

IEN – INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

ARTUR JOSÉ SILVA FERNANDES

**UTILIZAÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA PARA
DETERMINAÇÃO DE REPOSITÓRIO DE REJEITO
RADIOATIVO NO LEITO OCEÂNICO**

RIO DE JANEIRO

2014

ARTUR JOSÉ SILVA FERNANDES

UTILIZAÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA PARA DETERMINAÇÃO DE REPOSITÓRIO DE REJEITO RADIOATIVO NO LEITO OCEÂNICO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Tecnologia Nucleares (Mestrado Acadêmico)

Orientador: Prof. Dr. Ralph Santos-Oliveira

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Vivian Borges Martins

RIO DE JANEIRO

2014

UTILIZAÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA PARA DETERMINAÇÃO DE REPOSITÓRIO DE REJEITO RADIOATIVO NO LEITO OCEÂNICO

Artur José Silva Fernandes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR
DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUIS-
ITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E TEC-
NOLOGIA NUCLEARES.

Aprovada por:

Prof. Ralph Santos-Oliveira, Ph.D.

Prof.^a Vivian Borges Martins, Dr.^a

Prof.^a Maria Angélica Vergara Wasserman, Ph.D.

Prof. Pedro Luiz da Cruz Saldanha, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO de 2014

AGRADECIMENTOS

A todos os professores do curso de Mestrado do IEN por sua inestimável contribuição na formação da minha bagagem de conhecimento.

Aos meus orientadores, em especial, ao Professor Ralph Santos-Oliveira e às Professoras Vivian Borges Martins e Maria Angélica Vergara Wasserman, por sua paciente e generosa condução ao longo do caminho percorrido na construção deste trabalho que ora se apresenta.

E, por fim mas não menos, à querida Rosângela e aos amigos que direta ou indiretamente puderam contribuir ao longo de todas as fases que redundaram na finalização desta dissertação e realização proveitosa do curso realizado no IEN.

“Uma nova verdade científica triunfa não por que seus oponentes tornam-se convencidos e finalmente podem ver a luz, mas por que eventualmente morrem e nasce uma nova geração que é familiarizada com novos conceitos.”

Max Planck
Autobiographia Scientifica, Turin; 1956

RESUMO

O presente trabalho vem apresentar procedimento de revisão sistemática de literatura sobre conteúdo associado à gestão de rejeitos radioativos. Mais especificamente, nesta revisão será mostrada análise realizada sobre metodologias em uso ou propostas para deposição geológica de rejeitos de alto nível de radiação. Neste contexto avalia-se uma nova visão sistêmica sobre depósitos definitivos de resíduos radioativos, em particular daqueles classificados como destino de rejeitos de alta intensidade radioativa (rejeitos HLW e SNF) quando considerado seu confinamento por longos períodos de tempo (> 100 anos). Este estudo justifica-se face a proximidade da data em que países signatários da *Convenção de Londres* (1972) e do *Protocolo de Londres* (1996) realizarão novo estudo científico destinado à ratificação ou reforma/atualização dos princípios estabelecidos naquele acordo internacional sobre o alijamento de rejeitos e substâncias no mar, bem como sobre possíveis usos do meio ambiente marinho. Integra-se, também, a este trabalho a opinião convergente, na área nuclear, de pesquisadores sobre a destinação final de rejeitos e sobre apropriada indicação de sítios geológicos profundos para este fim. Por fim, serão abordadas algumas características normativas (aspectos legais) assim como aspectos comparativos entre procedimentos em vigor, adotados por alguns países, para a deposição segura de rejeitos radiativos de alta atividade radioativa. Este trabalho identificará a necessidade de se realizar a revisão técnico-acadêmica para efeito da conjunção das características favoráveis e vantajosas dos seguintes métodos já conhecidos no meio técnico ou já efetivamente postos em prática: deposição geológica em grande profundidade; deposição geológica em estratificação salina (evaporitos) e deposição sob o leito marinho (*sub-seabed*).

Palavras-chave: *ciclo combustível nuclear; rejeito radiativo; SNF; HLW; repositório; deposição geológica profunda; “sub-seabed”; leito marinho; estratificação salina.*

ABSTRACT

The present study was created to report a procedure of the systematic review of literature about content associated to the management of radioactive waste. In this context, this procedure will show an analysis performed by methodologies in use or proposed for application in the field of nuclear knowledge. Added to this is the proposition of new systemic image about definitive disposals of radioactive wastes, in particular of those classified as final destination of high intensity radioactive wastes (HLW and SNF) when considered their confinement for long periods of time (> 100 years). Now we take the chance to highlight the next date in which Contracting Parties of the London Convention (1972) and the London Protocol (1996) will hold new scientific study intended for ratification or reform/update some principles laid down in that international agreement about the dumping of wastes and other matter at sea, as well as about possible uses of the marine environment. Also added to this work, some opinions of many researchers in the nuclear area are converging to the final disposal of wastes and about the appropriate indications to deep geological sites for this purpose. It will be exposing some normative characteristics (legal aspects) as well as comparative aspects between procedures in use, adopted by some countries, for the safe disposal of high-level radioactive waste. A technical-academic review will be proposed to implement the conjunction of favorable and advantageous characteristics of the following methods already known in academic and technical communities or already effectively put into practice: depth geological disposal, geological disposal in saline stratification (evaporites) and deposition under the seabed (*sub-seabed*).

Keywords: *nuclear fuel cycle; radiative waste; SNF; HLW; deep geological disposal; sub-seabed; saline stratification.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- FIGURAS

Figura 01: Representação da exploração petrolífera denominada Pré-Sal	23
Figura 02: Países signatários da Convenção e Protocolo de Londres	25
Figura 03: Reprodução de trechos do Informe Circular IAEA	26
Figura 04: Definições regulamentares do ambiente marinho	28
Figura 05: Ciclo do combustível nuclear	29
Figura 06: Mapa indicativo dos locais onde ocorreram lançamentos de rejeito radioativo	49
Figura 07: Representação do procedimento <i>sub-seabed</i>	51
Figura 08: Divisões internas e placas tectônicas do globo terrestre	51
Figura 09: Placas tectônicas, Anel de Fogo e vulcões	54
Figura 10: Criação da zona de subducção	55
Figura 11: Representação de áreas restritas ao depósito de rejeitos nucleares	56
Figura 12: Ciclo de transporte do sistema <i>sub-seabed</i>	60
Figura 13: Curva típica de fluência do sal	69
Figura 14: WIPP – <i>Waste Isolation Pilot Plant</i> (USA)	72
Figura 15: Supercontinente Pangeia e suas linhas de ruptura	77
Figura 16: Separação dos continentes africano e sul-americano	77
Figura 17: Distribuição de maciços salinos nas margens continentais do Atlântico Sul	78
Figura 18: Procedimento <i>sub-seabed</i> atingindo a camada salina	79

- FOTOGRAFIAS

Fotografia 01:	Diversidade do uso e produção de rejeitos radioativos	32
Fotografias 02 a, b:	Armazenamento úmido ou molhado.	42
Fotografias 03 a, b:	Armazenamento a seco em contêineres	42
Fotografias 04 a, b:	ROV – <i>Remotly Operated Vehicle</i>	58
Fotografia 05:	Exemplo de contêiner metálico para contenção de SNF	65
Fotografias 06 a, b, c:	Armazenagem <i>onshore</i> em mina de sal (WIPP)	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de Rejeitos quanto a sua origem e seu estado físico	34
Tabela 2: Comparação qualitativa de meios geológicos como hospedeiro de repositório HLW	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALARA	As Low As Reasonably Achievable = <i>tão baixo quanto razoavelmente possível</i>
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	CANadian Deuterium Uranium reactor
CNUDM	<i>Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar</i>
CNEN	<i>Comissão Nacional de Energia Nuclear</i>
DAW	Dry Active Waste
DGD	Deep Geological Disposal
DRZ	Disturbed Rock Zone (<i>região adjacente de rocha fraturada e quebrada</i>)
EBS	Engineering Barrier System
ETN	<i>Eletrobrás Termo-Nuclear</i>
FEP	<i>Funcionalidade, Eventos e Processos</i>
FP	Fission Product
FR	Fast Reactor (operating at criticality)
GLOMARD	Global Marine Radioactivity Database
HLLW	High-Level radioactive Liquid Waste
HLW	High-Level Waste
HM	Heavy Metal
HWR	Heavy Water Reactor
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICGR	International Conference on Geological Repositories
ILW	Intermediate-Level Waste
IPEN	<i>Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares</i>
LC	London Convention
LILW	Low and Intermediate-Level Waste
LL	Long-Lived waste
LLFP	Long-Lived Fission Products
LWR	Light Water Reactor (either pressurised or boiling)
LWT	Legal-Weight Truck cask (NAC Intl.)
MA	Minor Actinides, principally neptunium, americium and curium
MARiS	MARine Information System
MOx	Mixed OXide fuel, uranium and plutonium unless otherwise specified
MPC	Multi-Purpose Canister
NAC	NAC International: <i>empresa americana</i>
NEA	Nuclear Energy Agency (OECD)
NPP	Nuclear Power Plant
NRC	Nuclear Regulatory Commission
OECD	Organisation for Economic Co-Operation and Development
P&T	Partitioning and Transmutation

PRIS	Power Reactor Information System
PUREX	Plutonium and Uranium Reduction and EXtraction of oxide fuel
PWR	Pressurised Water (cooled and moderated) Reactor
SL	Short-Lived waste
SNF	Spent Nuclear Fuel
TRU	TRansUranic elements, i.e. Pu, Np, Am and Cm
UFP	Used Fuel Pool
UOX	Uranium OXide fuel
US	USA
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant
ZEE	<i>Zona Econômica Exclusiva</i>
RWMC	Radioactive Waste Management Committee

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
1.1.1.	Estrutura da Dissertação	15
2.	METODOLOGIA	17
2.1.	REVISÃO SISTEMÁTICA	17
2.2.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	22
2.3.	PRÉ-SAL	22
2.4.	TRATADOS E LEIS	24
2.4.1.	Convenção de Londres	25
3.	GERÊNCIA DE REJEITOS RADIOATIVOS	29
3.1.	CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR	29
3.1.1.	Rejeito Radioativo	30
3.2.	ESTRATÉGIA GERAL DA GESTÃO	35
3.3.	PRINCÍPIOS DA GESTÃO DE RESÍDUOS	37
3.3.1.	Ciclo Combustível e Reprocessamento	37
3.3.2.	Ciclo de Combustível Fechado	38
3.4.	REJEITOS NUCLEARES: OPÇÕES HISTÓRICAS	39
3.4.1.	Migração de Resíduos Radioativos	40
4.	ARMAZENAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS	41
4.1.	DEPÓSITO DE SNF	41
4.2.	REPOSITÓRIO	43
4.3.	MEIOS GEOLÓGICOS PARA REPOSITÓRIO DE HLW/SNF	47
4.4.	REPOSITÓRIO EM MINAS DE SAL	46
4.4.1.	Predicados do Depósito de HLW/SNF em Minas de Sal	47
4.5.	DEPÓSITO NO OCEANO	48
4.5.1.	<i>Sub-seabed</i>	49
4.5.2.	Reversibilidade e a Recuperabilidade	52
5.	CIÊNCIA GEOLÓGICA	53
5.1.	PLACAS TECTÔNICAS	53
5.2.	SUBDUCÇÃO	55
5.2.1.	Depósito em zona de subdução	55
5.2.2.	Exploração Petrolífera <i>Offshore</i>	57
5.2.3.	Tecnologia	58
6.	SUB-SEABED EM ESTRATIFICAÇÃO SALINA	59
6.1.	LIMITAÇÕES	60
6.2.	SEGURANÇA BIOLÓGICA E AMBIENTAL	61
6.3.	RADIOTOXICIDADE	62
6.4.	REJEITOS HLW E SNF	63
6.5.	ENVELOPAMENTO DE REJEITOS	64
6.5.1.	Metais	64
6.5.2.	Vidro	66
6.5.3.	Cimentos	66
6.5.4.	Imobilização	67
6.5.5.	Meio Salino	68
6.5.5.1.	Condições Geoquímicas	71
6.5.5.2.	Armazenagem em Ambiente Salino	71
6.5.5.3.	Vantagens da Estratificação Salina	73
7.	PERFURAÇÃO EM SAL	75
7.1.	EXPERIÊNCIA BRASILEIRA	76
8.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	79
8.1.	CONCLUSÕES	80
8.2.	RECOMENDAÇÕES	81
9.	REFERÊNCIAS	84
10.	GLOSSÁRIO	90
11.	ANEXOS	92
11.1.	ANEXO A Trechos do <i>National Report of Brazil for The 4th Review Meeting</i>	93
11.2.	ANEXO B Parâmetros para implantação de repositórios	94
11.3.	ANEXO C Critérios básicos de proteção em profundidade e extensão	97
11.4.	ANEXO D Vantagens e desvantagens da camada salina	98
11.5.	ANEXO E Quadro comparativo de processos de deposição de rejeitos	100

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a publicação da *International Atomic Energy Agency* – IAEA que resume metadados sobre reatores nucleares de potência no mundo (*Reference Data Series No. 2* – IAEA)^[34, 35], em sua edição de 2014, a tecnologia nuclear respondeu, ao longo do ano de 2013, por 19,1% do consumo mundial de eletricidade (demonstrando um incremento percentual quando comparado com o ano anterior cujo valor foi de 18,37%) (IAEA-RDS-1/34 e 33)^[34, 33]. Ainda de acordo com a IAEA, essa participação de origem nuclear permanecerá e representará importante conjunto energético para uso da humanidade, sendo prevista para 2020 uma participação entre 12,4 e 13,9% do volume total de energia elétrica produzida e consumida no planeta. Previsões para os anos de 2030 e 2050 indicam intervalos percentuais de 9,9 a 13,5% e 4,8 a 12,1%, respectivamente. (IAEA-RDS-1/33, 2013)^[33].

É importante destacar que a tecnologia nuclear oferece oportunidade para a economia de recursos naturais e, em larga escala, a diminuição do atual regime de emissão de CO₂ no planeta, vindo corroborar as expectativas do Tratado de Quioto, de 1997. Em adição, o desenvolvimento da segurança energética (uso sob estrito controle), da segurança de procedimentos (manejo normatizado) e a independência deste ramo energético (ausência de exigências concomitantes de outros recursos primários adicionais) serão certamente estímulos continuados para uma maior e constante expansão da tecnologia nuclear (IAEA, 1995a)^[38]. Não obstante, constitui tecnologia que rapidamente põe-se disponível, com oferta suficiente para substituir, em parcela significativa, as atuais fontes energéticas dependentes dos combustíveis fósseis ou mesmo da biomassa.

Quando se considera o declínio de 4,3% acontecido na geração mundial de energia de origem nuclear em função do ocorrido em Fukushima, quando Japão e Alemanha

reduziram, respectivamente, 44,3% e 23,2% de sua geração nuclear de eletricidade, fica evidente que o uso desta energia nuclear, em decorrência desta condição hodierna, encontra-se em ligeiro processo de diminuição ou estabilização em países desenvolvidos. Entretanto, no período posterior ao citado acidente, pode se verificar um discreto aumento de sua utilização em economias em desenvolvimento, como a China e a Índia. (IAEA, 1995a)^[38]

Conquanto seja evidente que a aplicação da atual tecnologia nuclear signifique atender a uma necessidade energética específica, um maior desenvolvimento dessa tecnologia dependerá intrinsecamente de se melhorar os critérios da segurança nuclear, promovendo a sustentabilidade do ciclo produtivo e a diminuição da resistência à proliferação nuclear, assim como compatibilizar, de modo competitivo, os custos de produção com o mercado de energia.

Em relação à produção de energia, utiliza-se de forma globalizada a energia elétrica oriunda da transdução de outros tipos de energia. Além da energia potencial das águas (geração hidrelétrica) tem-se usado, ao longo dos tempos, a energia do calor para produção de energia elétrica (geração termelétrica), condição que tem por fonte primária certos derivados do petróleo (em especial o diesel), alguns produtos orgânicos obtidos por cultivo agrícola e seus resíduos (p. ex.: cana-de-açúcar, palha de arroz, restos orgânicos, etc.), e por último a de origem nuclear.

Mister se faz ressaltar que em todos os tipos de geração de energia elétrica supra citados ocorrem, sem exceção e nos mais diversos aspectos, a produção de condições desfavoráveis ao meio-ambiente. Ou, ainda, a produção de resíduos inservíveis (por condição natural ou por desconhecimento tecnológico para seu aproveitamento). Dentre esses resíduos destacam-se as emissões de carbono, em particular aquelas produzidas pelos derivados do petróleo. Ressalta-se, ainda, que o acúmulo de gases oriundos desta forma de geração de energia pode provocar a modificação da camada atmosférica do planeta e, conseqüentemente, da vida sobre a superfície do mesmo (Protocolo do Quioto – *United Nations Framework Convention on Climate Change*, 1997).

Como parte necessária do grande negócio global de comércio de matéria inservível, resultante dos processos de geração de energia, verifica-se o desenvolvimento de novas tecnologias para a redução dos níveis e/ou acondicionamento apropriado desses rejeitos.

Há toda uma preocupação quanto à preservação do estado atual das condições de vida, entendendo-se como a manutenção ou o acondicionamento (para a melhor forma) da biosfera. (IAEA, 1995a)^[38]

Um aspecto importante a destacar na produção energética de natureza nuclear, está fundamentado no controle pleno de todo o ciclo combustível nuclear, em particular sobre a possibilidade de limitar e restringir eficazmente a formação de rejeitos nucleares. Atualmente o foco de discussão científica concentra-se na utilização da tecnologia de reatores rápidos e de reprocessamento como alternativas para redução do volume de resíduos nucleares quando não permitido seu aproveitamento. A tecnologia de reatores rápidos tem o potencial de limitar tanto o volume como ampliar a vida útil do combustível, minimizando os rejeitos nucleares que não se prestam ao reaproveitamento no ciclo combustível, e assim melhorar a sustentabilidade do processo. (IAEA, 1995a)^[38]

Restrições e formas de atuação no tratamento de resíduos nucleares, não importando se em forma sólida, líquida ou gasosa, têm sido estabelecidas para que, de uma forma tecnológica e economicamente viável, seja possível a eliminação destes rejeitos, bem como a minimização e a mitigação dos efeitos deletérios ao meio-ambiente. (IAEA, 1995a)^[38]

Em meio a toda essa discussão, perdura ao longo dos anos uma campanha contrária ao uso da energia nuclear. Seja por desconhecimento de grande parte da população dos procedimentos e propósitos do uso deste tipo de energia, seja pela excessiva propaganda negativa atribuída aos acidentes nucleares, percebe-se que países vem cedendo à pressão popular e passam atualmente a apresentar propostas de redução, ou mesmo extinção, de seus programas institucionais na área nuclear para geração elétrica. (IAEA, 1995a)^[38]

Deve-se, entretanto, novamente lembrar e ressaltar que o método utilizado na indústria nuclear, nos moldes e regras atuais, é destacadamente o único que apresenta total controle desde seu início até o fim do processo (tanto dos materiais como de procedimentos), estabelecidos por meio de procedimentos rigorosos e fiscalização contínua, controlando todo o ciclo logístico, desde a extração da matéria-prima até o armazenamento dos rejeitos. Tudo sendo realizado com o constante cuidado no tocante a preservação do ecossistema circundante e a biosfera global. (IAEA, 1995a)^[38]

O objetivo principal deste trabalho é retomar o assunto do destino de materiais inservíveis ao ciclo nuclear e incluí-lo em discussões técnicas de modo a definir o melhor

local e a melhor maneira de armazenamento de longo prazo para os produtos finais dos procedimentos realizados em usinas nucleares (produção de energia elétrica), em procedimentos médicos (tratamentos e exames nucleares) e na indústria. Para efeito do exposto, em particular são apresentadas renovadas proposições para o depósito final de rejeitos com alta intensidade radioativa.

Nesse contexto, e com a proximidade da revisão dos parâmetros restritivos para a utilização dos sítios oceânicos, estabelecida pela Convenção de Londres e prevista para 2018, esse estudo se torna indispensável. Assim, utilizando-se da Revisão Sistemática, esse estudo foi elaborado como instrumento da avaliação das possibilidades, em torno desta agenda próxima.

Diante da iminência da data para a revisão deste acordo internacional, torna-se necessário suscitar um momento revisional em função dos parâmetros restritivos em vigor para utilização dos sítios oceânicos, valendo-se das condições estabelecidas pela própria Convenção de Londres e adaptações subsequentes. Esta convenção foi um marco importante no trato de resíduos das mais diversas naturezas e da preservação das condições marinhas do planeta.

1.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O método sugerido neste trabalho consiste na reunião das características e vantagens de uma série de procedimentos, já conhecidos no meio técnico-acadêmico ou efetivamente postos em prática, destinados à gerência de rejeitos radioativos possuidores de alto nível de radiação ou aqueles com meia-vida longa. São eles:

- deposição geológica em grande profundidade (ou poço profundo)
- deposição geológica em estratificação salina (evaporitos)
- deposição sob o leito marinho (*sub-seabed*)

Esta revisão igualmente fundamenta-se na utilização conjunta de novos conhecimentos técnicos adquiridos durante a fase de prospecção de petróleo em ambiente *offshore* (mar aberto). E, em particular, quando da constatação e identificação, neste ambiente, de estruturas salinas de extensas dimensões (por exemplo, a bacia de Santos apresenta-se com

cerca de 800 km de extensão por 200 km de largura). São estruturas localizadas a grandes profundidades sob o leito marinho, com camadas salinas atingindo espessuras de até dois mil metros e por sobre reservatórios de petróleo (condição por qual é conhecida como camada pré-sal). Esta prática em alto-mar (*offshore*) deu origem ao programa de exploração de petróleo e gás, desenvolvido na plataforma continental e bacia profunda da costa brasileira (região ZEE - zona econômica exclusiva) e denominado programa “Pré-Sal”.

A tecnologia empregada neste ramo *offshore* permite, com custos aceitáveis e avançada tecnologia, a realização de perfuração de poços direcionais e com diâmetros condizentes (através de procedimentos alargadores) com a geometria das cápsulas ou invólucros utilizados para o transporte e guarda de rejeitos radioativos. Esta tecnologia também faz uso de mecanismos robóticos e permite a avaliação em tempo real de características físicas do solo durante a perfuração, numa atividade que pode ser realizada tanto a partir de navios específicos (ao nível da superfície do oceano) como diretamente, em profundidade, sobre o próprio piso marinho (exploração automatizada em uso também em prospecções marinhas de minérios).

Deve ser salientado que o propósito do programa “Pré-Sal” é a exploração única dos combustíveis fósseis (petróleo e gás natural) sem atentar para as reservas salinas destas estratificações sedimentares (em grande parte formada por evaporitos). Estas reservas estruturais formadas por camadas de sal ocupam, segundo os levantamentos realizados, área maior que aquelas ocupadas pelo petróleo (podem ser encontradas informações sobre prospecções geotécnicas que resultaram em poços “vazios” ao longo das áreas delimitadas para prospecção de petróleo e gás). Tais condições permitem a ideia do aproveitamento destas áreas com o propósito de armazenamento de rejeitos, em especial dos rejeitos de alta atividade radioativa (HLW) e combustível nuclear usado (SNF).

1.1.1 Estrutura da Dissertação

Considerando o propósito exposto no item anterior, este trabalho encontra-se estruturado nas seguintes seções:

Na Seção 2 são apresentados os critérios utilizados para realização da Revisão Sistemática sobre o assunto objeto desta dissertação

Nas Seções 3 e 4 tem-se uma fundamentação teórica sobre o Gerenciamento e Armazenamento de Rejeitos Nucleares. Ainda nestas seções, são apresentados os fundamentos associados ao caráter geológico do procedimento conhecido como *Sub-seabed*.

Na Seção 5 é feita a descrição da aplicação técnica proposta neste trabalho, ressaltando-se os principais aspectos tecnológicos de sua utilização.

Na Seção 6 são discutidas as características específicas do procedimento de deposição de rejeitos nucleares em estratificação salina. Em sequência, são apresentadas considerações sobre o envelopamento de resíduos a serem adotados para a natureza deste tipo de resíduos.

Na Seção 7 é apresentada a experiência brasileira, desenvolvida pela Petrobrás, em perfurações de sondagem petrolífera em grandes profundidades e que ultrapassam camadas salinas de espessuras significativas.

Finalmente, na Seção 8, são expostas as conclusões obtidas com o estudo realizado, além de algumas sugestões e recomendações para o desenvolvimento de futuros estudos.

O trabalho também possui agregado, em sua parte final, cinco anexos com características e conteúdo específicos a serem utilizados ao longo do trabalho e no método proposto.

2 METODOLOGIA

Para a realização de um trabalho sobre um tema ou assunto escolhido verifica-se a necessidade do conhecimento prévio de outros trabalhos com o mesmo fulcro ou quanto à inexistência do caráter de ineditismo do mesmo.

Desta forma, a Revisão Sistemática de literatura proporciona a condição de conhecimento do que já foi produzido sobre a temática em pauta, sobre a possibilidade de novos pontos de vista sobre o assunto e, até mesmo, qualificar a natureza do foi pesquisado e será tornado objeto deste trabalho. Deve ser também lembrado que a originalidade, os critérios de relevância (importância científica) e a viabilidade são aspectos na realização de qualquer projeto desta natureza. Sabe-se que uma dissertação de mestrado deve estar amparada e fundamentada por fontes de informações fidedignas e acessíveis. (CIRIBELLI, 2000)^[10]

2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA

A Revisão Sistemática de literatura é, assim, um processo organizado, no qual uma grande quantidade de resultados de pesquisas clínicas e estudos primários que investigam uma mesma questão são selecionados e revisados, para posterior sumarização (MULROW, 1994; UNIFESP, 2004)^[77, 102]. Trata-se, assim, de um tipo de estudo secundário que utiliza métodos previamente definidos e explícitos para identificar, selecionar e avaliar criticamente pesquisas relevantes. Dessa forma, facilita a elaboração de diretrizes, além de contribuir como suporte teórico-prático para o planejamento de pesquisas. Não obstante, seu

grande poder de síntese pode ser expandido como metodologia, principal ou auxiliar, em muitos processos de tomadas de decisão. (SANTOS-OLIVEIRA, 2006)^[92, 93]

Diversos autores (GREENHALGH, 1997a,b; NAYLOR, 1997; BEYEA & NICOLL, 1998)^[21, 22, 4] procuram diferenciar os termos: Revisão de Literatura, Revisão Sistemática e Meta-análise, que são constantemente confundidos. De acordo com esses autores, a Revisão de Literatura é uma apresentação de dados novos ou resultados de pesquisa, de forma não sistematizada, destacando-se somente as informações relevantes ou que corroborem as teorias do autor sem uma análise criteriosa ou crítica desses resultados. Na Revisão Sistemática, os estudos são analisados em relação aos seus objetivos, materiais e métodos, permitindo ao leitor extrair conclusões do conhecimento já existente sobre determinado tema, sempre de forma criteriosa, minuciosa e coerente, por meio de dados estatisticamente concernentes. A meta-análise, por sua vez, amplia o caráter crítico e as indagações por meio de uma análise estatística secundária dos resultados de estudos similares. Deve-se ressaltar, entretanto, que nem sempre é possível realizar uma meta-análise, devido à escassez de pesquisas em determinadas áreas do conhecimento.

A Revisão Sistemática é um tipo de estudo secundário (baseado em estudos primários) que utiliza métodos previamente definidos e explícitos para identificar, selecionar e avaliar criticamente pesquisas relevantes, facilitando, dessa forma, a elaboração de diretrizes. Também, as revisões sistemáticas contribuem como suporte teórico-prático, por intermédio de extensa pesquisa bibliográfica classificatória, para o planejamento de pesquisas. A metodologia da Revisão Sistemática, pode ter seu uso expandido como metodologia auxiliar em muitos processos de tomadas de decisão. (SANTOS-OLIVEIRA, 2006)^[92, 93]

De acordo com MULROW (1994, 1997)^[77, 78], as Revisões Sistemáticas determinam quando os achados científicos são consistentes e podem, portanto, ser aplicados a uma população. Para o autor, a Revisão Sistemática de literatura é uma atividade científica baseada em vários parâmetros comprovadamente corretos.

O primeiro desses parâmetros está relacionado à quantidade de informação existente (SANTOS-OLIVEIRA, 2006)^[92, 93]. Estima-se, por exemplo, que mais de dois milhões de artigos são publicados anualmente na literatura, em mais de vinte mil jornais diferentes (LEDERBERGER & ZUCKERMAN)^[69]. Adicionalmente, CHAND, ROSENFELDT & PEPE (2008)^[8] informam que somente na “Sociedade de Cardiologia da Austrália e Nova Zelândia”, mais de dois mil artigos e resumos são apresentados, corroborando a imensa

massa de material crítico a ser analisada e avaliada para elaboração de uma Revisão Sistemática.

Segundo MULROW (1994)^[77], cerca de 4.400 páginas de material científico foram publicadas com 1.100 artigos no ano de 1992, juntando-se apenas o *British Medical Journal* (BMJ) e o *New England Journal of Medicine* (NEJM). Isto serve como ilustração da quantidade de material exposta ao público. A maneira mais usual para sumariar essas informações é por meio da Revisão Sistemática, uma vez que esta utiliza critérios de separação, seleção e análise, apresentando objetividade e eficiência na eliminação de material insignificante, inexpressivo ou redundante.

Um aspecto, que também deve ser lembrado, é o idioma do material. Muitas vezes, devido à localização dos centros de estudo ou dos pesquisadores, muitos trabalhos são publicados em idiomas pouco usuais, como o russo e o chinês, fato que dificulta a sua inclusão em um estudo de Revisão Sistemática cujo autor não domine esses idiomas, os quais, muitas vezes, são determinantes para a análise de um dado desfecho.

O segundo aspecto relevante desta questão é que os tomadores de decisões, principalmente em saúde e meio ambiente, precisam integrar criticamente toda a informação disponível, antes de estabelecerem um veredicto final. Sob esse aspecto, a Revisão Sistemática funciona como um grande integralizador de conhecimento, além de uma excelente interface entre as informações e os tomadores de decisão. (MULROW, 1994)^[77]

Como terceira premissa, tem-se que a Revisão Sistemática é uma eficiente técnica científica (metodologia de análise). Embora algumas vezes consuma muito tempo e esforço, ela é frequentemente mais rápida e menos custosa que iniciar um novo estudo ou reanalisá-lo. Deve-se lembrar que atualizações contínuas da revisão de literatura podem diminuir o tempo entre uma nova descoberta e a tomada de decisão. (MULROW, 1994)^[77]

Um quarto aspecto abordado é que as Revisões Sistemáticas podem providenciar um contexto interpretativo, indisponível isoladamente em qualquer estudo. Isto se deve ao fato de que estudos com as mesmas questões elegem critérios diferentes, modificando, desta forma, os resultados finais e possibilitando divergência de interpretação. Assim, as Revisões Sistemáticas são capazes de permitir um aumento na precisão das estimativas do risco ou do tamanho do efeito, ou seja, elas são capazes de definir, com maior clareza e concisão, se o produto (o alvo da pesquisa) sob análise, realmente apresenta efeito e se apresentar, se há

benefícios comprovados (MULROW, 1994)^[77]. Em se tratando de rejeitos radioativos, a determinação precisa de risco é fundamental.

Finalmente, tem-se a impessoalidade da Revisão Sistemática. Sabe-se que muitas críticas são feitas às revisões bibliográficas, devido ao caráter idiossincrático e à impressão pessoal do revisor. Tal fato não se aplica às Revisões Sistemáticas, que apresentam acurácia, referindo-se à respeitabilidade da avaliação de uma estimativa, ou seja, uma medida da correlação entre o valor estimado e os valores das fontes de informação, permitindo estimar a relação do "valor real" do parâmetro, impedindo, dessa forma, um possível caráter subjetivo à revisão. (BARBETTA; REIS & BORNIA, 2004)^[3]

Uma Revisão Sistemática segue padrões rigorosos de análise, que devem incluir: a) métodos que assegurem o alcance dos objetivos, de forma a não haver dispersão do estudo devido à grande quantidade de material que pode vir a ser trabalhada; b) análises minuciosas e com a colaboração de um revisor, sempre que possível, para que os erros ou más interpretações sejam minimizados ao máximo; c) exame da teoria adotada e estabelecimento de relações com os resultados, métodos, sujeitos e variáveis do estudo, no intuito de fornecer informações sobre os estudos revisados sem focalizar somente resultados, mas sim para propiciar o maior número de informações possíveis. (GANONG apud MOI, 2004 2)^[20]

Segundo MOI (2004)^[76], a Revisão Sistemática envolve seis passos primordiais:

(a) Selecionar hipóteses ou questões para a revisão:

É o ponto de partida da Revisão Sistemática, ou seja, o questionamento ou ponto de interrogação que necessite ser explicado ou que tem papel fundamental no desfecho de um estudo ou indicação de uso.

Nesse caso: “Os repositórios *sub-seabed* em ambiente marinho são seguros?”

(b) Selecionar trabalhos que comporão a amostra da análise:

Neste ponto, cabe ressaltar que a amostra é um indicador crítico de como determinadas conclusões podem ser generalizadas e que confiabilidade ela produz, uma vez que a omissão de procedimentos pode ser a maior ameaça para a validade e a idoneidade da Revisão Sistemática, ou seja, é na qualidade do material pesquisado que reside a qualidade da revisão, levando-se em conta o respeito às condutas que regem uma Revisão Sistemática. Sob esta ótica, algumas perguntas devem ser respondidas em um estudo de Revisão Siste-

mática para definir a composição da amostra, como por exemplo: O estudo revisado representa o universo de estudos no assunto? Que critério de inclusão o pesquisador aplica? Quais as bases ou critérios para a exclusão de estudos?

Não se deve pensar que o revisor conseguirá reunir tudo o que foi publicado sobre um determinado assunto, até pelas dificuldades discutidas anteriormente, mas sim se o que foi obtido é realmente significativo ou representativo.

(c) Representar as características dos trabalhos revisados:

Neste caso, fica a encargo do autor sumariar os dados de modo a permitir ao leitor a identificação das características da pesquisa, por meio de construções de gráficos, tabelas ou outro recurso que possibilite apresentar a quantidade de dados, facilitando a avaliação sistemática, a discussão de achados e as possíveis conclusões.

(d) Analisar os dados pesquisados a partir dos critérios de inclusão:

Esta etapa consiste na matriz da Revisão Sistemática e deve ser realizada de forma criteriosa e objetiva

(e) Interpretar os resultados, discutindo-os, estabelecendo relações com outras teorias e dando sugestões para futuras pesquisas:

Neste caso a interpretação e a análise devem ser realizadas com o auxílio de uma terceira pessoa, que realize uma interpretação não subjetiva dos fatos.

(f) Comunicar e publicar a revisão, tornando acessíveis os procedimentos adotados, fornecendo dados de importância para um determinado grupo ou de âmbito nacional, além de possibilitar, também, a indicação de ameaças que comprometam a validade da revisão:

Fundamental para a disseminação das evidências norteadoras das condutas. Uma vez realizada a Revisão Sistemática, deve-se comparar os resultados obtidos com um padrão previamente definido, para comprovar a eficácia da revisão ou sua veracidade, ou ainda para definir a qualidade dos resultados obtidos.

Neste trabalho, o objeto é a viabilidade do procedimento *sub-seabed* em ambiente marinho como repositórios de rejeitos radioativos de alta energia.

2.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Com o advento da exploração da energia do átomo, viu-se que todos os procedimentos do chamado ciclo nuclear têm uma exigência: controle total dos processos envolvidos no ciclo. Em todas as instâncias deste ciclo há a necessidade de um acompanhamento severo do manejo, utilização e descarte de substâncias radioativas.

Estando a humanidade cada vez mais conscientizada quanto ao meio ambiente, passou-se a considerar a problemática da guarda dos rejeitos nucleares que possuem efeitos ou atividade radioativos no decorrer de grande intervalo de tempo.

Utilizando-se do método dedutivo, partindo de princípios universais, cientificamente compreendidos e aplicados na prática (procedimentos em uso na área nuclear), este trabalho suscitará a discussão sobre soluções viáveis sobre a gestão do rejeito de elevada radioatividade.

É certo que, neste momento, procura-se passar da condição de solução provisória ou teórica por tentativa (modelo hipotético-dedutivo) para um direcionamento mais objetivo frente a novos conhecimentos e avanços científicos e ao entendimento de erros cometidos e contradições acontecidas ao longo dos tempos.

2.3 PRÉ-SAL

O termo “Pré-Sal” refere-se a um conjunto de rochas estratificadas localizadas nas porções marinhas de grande parte do litoral brasileiro, com potencial para a geração e acúmulo de petróleo e gás. Convencionou-se chamar este conjunto rochoso de Pré-Sal porque forma uma estrutura física de rochas que se estende por baixo de uma extensa camada de sal, que em certas áreas da costa pode atingir espessuras de até 2.000 metros. O termo “pré” é utilizado porque, ao longo da linha de tempo geológico, estas rochas reservatórios de óleo e gás foram depositadas antes da formação da camada de sal. A profundidade total de localização dessas rochas, que é a distância entre a superfície do mar e os reservatórios de petróleo existentes em seu interior, abaixo da camada de sal, pode chegar a mais de sete mil metros (Figura 01).

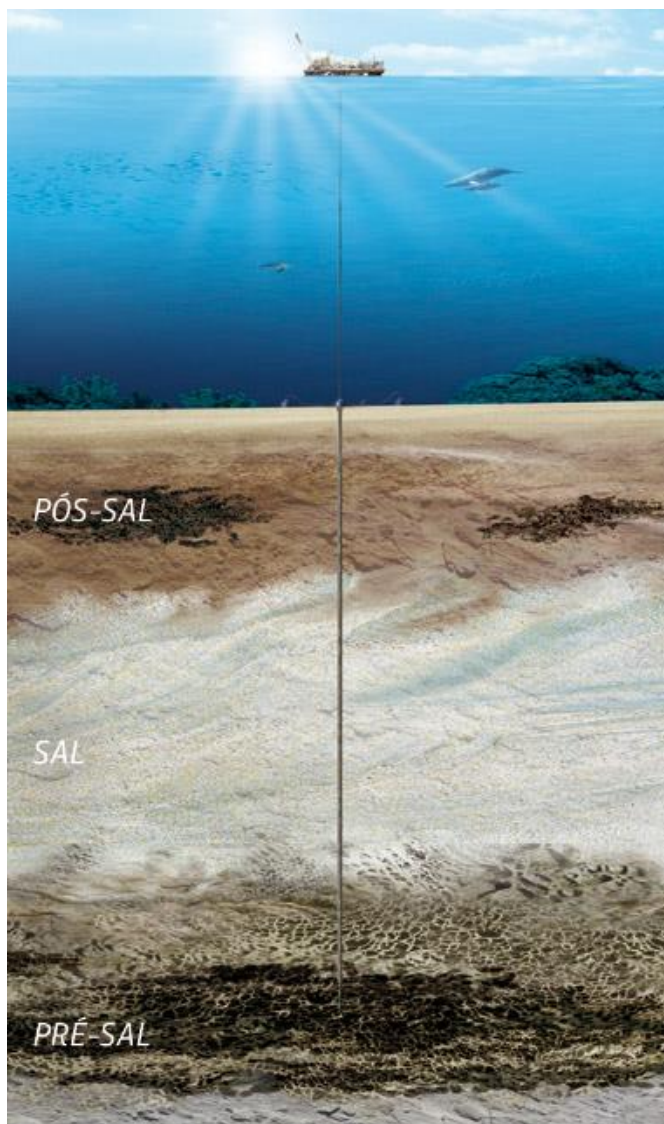


Figura 01: Representação da exploração petrolífera denominada Pré-Sal

Fonte: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal> (Petrobrás, 2009)^[87, 88]

A Petrobrás, empresa nacional atuante neste projeto exploratório, direciona grande parte de seus esforços para a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico com o objetivo de alcançar e retirar as diversas classes de combustíveis fósseis existentes nesta situação. O programa Pré-Sal é uma nova fronteira exploratória que, desenvolvida oficialmente sob a designação formal de Programa Tecnológico para o Desenvolvimento da Produção dos Reservatórios Pré-sal (PROSAL), é realizada pelo seu Centro de Pesquisas (CENPES) localizado na capital fluminense. Este programa também aproveita inovações desenvolvidas por outro importante programa, o PROCAP (Programa de Capacitação Tecnológica em Águas Profundas), que viabilizou a produção em largas lâminas de águas marinhas.

Além de desenvolver tecnologia própria, esta empresa trabalha em sintonia com uma rede de universidades que contribuem para a formação de um sólido portfólio tecnológico nacional. (PETROBRAS, 2009)^[87, 88]

2.4 TRATADOS E LEIS

Com a criação da Organização das Nações Unidas (ONU) e outros entes de natureza jurídica no plano transnacional, passamos a ver o conceito de território nacional como um instituto de Direito Público Internacional e não meramente de Direito interno. Assim, fica evidente que somente passa a fazer sentido lógico um raciocínio de que a definição de território nacional (espaço aéreo + solo + plataforma continental), se desenvolve tanto no âmbito das relações entre Estados soberanos quanto na esfera de aplicação de suas respectivas ordens jurídicas.

Segundo esta ótica, o mar territorial é um bem da União (considerado ente político interno e parcial) no que aplicado à constituição administrativa interna. Mas este mesmo mar territorial é um elemento do território nacional quando se raciocina em termos da ordem internacional. Desse ponto de vista, o mar territorial é um elemento consistente com a soberania nacional de cada país (Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar – CNUDM).

Entretanto, existem áreas oceânicas que não se enquadram na condição de mares territoriais e, portanto, ficam condicionados legalmente a regimentos jurídicos internacionais. Quando não se consideram os mares territoriais e as zonas econômicas exclusivas (ZEE) dos países, vê-se que “alto-mar” é o conjunto das zonas marítimas não submetidas à jurisdição de qualquer Estado soberano. Em termos do Direito do Mar, qualquer reivindicação de soberania sobre tais zonas deve ser considerada ilegítima.

A soberania nacional e outras questões de Direito Internacional são agora invocadas em relação a conceitos básicos do Direito do Mar, estabelecido por consenso entre países, e a aspectos técnicos atinentes e decorrentes desta norma jurídica internacional. A exemplo desta condição, tem-se a “Convenção para a Prevenção da Poluição Marinha por Operações de Alijamento de Rejeitos e Outros Produtos” atualmente em vigor.

2.4.1 CONVENÇÃO DE LONDRES

A “Convenção para a Prevenção da Poluição Marinha por Operações de Alijamento de Rejeitos e Outros Produtos” foi adotada após uma Conferência Intergovernamental, realizada em Londres, no ano de 1972, assumindo a denominação resumida de “Convenção de Londres” (LC)¹. Esta convenção alinhavou um ordenamento dos princípios de proteção ao meio ambiente e determinou o respeito ao enunciado prévio da Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente Humano (*United Nations Conference on the Human Environment*), realizada no mesmo ano em Estocolmo (Suécia).

A atuação da *International Atomic Energy Agency* – IAEA, criada em 1957, se manifestou desde os primeiros dias da Convenção de Londres, quando as partes signatárias convencionaram que esta agência seria a organização com autoridade internacional competente em matérias relacionadas com a descarga de rejeitos radioativos em ambiente marinho.

Esta convenção, embora aceita entre os 87 países signatários desde 1975, foi modernizada em 1996 pelo acréscimo de um protocolo² – Protocolo de Londres – que, entretanto, somente assumiu força legal a partir de 24 de março de 2006 e mesmo assim assinado por apenas 47 países participantes. (IMO, 1990)^[67]

SIGNATÁRIOS DA CONVENÇÃO E PROTOCOLO DE LONDRES

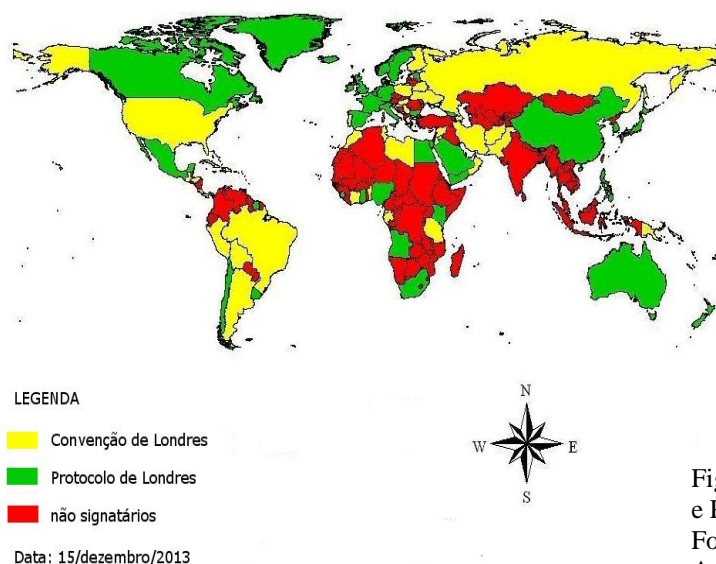


Figura 02: Países signatários da Convenção e Protocolo de Londres

Fonte: <http://www.imo.org> (Adaptado pelo Autor)

¹ Texto integral da convenção: <http://www.imo.org/OurWork/Environment/LCLP/Documents/LC1972.pdf>

² Texto integral do protocolo: <http://www.imo.org/OurWork/Environment/LCLP/Documents/PROTOCOLAmended2006.pdf>

Entre as várias atribuições que a IAEA possui, coube a ela desenvolver, para a devida compreensão da "Convenção de Londres" (IAEA INFCIRC/205/Add. 1, 1975)^[31], a definição formal de "resíduos radioativos ou material radioativos impróprios para despejo no mar". O documento com esta definição é parcialmente reproduzido a seguir em seu formato original (Figura 3):

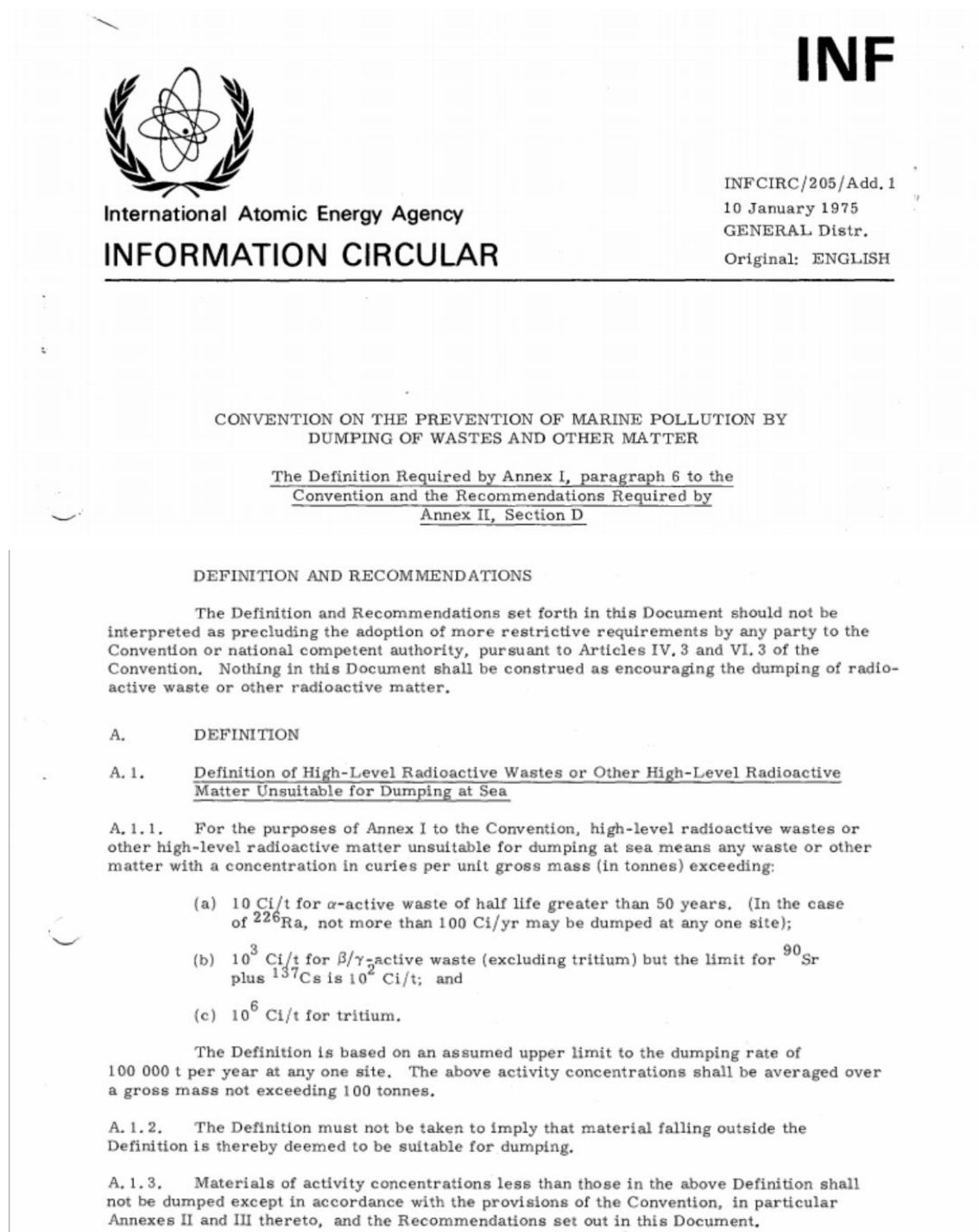


Figura 03: Trechos do Informe Circular IAEA nº 205Add.1, de 10 de janeiro de 1975
Fonte: IAEA (seleção feita pelo Autor)

Na Convenção de Londres – LC a palavra "*dumping*" (alijamento, descarga, despejo) é definida no artigo III (LC) da seguinte forma:

(a) *Por "alijamento" se entende:*

- (i) *todo despejo deliberado, no mar, de resíduos ou de outras substâncias efetuado por embarcações, aeronaves, plataformas ou outras construções no mar.*
- (ii) *todo despejo deliberado, no mar, de embarcações, aeronaves, plataformas ou outras construções no mar.*

A mesma agência recomendou a base técnica, aplicável pelas autoridades nacionais, para emissão de licenças especiais para as substâncias radioativas que poderiam ser lançadas ao mar, em particular para resíduos radioativos de níveis de radiação baixo e intermediário, devidamente acondicionados e em quantidades inofensivas. (IAEA INFCIRC/205/Add. 1, 1975)^[31]

Em 1985, os países signatários da Convenção de Londres criaram uma moratória voluntária relativa à eliminação de rejeitos radioativos de baixo nível no mar e, posteriormente, em 1993, uma proibição total sobre a eliminação de resíduos radioativos nas águas oceânicas.

Desde 1989, a pedido dos signatários, a IAEA desenvolveu e mantém bases globais de dados sobre resíduos radioativos já lançados ao mar, bem como deposições de material radioativo acontecidas por acidentes e perdas no mar. Trata-se do *Marine Information System* (MARiS)³ – que é suportado pelas informações da base de dados do projeto *Global Marine Radioactivity Database* (GLOMARD).

O objetivo desta base de dados é servir como suporte de avaliação quanto ao impacto radiológico produzido por lançamentos acidentais ou propositalis sobre o ambiente marinho. O conjunto de dados da Seção de Rejeitos e Segurança Ambiental da IAEA serve para atendimento dos critérios restritivos da Convenção de Londres e acompanha a sua evolução.

O Estado brasileiro, atendendo aos compromissos assumidos como signatário da Convenção e do Protocolo de Londres, promulgou, através do Decreto nº 6.511, em 17 de

³ <http://maris.iaea.org>

julho de 2008, as emendas aos Anexos I, II e III da Convenção de Londres (1972). (BRASIL-LEXML, 2008)

Em particular, no Anexo I, item 12, reescrito em 1993, pode ser destacada a condição na qual fica estabelecido o interregno de 25 anos para o reestudo científico do problema do alijamento de substâncias radioativas no mar.

O item é reproduzido, *in verbis*, na sequência:

Annex I, item 12 (as amended in 1993)

12. Within 25 years from the date on which the amendment to paragraph 6 enters into force and at each 25 year interval thereafter, the Contracting parties shall complete a scientific study relating to all radioactive wastes and other radioactive matter other than high level wastes or matter, taking into account such other factors as the Contracting parties consider appropriate, and shall review the position of such substances on Annex I in accordance with the procedures set forth in Article XV.

Um outro organismo internacional responde pela regulamentação dos atos definidos pelo conjunto de países que são signatários da Convenção de Londres. Trata-se da Autoridade Internacional dos Fundos Marinhos (ISA – *International Seabed Authority*), sediada na Jamaica, e tem por atribuição a definição e autorização da pesquisa e exploração dos solos marinhos internacionais.

Na figura abaixo encontra-se a definição gráfica da nomenclatura de alguns termos associados ao Direito do Mar, estabelecidos por esta autoridade internacional em relação ao ambiente marinho:

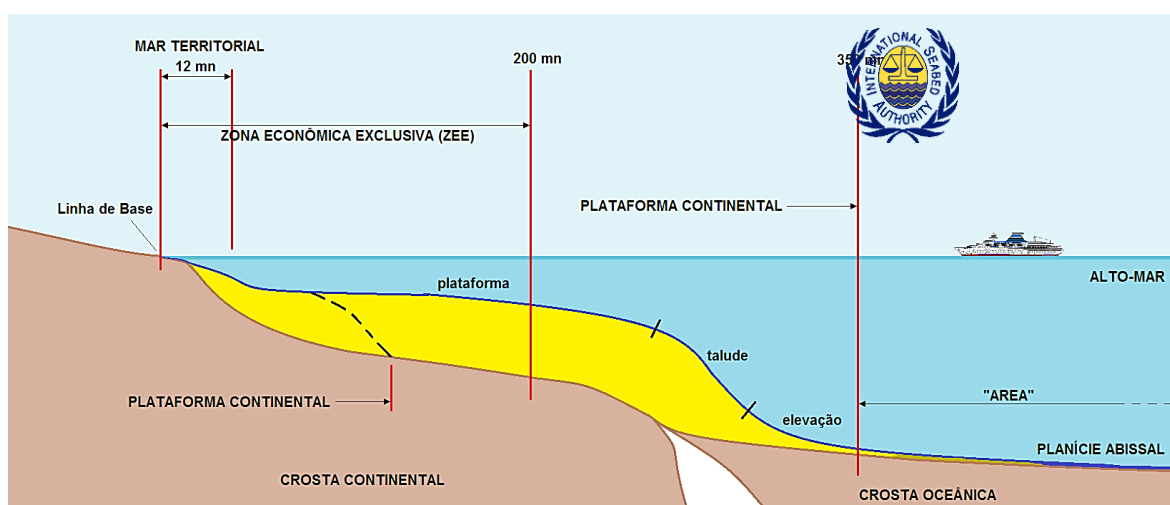


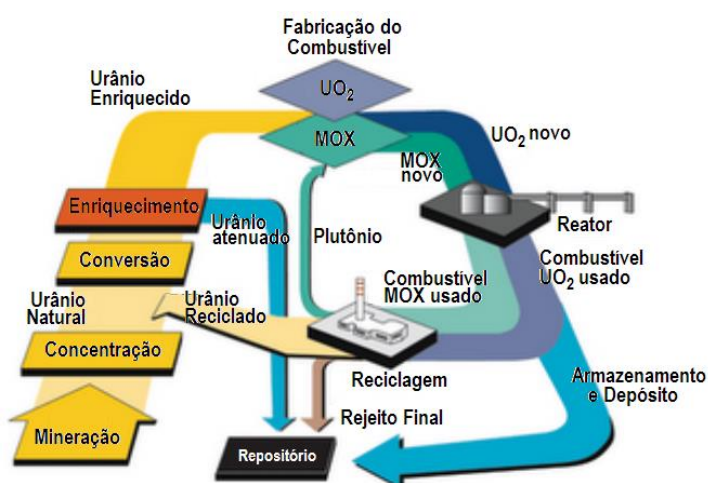
Figura 04: Definições regulamentares do ambiente marinho (ISA)
Fonte: Autor

3 GERÊNCIA DE REJEITOS NUCLEARES

A Gerência de Rejeitos Nucleares é definida como o conjunto de atividades técnicas e administrativas envolvidas na coleta, segregação, manuseio, tratamento, acondicionamento, transporte, armazenamento, controle e deposição final de rejeitos radioativos (norma CNEN NE 6.05 de dez/1985 – em revisão).

3.1 CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

O ciclo do combustível nuclear se constitui num conjunto de etapas do procedimento industrial que possibilita a transformação e utilização do urânio em sua forma mineral e processada. Este procedimento se inicia na condição do minério de urânio em estado natural (minério bruto) indo até seu uso como combustível na geração elétrica nuclear e, em situações específicas, pelo seu reaproveitamento em novos ciclos produtivos (Figura 05).



Source: US NRC

Figura 05: Ciclo do Combustível Nuclear
Fonte: US NRC (Adaptado pelo Autor)

Após as operações de mineração em jazidas minerais, acontecem diversos processos de beneficiamento com tratamentos físicos (fragmentação e classificação) e químicos (concentrados de urânio). Acontecem operações de separação do urânio dos outros componentes do minério (clarificação, separação e purificação), sua conversão em concentrados (UF_6) e seu enriquecimento para posterior utilização em reatores nucleares.

Finda a vida operacional do combustível nuclear surgem produtos de fissão, há um volume de urânio não consumido (com grau de enriquecimento mais baixo), restos do revestimento do elemento combustível, e alguns produtos químicos contaminados junto com elementos transurânicos.

Os produtos de fissão e os resíduos não aproveitáveis, surgidos ao longo do ciclo combustível nuclear, após sua separação (fracionamento) e operações de concentração, são também considerados rejeitos com alta atividade radioativa tal qual os elementos combustíveis queimados (condição em que foi esgotada sua vida operacional).

Segundo natureza do material descartado no ciclo nuclear, tem-se uma classificação primária, apresentada no item seguinte.

3.1.1 Rejeito Radioativo

Segundo algumas normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN (números NE 6.02⁴, NE 6.05, NE 6.06 e NN 6.09), rejeito radioativo é todo e qualquer material resultante das atividades humanas, que contenha radionuclídeos em quantidade superior aos estabelecidos por este órgão regulador, cuja reutilização é imprópria ou não prevista (definição de termos).

Os rejeitos radioativos surgem com todas as fases do ciclo do combustível nuclear, estão associados com a utilização de materiais radioativos ou radionuclídeos na indústria, na agricultura, na medicina, na pesquisa científica e em aplicações relacionadas com o setor militar. Todos os resíduos desta natureza e produzidos sob todas as formas devem ser gerenciados com absoluta segurança, de forma a proteger a biosfera, resguardando os seres

⁴ Norma em revisão.

humanos e o meio ambiente por longo período de tempo, de forma a preservar o amanhã das gerações futuras.

Para atender a este propósito devem ser realizados procedimentos de segregação condizentes com as características destes rejeitos. Os rejeitos não gasosos são segregados de acordo com a sua natureza principal e características secundárias:

- Rejeitos sólidos (compactáveis, não-compactáveis, incineráveis, não-incineráveis, biológicos, fontes seladas)
- Rejeitos líquidos (orgânicos, inorgânicos, ácidos, alcalinos, inflamáveis, não-inflamáveis)

Há, ainda, outro critério para a classificação de resíduos nucleares, por regra da CNEN, e que leva em conta o procedimento de manipulação e de cuidado deste material:

- (a) Rejeito de baixo nível de atividade (ou radiação): material que não exige blindagem para manuseio e transporte;
- (b) Rejeito de médio nível de atividade (ou nível intermediário de radiação): material que requer contenção e blindagem específicas para manuseio e transporte mas não gera calor;
- (c) Rejeito de alto nível de atividade (ou radiação): material que, além da blindagem e contenção, requer procedimento de resfriamento vez que é volume gerador de calor.

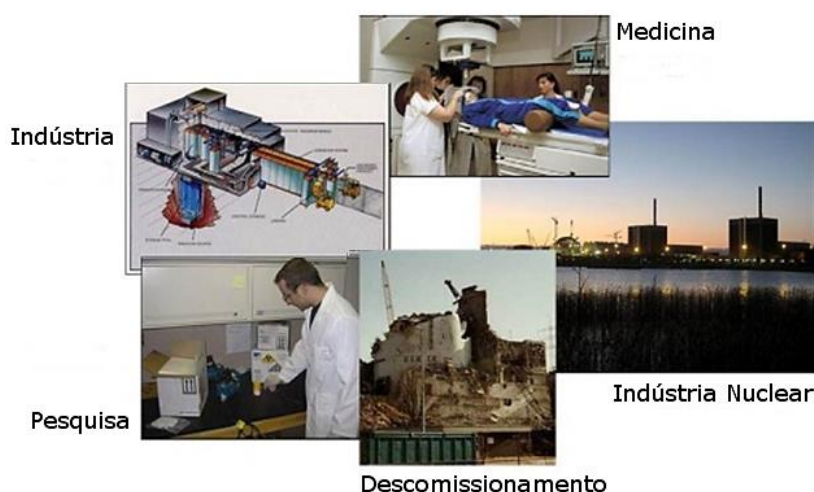
Segundo a IAEA, em sua publicação “*Safety Glossary – Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection*”, 2007 Edition, e na norma técnica IAEA *Safety Standards Series No. GSG -1 (General Safety Guide): Classification of Radioactive Waste*, 2009, verifica-se a seguinte classificação:

- *Exempt waste (EW)*: rejeito inerte
- *Very short lived waste (VSLW)*: rejeito com meia-vida muito curta
- *Very low level waste (VLLW)*: rejeito de muito baixo nível de radiação
- *Low level waste (LLW)*: rejeito de baixo nível de radiação

- *Medium level waste* (MLW ou LILW): rejeito de nível intermediário de radiação
- *Intermediate level waste* (ILW ou LILW): rejeito de nível intermediário de radiação
- *High level waste* (HLW): rejeito de alto nível de radiação

As maiores quantidades de rejeitos radioativos são produzidas nas atividades e instalações relacionadas com o ciclo do combustível nuclear. São volumes de materiais radioativos gerados desde as etapas iniciais da mineração e por todas as etapas subsequentes do beneficiamento do minério; das etapas de conversão, reconversão e enriquecimento isotópico; da irradiação no reator; do próprio combustível nuclear usado (SNF); do reprocessamento do combustível irradiado e finalmente do descomissionamento de todo o material radioativo inservível das instalações nucleares. (NEA, 2006)^[85]

Por seu lado, o material radioativo considerado resíduo e produzido pelo uso na agricultura, em pesquisas energéticas, biológicas e químicas, em medicina e na indústria, representa um volume de rejeitos que igualmente exige uma adequada programação do seu armazenamento final (Fotografia 01). Não há como desconsiderar que estes rejeitos, de menor volume, deixem de apresentar núclídeos e radioisótopos com altos níveis de radioatividade. (NEA, 2006)^[85]



Fotografia 01: Diversidade do uso e produção de rejeitos radioativos.

Fonte: Internet (ICGR)

Os resíduos provenientes das atividades associadas à área nuclear são diversificados em volume, no estado físico, na composição química, na concentração, na natureza da radiação e no conjunto de radionuclídeos existentes. Daí justificar-se rigorosa classificação de rejeitos manipulados e a escolha precisa dos procedimentos usados no tratamento dos mesmos. Cuidados que devem ser constantes em sua gestão, manuseio e transporte.

Desta forma, há de se ter um maior cuidado quando no manuseio e armazenagem de rejeitos com natureza especial, particularmente os SNF e HLW, como consequência da sua alta radiotoxicidade e existência de alguns produtos químicos tóxicos em sua composição.

Destaca-se que não há distinção entre rejeitos SNF oriundos dos diferentes tipos de reatores posto que a quantidade e a radioatividade dos produtos de fissão produzidos por unidade de energia térmica para cada tipo de reator nuclear são essencialmente as mesmas, não havendo distinção significativa entre a natureza do ciclo de combustível nuclear usado.

Considerando-se a imposição de transporte do rejeito, verifica-se igual necessidade de atenção quanto ao acondicionamento deste material radioativo. Como característica mais geral de contenção primária há a definição da matriz de imobilização. Esta matriz de proteção radiológica, além de estabelecer a forma física do rejeito, torna-se uma barreira artificial que restringe a liberação de radionuclídeos, quando construída de maneira homogênea, e produz a estabilidade da distribuição dos radionuclídeos conforme a taxa de degradação física e química especificada. Podem ser utilizadas matrizes sólidas de resina, betume, concreto, vitrificadas ou mistura pastosa (lama) com rejeitos incinerados.

A radiação existente nesses materiais constitui-se em perigo que naturalmente regride com o passar do tempo, certo de que em forma gradual ao longo dezenas ou até centenas de milhares de anos. Desta forma fica evidente a necessidade de abrigar tais resíduos num tipo de armazenamento adequado que proporcione a proteção adequada do público e do meio ambiente durante períodos muito longos de tempo.

Na Tabela 1, apresentada na página seguinte, podemos identificar os principais rejeitos do Ciclo do Combustível Nuclear bem como o estado físico e a natureza radioativas destes elementos:

Tabela 1: Tipos de Rejeitos quanto a sua origem e seu estado físico

<i>ORIGEM</i>	<i>ESTADO FÍSICO</i>	<i>REJEITOS</i>	<i>NATUREZA</i>
<i>Mineração</i>	<i>Gasoso</i>	<i>Radônio (Rn)</i> <i>Poeiras de Minério</i>	<i>Radioativos</i>
	<i>Líquido</i>	<i>Radium (Ra) em solução</i>	<i>Radioativo</i>
	<i>Sólido</i>	<i>Estéreis</i> <i>Minérios pobres (U, Ra, Th)</i>	<i>Radioativos</i>
<i>Produção de Concentrados</i>	<i>Gasoso</i>	<i>Radônio (Rn)</i> <i>Tri-óxido de enxofre</i>	<i>Radioativo</i>
	<i>Líquido</i>	<i>Metais pesados</i> <i>Ácidos e sais inorgânicos</i> <i>Lavagens</i>	- - <i>Radioativas</i>
	<i>Sólido</i>	<i>Resíduos insolúveis do ataque químico</i>	-
<i>Conversão e Reconversão</i>	<i>Gasoso</i>	<i>Amoníaco</i> <i>Gás fluorídrico</i> <i>Flúor (F)</i> <i>Vapor d'água</i>	- - - -
	<i>Líquido</i>	<i>Nitratos solúveis</i> <i>Sais inorgânicos</i> <i>Ácidos</i>	<i>Radioativos</i> - -
	<i>Sólido</i>	<i>Resíduos de filtração</i>	<i>Radioativos</i>
<i>Enriquecimento</i>	<i>Gasoso</i>	<i>Hexafluoreto de urânio (UF₆)</i> <i>Hidrogênio</i> <i>Hélio</i>	<i>Radioativo</i> - -
	<i>Líquido</i>	<i>Traços de Urânio</i> <i>Fluoretos</i>	<i>Radioativos</i> -
	<i>Sólido</i>	<i>Resíduos de processo</i>	<i>Radioativos</i>
<i>Reator</i>	<i>Gasoso</i>	<i>Gases nobres (Xe, Kr)</i> <i>Iodo</i> <i>Trítio (T)</i> <i>Óxido de trítio (T₂O)</i>	<i>Radioativos</i>
	<i>Líquido</i>	<i>Produtos de corrosão (materiais estruturais)</i> <i>Produtos de ativação</i>	- <i>Radioativos</i>
	<i>Sólido</i>	<i>Resinas esgotadas</i>	<i>Radioativas</i>
<i>Reprocessamento</i>	<i>Gasoso</i>	<i>Produtos de fissão (Kr, Xe, I₂, T₂)</i> <i>Óxidos de nitrogênio</i> <i>Hélio</i>	<i>Radioativos</i> - -
	<i>Líquido</i>	<i>Produtos de fissão: zircônio (Zr), nióbio (Ni), rutênio (Ru), rhódio (Rh), célio (Cs), etc.</i> <i>Nitratos</i> <i>Materiais orgânicos</i> <i>Urânio</i> <i>Plutônio</i> <i>Elementos transurânicos</i>	<i>Radiativos</i> - - <i>Radioativo</i> <i>Radioativo</i> <i>Radioativos</i>
	<i>Sólido</i>	<i>Materiais de processo</i> <i>Partes de revestimento (contaminadas por produtos de fissão, por urânio e plutônio)</i>	- <i>Radioativas</i>
<i>Tratamento de Rejeitos</i>	<i>Gasoso</i>	<i>Criptônio (Kr)</i> <i>Xenônio (Xe)</i>	<i>Radioativos</i>
	<i>Líquido</i>	<i>Concentrados das soluções aquosas</i> <i>Água tritiada</i>	<i>Radioativos</i> -
	<i>Sólido</i>	<i>Rejeitos impregnados (em concreto, betume, vidro)</i>	<i>Radioativos</i>

3.2 ESTRATÉGIA GERAL DA GESTÃO DE REJEITOS

O início da gestão do combustível nuclear, uma vez encerrada a sua utilização na produção de energia no reator, consiste no armazenado provisório do mesmo em piscinas de combustível usado (UFPs), no próprio interior da usina nuclear (NPP), local que se presta para remoção do calor residual de decaimento dos produtos de fissão radioativos que o combustível ainda produz. Neste momento existem diferentes opções fundamentais de ação:

- **Ciclo aberto:** após um período indefinido de armazenamento temporário ou intermediário (quando em depósitos úmidos ou piscinas e em depósitos secos com uso de contêineres), o combustível usado é acondicionado e encapsulado para depósito definitivo como rejeito radioativo de alto nível de radiação. Esta opção é mundialmente reconhecida como mais viável e recomendada como alternativa para questões de não proliferação e menor incerteza na estimativa de custo.
- **Ciclo fechado:** após período indefinido de armazenamento temporário (depósito seco/úmido), o combustível usado é submetido ao reprocessamento com o objetivo de se extrair o urânio e o plutônio residuais dos elementos do combustível queimado (SNF). Estes servirão para uma posterior utilização como combustível (enriquecimento energético do urânio) em um novo processo de fissão nuclear. Rejeitos produzidos com alto nível de radioatividade devem ser acondicionados pelo processo de vitrificação, garantindo fácil manipulação e condizente armazenamento final. Esta condição de encapsulamento sólido se constitui na melhor e mais sustentável forma controle do combustível nuclear usado.
- **Ciclo fechado avançado:** outra forma de ciclo fechado, inclui a separação e a transmutação de actínídeos menores e de certos produtos de fissão impondo uma redução da atividade e da radiotoxicidade do rejeito. Destaca-se nesta última opção a necessária existência de um conjunto de reatores rápidos e de instalações industriais para a separação e a transmutação.

Em todos os citados ciclos, tanto os rejeitos de alto nível de radiação como os rejeitos de longa meia-vida (centenas a milhares de anos) não são apropriados para acomodação em depósito próximo à superfície. Eles devem ser armazenados em instalação chamada Repositório Geológico Profundo (*Deep Geological Disposal – DGD*), uma opção específica para combustível usado ou para rejeito com alto nível de radiação.

Em seu aspecto institucional, o relatório brasileiro da CNEN (*National Report of Brazil for the 4th Review Meeting*), de outubro de 2011, destinado à apresentação na “*Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*” (maio de 2012), contém uma descrição da política brasileira e dos programas relacionados com a segurança da energia nuclear. Nele há a descrição das medidas que o Brasil está tomando para implementar suas obrigações estabelecidas pelas regras legais e convenções com que está pactuada. (CNEN, 2011)^[12]

Este relatório, em sua seção G – Segurança no Gerenciamento do Combustível Nuclear Usado (CNEN, 2011)^[12], esclarece como o Brasil responde sobre a deposição do combustível usado conforme estipulado no Artigo 10 da Lei nº 10.308, de 20 de novembro de 2001. (BRASIL-LEXML, 2001)^[5]

Nesta citada seção, apresentada em parte no Anexo A, o Brasil informa não possuir solução técnica para reprocessamento ou eliminação do combustível irradiado. Esta solução pode exigir algum tempo de estudos ou até que se consiga um consenso internacional. (CNEN, 2011)^[12]

Nela, ainda, está explícita a indicação de construção de um novo local para depósito ainda nesta década.

O supra citado relatório ainda informa que o Brasil tem por prática enviar elementos combustíveis usados que contenham urânio de origem americana, para o laboratório *Savannah River*, nos Estados Unidos e que são embarcados em embalagem apropriada fornecida por empresa norte-americana. (CNEN, 2011)^[12]

Quanto ao invólucro destes rejeitos, a solução brasileira prevista considera envolver o SNF num contêiner vedado e encaminhamento para armazenamento numa instalação provisória de longo prazo sob a superfície. A viabilidade técnica deste acondicionamento de SNF será objeto de teste pela CNEN e Eletronuclear ainda nesta década.

3.3 PRINCÍPIOS DA GESTÃO DE RESÍDUOS

São objetivos principais e universais para o gerenciamento de resíduos radioativos de qualquer natureza:

- (a) Minimizar a geração dos rejeitos radioativos
- (b) Manter controle sobre os rejeitos em todas as etapas da gestão
- (c) Minimizar as doses de radiação e, ao mesmo tempo, minimizar os custos da gestão, aplicando o princípio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*)
- (d) Diluir e Dispersar (D&D) os rejeitos
- (e) Reter e Retardar (R&R) a liberação
- (f) Concentrar e Confinar (C&C)

3.3.1 Ciclo Combustível e Reprocessamento

O ciclo combustível nuclear utiliza apenas uma pequena fração do total do combustível nuclear posto em uso. No combustível de um reator térmico, o enriquecimento físsil do combustível novo é limitado a cerca de 5% da carga total do reator. Antes da irradiação, apenas o urânio físsil (^{235}U) e urânio fértil (^{238}U) estão presentes no combustível.

Ao final da irradiação, uma percentagem significativa da potência do reator é agora produzida pela fissão do plutônio (^{239}Pu) gerado durante o processo interno do reator. Após a irradiação, o combustível nuclear irradiado (ou queimado) tem opção de ser preparado para o armazenamento permanente (ciclo aberto), ou ser enviado para uma planta de reprocessamento (ciclo fechado). (NEA, 2006)^[85]

Embora os custos incidentes do reprocessamento não sejam compensados pelos ganhos do combustível físsil, a escolha da reciclagem restringe a produção de resíduos nucleares através de uma melhor utilização do combustível nuclear, limitando, assim, um potencial impacto ambiental dos rejeitos nucleares.

No ciclo de reprocessamento do combustível, o urânio e o plutônio, quase 96% do combustível irradiado, são separados por meio do processo PUREX (*Plutonium and Uranium REduction and eXtraction*). Os actínídeos menores (como Np, Am, Cm) não são extraídos e, nesta condição, tornam-se rejeitos a serem segregados. Eles seguem o caminho dos produtos de fissão e são armazenados em blocos de isolamento. (NEA, 2006)^[85]

O plutônio separado, como um óxido, é então misturado com o urânio empobrecido produzido por uma instalação de enriquecimento para formar um novo combustível de óxido misto. O novo combustível é chamado *Mixed Oxide* (MOx). Uma única reciclagem de plutônio aumenta a energia proveniente do urânio original empobrecido, em aproximadamente 17%. (NEA, 2006)^[85]

Ainda sobre este tipo de combustível sabe-se que após duas reciclagens, devido à absorção parasitária de maiores isótopos do plutônio, há a limitação do potencial de aproveitamento pela reciclagem do combustível queimado.

3.3.2 Ciclo de Combustível Fechado

Comparados a reatores LWR em uso, reatores rápidos têm o potencial de fechar completamente o ciclo de combustível para todos os metais pesados. Todo urânio, plutônio e isótopos actínídeos podem fissionar em um espectro rápido. De modo a manter o combustível na mesma densidade em múltiplos ciclos, e, assim, manter a mesma massa total carregada de Metais Pesados (*heavy metal* – HM), exige-se que produtos de fissão retirados devam ser substituídos no núcleo. O reprocessamento e a posterior reciclagem em um ciclo de combustível de reator rápido podem ser assim considerados como parte de um ciclo de combustível completo (fechado) (NEA, 2006)^[85]. Deve-se lembrar, contudo que para ser utilizado em reatores nucleares térmicos convencionais, o urânio deve ser obrigatoriamente enriquecido atingindo percentual de 0,7 a 3%. (NEA, 2006)^[85]

3.4 REJEITOS NUCLEARES: OPÇÕES HISTÓRICAS

O intervalo de tempo necessário para que resíduos radioativos e o combustível nuclear usado sejam declarados como um resíduo sem risco potencial para a saúde humana, ou para o ambiente, varia significativamente. Isso pode variar de alguns poucos meses ou anos para alguns tipos de rejeitos até milênios para HLW, e centenas de milhares de anos para o combustível nuclear usado.

A partir da década de 1950, diversos cientistas e engenheiros começaram a estudar as possibilidades de gerir alguns materiais altamente radioativos acumulados em centrais elétricas e em outros locais. Desde aquela época verificou-se que o armazenamento por longo prazo destes materiais enterrados próximo à superfície tem apresentado significativo potencial de riscos à saúde, à segurança institucional e ao meio ambiente.

Desta forma, os governos e os cientistas têm preocupações legítimas sobre segurança no curto, médio e longo prazo. Segurança a longo prazo é definida pela deposição à prova de falhas, e até que um local de descarte adequado tenha sido implementado, esta segurança englobará a gestão do material em seu armazenamento provisório ou intermediário. (CHAPMAN & NEALL, 2008)^[9]

Em se tratando de um problema já conhecido e definido pelo próprio conceito do uso do combustível nuclear e de materiais radioativos, surgiram propostas para o encerramento do ciclo nuclear. Por razões evidentes, alguns destes métodos propostos não foram desenvolvidos, nem de maneira experimental.

Os procedimentos que mais se destacaram são os seguintes:

- Depósito sob o leito marinho (*sub-seabed*)
- Depósito em poços muito profundos (*very deep-hole disposal*)
- Depósito no espaço sideral (*space disposal*)
- Depósito sob camadas de gelo (*ice-sheet disposal*)
- Depósito geológico em ilha (*island geologic disposal*)
- Depósito por injeção porosa (*deep-well injection disposal*)
- Reprocessamento
- Transmutação
- Depósito geológico (*geologic disposal*)

3.4.1 Migração de Resíduos Radioativos

O principal problema no depósito ou armazenamento de resíduos radioativos, qualquer que seja a instalação utilizada, consiste na percolação de tóxicos contidos no material radioativo para lençóis freáticos ou água superficiais, levando assim à inevitável dispersão do material na biosfera. Uma vez contaminada, a água entra diretamente na cadeia alimentar, como por exemplo através de represas e poços e, indiretamente através da ingestão de alimento contaminado (incorporação da contaminação pelo pescado, utilização de água no cultivo agrícola, pecuária entre outros). (WASSERMAN, 2012)^[105]

A IAEA define Segurança Nuclear como:

"os meios e as formas de prevenção, detecção e resposta a sabotagem, roubo e acesso não autorizado ou transferência ilegal de materiais nucleares e de outras substâncias radioativas, bem como as respectivas instalações associadas".

A discussão das estratégias de países sobre resíduos altamente radioativos e sobre a gestão do combustível usado, incide, particularmente, no aspecto da armazenagem e depósito final, bem como as implicações para a segurança e a sustentabilidade durante os períodos de armazenamento.

Apesar dos progressos significativos alcançados por alguns países na gestão dos respectivos resíduos radioativos, são ainda necessários esforços num número maior de países para desenvolver uma estratégia global que inclua deposição e o reforço das infraestruturas nacionais. Um dos maiores desafios na gestão do combustível usado e dos rejeitos radioativos é o desenvolvimento e implementação de estratégias de armazenagem (IAEA TECDOC, 2005b)^[66]. Em particular, depósito geológico dos resíduos altamente radioativos e do combustível usado permanece um tópico de preocupação e sua execução foi postergada em muitos países.

A armazenagem é um passo necessário na gestão global de resíduos radioativos. Nos últimos anos, principalmente devido à indisponibilidade de instalações definitivas, locais originariamente destinados a instalações temporárias tiveram sua vida útil estendida por até 100 anos (tornando-se depósitos intermediários) e, além disso, tornou objeto de apreciação, em alguns países, a utilização do depósito com a gestão de longo prazo. (IAEA, 2008)^[50]

4 ARMAZENAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS

De acordo com a IAEA: “O objetivo do gerenciamento dos rejeitos radioativos é lidar com o mesmo de forma a proteger a saúde humana e o meio ambiente, agora e no futuro, sem impor encargos desnecessários às gerações futuras”. (IAEA, 1995a)^[38]

A gestão de rejeitos radioativos abrange um conjunto de atividades técnicas e administrativas que englobam desde a caracterização inicial do material rejeitado até a sua destinação final, após diversas etapas de tratamento.

Armazenamento é a estocagem não definitiva dos rejeitos radioativos, já tratados e imobilizados, em local apropriado. Esta etapa permite a inspeção e a manutenção dos embalados e a reembalagem, quando necessário, para transporte até a unidade de deposição final.

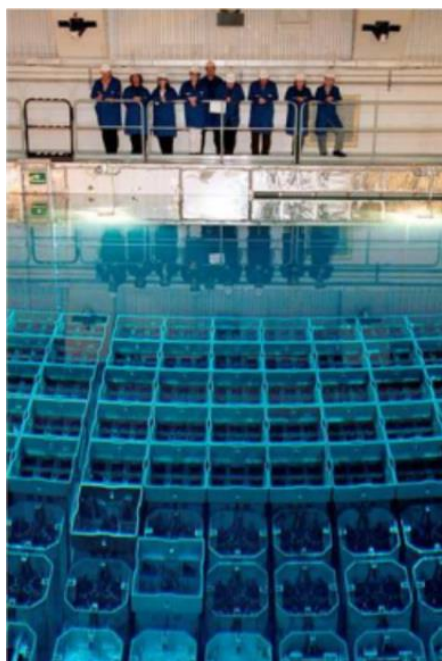
4.1 DEPÓSITOS DE SNF

Quando o combustível nuclear do reator exaure sua eficiência na geração de energia, o combustível irradiado ou usado (SNF) é retirado do reator. Ele, entretanto, é ainda termicamente quente, é altamente radioativo, e é potencialmente prejudicial ao homem e ao meio ambiente. Este componente radioativo precisa ser resfriado e protegido com segurança fora do reator.

Este armazenamento inicial, numa condição transitória, envolve especialmente a guarda deste material em ambiente úmido e isolado, concebidos como uma piscina de água especificamente tratada. Os conjuntos de SNF são transferidos para a água da piscina, em

geral existente no próprio edifício do reator ou em prédio específicos próximo a ele. Nesta situação o SNF recebe refrigeração externa e permanece aguardando, por alguns anos, o encaminhamento para um outro armazenamento provisório que pode ser um ambiente seco, ou para um depósito definitivo.

Existem dois métodos de armazenamento provisório aceitáveis para SNF: armazenagem úmida ou molhada (*wet storage*), onde a água é usada como dissipador do calor ainda produzido, e a armazenagem a seco (*dry storage*), onde circulação natural de ar dissipa o calor. Estes processos podem ser vistos nas Fotografias 02 a, 02 b, 03 a e 03 b seguintes:



Fotografias 02 a e 02 b: Armazenamento úmido ou molhado (deposição em piscina)

Fonte: Internet (www.eletronuclear.gov.br/www.skb.se)



Fotografias 03 a e 03 b: Armazenamento a seco em contêineres (podendo ser em *vaults* ou em silos, todos blindados)

Fonte: Internet (www.kernenergie.de/www.skb.se)

No armazenamento úmido, a água tratada mostra-se uma eficiente proteção e permite boa refrigeração do SNF. Na piscina de armazenamento, a radioatividade e o calor diminuem com o tempo como resultado da manutenção de um fluxo circulante da água por um trocador de calor externo (bombas elétricas garantem este procedimento).

A armazenagem a seco tem sido adotado com sucesso no mundo e difere do meio úmido pois utiliza gás inerte ou pouco reativo no interior do cilindro (contêiner) onde o SNF é armazenado, com o propósito de evitar oxidação do combustível. Estes contêineres fornecem a estanqueidade necessária à contenção do combustível irradiado. Esta blindagem interior que fica em contato com o SNF é circundado por outro revestimento metálico ou de concreto que oferece também proteção contra as radiações e age como a água do armazenamento em meio úmido. O resfriamento do calor dissipado é realizado por convecção natural do ar circundante ao contêiner. (ROMANATO, 2011)^[90]

4.2 REPOSITÓRIO

O depósito de maneira definitiva destes resíduos em instalações projetadas, denominadas repositórios, é, para grande número de países que possuem significativo volume de rejeitos radioativos, a forma objetiva de proteger os seres humanos e o meio ambiente.

Os repositórios são instalações que têm, assim, o propósito de reter e isolar os radionuclídeos contidos nos rejeitos ali colocados, para minimizar qualquer forma de dano ao ecossistema, no presente e no futuro. A escolha do tipo de repositório depende do nível de radioatividade, da meia vida dos radionuclídeos e da forma de acondicionamento destes rejeitos.

Atualmente há uma tentativa de convergência dos procedimentos entre os países quanto à natureza do repositório a ser escolhido. Há, inclusive, a ocorrência de grande intercâmbio técnico na resolução de problemas e na definição de paradigmas ligados ao tema. De modo a exemplificar, é possível encontrar, entre os maiores países usuários da tecnologia nuclear, a adoção comum do conceito de se enterrar profundamente seus rejeitos (IAEA, 2004, TECDOC 2005b, 2009b, 2009c, 2011a)^[64, 66, 52, 53, 54]. Dessa forma sustenta-se que

escolher depósitos localizados profundamente em formações geológicas, estáveis e apropriadas, se constitui numa fórmula igualitária, podendo ser nivelada no mundo como solução de referência.

Projetar depósitos geológicos profundos passa a ser entendido como um ponto final no processo de gestão de resíduos radioativos. Nesta linha conceitual, pode até se entender o provimento de segurança de forma passiva, sem a necessidade de intervenção humana renovada e, obviamente, custosa (IAEA, 2008)^[50].

Os sistemas de depósito radioativos em profundidade fornecem um nível elevado e específico de proteção para os rejeitos de alta atividade radioativa bem como para resíduos radioativos de longa meia-vida. Tratam-se de projetos que aproveitam os recursos tanto da geologia local como da engenharia de materiais, mostrando-se útil em atender as funções de segurança, proporcionando múltiplas e diversas funções de barreira radioativa (NEA, 1999)^[84].

Segundo relatório da *Nuclear Energy Agency* (NEA), órgão da *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD), a opinião científica mundial considera a deposição em formação geológica como tecnicamente viável e tem um caráter quase ubi-quitário. (NEA, 2008)^[86]

Ainda de acordo com o relatório, tais opiniões balizam-se pela(o):

- extensa coleção de dados experimentais obtidos nas formações geológicas indicadas como padrão (salina, granítica, argilosa);
- atualizada pesquisa da engenharia de materiais;
- existência de instalações que se prestam para realização de pesquisa e demonstração de equipamentos e protótipos de instalações;
- estado atual da arte em técnicas numéricas de modelagem;
- experiência no tocante ao funcionamento de depósitos subterrâneos para as outras classes de resíduos; e
- grandes avanços nas práticas da realização de avaliação de segurança aplicados a sistemas de repositórios em potenciais.

Apesar das convergências científicas, outros fatores, tais como: (i) atos de terrorismo; (ii) mudanças geopolíticas; (iii) catástrofes naturais; entre outros, tornam evidente a

necessidade em se adotar o modelo subterrâneo em profundidade, em especial, para os depósitos finais de SNF e HLW, assim como de outros materiais perigosos da indústria nuclear.

Salienta-se em particular quanto ao item (i), que a estratégia de depósito radioativo em profundidade geológica evita totalmente, ou pelo menos minimiza fortemente, o acesso indevido ou a intrusão com interesses ilegais ou terroristas.

A localização do depósito em grande profundidade, por si, caracteriza uma opção suficientemente segura, garantindo isolamento físico por longo prazo e o estabelecimento de um nível de segurança física e radioativa com maior e estrita dependência das barreiras naturais do aquele gerado por obstáculos artificiais. (NEA, 2006, 2008)^[85, 86]

Qualquer que seja o futuro e destino da energia nuclear nos diversos países do planeta é universalmente reconhecido que soluções seguras e aceitáveis para repositórios definitivos devem ser pesquisadas para armazenar o inventário de rejeitos radioativos de alta intensidade radioativa (HLW) e de meia-vida longa já acumulados e aqueles previstos para data futura. Nesse sentido, o uso do leito oceânico (*sub-seabed*) torna-se uma opção a ser considerada posto ser viável e economicamente possível.

4.3 MEIOS GEOLÓGICOS PARA REPOSITÓRIO DE HLW/SNF

Instalações projetadas como repositório e construídas em formações geológicas profundas e estáveis, constituem-se na solução de referência para permanentemente isolamento dos resíduos radioativos de longa vida da biosfera terrestre. Este método de gestão de rejeitos é entendido como de segurança intrínseca e final, ou seja, não há dependência da presença humana e de intervenção a fim de cumprir o objetivo de segurança. A localização destes repositórios de resíduos traz um número de questões que tocam no conhecimento científico, na capacidade técnica, em valores éticos, em ordenamento territorial, no bem-estar da comunidade, e muitas mais. Concretizar esta tarefa de algumas décadas, no desenvolvimento e implantação de um repositório exige um forte compromisso nacional e uma significativa participação regional e local.

A deposição geológica em profundas formações geológicas, debaixo da crosta continental ou sob o leito do mar, entendida como um meio de deposição de resíduos radioativos, tem sido estudada desde 1957 para o armazenamento de resíduos de alta intensidade radioativa mas sem caráter produtivo.

Sítios geológicos profundos proporcionam um sistema natural de isolamento que mostra-se estável ao longo de centenas de milhares de anos para efeito da contenção de rejeitos radioativos de longa vida.

Rejeitos desta natureza são depositados em rochas hospedeiras que podem ser do tipo cristalina (granito, gnaiss), argilosas (argilas), salinas ou depósitos calcários.

Uma vez que, na maioria dos países, ainda não há um grande volume de resíduos altamente radioativos aguardando urgentemente seu depósito, são utilizadas algumas instalações de armazenagem provisórias, que permitem o arrefecimento destes resíduos durante algumas décadas.

Em 2008, o Comitê de Gestão dos Resíduos Radioativos (RWMC) da agência europeia OCDE emitiu uma declaração conjunta sobre a conveniência e a viabilidade da deposição geológica para determinadas categorias de resíduos radioativos. A declaração reflete o forte consenso internacional de que a deposição geológica é a rota mais adequada em razão de ser tecnicamente viável; ser seguro para as gerações atuais e futuras; não possuir alternativas confiáveis para depósito de rejeitos radioativos; e que, apesar dos avanços tecnológicos possíveis na área, haverá sempre a necessidade de deposição de algumas classes de resíduos. (NEA, 1999)^[84]

Meios geológicos também representam uma correta abordagem sob o ponto de vista ético. A responsabilidade pelo destino do que é produzido na forma de resíduos deve ser considerada, conforme a situação de cada país, como objetivo de uma política de gerenciamento de rejeitos radioativos eficaz, transparente e duradoura. (NEA, 2008)^[86]

4.4 REPOSITÓRIO EM MINAS DE SAL

O uso de formações salinas para depósitos de resíduos nucleares tem sido um conceito amplamente avaliado por mais de 60 anos.

Sabe-se que o sal é impermeável e se deforma plasticamente em torno dos resíduos. Não há água natural fluindo através de um repositório salino. O depósito final de resíduos nucleares em sal permanece um conceito exequível em vários países segundo seus organismos responsáveis pelo gerenciamento de resíduo nucleares.

A adequação do sal como um meio para acomodação final do HLW tem sido reconhecida pelos programas nacionais e internacionais sobre repositórios, que desenvolveram conceitos avançados de engenharia, bem como conceitos científicos e operacionais.

O atual conhecimento dos efeitos térmicos no sal está baseado em poucos testes e limitadas experiências, porém ele permite uma concepção possível da operação de um repositório. Certas particularidades do ambiente salino ainda carecem de estudos mais evoluídos. Entre estes estudos, há necessidade de melhor avaliação das deformações surgidas nos túneis de acesso e na sua estabilidade, bem como sobre os efeitos da escavação e do aquecimento no desempenho de longo prazo. De igual maneira se verifica a necessidade do desenvolvimento de modelos constitutivos específicos para o sal. Habilidades tridimensionais aplicáveis à física são agora disponíveis e prometem capacidades avançadas para modelagem e avaliação de desempenho e o desenvolvimento do teste de campo.

Considerações térmicas, hidrológicas e geoquímicas sugerem que radionuclídeos em um repositório de sal para rejeitos HLW não poderiam migrar além do horizonte do depósito. A maioria dos radionuclídeos do atual inventário de resíduos será termodinamicamente estável quando no estado sólido, e irá, pois, resistir às migrações. Muitos dos elementos deste inventário provavelmente decairão antes que uma intrusão humana ocorra. Uma avaliação formal de desempenho deve ser utilizada para examinar estas hipóteses a respeito de uma formação salina ou sua localização. Uma apurada avaliação da sequência isotérmica FEP (Funcionalidade, Eventos e Processos) é um dos primeiros elementos de pesquisa indicado para um repositório de HLW. (CARTER *et al.*, 2011)^[7]

4.4.1 Predicados do Depósito de HLW/SNF em Minas de Sal

A identificação da melhor opção ou melhor alternativa para o depósito permanente ou definitivo de rejeitos de alto nível radioativo (HLW) e de combustíveis nucleares

usados (SNF) exige uma apurada investigação de um número grande de especificidades técnicas para efeito da segurança. A vantagem, que hoje se apresenta neste estudo multidisciplinar, permite pela troca de conhecimentos entre a comunidade envolvida com o trato do ciclo nuclear e pela realidade já analisada em ambientes experimentais reais que a definição dos atributos de um sítio de deposição seja obtida por consenso.

A lista que se segue vem expor o rol de predicados a serem avaliados em profundidade para a perfeita caracterização do local de depósito final dos rejeitos da natureza considerada:

Lista: Itens a serem apreciados na definição do sítio de um repositório de HLW e SNF.

<i>Atividade Magmática</i>	<i>Atividade Metamórfica</i>	<i>Atividade Sísmica</i>
<i>Atividade Vulcânica</i>	<i>Brechas de Colapso</i>	<i>Deformação Salina</i>
<i>Diapirismo</i>	<i>Dissolução Profunda</i>	<i>Dissolução Superficial</i>
<i>Efeitos da Dissolução</i>	<i>Epirogênese e Subsidência</i>	<i>Espessura de Camada</i>
<i>Estratigrafia</i>	<i>Feição Estrutural</i>	<i>Fluxo de Fratura</i>
<i>Fluxo Insaturado de Águas Subterrâneas</i>	<i>Fluxo Saturado das Águas Subterrâneas</i>	<i>Formação de Fraturas</i>
<i>Formação de Novas Falhas</i>	<i>Geoquímica das Águas Subterrâneas</i>	<i>Infiltração de Fratura</i>
<i>Intrusão de Gás Natural</i>	<i>Intrusão Salina (Efeito hidrogeológico)</i>	<i>Intrusão Salina (Efeitos geoquímicos)</i>
<i>Mineralogia</i>	<i>Movimento de Falha</i>	<i>Perfuração/Sondagem</i>
<i>Profundidade</i>	<i>Propriedades da Fratura</i>	<i>Reservatórios de Salmoura</i>
<i>Resposta Hidrológica a Sismos</i>	<i>Sismicidade</i>	<i>Tectônica Regional</i>
<i>Tensão Local (estresse)</i>	<i>Topografia</i>	<i>Tubos de Brecha</i>

O detalhamento individual destes itens pode ser visto no Anexo B deste trabalho.

4.5 DEPÓSITO NO OCEANO

Durante muitos anos, antes de 1982, países industrializados do mundo (como por exemplo, os EUA, França, Grã-Bretanha, *etc.*) optaram pelo método mais barato destinado à eliminação dos resíduos radioativos: efetuaram o alijamento de tonéis com o “lixo radioativo”, produzidos por eles, em regiões profundas dos oceanos. As regiões, onde foram realizados estes lançamentos, não tiveram o acompanhamento ou monitoramento mais adequado à natureza da carga ou quanto ao tipo de contenção (embalagem) destinado ao resíduo radioativo. Atualmente, grande parte destes lançamentos pode ter suas posições identificadas

e, conseqüentemente, passaram a ser monitorados. Esta situação permitiu traçar mapas com a indicação do posicionamento destes rejeitos e o acompanhamento do processo físico de corrosão desenvolvido sobre os tipos de tonéis usados como invólucros (Figura 06).



Figura 06: Mapa indicativo dos locais onde ocorreram lançamentos de toneis com rejeito radioativo (em data anterior a 1982).

Fonte: IAEA-TECDOC-1105 (1999) (Adaptação pelo Autor)^[63]

Embora essa prática seja proibida pela maior parte dos países com programas nucleares, o problema dos rejeitos nucleares ainda persiste. A Rússia, no presente, continua fazendo o descarte de seus resíduos nucleares ainda nos oceanos.

4.5.1 *Sub-Seabed*

Como dito no item anterior, o alijamento direto de rejeitos SNF ou HLW no mar está fora de questão sob qualquer situação (Protocolo de Londres, LC.51(16), 1993). Por outro lado, enterrar o rejeito radioativo no leito oceânico ou em estruturas sedimentares do mesmo pode ser encarado como uma possibilidade factível.

O subsolo do fundo do mar oferece condições favoráveis ao este tipo de isolamento de rejeitos radioativos. Isto fica caracterizado por alguns fatores:

- (a) distanciamento do sítio subterrâneo (geologicamente profundo) que existe em relação ao ambiente rotineiramente acessado pelo homem ou pela biota marinha;
- (b) estabilidade em longo tempo para as condições geofísicas e geoquímicas necessárias;

- (c) significativa capacidade dos sedimentos em absorver radionuclídeos quando liberados e sua enorme diluição na água do mar caso consiga migrar naquela direção (NEA, 1999)^[84].

A proposta de enterramento sob o leito do mar prevê a perfuração da “lâmina de lama” sedimentar em profundidade da ordem de centenas de metros, com furos espaçados entre si por várias centenas de metros.

Os resíduos radioativos de alto nível, contidos em contêineres apropriados, são baixados nestes poços perfurados e empilhados verticalmente com os intervalos de separação preenchidos por material semelhante à lama especial que é bombeada no poço perfurado.

Entende-se que este método depende das técnicas padronizadas de perfuração rotineiramente praticadas em mar profundo e dos métodos de selagem dos poços perfurados. Estes dois aspectos são, atualmente, bem desenvolvidos, graças à indústria de petróleo e a evolução da mineração submarina, embora ainda sejam procedimentos onerosos em suas implementações.

Conquanto a tendência mundial seja direcionada à opção do depósito realizado em solo seco (*onshore*), é duvidoso entender que restringir a localização de repositórios em terra realmente irá prevenir a poluição dos mares. Se radionuclídeos de um repositório em solo não marinho forem lixiviados sobre a superfície, eles serão rapidamente transportados para o mar por águas superficiais. O que é importante é impedir a migração de radionuclídeos para a biosfera de forma tão confiável quanto possível.

Se a deposição sob o leito marinho resulta em isolamento mais seguro, ela será a melhor salvaguarda contra a poluição do mar. Desta forma, o método *sub-seabed*, como qualquer outro método em condição de estudo, deverá ser submetido às mesmas formas de apreciação de sua viabilidade tecnológica, da proteção proporcionada ao meio ambiente marinho e dos reflexos deste procedimento frente a compreensão leiga internacional.



Figura 07: Representação do procedimento *sub-seabed*.
Fonte: Adaptação pelo Autor (2014)

No entanto, para a perfeita aceitação e aplicação desta tecnologia, torna-se indispensável a condição de consenso planetário (entenda-se países e seus governantes). Esta condição deverá resultar na realização de alterações na atual legislação internacional (Convenção sobre Prevenção da Poluição Marinha Causada pelo Alijamento no Mar de Resíduos e Outras Substâncias – 1972) que, no momento, é instrumento legal impeditivo no tocante ao uso do fundo do mar para os procedimentos em questão. Trata-se de modificação da regulamentação vigente (Convenção e Protocolo de Londres), em seu aspecto legal e político, que, em permitindo o uso de recursos dos mares, resultará num programa mundial, desenvolvido conjuntamente por todos os países com interesses marinhos. Este programa obrigatoriamente irá promover o uso seguro do subsolo marinho em sua plataforma continental submarina e na crosta oceânica como também em águas internacionais ou alto-mar.

4.5.2 Reversibilidade e a Recuperabilidade

A reversibilidade e a recuperabilidade são consideradas partes importantes da estratégia da gestão de resíduos. Ainda não há definição padronizada para estes critérios.

Reversibilidade significa a capacidade mais genérica de reconsiderar e alterar o curso de ação, a qualquer momento, durante o desenvolvimento e a implementação de um projeto para instalação de um sítio destinado à deposição geológica. Trata-se, portanto, da possível situação em que um município ou comunidade hospedeira do repositório decidir mais tarde que ele quer modificar a sua apreciação ou julgamento inicial.

Pode igualmente significar que uma decisão de armazenar SNF em um repositório tem condição de ser revertida, com nova possibilidade de que o combustível seja submetido a reprocessamento e reciclagem.

A reversibilidade, em sua essência, transparece a condição de que o desenvolvimento de um programa (de qualquer natureza) será sempre objeto de reflexão quanto à sua abordagem e qual a política praticada ou mais recente. (IAEA, 2009c)^[53]

A recuperabilidade está associada à capacidade técnica para remover os resíduos radioativos de depósitos independentemente de sua natureza.

Destaca-se que a recuperabilidade não é uma diretiva absoluta ou binária, em contrário, ela é relativa. A questão que se coloca é quão mais fácil ou difícil será recuperar o rejeito armazenado num depósito geológico e depois de qual período de tempo.

Adotado este critério, verifica-se que, por projeto, os resíduos que foram armazenados numa instalação geológica poderiam sempre, se absolutamente necessário, ser recuperados de alguma forma, implicando consequentemente num procedimento por vezes oneroso.

O critério da reversibilidade implica que a instalação de um depósito deve ser implementada por um programa em estágios, conhecidas suas opções e efetuada a escolha conforme o desenvolvimento de cada estágio. A recuperação é, assim, a possibilidade de reverter a etapa de destinação dos resíduos. (WHITE *et al.*, 2013)^[106]

5 CIÊNCIA GEOLÓGICA

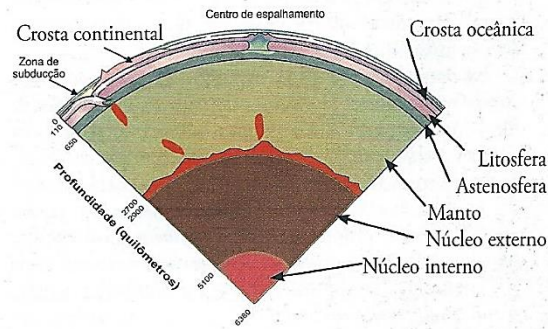
A Geologia, como ciência teórica, mostra-se como um campo científico que trata da história da Terra. Através de outras áreas com as quais guarda correlação, como a Geofísica e a Geoquímica, a Geologia vem explicar os problemas enfrentados pelos geólogos quanto à produção de mapas geológicos e tectônicos. Problemas cujas soluções permitem criar enorme e precisa base de dados a serem utilizados na previsão de ocorrências no solo e subsolo, economicamente viáveis em sua exploração (descoberta de depósitos minerais, de óleo e gás e outros).

A tarefa da Geologia é estudar a história da Terra como um todo e suas várias esferas, camadas ou estratos e o núcleo (Figura 08). A Geologia investiga todos os processos naturais em suas inter-relações históricas. Processos geológicos contemporâneos não são mais do que um elemento no infinitamente longo processo dinâmico de evolução do planeta. (POTAPOVA, 1968)^[111]

5.1 PLACAS TECTÔNICAS

Placas tectônicas ou também placas litosféricas são gigantescas estruturas irregulares, semelhantes a espessas lajes com formas irregulares e constituídas por rochas sólidas de diversas constituições e situadas na parte externa do planeta, flutuando sobre mantos internos. (Figura 08)

Em geral, a maior diferença entre placas tectônicas é a distinção feita entre a massa no nível continental e aquela estabelecida como litosfera oceânica.



Globo terrestre mostrando as principais divisões internas (núcleo, manto, astenosfera, litosfera) e placas tectônicas.

Modificado de Press et al., 2006

Figura 08: Divisões internas e placas tectônicas do globo terrestre.

Fonte: Internet (Press et al., 2006)^[107]

A dimensão das placas tectônicas pode apresentar grande variação, indo de algumas centenas até milhares de quilômetros de extensão (as Placas do Pacífico e da Antártida estão entre as maiores placas do globo terrestre). (Figura 09)

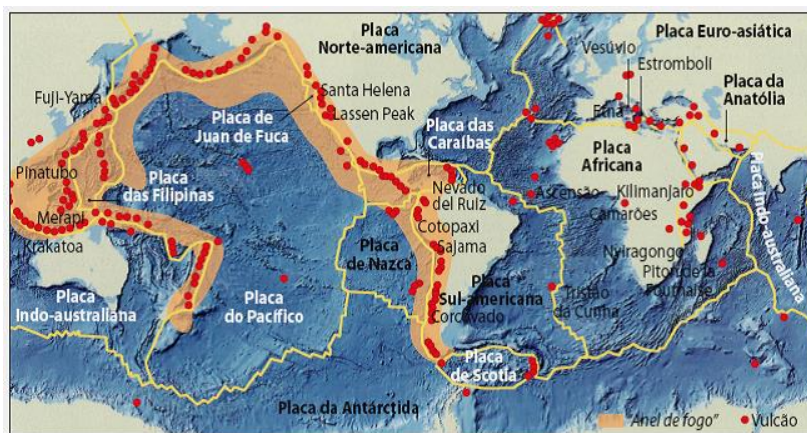


Figura 09: Placas tectônicas, Anel de Fogo e vulcões

Fonte: <http://www.monografias.com/trabajos32/placas-tectonicas/placas-tectonicas.shtml>

A espessura das placas tectônicas também admite larga diferença, variando de pouco menos de 15 quilômetros, para algumas placas jovens da litosfera oceânica, até atingir dimensões próximas a 200 quilômetros, situação encontrada em pontos de placas com maior idade geológica como na litosfera continental do continente americano (partes interiores da América do Norte e do Sul).

5.2 SUBDUCÇÃO

Zona de subducção é o nome que se dá a uma área de convergência de placas ou lajes tectônicas, onde uma destas se infiltra debaixo da outra, de acordo com a teoria da tectônica de placas (teoria da geologia que descreve os movimentos de grande escala ocorridos na litosfera terrestre). (Figura 10)

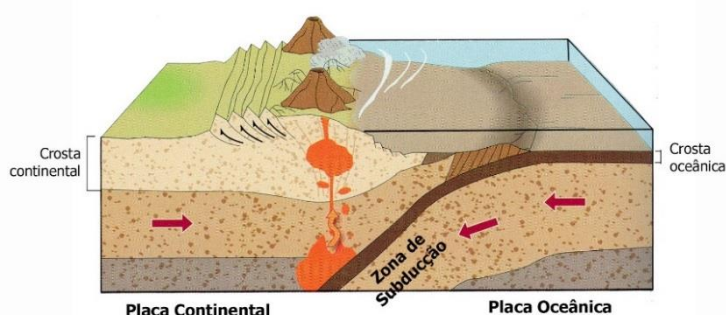


Figura 10: Criação da Zona de Subducção. As setas vermelhas indicam o sentido da movimentação das placas.
Fonte: Internet (Adaptado pelo Autor)

Segundo a cronologia geológica, é a litosfera ou placa oceânica, de maior peso, aquela que se subduz sob a litosfera continental, de menor peso específico em razão de sua maior espessura interna. Este deslocamento por debaixo da placa continental gera formação em canaleta e o desenvolvimento de fendas e desníveis (trincheiras) no piso marinho e enrugamento (fraturas) na camada superior.

5.2.1 Depósito em Zonas de Subducção

A ideia de eliminação definitiva dos resíduos radioativos nas zonas de subducção seria a deposição dos resíduos em pontos da trincheira gerada nas canaletas⁵ que atualmente existem nas mais profundas regiões submarinas da superfície da Terra.

O efeito da subducção ocorre principalmente ao longo da costa oeste da América do Sul (Chile, Equador, Colômbia, Peru), na vizinhança do Japão, das ilhas Aleutas, de Java e em regiões do Mar Mediterrâneo (HOLLISTER *et al.*, 1998)^[30]. Na Figura 11 percebe-se

⁵ *Nota do Autor:* a borda da placa principal é amassada e obrigada a formar uma cadeia montanhosa paralela à canaleta. Em mar profundo, os sedimentos da laje descendente são raspados e passam a integrar as montanhas adjacentes. Como a placa oceânica desce em direção ao manto quente (núcleo da Terra), trechos dela começam a derreter. O magma assim formado migra para cima, podendo atingir a superfície através de respiros com a erupção de lava vulcânica.

que há uma relação direta destas zonas com regiões específicas da crosta terrestre, tais como o Anel de Fogo (no oceano Pacífico) e a vizinhança de vulcões.

Embora as zonas de subducção estejam presentes num grande número de locais distribuídos por toda a superfície da Terra, determinados países não possuem acesso geográfico e geológico a tais estruturas. Daí, a necessidade do uso das canaletas em águas internacionais. Contudo, conforme o exposto, esta opção de eliminação de rejeitos nunca foi realizada devido a limitantes legais em âmbito internacional.

Porém nem toda área do solo marinho submerso apresenta-se adaptada para destino e eliminação de resíduos nucleares. Observa-se, ainda na Figura 11, quanto há de solo marinho (e respectivo subsolo) em condições de aproveitamento para repositórios.

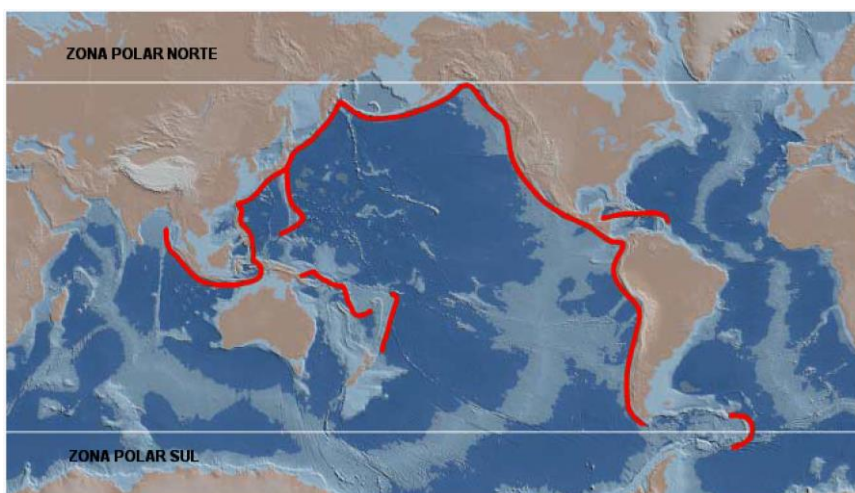


Figura 11: Representação de áreas restritas ao depósito de rejeitos nucleares
Fonte: Hollister, 1998^[30]

Nesta figura, vê-se que:

- (a) Por razões de proteção do meio ambiente são desconsiderados aqueles locais onde o fundo do mar é mais raso que quatro quilômetros (**azul claro**), porque essas áreas coincidem com os centros de propagação das placas tectônicas e, muitas vezes, são recobertos por tipos inapropriados de sedimentos.
- (b) De forma análoga ao item anterior, há uma regra impeditiva para regiões de atividade tectônica, como as placas de colisão (**vermelho**) ou vulcanismo.
- (c) Igualmente as zonas polares (latitudes superiores a 60 graus) são descartadas porque os sedimentos marinhos que normalmente contêm fragmentos grossos de rocha, com possível contaminante radioativo, podem ser transportados por icebergs.

Assim, após ponderar sobre fatores impeditivos para estas regiões, descritas em (a), (b) e (c), também indica-se um caráter restritivo para outras grandes áreas. Estas áreas são limitadas por seu interesse econômico (sabe-se, por exemplo, que a plataforma continental apresenta subsolo capaz de abrigar valiosa quantidade de óleo, gás e minerais).

Desta forma, mesmo não considerando as áreas marinhas citadas anteriormente, verifica-se ainda a existência de enormes extensões de solo marinho submerso que oferecem amplas possibilidades para deposição de resíduos nucleares (regiões do mapa em *azul escuro*).

5.2.2 Exploração Petrolífera *Offshore*

Ao longo de mais de 30 anos, a empresa nacional Petrobrás vem fazendo uso intensivo da prospecção e exploração em campos petrolíferos situados em área marinha. Estas atividades, denominadas de *offshore*, vêm exigindo o desenvolvimento de tecnologia específicas para este ambiente.

A partir de 1984, com a descoberta do campo de Albacora e outros, a Petrobrás passou a desenvolver suas atividades exploratórias em posições marinhas com lâminas d'água superiores a 300 metros (profundidades limite para o trabalho de mergulhadores) e desta forma, foi gerada uma necessidade de novas metodologias de trabalho.

Com a criação de pioneiras técnicas de produção de petróleo e gás em campos *offshore* e com novas descobertas de campos em águas profundas e ultra profundas, viu-se a necessidade da Petrobrás estabelecer programas continuados de pesquisa petrolífera (CEN-PES) garantindo o acontecimento de recordes de profundidade e produção.

Alguns campos produtivos, localizados em áreas com lâminas d'água variando entre de 350 a 650 metros, podem ser considerados verdadeiros laboratórios avançados onde a tecnologia de produção em águas profundas pode contar com o desenvolvimento e uso da automação de procedimentos bem como a adoção da robotização operacional (adoção de veículos submarinos controlados à distância).

5.2.3 Tecnologia

A tecnologia empregada na atividade *offshore* é atualmente dominada por equipamentos submarinos robotizados (veículos AUV – *Autonomous Undersea Vehicle* e ROV – *Remotly Operated Vehicle*) bem como a adoção da nanotecnologia (uso de nanotubos adesivos, reparadores e estruturais, bem como nanorrobôs).

Alguns destes veículos são vistos nas fotografias seguintes.



Fotografias 04 a e 04 b: ROV –
Remotly Operated Vehicle
Fonte: ECA Group (França)

Neste novo campo de exploração submarina de petróleo e de recursos minerais cada vez mais se intensifica o uso de equipamentos operados remotamente pois estes mostram-se mais habilitados para enfrentar os desafios das atividades petrolíferas ou de mineração. Esta qualificação tecnológica vem reduzindo o emprego de navios sondas convencionais (custo elevado: ~ US\$15.000/hora) ao longo do processo exploratório.

Outra alternativa é a utilização de plataformas robotizadas estacionárias, posicionadas no leito marinho em condições de prospecção. Isto também evita o emprego de navios sonda (prospecção) e de navios de perfuração e produção de poços (produção operacional), tornando-se solução eficiente em termos de custo de exploração submarina profunda.

6 SUB-SEABED EM ESTRATIFICAÇÃO SALINA

O procedimento de deposição geológica (*sub-seabed*) em estratificação salina permite que sejam considerados os seguintes aspectos favoráveis:

- Qualidade de acomodação do rejeito em rocha salina definida pela:
 - Estabilidade geológica do ambiente
 - Condutibilidade térmica do sal
 - Menor corrosão dos contêineres
- Segurança local estabelecida em razão da:
 - Profundidade e existência da lâmina d'água marinha
 - Dificil acessibilidade provocada por
 - Barreiras naturais
 - Complexidade de uma intrusão humana no local
 - Passividade natural (independência da ação humana após instalação do repositório)
 - Proposição de um legado futuro condizente
- Viabilidade da instalação física
 - Tecnologia (*know-how*) conhecida através da exploração *offshore*
 - Recuperabilidade possível
 - Diversidade de posicionamento geográfico
 - Águas nacionais e internacionais (alto mar)
 - Regiões marinhas com reduzidos recursos minerais e biológicos

Entretanto, também há fatores adversos a considerar tais como:

- Custo de execução e instalação (perfuração *offshore*)
- Díficeis procedimentos de transporte
- Tecnologia incipiente para recuperação e com alto custo
- Acondicionamento adequado dos rejeitos
 - Envelopamento com vitrificação
 - Tecnologia para os contêineres
 - Diâmetro das cápsulas (restrição do volume)
- Rejeição da sociedade quanto ao uso do ambiente marinho

6.1 LIMITAÇÕES

Em todos os procedimentos e instalações da área nuclear, a segurança é avaliada na condição de se sujeitar a licenciamentos específicos para efetivação dos procedimentos consoante critérios estabelecidos e revistos por uma autoridade competente.

O licenciamento de uma instalação de deposição de resíduos radioativos é muitas vezes um processo moroso e, por isso mesmo, requer o estabelecimento de uma política de curto prazo para o transporte e o armazenamento transitório dos resíduos de forma segura antes da deposição definitiva.

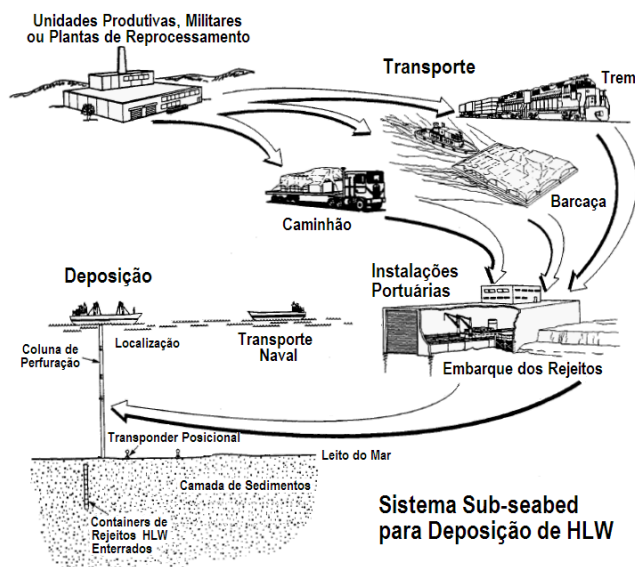


Figura 12: Ciclo de transporte do sistema *sub-seabed*

Fonte: Internet (Adaptado pelo Autor)

Desta forma, o transporte de materiais radioativos, seja por via aérea, marítima, ou terrestre, deve cumprir as exigências estabelecidas em normas específicas e adequadas à natureza do material transportado.

Fica ressaltado, desta forma, que por mais acautelado seja o procedimento de deposição final do rejeito radioativo, haverá sempre uma preocupação especial quanto ao deslocamento do material em condições seguras e confiáveis. Em havendo comprometimento da segurança do armazenamento transitório (intrusões), ou descontinuidade no procedimento de traslado do rejeito (falha do transporte), ter-se-á, nesta condição, uma limitação no confinamento do ciclo de vida do HLW/SNF.

6.2 SEGURANÇA BIOLÓGICA E AMBIENTAL

A fuga ou transferência de radionuclídeos para o exterior da área ou volume de contenção de um repositório não é realizada de forma única ou padronizada. Em decorrência das diversas maneiras como isto se processa em um repositório, verifica-se que, em comum, o impacto radiológico e a radiotoxicidade atuante no homem e em espécies vivas (biota) devem ser avaliadas de maneira particular. Em especial, deve haver preocupação quanto aos danos biológicos induzidos com a assimilação potencialmente acontecida por meio dos radionuclídeos vazados.

Cada tipo de repositório possui um ecossistema em seu entorno com uma dinâmica característica. A mecânica do que acontece neste entorno, em especial quanto à migração de radionuclídeos, sua concentração e seu processo de dispersão, é configurada como um campo da radioecologia.

A escala de tempo considerada para a segurança do depósito geológico possui dois aspectos. O primeiro consiste no intervalo de tempo que oscila de várias dezenas a poucas centenas de anos durante os quais são desenvolvidas as atividades de seleção do local do depósito.

O segundo aspecto é o longo intervalo de tempo no qual a atividade do HLW permanece como risco potencial à biosfera (conjunto total dos biomas) e, em especial, ao homem. Neste caso, o problema difere daqueles encontrados em outras partes do ciclo do

combustível nuclear. É quando o risco potencial supera a escala de tempo esperada para mais de uma ou duas gerações humanas. (WASSERMAN, 2012)^[105]

6.3 RADIOTOXICIDADE

A radiotoxicidade de um nuclídeo é uma das medidas do perigo radiológico aos seres humanos. Esta avaliação indica o modo de decaimento de cada nuclídeo (decaimentos gama, beta ou alfa), a meia-vida biológica, e a incorporação de radionuclídeos por seres vivos. Por esta razão destaca-se sua importância na observação e análise dos rejeitos radioativos originados do ciclo combustível e de outros usos (medicinal, industrial, pesquisa, *etc.*) bem como os efeitos produzidos ao meio ambiente onde se encontrem disponibilizados.

Neste aspecto, verifica-se a mudança da radiotoxicidade dos diversos componentes do inventário total dos rejeitos de qualquer natureza quando se considera os diferentes tempos de armazenamento. (KLETT, 1997)^[68]

Sabe-se que para combustíveis e seus rejeitos, as alterações da radiotoxicidade dos diferentes isótopos presentes tem correlação com o decaimento radiativo acontecido ao longo de período de tempo que vão de dez até milhares de anos. (HOLLISTER *et al*, 1981)^[29]

Como a quantidade de actínios menores (MA) no combustível diminui durante a queima, a radiotoxicidade do inventário diminui de forma semelhante. Entretanto, após os primeiros mil anos de armazenamento, os índices da radiotoxicidade das diferentes composições originadas do combustível tornam-se convergentes entre si (sempre próximos a 1% da radiotoxicidade original). Em longo prazo, a radiotoxicidade do inventário é predominantemente dependente de isótopos do plutônio e amerício.

A qualidade energética e radioativa do combustível nuclear diminui durante o tempo de armazenamento intermediário, período necessário a sua estabilização térmica (resfriamento do combustível queimado) e decaimento radioativo. Esta redução é devida ao decaimento do ^{241}Pu para ^{241}Am que são elementos físseis de meia-vida relativamente curtas.

Em termos gerais, uma alternativa para lidar com o problema dos rejeitos perigosos, que se constitui processo já praticado por alguns países, é a separação e a transmutação destes rejeitos em outros produtos de meia-vida curta ou isótopos estáveis, caso haja viabilidade para tanto.

Mesmo quando considerados os ciclos de combustível melhorados, não há como deixar de produzir certa quantidade de rejeitos radioativos (elementos com meia-vida longa). A tecnologia de transmutação tem por objetivo reduzir o inventário de actínídeos e produtos de fissão com meia-vida longa que surgem nos resíduos nucleares.

A realização deste mecanismo tecnológico permite a diminuição dos riscos associados com a gestão dos rejeitos radioativos de alta atividade, facilitando a prática de deposição intermediária ou provisória, condição tecnologicamente mais simples. De igual forma, isto implicará, como reflexo positivo, no alívio da sobrecarga estrutural sobre o meio geológico onde se dá a localização do repositório.

É evidente que a transmutação não eliminará a necessidade do depósito em formações geológicas, pois se configura impossível destruir a totalidade dos radionuclídeos existentes no HLW ou no SNF. Trata-se, portanto, de um problema perene e que exigirá a procura permanente da solução para a deposição final dos rejeitos radiativos por um longo prazo.

6.4 REJEITOS HLW E SNF

Rejeitos HLW, rejeitos nucleares termicamente quentes, apresentam-se sob múltiplas formas de resíduos: pastilhas (*pellets*) de dióxido de urânio (UO_2), vidro de boro-silicato, materiais cerâmicos ou metais. A geometria dos rejeitos após seu armazenamento por longo prazo, antes do depósito final, não difere da forma dos rejeitos obtidos imediatamente após sua geração. (MARTINS, 2011)^[71]

A geração de calor é uma das principais características do HLW. O calor é gerado em razão dos radionuclídeos contidos nos rejeitos. Considerando um combustível usado (SNF) há dez anos afastado de um reator, tem-se que ele apresenta quase 77% da energia térmica originada do decaimento do ^{137}Cs e do ^{90}Sr . Em curto prazo (tempo < 50 anos), o decaimento do ^{90}Sr e do ^{137}Cs continua a produzir a maior parte do calor global do SNF, e

os valores de potência máxima de aquecimento são experimentados durante este período de tempo. (HANSEN & LEIGH, 2011)^[24](MICHAELS, 1996)^[109]

Durante períodos superiores a 100 anos, após o abrandamento progressivo da geração de calor do ^{90}Sr e do ^{137}Cs , observa-se o decaimento alfa de diversos actínídeos⁶, principalmente Pu e Am (HANSEN & LEIGH, 2011)^[24](MICHAELS, 1996)^[109]. Assim, no contexto das temperaturas globais dos grandes volumes do repositório, verifica-se que o decaimento dos actínídeos com meias-vidas intermediárias domina a produção de longo prazo de calor e não o decaimento dos produtos de fissão como ^{90}Sr e ^{137}Cs . (HANSEN & LEIGH, 2011)^[24](MICHAELS, 1996)^[109]

6.5 ENVELOPAMENTO DE REJEITOS

A gestão de rejeitos radioativos, em todas as fases, requer a existência de barreiras de segurança (EBS). Sob este aspecto, sistemas de engenharia exigem a análise dos materiais envolvidos com a contenção restritiva dos rejeitos em condição de transporte e guarda (imobilização intermediária e definitiva). (IAEA TECDOC, 2005a)^[65]

6.5.1 Metais

Metais se prestam como sistemas de barreira em todos os projetos de repositório destinados aos resíduos de longa meia-vida. Eles serão usados na constituição de:

- contêineres (canisters e tonéis) e cobertura para resíduos vitrificados de alto nível de radioatividade e combustível usado (HLW e SNF);
- recipientes para resíduos de nível intermédio (ILW) solidificado e compactados;
- estruturas de concreto armado, em silos subterrâneos e repositórios de ILW;

⁶ Actínídeos representam cerca de 80% do calor cumulativo que é produzido ao longo dos primeiros 1.000 anos. Para prazos superiores a 1.000 anos, actínídeos contribuem com cerca de 99% do calor adicional gerado em um repositório.

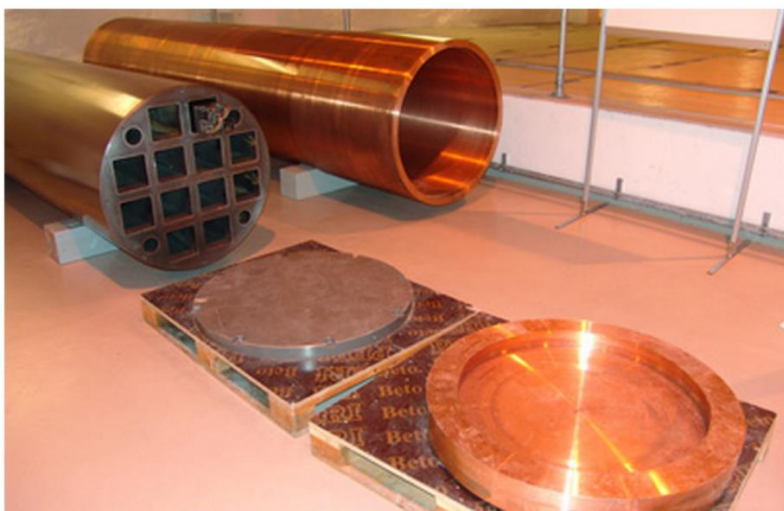
- sistemas de apoio e reforço em rocha (parafusos, redes, âncoras, chumbadores) na maioria dos ambientes geológicos.

Há, nesta categoria de material, o interesse técnico quanto a sua longevidade operacional. O conhecimento do comportamento corrosivo a longo prazo torna-se aspecto determinante para entendimento da degradação física desta natureza de contenção.

As principais vantagens deste tipo de material são definidas sobre os seguintes aspectos:

- taxas de corrosão uniforme;
- resistência à oxidação e corrosão sob tensão;
- produtos de corrosão conhecidos (propriedades e evolução com o passar do tempo);
- comportamento de dissipação térmica conhecido (dissipação do calor gerado).

Somente alguns metais, como o ferro, o aço, o cobre e o bronze possuem histórico evolutivo do seu comportamento sob corrosão ao longo de milhares de anos. Metais especiais mais novos, como por exemplo o titânio (Ti), ligas de níquel-cromo-molibdênio (Ni-Cr-Mo) ou o aço inoxidável (ligas Fe-Cr-Ni), já são utilizados no envelopamento de rejeitos mas encontram-se sob estudo quanto a sua resistência à deterioração em prazos longos (Fotografia 05).



Fotografia 05: Exemplo de contêiner metálico para contenção de SNF

Fonte: M. Zürcher (Finlândia)

6.5.2 Vidro

Rejeitos de alta atividade radioativa quando submetidos à contenção vitrificada, podem utilizar, na composição da sua matriz de envelopamento, o vidro boro-silicato.

O comportamento do vidro quando submetido às condições específicas de um repositório e a sua taxa de degradação em longos períodos de tempo são, ainda, objetos de estudo. No presente, procura-se entender os aspectos metaestáveis da lixiviação do vidro e seu potencial de retenção (alteração do material) se exposto à água circundante (subsolo).

Fatores importantes quanto ao desempenho deste tipo de material são:

- sua taxa de libertação de radionuclídeos é função do tempo após sua exposição às águas subterrâneas;
- a estrutura e a resistência posterior a lixiviação do vidro da camada pela alteração da camada de gel que se forma sobre a superfície de vidro;
- as propriedades de retenção, em potencial secundário, sobre os produtos resultantes da alteração do vidro;
- o efeito da radiação sobre os mecanismos mencionados acima.

6.5.3 Cimentos

Cimento e concreto constituem certamente o tipo de material a ser usado em todos os tipos de repositórios especificados para camadas geológicas profundas. (ALEXANDER, 1995)^[2]

Para repositórios de rejeitos com níveis de radiação baixo e intermediário, o concreto é, por si, parte estrutural integral do sistema de barreiras projetadas (composição de abóbadas, de silos ou para recipientes de contenção de rejeitos).

As condições extremamente alcalinas nestas barreiras construídas com cimento permitem que muitos radionuclídeos apresentem baixa solubilidade e a natureza gelificada do cimento e seus minerais constituem grandes áreas que funcionam como superfície de absorção e dissipação térmica.

Neste contexto, os principais objetos de interesse quanto a segurança do cimento são as seguintes:

- a durabilidade e a longevidade de suas condições de hiperalcalinidade e de baixa condutividade hidráulica;
- sua interação com rocha hospedeira circundante, afetando as suas propriedades de contenção;
- a produção de coloides nas barreiras de cimento;
- sua capacidade de absorver os radionuclídeos.

6.5.4 Imobilização

Os rejeitos radioativos não enquadrados nos parâmetros de armazenamento, não qualificados para armazenamento e transporte e, conseqüentemente, não adequados para a deposição final, devem ser submetidos ao procedimento de imobilização. Caracteriza-se pelo confinamento do resíduo com significativa atividade radioativa no interior de uma matriz sólida e monolítica, evitando-se contaminações e vazamentos. O produto resultante desta etapa deve apresentar integridade física e estabilidade mecânica e físico-química, para garantir a segurança nas etapas subsequentes da gerência de rejeitos.

Algumas matrizes, além das citadas anteriormente, destinadas à imobilização de rejeitos de níveis intermediários de radiação podem ser de betume e de polímeros específicos. A escolha de uma matriz de imobilização depende de diversos fatores, entre os quais pode-se citar sua compatibilidade química com o rejeito, sua disponibilidade comercial e seu custo, a tecnologia relacionada ao processo de imobilização e a qualidade do produto final

Por fim, toda matriz de imobilização deve apresentar facilidade de manuseio, baixo custo, boa resistência mecânica, dispor da propriedade de auto blindagem e sujeitar-se às variações térmicas, consequência da carga de calor produzida pelo rejeito.

A deposição sob o leito marinho (*sub-seabed*), tanto quanto outros esquemas deposição geológica, envolve multibarreiras (EBS) através do enterramento do rejeito de alto nível radioativo (HLW) solidificado e embalado, ou do combustível nuclear usado (irradiado) alojados em contêineres (*canister* ou tambores de alta contenção), dezenas de metros adentro de formações geológicas estáveis como as camadas salinas.

6.5.5 Meio Salino

O meio salino, devido as suas qualidades, merece destaque como escolha primária para repositório de material radioativo, por suas propriedades. Esses sedimentos evaporíticos podem deformar, dissolver e migrar, criando rotas preferenciais de fluxo (material) e gerando estruturas e trapas estratigráficas propícias à acumulação de hidrocarbonetos. Este fato é conhecido desde os primórdios da indústria do petróleo. Além desses fatores, os sais comportam-se como selos quase perfeitos permitindo estanqueidade para material acumulado abaixo deles.

Sua presença em bacias sedimentares tem importante significado econômico, tanto na fase de interpretação exploratória quanto na ação de perfuração de poços, uma vez que eles apresentam características mecânicas distintas das rochas siliciclásticas e carbonáticas. Entretanto, do ponto de vista operacional, a perfuração de algumas dessas rochas salinas está associada a um grande número de problemas de estabilidade de poços (condições de curto prazo) e a integridade de revestimentos (em longo prazo), quando comparado com outras litologias. (MOHRIAK *et al.*, 2008b)^[75]

Os sais pertencem a um grupo de rochas sedimentares chamadas evaporitos, depositados por evaporação da água do mar, e são formadas em bacias fechadas sujeitas a um clima árido e com periódicos influxos de água marinha. A precipitação do sal durante a evaporação desses influxos resultou na deposição sequencial de evaporitos estratificados. Dentre os minerais formadores dessas estratificações destacam-se a calcita (CaCO_3), a anidrita (CaSO_4), o gipso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a halita (NaCl), a silvita (KCl), a carnalita ($\text{KMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e a taquidrita ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$).

Os cloretos ou sais solúveis (halita, carnalita e taquidrita) são materiais geológicos atípicos, porque, mesmo quando submetidos a uma tensão desviadora constante, uma considerável deformação pode ser esperada como função deste componente de tensão. Este comportamento é chamado *creep* ou fluência, e pode causar a obstrução de poços perfurados em curto prazo. (MOHRIAK *et al.*, 2008b)^[75]

Esse comportamento é influenciado sensivelmente pela espessura da camada, temperatura da formação, composição mineralógica, conteúdo de água, presença de impurezas e pela tensão desviadora aplicada ao corpo salino.

Carbonatos e sulfatos são essencialmente imóveis. Os cloretos que contêm água (bischofita, carnalita e taquidrita) apresentam as maiores taxas de fluência, movendo-se para dentro do poço assim que se estabelece a cavidade cilíndrica, enquanto que a halita, o sal mais comum da natureza, é menos móvel. Contudo, a halita pode apresentar taxas de fluência consideráveis, dependendo das condições a que está submetida.

Uma curva típica de fluência dos evaporitos apresenta três estágios (Figura 13). A partir da aplicação da tensão desviatória, a taxa de deformação é muito alta. Esta deformação decresce ao longo do tempo até atingir uma taxa constante. Estes dois estágios são chamados de regime transiente e permanente de fluência ou fluência primária e secundária, respectivamente. O último estágio, chamado de fluência terciária, fica evidente pela aceleração da taxa de deformação, que causa a dilatação do arcabouço mineral da rocha pelo aumento do seu volume por meio de micro fraturas, resultando na ruptura do material. (FALCÃO *et al.*, 2008)^[19]

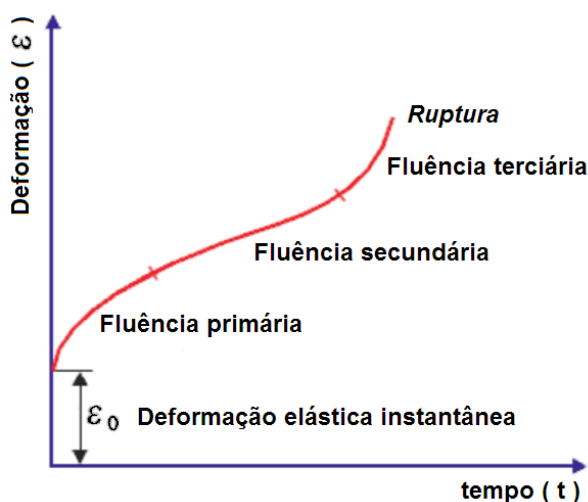


Figura 13: Curva típica de fluência do sal
Fonte: Costa, 1984^[17] (modificado pelo Autor)

Fazendo referência genericamente ao sal, subentende-se que se trata de sais solúveis (cloretos).

Executados os ensaios de fluência dos sais supra citados, quando são submetidos a tensão desviadora de 10 MPa (1.415 psi) e temperatura de 86°C, e após 160 horas de ensaio, verifica-se que as deformações axiais específicas foram, respectivamente, 0,0014; 0,055 e 0,15, ou seja, a taxa de mobilidade da taquidrita é em torno de 107 vezes maior que a da halita e, aproximadamente, 2,7 vezes maior que a da carnalita (POIATE *et al.*, 2006)^[110]. Isso faz com que a ocorrência de camadas de taquidrita na trajetória de uma perfuração seja

quase uma garantia de problemas durante a sua realização, caso medidas paliativas não estejam planejadas. (POIATE *et al.*, 2006)^[110]

Apesar disso, nem todos os sais são problemáticos. Quando o sal apresenta baixa mobilidade, passa a ser uma formação ideal para perfuração devido a sua homogeneidade, baixa porosidade, elevado gradiente de fratura e, em geral, apresentar boa taxa de penetração. (POIATE *et al.*, 2006)^[110]

Porém, mesmo depois do poço revestido, essa fluência pode causar, em longo prazo, o colapso do revestimento devido aos esforços adicionais impostos por esse confinamento mecânico, caso ele não tenha sido dimensionado para isso. Tal efeito é mais pronunciado quando há geração de cargas pontuais devido, por exemplo, à falha na cimentação (MOHRIAK *et al.*, 2008b)^[75]. Ou seja, deve-se considerar a fluência em toda a vida útil do projeto e não só na fase de perfuração. Equilibra-se este fenômeno com o preenchimento da cavidade com material que possa anular esses esforços dinâmicos do corpo salino (mesma densidade).

Além da fluência, os sais possuem outras propriedades que os diferenciam dos demais sedimentos. Eles são praticamente impermeáveis e apresentam resistência à fratura, superior à de outras formações. Assim, em uma seção homogênea não se espera perda de circulação.

Os sais têm também alta condutividade térmica (duas a três vezes superior à dos outros sedimentos), o que faz com que o gradiente geotérmico numa seção de sal seja menor do que o das formações acima e abaixo dela. (MOHRIAK *et al.*, 2008b)^[75]

Formações salinas têm naturalmente baixa permeabilidade e características auto-selantes favoráveis ao isolamento dos rejeitos. (MOHRIAK, 2008a)^[74]

Estas considerações conduzem a abordagens para representar as condições térmica, mecânica, hidrológica, geoquímicas e outras possíveis em um repositório salino de rejeitos do tipo HLW e SNF.

6.5.5.1 Condições Geoquímicas

A geoquímica no entorno de um repositório de sal é controlada pelas possíveis influências mútuas entre a formação salina e a estrutura envoltória do rejeito, avaliando-se as interações entre as embalagens de contenção do rejeito e o material de posicionamento e preenchimento do local de posicionamento definitivo do invólucro.

Na medida em que água salgada estiver disponível para reagir com estes materiais, o pH, as condições de oxirredução, a volatilidade gasosa aquosa e espécies dominante presentes poderão evoluir ao longo do tempo. Esta evolução seria influenciada pela temperatura, especialmente durante o período de tempo em que o rejeito HLW (alta produtividade térmica) estará em exposição à água salgada. (MOHRIAK, 2008a)^[74]

6.5.5.2 Armazenagem em Ambiente Salino

Procedimentos de armazenagem de rejeitos radioativos em ambiente salino já são realizadas em solo seco (*onshore*), com destacadas vantagens sobre outros manejos de rejeitos radioativos aceitos e formalizados (Figura 14 e Fotografias 06 a, 06 b e 06 c). O aproveitamento do conhecimento nesta área facilitará a visão futura quanto a “marinização” de instalações em subsolo marinho como repositório de rejeitos radioativos (Figura 11).

Tanto nas instalações de superfície como naquelas projetadas para grandes profundidades há necessidade do conhecimento das conformidades geológica e geofísica do sítio destinado ao repositório.

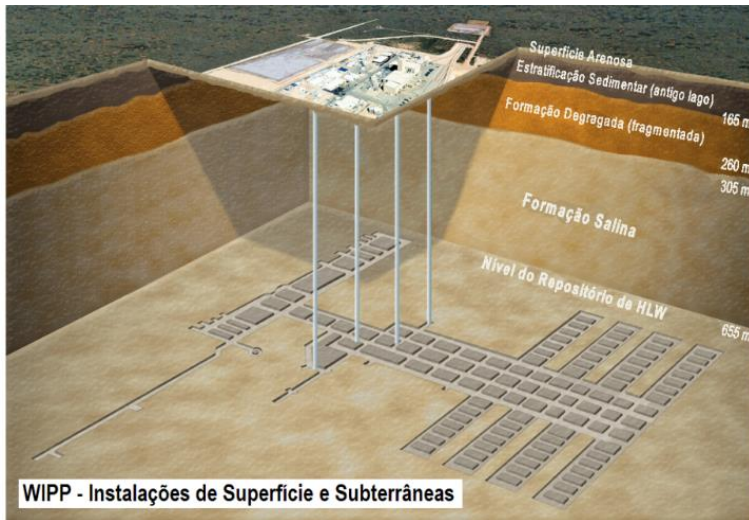


Figura 14: WIPP – *Waste Isolation Pilot Plant* (USA) localizada em solo continental.

Fonte: U.S. *Department of Energy* (DOE) (Adaptado pelo Autor)



Fotografias 06 a, 06 b e 06 c:
Armazenagem *onshore* em mina de sal (WIPP)
Fonte: U.S. *Department of Energy* (DOE)

HANSEN & LEIGH (2011)^[24] afirmam que depósito geológico salino permanece como uma das principais opções ou locais de depósito final conforme estabelecido por consenso científico internacional. Tal afirmação baseia-se na fundamentação que:

- Existem formações salinas em uma distribuição geográfica ampla, disponíveis em múltiplas regiões estáveis, com formações geológicas aptas a hospedar um repositório.
- Formações salinas tem existência por milhões de anos em áreas de baixa atividade sísmica.
- Camadas de sal podem ser facilmente mineradas. Existe extensa experiência subterrânea, incluindo operações de depósito de rejeitos transurânicos (TRU) no WIPP (USA), proporcionando a garantia de que um repositório pode ser construído e utilizado de forma segura em minas de sal.
- O sal contorna e envolve o material depositado e encapsulando-o. O movimento de infiltração salina já foi bem caracterizado para muitas aplicações.

- O sal é essencialmente impermeável. O transporte de radionuclídeos em salmoura é dificultado ao máximo, ou mesmo impossível, quando observado em estruturas ou camadas salinas não fraturadas (não fragmentadas).
- Fraturas em camadas salinas são auto-selantes. Uma zona rochosa fraturada (DPZ - *Disturbed Rock Zone*) irá curar-se como a cementação das aberturas e fraturas com seu próprio material constitutivo.
- O sal apresenta uma relativamente alta condutividade térmica, condição que permite a dissipação do calor do decaimento dos rejeitos na própria formação rochosa circundante e, assim, atenuando a temperatura dos invólucros dos rejeitos.

6.5.5.3 Vantagens da Estratificação Salina

Considerando a deposição de rejeitos de alto nível (HLW e SNF) é possível identificar o seguinte resumo das vantagens primárias para a estratificação salina:

- A mineração (ação mecânica) do sal pode ser facilmente realizada
- O sal possui uma relativamente alta condutividade térmica
- Disponível em extensa distribuição geográfica (diversos locais potenciais)
- O sal é plástico
- O sal é essencialmente impermeável
- Fraturas no sal são auto-selantes
- Estruturas de sal têm sido geologicamente estáveis por milhões de anos

Estima-se que a estratificação da camada pré-sal na região do Atlântico Sul esteja se acumulando há mais de 110 milhões de anos, quando a África e a América do Sul se separaram. Na ruptura da Pangeia formaram-se diversos depósitos sedimentares de matéria orgânica geradora do petróleo e pelo influxo da água marinha criou-se as extensas estratificações salinas (vide o item 7.1).

Em seguida é apresentada uma tabela comparativa entre meios geológicos já analisados como potencialmente aceitáveis para deposição de rejeitos HLW e SNF. Pode ser apreciada a qualificação das propriedades principais em relação a cada natureza hospedeira:

Tabela 2: Comparação qualitativa de meios geológicos como hospedeiro de repositório HLW
Adaptado de HANSEN & LEIGH, 2011^[24]

PROPRIEDADE	SAL	XISTO	GRANITO	POÇOS PROFUNDOS
Condutividade Térmica	Alta	Baixa	Média	Média
Permeabilidade	Praticamente impermeável	Muito baixa a baixa	Muito baixa (rocha contínua) a permeável (rocha fraturada)	Muito baixa
Resistência à Tensão	Média	Baixa a média	Alta	Alta
Comportamento de Deformação	Viscoplástico (deformável)	Plástico a friável	Friável	Friável
Estabilidade de Cavidades	Autoportante na escala de décadas	Requer reforço artificial	Alta (rocha contínua) a baixa (altamente fraturada)	Média a grandes profundidades
Tensão Local	Isotrópico	Anisotrópico	Anisotrópico	Anisotrópico
Comportamento de Dissolução	Alta	Muito baixa	Muito baixa	Muito baixa
Comportamento de Absorção	Muito baixa	Muito alta	Média a alta	Média a alta
Química	Redutora	Redutora	Redutora	Redutora
Resistência ao Calor	Alta	Baixa	Alta	Alta
Experiência de Mineração	Alta	Baixa	Alta	Baixa
Geologia Disponível	Extensa	Extensa	Média	Extensa
Estabilidade Geológica	Alta	Alta	Alta	Alta
Barreiras Projetadas	Mínimas	Mínimas	Atenção	Mínima

QUALIDADE FAVORÁVEL		QUALIDADE MÉDIA OU VARIÁVEL		PROPRIEDADE DESFAVORÁVEL
---------------------	--	-----------------------------	--	--------------------------

No Anexo C são expostas outras duas listas, com vantagens e desvantagens associadas à utilização de ambiente salino.

7 PERFURAÇÃO EM SAL

Na indústria do petróleo, perfurar próximo ou através de sal vem sendo feito desde os primórdios desta atividade em diversas partes do mundo: Mar do Norte, costa do Golfo, Golfo do México, Mar Vermelho, Golfo Pérsico, Oeste da África, Brasil, entre outras. (Falcão *et al.*, 2008)^[19]

Avanços tecnológicos na perfuração *offshore*, particularmente em águas profundas, e a evolução dos procedimentos de análise de perfis geológicos (2D e 3D) em solo marinho tornam-se grandes facilitadores da técnica exploratória de áreas submarinas.

O sal como sedimento é bastante peculiar, devido não só à variedade de seu comportamento, como também pelas diferentes formas geológicas com que pode ser encontrado, tais como: almofadas, diápiros, muralhas e até corpos isolados, formando o núcleo de corpos de outras rochas, chamados *rafts* tectônicos ou jangadas⁷ (Falcão *et al.*, 2008)^[19]

Em certas bacias, o sal também ocorre separado da camada-mãe (autóctone⁸), formando línguas imensas de sal alóctone⁹, cunhando sequências sedimentares mais jovens. (MOHRIAK *et al.*, 2006)^[73]

⁷ *Raft* tectônico: bloco sedimentar isolado e fraturado em sua maior extensão.

⁸ Autóctone: denominação que se dá ao sal que não sofreu deslocamento significativo em relação ao seu local original de deposição;

⁹ Alóctone: sedimento, individualizado como partícula ou fragmento, que foi gerado em um lugar e através do transporte foi depositado em outro

7.1 EXPERIÊNCIA BRASILEIRA

Até 2006, a maior espessura de sal atravessada foi na Bacia do Espírito Santo, por 364 m. Poços perfurados em terra também atravessaram algumas centenas de metros de sal na Bacia de Sergipe/Alagoas e na Bacia do Solimões. Na Bacia de Santos, em data posterior, já se atingiu 1.933 m, quebrando um recorde anterior de 848 m. (FALCÃO *et al.*, 2008)^[19]

Com o início da exploração dos prospectos subsal (estratificação mais próxima à superfície do leito marinho) nos blocos de águas profundas, camadas mais espessas de evaporitos foram encontradas. Sabe-se que em diversos ambientes marinhos de águas profundas, atingidos através de lâminas d'água de quase três mil metros, e distantes da costa litorânea, muitas vezes a prospecção de óleo e gás resulta em poços secos (áreas físicas sem aproveitamento econômico) após perfurações que atravessam camadas salinas com espessuras de até 800 metros.

Atualmente a visão geológica evoluiu muito sobre as áreas onde se encontram evaporitos. Em um destes sítios, no Andar Alagoas da margem leste brasileira, observou-se que decorrente da alta taxa de acumulação salina, foi criado um empilhamento original de alguns milhares de metros de sal (comum em algumas regiões das bacias brasileiras) com tempo de formação menor do que um milhão de anos.

Com a evolução posterior da margem, os evaporitos foram mobilizados na forma de almofadas, domos e diápiros, muitos destes com mais de sete quilômetros de altura, tendo assumido a halocinese um fundamental papel na história das bacias da margem continental.

Esta situação é também repetida na Bacia de Santos, onde espessuras similares – porém da ordem de quatro mil metros – de evaporitos (Formação Ariri) e da seção carbonática “pré-sal” (formações Barra Velha, Itapema e Piçarras) contrastam expressivamente quando numa representação em escala de tempo geológico. (MOHRIAK, 2008a)^[74].

Os processos tectônicos responsáveis pela criação destas diversas áreas sedimentares oceânicas tiveram origem durante a ruptura mesozoica do supercontinente Pangeia, em particular na formação do oceano Atlântico Sul causado pela separação de Gondwana, quando foram individualizadas as placas Africana e Sul-Americana. Trata-se da separação

espessura quanto em extensão, e que apresentam elevada estabilidade geológica e geoquímica (Figura 17). Sendo, portanto, regiões indicadas ao procedimento apresentado neste trabalho.

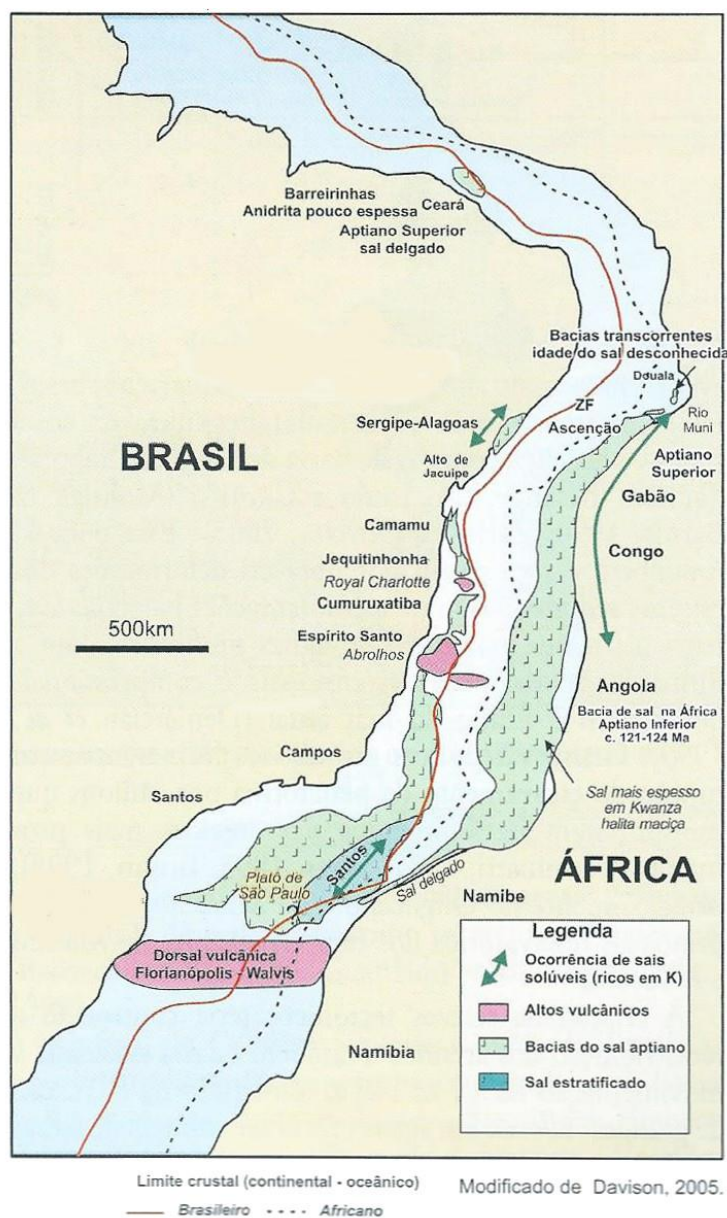


Figura 17: Distribuição de maciços salinos nas margens continentais do Atlântico Sul.
Fonte: Internet

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho tem nesta seção final a apresentação simplificada do procedimento de deposição final de contêineres de rejeitos radioativos HLW/SNF em uma camada ou estratificação salina (Figura 18).

Na figura seguinte pode ser acompanhada a sequência do procedimento:

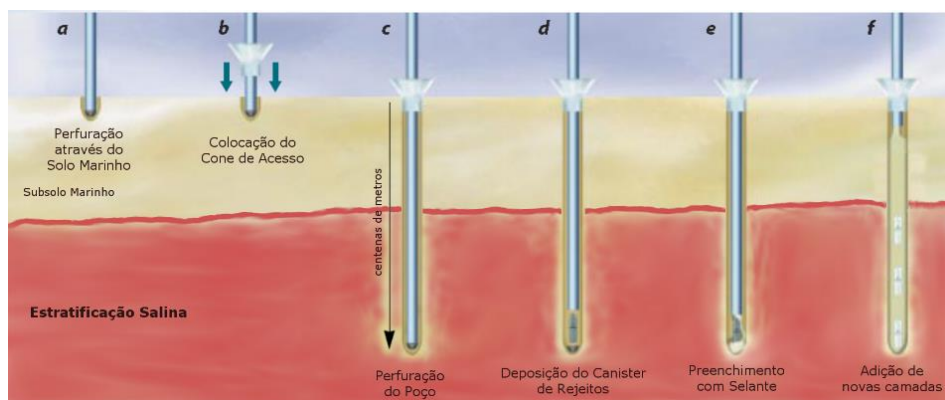


Figura 18: Procedimento *Sub-seabed* atingindo a camada salina

Fonte: Autor

- (a) Perfuração inicial da camada superficial do solo marinho, formado por deposição de sedimentos (pode ser realizada por lançamento);
- (b) Posicionamento do Cone de Acesso para direcionamento da coluna de perfuração (broca) e proteção da parte superior do poço;
- (c) Procedimento de perfuração das diversas camadas do subsolo com construção das paredes de revestimento do poço (por centenas de metros);
- (d) Após cura do revestimento e inspeção final do poço, efetivação do lançamento do primeiro canister com rejeitos;
- (e) Preenchimento e tamponamento do primeiro canister com selante (para reforço estrutural do local e para garantir dissipação térmica local);

- (f) Repetição de lançamentos de outros canisters e de substância de selagem e envolvimento da coluna de rejeitos armazenados.
- (g) A parte seguinte é o enclausuramento do poço com a obstrução e taponamento do meio salino e do poço.

8.1 CONCLUSÕES

A área nuclear, em particular, possui a particularidade de apresentar um ciclo de produção – entendido desde a mineração até o descarte final – com pleno e rigoroso controle de todas as suas fases de desenvolvimento. Regulações e controles para esta área são realizados por organismos internacionais para efeitos de todos os níveis de segurança exigidos por um processo desta natureza.

A indústria nuclear e setores que se utilizam de materiais radioativos tem, assim, um problema que é o encerramento do ciclo produtivo, ou seja, a guarda ou destino final dos rejeitos radioativos. Deve ser lembrado que tais materiais são produtos que considerados inservíveis pelo seu esgotamento de capacidade funcional, ainda possuem efeitos que se mostram prejudiciais ao meio ambiente e ao ser humano se dispostos sem a devida proteção.

Desta forma, entende-se que o procedimento apresentado, a deposição de rejeitos radiativos de alto nível (HLW), combustível nuclear usado (SNF) e rejeitos de meia-vida longa em depósitos situados em grande profundidade sob o leito marinho, no interior de rochas evaporíticas de halita, assume o aspecto de ser uma estratégia viável, segura e com a real possibilidade de ser levada a estudo em atualizado nível técnico, político e social.

Pauta-se esta possibilidade no conhecimento científico desenvolvido nos projetos pilotos de depósitos em minas de sal e dos resultados alcançados no estágio atual do prospecto exploratório da indústria do petróleo e gás em águas profundas e ultra profundas.

Por fim, este trabalho vem estimular um novo estudo sobre uma velha ideia (lançar dejetos radioativos no mar). Estudo que deve ser reavivado tecnologicamente, porém pautado sobre uma avançada perspectiva ecológica e ética (proteção ao meio ambiente e ao homem) e que apresente um aspecto tecnologicamente mais evoluído no manejo de rejeitos

radioativos (segurança processual e institucional) em sítios geológicos profundo onde hajam estratificações salinas.

É importante ressaltar que, hoje, os resíduos nucleares não se constituem num problema espinhoso qual se pensava no século passado. O tratamento de rejeitos radioativos apresenta-se como um problema em escala menor do que outros resíduos relacionadas a outras formas de energia (WRIGHT & CONCA, 2007)^[112].

Conforme apresentado neste trabalho, o processo de depósito de rejeitos nucleares em sítio geológico profundo (DGD) mostra-se perante a comunidade científica como correto e não caro. Segundo MC EWEN (1995)^[113], o DGD tem a possibilidade de ser totalmente financiado pelos fundos e reservas existentes para custeio do armazenamento de rejeitos nucleares para o qual todas as instalações nucleares contribuem ordinariamente.

Ampliando esta visão *onshore* para o ambiente *sub-seabed*, há de ser observada a viabilidade do procedimento proposto neste trabalho quando atendidas as principais características para este repositório geológico em profundidade em estratificação salina. Quais sejam: (i) a camada salina deve apresentar uma hidrogeologia simples; (ii) o passado geológico do sítio deve ser estável; (iii) a área deve ter seu comportamento tectônico perfeitamente interpretável; (iv) possuir uma proteção robusta assegurada e sem qualquer tipo de desperdícios (nenhum processo difícil ou exótico necessário); (v) mínima confiabilidade nas barreiras criadas (EBS) para evitar despesas excessivas com consequência de modelos de avaliação complexos; (vi) desempenho do repositório independente do invólucro do rejeito (um único contêiner deve atender as exigências de transporte, manipulação e posicionamento no repositório); (vii) tratar-se de uma região geográfica, em mar aberto e profundo, sem proximidade de infraestrutura sociopolítica e econômica (cidade ou local de exploração econômica) e condição potencialmente segura para efeito de invasões ou intrusões.

8.2 RECOMENDAÇÕES

Enquanto soluções seguras e sustentáveis são implementadas ou estão em desenvolvimento ao redor do mundo, interessante destacar a regra de que, no campo da segurança, nunca é suficiente simplesmente reproduzir a mesma solução em um local diferente.

Assim, como proposta genérica para a evolução deste trabalho, temos:

1. Identificar e estudar a influência de outros parâmetros do ambiente marinho e seu subsolo, e em particular da estratificação salina.
2. Identificar o aproveitamento e adaptação dos procedimentos em uso na indústria *offshore* de petróleo para perfurações em águas profundas. E, por consequência, o desenvolvimento de métodos que permitam aumentar a eficiência das operações complementares.
3. Desenvolvimento de envelopamento único e apropriado a este tipo de rejeitos radioativos.

Um outro aspecto teórico a ser considerado consiste no desenvolvimento de base técnica para a modelagem de comportamento do depósito de HLW/SNF em ambiente salino. Especificamente sobre este último componente, tornam-se necessários estudos dos itens agrupados na lista que se segue:

1. Resposta da região adjacente ao ambiente salino para forças térmicas e mecânicas combinadas
2. Consolidação dos materiais de preenchimento
3. Disponibilidade e circulação de água salgada
4. Mecanismos de transporte da fase de vapor
5. Controle de solubilidade de radionuclídeo em sal
6. Mecanismos de transporte de potenciais radionuclídeos
7. Degradação da embalagem e/ou geometria dos resíduos
8. Geração de gases e acúmulo de pressão
9. Minimização do peso da embalagem dos resíduos
10. Radiólise do material e da embalagem dos resíduos e do sal
11. Alterações climáticas do ambiente marinho

Encerrando, alertamos que qualquer metodologia proposta para avaliar a viabilidade deste tipo de repositório certamente deve incluir a definição clara dos objetivos, das condições limites e quais estratégias de segurança devem ser obedecidas.

9 REFERÊNCIAS

- [1] AKOBENG, A. K., Understanding systematic reviews and meta-analysis, Arch Dis Child, 2005 v. 90 p. 845-849.
- [2] ALEXANDER, W. F., Natural cements: How can they help us safely dispose of radioactive waste?, Radwaste Magazine, American Nuclear Society, September 1995, v. 62
- [3] BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C., Estatística para cursos de engenharia e informática, São Paulo: Ed. Atlas, 2004
- [4] BEYEA, S. C.; NICOLL, L. M., Writing an integrative review, AORN Journal, 1998 v. 67 n. 4 p. 877-880
- [5] BRASIL-LEXML, Dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e dá outras providências, Lei nº 10.308, de 20 de Novembro de 2001 URL: <http://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:federal:lei:2001-11-20;10308>
- [6] BRASIL-LEXML, Promulgação das emendas aos anexos da convenção sobre prevenção da poluição marinha causada pelo alijamento no mar de resíduos e outras matérias, Decreto nº 6.511, de 17 de Julho de 2008 URL: <http://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:federal:decreto:2008-07-17;6511>
- [7] CARTER, J. T.; HANSEN, F.; KEHRMAN, R.; HAYES, T., A generic salt repository for disposal of waste from a spent nuclear fuel recycle facility. Aiken, SC: Savannah River National Laboratory, 2011, SRNL-RP-2011-00149 Rev. 0
- [8] CHAND, V.; ROSENFELDT, F. L.; PEPE, S., The publication rate and impact of abstracts presented at the cardiac society of australia and new zealand (1999–2005), Heart, Lung and Circulation Journal, October 2008, v. 17 n. 5 p. 375-379 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hlc.2008.02.005>
- [9] CHAPMAN, N. A.; NEALL, F. B., Geological disposal options for high-level waste and spent fuel, Galson Sciences Limited, final report to NDA-RWMD, 2008 Available at www.nda.gov.uk
- [10] CIRIBELLI, M. C., Projeto de pesquisa: um instrumental da pesquisa científica, Rio de Janeiro: Ed. 7Letras, 2000
- [11] CNEN, IN-DRS 010 – Rev. 03 – Requisitos de segurança para depósitos finais de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação (Safety requirements for low and intermediate level radioactive waste disposal facilities), May 2007
- [12] CNEN, National report of Brazil for the 4th review meeting, outubro 2011, URL: http://www.cnen.gov.br/seguranca/documentos/Waste_final_11.pdf
- [13] CNEN, NE 6.02 Licenciamentos de instalações radiativas – (Licensing of radioactive installations), July 1998
- [14] CNEN, NE 6.05 Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas - (Radioactive waste management in radioactive facilities), December 1985 (Currently under review)
- [15] CNEN, NE 6.06 Seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos - (Site selection for radioactive waste storage facilities), December 1989
- [16] CNEN, NN 6.09 Critérios de aceitação para deposição de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação - (Acceptance criteria for disposal of low and intermediate level radioactive wastes), Setember 2002
- [17] COSTA, A. M.; POIATE, E., Acompanhamento dos ensaios de fluência sobre amostras de rocha halita: projeto 600102: período de julho a outubro de 2002, Report RT/MC-009, Rio de Janeiro: Petrobrás - Cenpes. PDP. MC, 2003
- [18] DIVINS, D. L., Total sediment thickness of the world's oceans & marginal seas, NOAA National Geophysical Data Center, Boulder, CO, 2003.

- [19] FALCÃO, J. L. (Editor) et al., Perfuração em Formações Salinas, Rio de Janeiro: Boletim Técnico da Produção de Petróleo, 2008 v. 2 n. 2 p. 261 – 286
- [20] GANONG, L. H., Integrative reviews for nursing, Rev. Research in Nursing & Health. v. 10 p. 1-11, 1987 in MOI, R. C., Envelhecimento do sistema tegumentar: revisão sistemática da literatura. Ribeirão Preto: Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Enfermagem. USP, Ribeirão Preto, 2004.
- [21] GREENHALG, T., Getting your bearings (deciding what the paper is about), BMJ - British Medical Journal, n. 315 p. 243-246, 1997a
- [22] GREENHALG, T., Papers that summarize other papers (systematic reviews and metanalysis), BMJ - British Medical Journal, v. 315, p. 672-675, September 1997b URL: <http://www.bmj.com/collections/red.shtml> (desabilitado) DOI: <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.315.7109.672> (Published 13 September 1997).
- [23] GUSSOW, W. C., Salt diapirism: Importance of temperature and energy source of emplacement, in Braunstein, J. & O'Brien, G. D. (eds.), 1968: Diapirism and Diapirs, Mem. Am. Assoc. Petrol. Geol., 8 pp. 16-52
- [24] HANSEN, F. D.; LEIGH, C. D., Salt disposal of heat-generating nuclear waste, Sandia Report, SAND2011-0161, Printed January 2011, URL: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2011/110161.pdf> http://www.Sandia.gov/SALT/SALT_Home.html; 2011
- [25] HARBOUR, R.; MILLER, J., A new system for grading recommendations in evidence based guidelines, BMJ - British Medical Journal, 2001 n. 323 p. 334-336
- [26] HARDIN, E. (SNL); FRATONI, M.; BLINK, J.; GREENBERG, H.; SUTTON, M. (LLNL); CARTER, J.; DUPONT, M. (SRNL); HOWARD, R. (ORNL), Generic repository design concepts and thermal analysis (FY11). SAND2011-6202, August 2011; SAND2011-9422C, January 2012
- [27] HINGA, K. R.; HEATH, G. R.; ANDERSON, D. R.; HOLLISTER, C. D., Disposal of high-level radioactive wastes by burial in the sea floor, Environ. Sci. Technol., U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, 1982, v. 16 (1)
- [28] HINGA, K. R.; SILVA, A. J. Instrumentation development for research on subseabed disposal of radioactive wastes, IEEE Journal of Oceanic Engineering, American Geosciences Institute, 1985, v. 10 (1) p. 2 [Periódico revisado por pares] ISSN: 0364-9059
- [29] HOLLISTER, C. D.; ANDERSON, D. R.; HEATH, G. R., Sub seabed disposal of nuclear waste, 18 September 1981, Revista Science, v. 213 n. 45141 – URL: www.sciencemag.org on 21 September 2011
- [30] HOLLISTER, C. D.; NADIS, S., Burial of radioactive waste under the seabed, Scientific American, January 1998
- [31] IAEA INFCIRC/205/Add. 1, Convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matter, provisional definition and recommendations concerning radioactive wastes and other radioactive matter referred to in annexes I and II to the convention, Vienna: IAEA, 1975
- [32] IAEA INFCIRC/640, Multilateral approaches to the nuclear fuel cycle, Vienna: IAEA, 2005
- [33] IAEA RDS-1/33, Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050, 2013 Edition, Reference Data Series No. 1, Vienna: IAEA, August 2013, 53 pp ISBN 978-92-0-111910-0 ISSN 1011-2642 URL: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-1-33_web.pdf
- [34] IAEA RDS-2/33, Nuclear power reactors in the world, 2013 Edition, Reference Data Series No. 2, Vienna: IAEA, 2013, 80 pp. 6 figures ISBN 978-92-0-144110-2 ISSN 1011-2642 URL: <http://www.iaea.org/PRIS/Publications.aspx>
- [35] IAEA RDS-2/34, Nuclear power reactors in the world, 2014 Edition, Reference Data Series No. 2, Vienna: IAEA, May 2014, 79 pp. 6 figures ISBN 978-92-0-104914-8 ISSN 1011-2642 URL: <http://www.iaea.org/PRIS/Publications.aspx>
- [36] IAEA, Radioactive waste management an IAEA source book, 1991 & IAEA Bulletin 40, 1; 1998

- [37] IAEA, Classification of radioactive waste, Vienna: IAEA Safety Series No. 111-G-1.1, 1994
- [38] IAEA, The principles of radioactive waste management, Vienna: IAEA Safety Series No. 111-F, 1995a
- [39] IAEA, Design of spent fuel storage facilities, Vienna: IAEA Safety Series No. 116, 1995b
- [40] IAEA, Safety assessment for spent fuel storage facilities, Vienna: IAEA Safety Series No. 118, 1995c
- [41] IAEA, Energy, safety assessment for near surface disposal of radioactive waste: safety guide, Vienna: Safety Standards Series No. WS-G-1.1, 1999
- [42] IAEA, Organisation and staffing of the regulatory body for nuclear facilities, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. GS-G-1.1, 2002a
- [43] IAEA, Review and assessment of nuclear facilities by the regulatory body, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. GS-G-1.2, 2002b
- [44] IAEA, Regulatory inspection of nuclear facilities and enforcement by the regulatory body, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. GS-G-1.3, 2002c
- [45] IAEA, Documentation for use in regulating nuclear facilities, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. GS-G-1.4, 2002d
- [46] IAEA, Predisposal management of low and intermediate level radioactive waste, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. WS-G-2.5, 2003
- [47] IAEA, Scientific and technical basis for geological disposal of radioactive wastes, Vienna: Technical Reports Series No. 413, 2003
- [48] IAEA, Regulations for the safe transport of radioactive material, 1996 Edition (as amended 2003), Vienna: IAEA Safety Standards Series No. TS-R-1, 2004
- [49] IAEA, Safety glossary : terminology used in nuclear safety and radiation protection, 2007 edition, Vienna: IAEA STI/PUB/1290, 2007 p. 227 ISBN 92-0-100707-8
- [50] IAEA, The management system for the disposal of radioactive waste, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. GS-G-3.4, 2008
- [51] IAEA, Classification of radioactive waste: safety guide, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. GSG-1, 2009a
- [52] IAEA, Borehole disposal facilities for radioactive waste, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. SSG-1, 2009b
- [53] IAEA, Geological disposal of radioactive waste: technological implications for retrievability, Vienna: IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.19, 2009c
- [54] IAEA, Geological disposal facilities for radioactive waste: specific safety guide, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. SSG-14, 2011a
- [55] IAEA, Disposal of radioactive waste, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, 2011b
- [56] IAEA, Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards - interim edition, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (Interim), 2011c
- [57] IAEA, Identification of vital areas at nuclear facilities: technical guidance, Vienna: IAEA Nuclear Security Series No. 16, 2012a
- [58] IAEA, The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. SSG-23, 2012b
- [59] IAEA, Near surface disposal facilities for radioactive waste, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. SSG-29, 2014a
- [60] IAEA, Monitoring and surveillance of radioactive waste disposal facilities, Vienna: IAEA Safety Standards Series No. SSG-31, 2014b
- [61] IAEA, Power reactor information system, Brazil nuclear power profiles, Vienna: IAEA-PRIS, URL: <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Brazil/Figures/BRAZIL%20CNPP.pdf>

- [62] IAEA, Power reactor information system, Country nuclear power profiles, Vienna: IAEA-PRIS, URL: <http://www.iaea.org/PRIS/home.aspx> <https://cnpp.iaea.org/pages/index.htm>
- [63] IAEA TECDOC-1105, Inventory of radioactive waste disposals at sea, Vienna: IAEA, 1999 ISSN: 1011-4289
- [64] IAEA TECDOC-1413, Developing multinational radioactive waste repositories: infrastructural framework and scenarios of cooperation, Vienna: IAEA, 2004
- [65] IAEA TECDOC-1481 , Anthropogenic analogues for geological disposal of high level and long lived waste, Final report of a coordinated research project 1999–2004, Vienna: IAEA, 2005a ISBN 92–0–113105–4 ISSN 1011–4289
- [66] IAEA TECDOC-1482, Technical, economic and institutional aspects of regional spent fuel storage facilities, Vienna: IAEA, 2005b
- [67] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO), KnowledgeCentre, Londres: 1990 URL: http://www.imo.org/KnowledgeCentre/ReferencesAndArchives/IMO_Conferences_and_Meetings/London_Convention
- [68] KLETT, R. D., Performance assessment overview for sub-seabed disposal of high level radioactive waste, SAND93-2723, USA: Sandia National Laboratories, 1997
- [69] LEDERBERGER, J.; ZUCKERMAN, H., Postmature scientific discovery. *Nature*, 1986 v. 324 p. 629-631
- [70] MARINE POLLUTION BULLETIN, Ocean disposal of radioactive wastes to be studied, *ScienceDirect Journals (Elsevier)*, May1988, v. 19 n. 5, p. 198-199 [periódico revisado por pares] 7 April 2003, ISSN: 0025-326X; DOI: 10.1016/0025-326X(88)90227-5
- [71] MARTINS, V. B., Material de estudo e notas de aulas: Gerenciamento de rejeitos radioativos, Rio de Janeiro: 2011
- [72] MEACHAM, P. G. (Raytheon Ktech.), Performance assessment methodology for long-term environmental programs : the history of nuclear waste management, Sandia National Laboratories, 2011 DOI:10.2172/1031300
- [73] MOHRIAK, W. U.; SZATMARI, P.; Breve história do sal nas civilizações, Petrobrás/Ed. Beca, 2006
- [74] MOHRIAK, W. U., Tectônica de sal na margem sudeste brasileira, sal: geologia e tectônica, Petrobrás/Ed. Beca, 2008a
- [75] MOHRIAK, W. U.; SZATMARI, P.; COUTO ANJOS, S. M., Sal: geologia e tectônica – exemplos nas bacias brasileiras, Petrobrás/Ed. Beca, 2008b
- [76] MOI, R. C., Envelhecimento do sistema tegumentar: revisão sistemática da literatura. Ribeirão Preto: Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Enfermagem. USP, Ribeirão Preto, 2004.
- [77] MULROW, C. D., Systematic reviews: rationale for systematic reviews. *BMJ - British Medical Journal*, 1994 v. 309 p. 597-599
- [78] MULROW, C. D.; COOK, D. J.; DAVIDOFF, F., Systematic reviews: critical links in the great chain of evidence, *Annals of Internal Medicine*, 1997, v. 126 n. 5 p. 389-391
- [79] NADIS, S., Sub-seabed solution: ... a promising solution to the radioactive-waste problem faces stiff opposition, *The Atlantic*, Cengage Learning, Inc., Oct, 1996, v. 278 (4) p. 23,30+ ISSN: 1072-7825
- [80] NAYLOR, D., Metanalysis and meta-epidemiology of clinical research, *BMJ - British Medical Journal*, 1997 v. 315 p. 617-619 46
- [81] NDA, Standardized range of disposal canister designs for legacy spent fuel an HLW, Report No. 18186857, Revision 2, January 2013
- [82] NIREX, Specification for waste packages containing vitrified high-level waste and spent nuclear fuel, Nirex Report No. N/124, 2005

- [83] NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA), Radioactive waste management in perspective, OECD NEA, 1996
- [84] NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA), Geological disposal of radioactive waste - review of developments in the last decade, OECD NEA, 1999
- [85] NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA), Advanced nuclear fuel cycles and radioactive waste management, Paris: OECD NEA No. 5990, 2006
- [86] NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA), Moving forward with geological disposal of radioactive waste, Paris: OECD, NEA No. 6433, 2008 URL: <http://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2008/nea6433-statement.pdf>
- [87] PETROBRAS, Informações do mini-site Pre-sal, 2009 URL: <http://sites.petrobras.com.br/mini-site/presal/perguntas-respostas/index.asp>
- [88] PETROBRAS, informações do mini-site Pre-sal, 2009 URL: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>
- [89] ROCHA, L. A. S. et al, Perfuração direcional, Rio de Janeiro: Interciência, Petrobrás, IBP, 2011
- [90] ROMANATO, L. S., Advantages of dry hardened cask storage over wet storage for spent nuclear fuel, International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011, Belo Horizonte, MG, Brazil, October 24-28, 2011, Associação Brasileira de Energia Nuclear – ABEN ISBN: 978-85-99141-04-5
- [91] SAMPAIO, R. F; MANCINI, M. C., Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica, São Carlos: Departamento de Fisioterapia, Revista Brasileira de Fisioterapia, jan/fev 2007, v. 11 n. 1 p. 83-89 tab., ISSN 1413-3555, URL: <http://portal.revistas.bvs.br/index.php?issn=1413-3555&lang=pt>
- [92] SANTOS-OLIVEIRA, Ralph, Revisão sistemática e radiosensitividade gama de plantas medicinais: desenvolvimento de protocolo para controle de qualidade, Mestrado em Tecnologias Energéticas Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Brasil, Ano de Obtenção: 2006
- [93] SANTOS-OLIVEIRA, Ralph, Utilização da revisão sistemática com metanálise como metodologia padronizada para o desenvolvimento de formulário nacional em radiofarmácia: formação de uma modelo de protocolo técnico-científico e referência nacional, Doutorado em Biotecnologia - RENORBIO, Universidade Estadual do Ceará, 2006/2008
- [94] SANTOS-OLIVEIRA, Ralph; COLAÇO, W.; COULAUD-CUNHA, S.; CASTILHO, S. R., Revisão sistemática em fitoterapia: padronização internacional de qualidade, Revista Brasileira de Farmacognosia (Impresso), 2007, v. 17 p. 271-274
- [95] SASSANI, D. C.; CRISCENTI, L. J. (Sandia National Laboratories) et alli., Waste form degradation model integration for engineered materials performance, FCRD-UFD-2014-000051 / SAND2014-18301 R, August 22, 2014, Prepared for U.S. Department of Energy Used Fuel Disposition Campaign
- [96] SAVAGE, D. (editor), The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste, John Wiley & Sons Ed., West Sussex, 1995.
- [97] SCHALLER, K. H., Feasibility of disposal of high-level radioactive wastes into the seabed: Engineering, 1988 URL: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/7243924>
- [98] SEARLE, R. C., Feasibility of disposal of high-level radioactive wastes into the seabed: Geoscience characterization studies, 1988 URL: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/5459401>
- [99] SPIEGELBERG-PLANER, R.; MANDULA, J., The power reactor information system (PRIS) and its extension to non-electrical applications, decommissioning and delayed projects information, IAEA Technical Reports Series Report v. 428, 2005
- [100] TALBERT, D. M., Subseabed radioactive waste disposal feasibility program: ocean engineering challenges for the 80's, 1980 URL <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/5168453>
- [101] UN (ONU), 7a Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate change, Kyoto: UNFCCC, 11 December 1997 URL: [https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume 1527/v1527.pdf](https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%201527/v1527.pdf) http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php

- [102] UNIFESP Virtual, Curso de Revisão Sistemática e Metanálise, Aldemar A. Barros (Coord.), Universidade Federal de São Paulo, 2004 URL: <http://www.virtual.unifesp.br/home/card.php?obj=14>
- [103] US NRC, Disposal of high level radioactive wastes in geologic repositories, Code of Federal Regulations, Title 10, Part 60
- [104] US NRC, Licensing requirements for land disposal of radioactive waste, Code of Federal Regulations, Title 10, Part 61.
- [105] WASSERMAN, M. A. V., notas de aula, IEN, Rio de Janeiro, 2012
- [106] WHITE, M. J.; HICKS, T. W.; MACKENZIE, J. (Areva RMC); MCKINLEY, I. (MCM Consulting); WILSON, J. (Quintessa); Geological disposal concept options for spent fuel, Report of Gallson Sciences Ltd., 9 January 2013
- [107] PRESS, F. et al., Para entender a Terra, 4ª ed., Porto Alegre: Bookman, 2006
- [108] KELLER, W; MODARRES, M, A historical overview of probabilistic risk assessment development and its use in the nuclear power industry, Rev. Reliability Engineering and System Safety, Elsevier, 2005 n. 89 p. 271-285
- [109] MICHAELS, G.E., Thermal issues with the us high-level waste repository and the potential benefits of waste transmutation, CONF-9511196-3. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1996 URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/060/27060264.pdf?origin=publication_detail
- [110] POIATE, E.; COSTA, A. M.; FALCÃO, J. L., Well design for drilling through thick evaporite layers in Santos basin, Brazil. In: Society of Petroleum Engineers. International Association of Drilling Contractors. Drilling Conference, Miami: Society of Petroleum Engineers, 2006. Paper SPE 99161
- [111] POTAPOVA, M. S., Geology as a historical science of nature. In: The Interaction of Sciences in the study of the Earth, Trad. V. Talmy. Moscou: Progress, 1968 p. 117-126, Versão traduzida in Terræ Didactica, 2001, v. 3 n. 1 p. 86-90 URL: <http://www.ige.unicamp.br/terraedidactica/>
- [112] WRIGHT, J.; CONCA, J. L., The geopolitics of energy: achieving a just and sustainable energy distribution by 2040, BookSurge Publishing: North Charleston, SC, 20 November 2007. ISBN 1-4196-7588-5
- [113] MC EWEN, T., Selection of waste disposal sites. Chapter 7 in the Scientific and Regulatory basis for the Geologic Disposal of Radioactive Waste, D. Savage, ed. John Wiley & Sons: New York, 1995 pp. 201-238

10 GLOSSÁRIO

- ✓ **Área preliminar de interesse** - área identificada dentro da região de interesse, não excluída pela análise regional e a ser investigada para identificação de áreas potenciais.
- ✓ **Armazenamento de material radioativo ou de rejeitos radioativos** - confinamento de material radioativo ou de rejeitos radioativos por um determinado período de tempo.
- ✓ **Barreira de engenharia** - construção feita com materiais específicos e adequados para reter, retardar ou minimizar a lixiviação de radionuclídeos da contenção do repositório para o meio ambiente circunvizinho (EBS).
- ✓ **Combustível nuclear** - Material físsil ou fissionável utilizado num reator nuclear para produzir energia, em uma composição tal que, quando colocado em um reator nuclear, possibilita uma reação de fissão em cadeia autossustentada, produzindo calor de maneira controlada pelo uso do processo.
- ✓ **Combustível nuclear usado** - Combustível nuclear que já foi usado no reator nuclear e removido do seu núcleo, ficando armazenado em local apropriado para sua futura reutilização ou reprocessamento.
- ✓ **Deposição de rejeitos radioativos** - colocação de rejeitos radioativos em instalação licenciada pelas autoridades competentes, sem a intenção de removê-los.
- ✓ **Depósito intermediário ou armazenagem temporária** - local, com todos os requisitos de segurança, usado para acolher temporariamente embalados com rejeitos radioativos.
- ✓ **Depósito de rejeitos radioativos** (ou simplesmente **depósito**) - edificação ou local adequado para armazenamento (inicial ou intermediário) ou deposição (final) de rejeitos radioativos.
- ✓ **Depósito final** (vide **repositório**) - depósito licenciado, destinado a receber e armazenar, em observância aos critérios estabelecidos pelas autoridades competentes, rejeitos radioativos, sem a intenção de removê-los.
- ✓ **Impacto ambiental** - qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetem: a saúde, a segurança e o bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais.
- ✓ **Lixiviação de radionuclídeos** - é o processo pelo qual os radionuclídeos presentes no rejeito que foi imobilizado são transferidos para o meio ambiente, tendo como meio de transferência a água. É um processo químico influenciado pela característica química do rejeito, matriz de solidificação, outras barreiras de engenharia e da própria água.
- ✓ **Migração de radionuclídeos** - movimento de radionuclídeos através de diversos meios por causa do escoamento de um fluido e/ou do fenômeno da difusão.

- ✓ **Recuperabilidade** - indica a possibilidade de inverter a ação de deposição de resíduos (ou rejeitos). Trata-se, portanto, de um caso especial de reversibilidade. É o potencial de recuperação, isto é, a ação de recuperação do acondicionamento de resíduos ou rejeitos.
- ✓ **Rejeitos acondicionados** ou **envelopados** - rejeitos radioativos transformados para uma forma adequada ao transporte e/ou estocagem e/ou depósito final. As operações do acondicionamento podem incluir a transformação do rejeito para outra forma, isolando o rejeito em recipientes e embalagens adicionais.
- ✓ **Repositório** ⁽¹⁾ - instalação superficial ou subterrânea na qual são colocados rejeitos radioativos para deposição final.
- ✓ **Repositório** ⁽²⁾ ou **depósito final** - instalação licenciada pelas autoridades competentes e destinada à deposição dos rejeitos radioativos provenientes de depósitos iniciais, intermediários ou provisórios, em observância aos critérios estabelecidos pelo organismo regulador.
- ✓ **Resíduo Radioativo** - Qualquer substância remanescente, gerada em instalações nucleares ou radiativas, que contenha radionuclídeos e para a qual a reutilização é possível, em conformidade com os requisitos de proteção radiológica estabelecidos pelo organismo regulador.
- ✓ **Reversibilidade** - denota a possibilidade de inverter uma série de etapas no planejamento ou desenvolvimento em qualquer fase do programa de um repositório. Trata-se da revisão e, se necessário, reavaliação de decisões anteriores, bem como os meios (técnicos, financeiros, etc.) para inverter uma etapa.
- ✓ **Sítio potencial** ou **área potencial** - área contida na área preliminar, identificada como potencialmente satisfatória para abrigar um repositório para rejeitos radioativos, através da aplicação de critérios técnicos restritivos e estudos técnicos específicos.

11 ANEXOS

11.1 ANEXO A

NATIONAL REPORT OF BRAZIL FOR THE 4th REVIEW MEETING

CNEN – October 2011

Section G - Safety of Spent Fuel Management

(Segurança no Gerenciamento do Combustível Nuclear Usado)

G.7.1 - FUEL FROM NUCLEAR POWER PLANTS

The technical solution regarding reprocessing or disposal of spent fuel has not been taken in Brazil. This solution may take some time, until international consensus is achieved. Meanwhile, Brazil continues to monitor the international situation. For Angra-1 and 2, as well as for Angra-3, in the future, an additional wet storage facility for spent nuclear fuel is being foreseen, in order to complement the current on-site storage capacity of the plants. This facility will be under ETN responsibility as a complementary and initial storage facility of the plant. Regarding the long term storage of Spent Nuclear Fuel, CNEN, in partnership with ETN, is considering the technical solution of a safety dry storage away from reactor. Actually, the solution envisaged considers to envelop the SNF in a welded canister and emplace it in an interim long-term under surface storage facility. The technical viability of this SNF conditioning is supposed to be tested in a demonstration plant to be erected by CNEN and ETN still in this decade.

G.7.2 - FUEL FROM NUCLEAR REACTORS

On November, 2007, 33 spent fuel elements stored in the pool of the IEA-R1 (IPEN – SP) reactor and containing uranium of US origin were shipped back to Savannah River Laboratory, South Carolina, USA. This operation, which was very similar to the one concluded in 1999, when 127 spent fuel elements were shipped back to the USA, used a different transport cask (LWT) supplied by the US company NAC.

11.2 ANEXO B

Características a serem avaliadas como parâmetros para implantação de repositórios de rejeitos radioativos do tipo HLW e SNF, com o objetivo de controlar a estabilidade e solubilidade dos radionuclídeos armazenados:

- *Atividade Magmática*: a intrusão ígnea subsuperficial de rochas podem afetar o desempenho do sistema repositório (condição desprezada com base na pequena consequência deste evento).
- *Atividade Metamórfica*: altas pressões e/ou temperaturas podem provocar mudanças recristalização em estado sólido (condição desprezada em razão de baixa probabilidade).
- *Atividade Sísmica*: a agitação mecânica do solo pode dar origem a processos de fissura nas faces livres, tais como o teto do repositório (condição incluída na análise de desempenho de cenários não perturbados).
- *Atividade Vulcânica*: vulcões próximos, expelindo de material ígneo ou fluxos de superfície, poderiam afetar a qualidade e o desempenho do sistema de armazenamento (condição desprezada em razão de baixa probabilidade).
- *Brechas de Colapso*: a dissolução de material rochoso pode resultar no colapso de unidades sobrejacentes (condição desprezada em razão de baixa probabilidade).
- *Deformação Salina*: alterações nas estruturas salinas por ação da gravidade ou de outras forças.
- *Diapirismo*: forças de fluabilidade que podem causar a ascensão do sal em meio a rochas densas.
- *Dissolução Profunda*: cavidades de dissolução na camada degradada ou na base da camada salina podem propagar em direção à superfície (condição desprezada em razão de baixa probabilidade).
- *Dissolução Superficial*: percolação das águas subterrâneas e dissolução na camada degradada podem aumentar a transmissividade.
- *Efeitos da Dissolução*: a ação da dissolução mineral pode afetar a química das águas subterrâneas e daí o transporte dos radionuclídeos.

- *Epirogênese e Subsidência Regional*: condições geomorfológicas devidas à atividade tectônica em escala regional que poderiam causar movimentação vertical positiva (elevando) e negativa (rebaixando) camadas de solo.
- *Estratigrafia*: sistema de estudo de eventos e propriedades das formações geológicas segundo suas camadas de rocha.
- *Existência de Reservatórios de Salmoura*: reservatórios pressurizados de salmoura que podem ser encontrados em regiões sob a área controlada.
- *Fluxo de Fratura*: águas subterrâneas podem fluir ao longo das fraturas, bem como através do espaço de poros interconectados.
- *Fluxo Insaturado de Águas Subterrâneas*: a presença de ar ou de outras fases gasosas pode influenciar o fluxo das águas subterrâneas.
- *Fluxo Saturado das Águas Subterrâneas*: o fluxo de águas subterrâneas sob o lençol freático é importante para o desempenho do sistema repositório (condição incluída na análise de desempenho de cenários não perturbados).
- *Formação de Fraturas*: processo onde alterações de tensão podem causar novo conjunto de fraturas à formação rochosa (condição desprezada em razão de baixa probabilidade, mas incluída na análise de desempenho de cenários não perturbados próximos ao repositório).
- *Formação de Novas Falhas*: atividade tectônica em escala regional que poderia provocar novas falhas para a formação rochosa (condição desprezada em razão de baixa probabilidade).
- *Geoquímica das Águas Subterrâneas*: a geoquímica das águas subterrâneas influencia o retardo actínido e a estabilidade coloidal (condição incluída na análise de desempenho de cenários não perturbados).
- *Infiltração de Fratura*: a precipitação de minerais com o preenchimento da fratura pode reduzir a condutividade hidráulica (condição desprezada em razão de baixa consequência útil).
- *Intrusão de Gás Natural*: a introdução do gás natural de formações rochosas sob o repositório pode afetar o fluxo de águas subterrâneas (condição desprezada em razão da baixa probabilidade).
- *Intrusão Salina (Efeito hidrogeológico)*: a introdução de mais água salina na camada degradada poderia afetar o fluxo das águas subterrâneas.

- *Intrusão Salina (Efeitos geoquímicos)*: a introdução de mais água salina na camada degradada poderia afetar o retardo actínídeo e a estabilidade coloidal (condição desprezada em razão da baixa importância).
- *Movimento de Falha*: movimentação ao longo de falhas no estrato degradado ou em unidades geológicas abaixo da camada salina que poderiam afetar a situação hidrogeológica.
- *Mudanças na Tensão Local*: atividade tectônica em escala regional que pode alterar os níveis de tensão (estresse).
- *Mudanças nas Propriedades da Fratura*: alterações no campo local de tensão podem modificar propriedades como a abertura e aspereza.
- *Resposta Hidrológica a Sismos*: o movimento de falhas pode afetar as direções dos fluxos de águas subterrâneas, e as alterações da pressão podem afetar os níveis e a circulação das águas subterrâneas (condição desprezada em razão da baixa importância).
- *Tectônica Regional*: definição tectônica da região que determina o nível atual de esforços de tensão.
- *Tubos de Brecha (solução chaminés)*: formações surgidas acima das cavidades de dissolução profunda podem fraturar (condição desprezada em razão de baixa probabilidade).

11.3 ANEXO C

A concepção de segurança em profundidade e em extensão, adequada à fase de projeto de uma instalação, leva em importância para análise¹⁰:

1. Utilização de múltiplas barreiras de engenharia (EBS), ativas e/ou passivas, para controle de quaisquer simples falhas que provoquem a liberação de materiais radioativos;
2. Incorporação de grandes margens de projeto para sobrepor qualquer vazio do conhecimento preciso (incerteza epistêmica) sobre a capacidade das barreiras e a dimensão dos desafios gerados por condições normais ou acidentais.
3. Aplicação de padrão de qualidade no projeto e na fase de execução;
4. Operação dentro de determinados limites de segurança designados no projeto;
5. Adoção de programas continuados de testes, inspeções e manutenção de modo a preservar as margens de projetos originais.

¹⁰ Keller, W; Modarres, M; “A historical overview of probabilistic risk assessment development and its use in the nuclear power industry”, Reliability Engineering and System Safety 89, pag. 271-285, Elsevier, 2005.

11.4 ANEXO D

A camada salina destaca-se vantajosamente por:

1. apresentar ótima qualidade técnica para a criação de sítios de depósito (prospecto exploratório dos poços de armazenamento);
2. demonstrar estabilidade geológica por milhares de anos;
3. ser constituída por estruturas evaporíticas (camadas rochosas de sal);
4. apresentar seu mineral constituinte com propriedades reológicas que favorecem o propósito do armazenamento de rejeitos radioativos;
5. apresentar excelente condutividade térmica (diminuição da temperatura de decaimento do rejeito), baixa capacidade higroscópica ou alta impermeabilidade (dificuldade para migração de radionuclídeos e dissolução através do meio sedimentar) e plasticidade (capacidade de deformações e condição auto-selante na recuperação de fraturas);
6. ser ambiente com reduzida existência de biota relevante;
7. demonstrar elevado grau de segurança passiva definido por:
 - (a) espessa lâmina d'água marinha (barreira de segregação e dissolução de partículas);
 - (b) distanciamento geológico da camada salina em relação ao solo do fundo mar (e, em especial, ao seu ecossistema);
 - (c) proteção física da contenção (para transporte e blindagem radioativa);
8. minimizar o problema da intrusão humana;
9. permitir possível recuperação do rejeito.

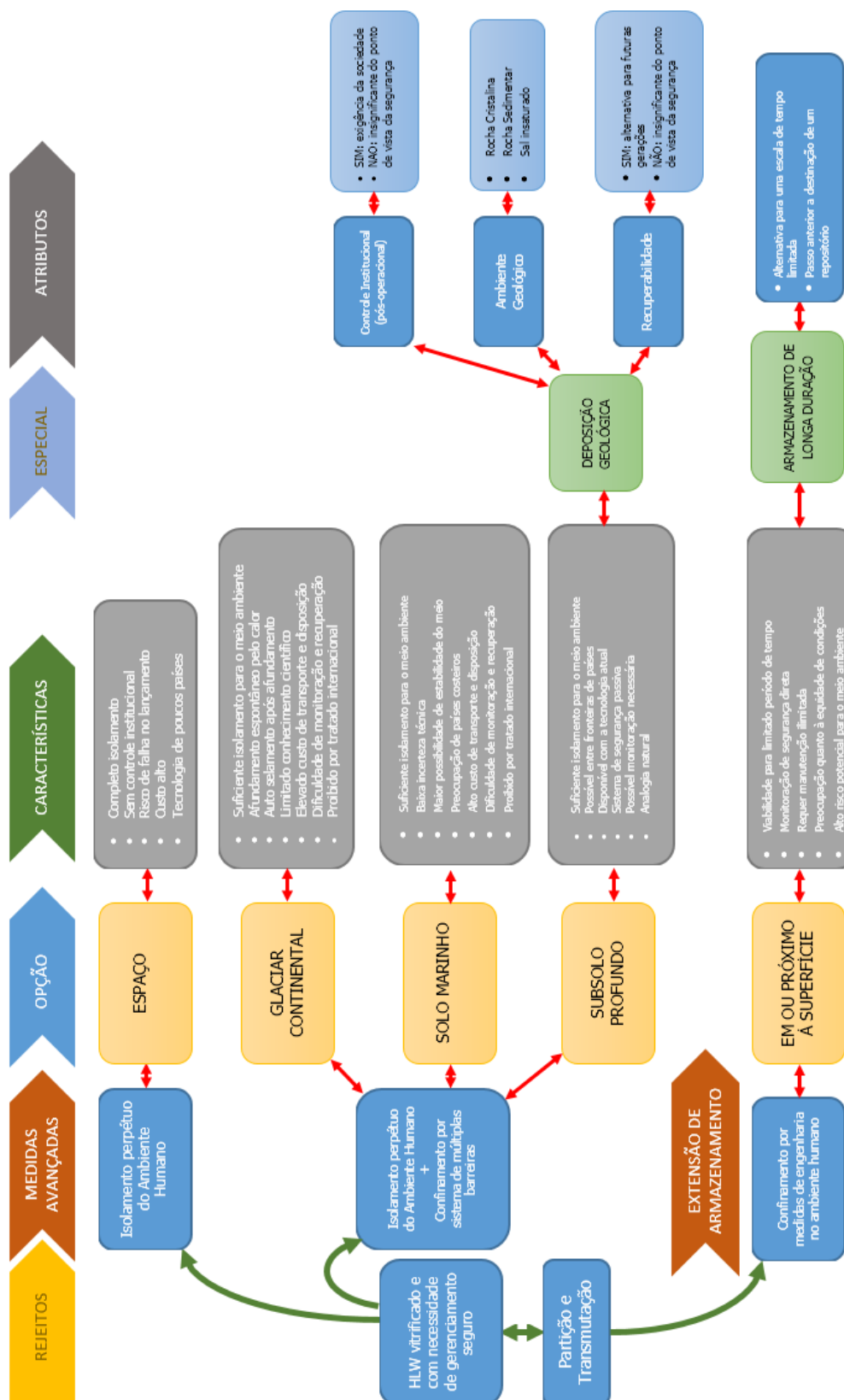
Entretanto, apresenta por contrapartidas:

- a. transporte do rejeito radioativo até o local de descarte e deposição (emprego de veículos e navios especializados);
- b. rigoroso controle de movimentação destas cargas;
- c. custo elevado das operações *offshore* de perfuração dos poços de deposição e recuperação de material depositado;

- d. exigência de alargadores de poços (diâmetro e geometria dos contêineres);
- e. limitação da quantidade de material radioativo por poço;
- f. possibilidade de colapso das paredes do poço (fluência de rocha salina);
- g. rejeição social pelo uso do ambiente marinho (desconhecimento do método);
- h. restrições de acordos internacionais (Convenção e Protocolo de Londres).

11.5 ANEXO E

Quadro comparativo de processos de deposição de rejeitos:



CIP – Catalogação na Publicação

F363u

Fernandes, Artur José Silva, 1956-

Utilização da Revisão Sistemática para Determinação de Repositório de Rejeito Radioativo no Leito Oceânico / Artur José Silva Fernandes – Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2014.

100 f. ; il..

Orientador: Ralph Santos-Oliveira.

Coorientadora: Vivian Borges Martins.

Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ciência e Tecnologia Nucleares) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2014.

1. Ciclo de Combustíveis Nucleares. 2. Rejeitos Nucleares. 3. Repositórios de Rejeitos Nucleares. I. Santos-Oliveira, Ralph (orientador) II. Martins, Vivian Borges (coorientadora) III. Título.

CDD: 620.4