

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**O ARMAZENAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS NO BRASIL COM
ÊNFASE ESPECIAL EM ROCHAS**

CYRO TEITI ENOKIHARA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de "Mestre na Área de Concentração em Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear".

Orientador: Dr. Roberto Yoshiyuki Nakai

São Paulo
1983

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

O ARMAZENAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS NO BRASIL COM
ÊNFASE ESPECIAL EM ROCHAS

Cyro Teiti Enokihara

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de "Mestre
na Área de Concentração em Reatores
Nucleares de Potência e Tecnologia do
Combustível Nuclear".



Orientador: Dr. Roberto Yoshiyuki Hukai

SÃO PAULO

1983

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
I. P. E. N.

À memória de meu pai

À minha família

AGRADECIMENTOS

Dedicamos os nossos sinceros agradecimentos ao Professor Dr. Roberto Yoshiyuki Hukai pela orientação, colaboração e amizade dispensadas no transcorrer desse trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares CNEN/SP pelas facilidades concedidas.

Ao Eng^o Nelson Leon Meldonian, da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Rio de Janeiro), pela amizade e pelo inestimável auxílio e incentivo recebidos, bem como pela leitura do manuscrito e pelas sugestões prestadas no decorrer desse trabalho.

Ao Dr. José Mauro Esteves dos Santos, da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Rio de Janeiro), pela amizade e pelo valioso auxílio, críticas e leitura do manuscrito.

Ao Professor Dr. Milton Assis Kanji, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelo auxílio e proveitosas discussões durante a execução desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Rui Ribeiro Franco e ao Prof. Dr. Fausto Walter de Lima pela preciosa colaboração.

Ao Eng^o Homero E.B. Pêrez, ao Eng^o Antonio Carlos G. Castagnet e ao pesquisador Héctor C.C. Rocca pela colaboração.

Ao Dr. Yociteru Hasui, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, e ao Dr. Aldo da Cunha Rebouças, do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, pelo auxílio no início das pesquisas.

Aos colegas do Departamento de Aplicações na Engenharia e na Indústria, em especial ao Eng^o Pedro E. Aoki, às pesquisadoras Maria Helena O. Sampa, Helena K. Nakahira e Dora C.R. Poli, ao Eng^o Sergio Marcelino e às Sntas. Elza M. de Melo e Sueli I.B. Rios pela colaboração e incentivo recebidos.

Aos geólogos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo pelo auxílio recebido.

Ao colega Luis Antonio Terribile de Mattos pelas informações e sugestões.

Ao colega Mitsuru Arai, geólogo da Petrobras S/A,
pelas informações.

Ao colega José Glaucio M. Garone pela colabora -
ção.

À Srta. Mary Samudio Igami pela elaboração das
referências bibliográficas.

" O ARMAZENAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS NO BRASIL COM
ÊNFASE ESPECIAL EM ROCHAS "

Cyro Teiti Enokihara

SUMÁRIO

Foi feita uma avaliação do problema de armazenamento dos rejeitos radioativos a serem produzidos pela indústria nuclear no Brasil, com ênfase especial na estocagem em formações rochosas. Tais locais devem proporcionar segurança máxima até que a radioatividade decaia a níveis aceitáveis.

Neste trabalho, são estudadas, em termos regionais, as ocorrências de três tipos de rochas, a saber, o sal gema, o granito e o basalto no que se refere aos aspectos geológicos, tectônicos e sismicidade, hidrogeológicos, de recursos minerais, geomorfológicos, demográficos e de vias de acesso. As áreas propostas para este estudo são as Bacias de Sergipe-Alagoas e do Recôncavo para o sal gema, as Regiões de Dobramentos Nordeste e Sudeste para os granitos e a Bacia do Paraná para o basalto.

Este estudo corresponde à macro-análise necessária à seleção de local para a deposição de rejeitos. Os resultados obtidos servem como indicadores preliminares para posteriores estudos de micro-localização mais pormenorizados.

" THE DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTES IN BRAZIL WITH SPECIAL
EMPHASIS ON ROCKS "

Cyro Teiti Enokihara

ABSTRACT

The disposal of radioactive wastes in geological formations seems to be the most appropriate solution for the nuclear waste problem. The disposal sites must provide the maximum safety for the radionuclides during its decay period.

The study presents a general analysis of three types rocks: salt, granite and basalt. In our analysis we have dealt with the following aspects: geology, tectonics, seismicity, hydrogeology , mineral resources, geomorphology, population and acess. The studied regions were: Sergipe-Alagoas and Recôncavo Basins, Northeastern and Southeastern Folded Regions and Paraná Basin.

Our study contains the macro-analysis needed for the selection of a safe site for radioactive waste disposal. We believe this work will be useful as a first step for further micro-analysis of selected sites.

ÍNDICE

	PAG.
1. - INTRODUÇÃO	1
1.1. - Objetivos	1
1.2. - Histórico	2
1.3. - Organização do trabalho	5
2. - ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO DOS REJEITOS RADIOATIVOS	7
2.1. - O ciclo do combustível nuclear	7
2.1.1. - Opção I - Operação do ciclo do combustível sem reciclagem do Urânio e Plutônio	8
2.1.2. - Opção II - Operação do ciclo do combustível com reciclagem somente do Urânio	8
2.1.3. - Opção III - Operação do ciclo do combustível com reciclagem do Urânio e Plutônio	11
2.2. - Fontes de rejeitos radioativos	11
2.2.1. - Mineração	11
2.2.2. - Beneficiamento do minério	13
2.2.3. - Conversão em hexafluoreto de Urânio	14
2.2.4. - Enriquecimento isotópico	15
2.2.5. - Fabricação de elementos combustíveis	16
2.2.6. - Irradiação do combustível no reator	16
2.2.7. - Instalações de estocagem do combustível irradiado	17
2.2.8. - Usinas de reprocessamento	18
2.2.9. - Usinas de fabricação dos óxidos mistos de U e Pu	22
2.3. - Categorias de rejeitos radioativos	22
2.3.1. - Introdução	22
2.3.2. - Categorias de rejeitos radioativos propostas pela Agência Internacional de Energia Atômica para fins de armazenamento e deposição	23
3. - ARMAZENAMENTO DOS REJEITOS RADIOATIVOS	27
3.1. - Introdução	27
3.1.1. - Confinamentos dos rejeitos na Terra	27
3.1.2. - Eliminação dos rejeitos da biosfera	31
3.2. - Armazenamento dos rejeitos de baixa atividade	32
3.2.1. - Introdução	32
3.2.2. - Característica do local	33

3.2.3. - Projetos dos repositórios	37
3.3. - Armazenamento do combustível irradiado	43
3.3.1. - Introdução	43
3.3.2. - Tanques de estocagem	43
3.3.3. - Requisitos necessários para a estocagem em tanques	48
3.3.4. - Acondicionamento	51
3.3.5. - Deposição do combustível irradiado	52
3.4. - Armazenamento dos rejeitos de alta atividade	54
3.4.1. - Introdução	54
3.4.2. - Tanques de estocagem de rejeitos líquidos de alta atividade	58
3.4.3. - Solidificação	62
3.4.4. - Estocagem provisória de rejeitos solidificados de alta atividade na usina de reprocessamento	64
3.4.5. - Estocagem provisória nas Instalações em Superfície	65
3.4.6. - Deposição no repositório geológico	68
3.5. - Armazenamento dos rejeitos contaminados com elementos transurânicos	70
3.5.1. - Introdução	70
3.5.2. - Estocagem provisória	71
3.5.3. - Deposição no repositório geológico	72
3.6. - Critérios para seleção de locais	72
3.6.1. - Topografia	74
3.6.2. - Tectônica e sismicidade	74
3.6.3. - Estrutura	75
3.6.4. - Condições de sub-superfície	77
3.6.5. - Hidrologia	79
3.6.6. - Propriedades físicas e químicas	81
3.6.7. - Transporte de rejeitos	84
3.6.8. - Densidade de população	85
3.6.9. - Recursos minerais	85
3.6.10.- Considerações econômicas e sociais	85
3.7. - Deposição geológica dos rejeitos de alta atividade e os contaminados com elementos transurânicos	85
3.7.1. - Alternativas para a deposição geológica dos rejeitos em questão	85
3.7.2. - Formações geológicas	89
3.7.2.1. - Evaporitos	89
3.7.2.2. - Outras rochas sedimentares	97
3.7.2.3. - Rochas Ígneas	99

3.7.2.4. - Rochas metamórficas	102
3.7.3. - Programas para definição de locais	103
4. - OCORRÊNCIAS DE ROCHAS PARA O ARMAZENAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS NO BRASIL	107
4.1. - Ocorrências de sal gema	109
4.1.1. - Bacia de Sergipe-Alagoas	109
4.1.1.1. - Geomorfologia e hidrografia	111
4.1.1.2. - Demografia e acesso	111
4.1.1.3. - Geologia	111
4.1.1.4. - Estrutura tectônica e sismicidade	118
4.1.1.5. - Hidrogeologia	121
4.1.1.6. - Recursos minerais	121
4.1.2. - Bacia do Recôncavo	122
4.1.2.1. - Geomorfologia e hidrografia	122
4.1.2.2. - Demografia e acesso	123
4.1.2.3. - Geologia	123
4.1.2.4. - Estrutura tectônica e sismicidade	127
4.1.2.5. - Hidrogeologia	127
4.1.2.6. - Recursos minerais	128
4.2. - Rochas graníticas	128
4.2.1. - Região de Dobramentos Nordeste	128
4.2.1.1. - Geomorfologia e hidrografia	130
4.2.1.2. - Demografia e acesso	130
4.2.1.3. - Geologia	130
4.2.1.4. - Estrutura tectônica e sismicidade	135
4.2.1.5. - Hidrogeologia	136
4.2.1.6. - Recursos minerais	138
4.2.2. - Região de Dobramentos Sudeste	139
4.2.2.1. - Geomorfologia e hidrografia	139
4.2.2.2. - Demografia e acesso	141
4.2.2.3. - Geologia	141
4.2.2.4. - Estrutura tectônica e sismicidade	145
4.2.2.5. - Hidrogeologia	148
4.2.2.6. - Recursos minerais	148
4.3. - Basalto	149
4.3.1. - Bacia do Paraná	149
4.3.1.1. - Geomorfologia e hidrografia	149
4.3.1.2. - Demografia e acesso	149
4.3.1.3. - Geologia	150

4.3.1.4. - Estrutura tectônica e sismicidade	156
4.3.1.5. - Hidrogeologia	161
4.3.1.6. - Recursos minerais	163
5. - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	164
5.1. - Conclusões	164
5.2. - Sugestões para trabalhos futuros	170
6. - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	171
APÊNDICE A - MAPA SISMOTECTÔNICO DO BRASIL	181

ÍNDICE DAS FIGURAS

	PAG.
FIGURA 2.1. Opção I - Ciclo do combustível nuclear sem reciclagem do Urânio e do Plutônio	9
FIGURA 2.2. Opção II - Ciclo do combustível nuclear com reciclagem somente do Urânio	10
FIGURA 2.3. Opção III - Ciclo do combustível nuclear com reciclagem do Urânio e do Plutônio	12
FIGURA 2.4. Etapas principais durante o reprocessamento	19
FIGURA 3.1. Projeto de armazenamento de rejeitos no solo	29
FIGURA 3.2. Concepção de deposição em formações de sal gema	30
FIGURA 3.3. Diagrama representativo de um modelo hidrológico	34
FIGURA 3.4. Desenvolvimento de um modelo indicando os caminhos críticos	36
FIGURA 3.5. Modelo de trincheira recoberta	40
FIGURA 3.6. Detalhes da seção transversal de uma trincheira recoberta	41
FIGURA 3.7. Detalhes da seção longitudinal de uma trincheira recoberta	41
FIGURA 3.8. Seção transversal de uma trincheira para rejeitos sólidos de baixa atividade	39
FIGURA 3.9. Projeto de tanque de água para a estocagem dos elementos combustíveis irradiados	47
FIGURA 3.10. Prateleira típica para a estocagem dos elementos combustíveis irradiados	49
FIGURA 3.11. Sistema de purificação e refrigeração do tanque de estocagem	50
FIGURA 3.12. Etapas de estocagem dos rejeitos de alta atividade	58
FIGURA 3.13. Tanque típico para estocagem de rejeitos não geradores de calor	59
FIGURA 3.14. Controles de segurança em tanques de estocagem para rejeitos de alta atividade	59
FIGURA 3.15. Tanque de estocagem com parede dupla para rejeitos geradores de calor	60
FIGURA 3.16. Detalhes do tanque de estocagem (1974-1978)	61
FIGURA 3.17. Projeto do tanque de água/sistema de remoção do calor	65
FIGURA 3.18. Recipiente de estocagem em casco lacrado	67
FIGURA 3.19. Instalação de estocagem provisória em superfície	69
FIGURA 3.20. Concepção de repositório em formações geológicas profundas	88
FIGURA 3.21. Corte vertical da Mina de Asse	91
FIGURA 3.22. Corte do sistema de cavidade para armazenamento de material de atividade intermediária (Mina de Asse)	93

FIGURA 3.23	Concepção de deposição em formações de sal gema	94
FIGURA 4.1.	Ocorrências de sal gema, granitos e basalto	108
FIGURA 4.2.	Mapa das ocorrências do sal gema na Bacia de Sergipe-Alagoas	110
FIGURA 4.3.	Coluna estratigráfica da Bacia Sergipe-Alagoas	113
FIGURA 4.4.	Estudo da distribuição dos sais de potássio em Carnópolis	114
FIGURA 4.5.	Mapa do contorno de sal gema na Bacia de Sergipe-Alagoas	116/7
FIGURA 4.6.	Mapa estrutural da Bacia Sergipe-Alagoas	120
FIGURA 4.7.	Coluna estratigráfica da Bacia do Recôncavo com indicação da ocorrência de sal gema na parte basal da coluna	124
FIGURA 4.8.	Secção geológica NW-SE da Bacia do Recôncavo mostrando algumas falhas	125
FIGURA 4.9.	Os maciços mediano e as faixas de dobramentos da Região de Dobramentos Nordeste	129
FIGURA 4.10.	Mapa estrutural da Região de Dobramentos Nordeste	137
FIGURA 4.11.	Os maciços mediano e as faixas de dobramentos da Região de Dobramentos Sudeste	140
FIGURA 4.12.	Principais corpos graníticos da Região de Dobramentos Sudeste	142
FIGURA 4.13.	Principais feições estruturais da Região de Dobramentos Sudeste na parte leste paulista e adjacências	146
FIGURA 4.14.	Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná	151
FIGURA 4.15.	Mapa das isópacas das rochas basálticas na Bacia do Paraná	152
FIGURA 4.16.	Situação espacial das rochas da Bacia do Paraná	155
FIGURA 4.17.	Mapa estrutural do topo do embasamento da Bacia do Paraná	160
FIGURA A.1.	Mapa Sismotectônico do Brasil	182

ÍNDICE DAS TABELAS

	PAG.
TABELA 2.1. Classificação dos rejeitos	25
TABELA 2.2. Correlação Categoria/Procedência	26
TABELA 3.1. Avaliação dos fatores para a estocagem dos rejeitos de baixa atividade	38
TABELA 3.2. Composição isotópica do combustível irradiado, em átomogramma em função do tempo após a retirada do reator	44
TABELA 3.3. Quantidade total de calor gerado no combustível irradiado	45
TABELA 3.4. Capacidade do tanque de estocagem de elementos combustíveis	46
TABELA 3.5. Radioatividade dos principais produtos de fissão no rejeito de alta atividade a partir do reprocessamento de uma tonelada do combustível	55
TABELA 3.6. Radioatividade do urânio, plutônio e dos elementos transurânicos	56
TABELA 3.7. Quantidade de calor gerado no rejeito de alta atividade	57
TABELA 3.8. Tipos de produtos resultantes do processo de vitrificação em vários países	62
TABELA 4.1. Reservas geológicas de sal (Bacia de Sergipe-Alagoas)	119
TABELA 4.2. Principais corpos graníticos da Região de Dobramentos Sudeste	143
TABELA 4.3. Espessura global dos derrames	154
TABELA 4.4. Análises químicas das rochas basálticas	157
TABELA 4.5. Procedência das análises químicas da TABELA 4.4.	157
TABELA 4.6. Análises químicas dos elementos principais em rochas basálticas da Bacia do Paraná	158
TABELA 4.7. Procedência das análises químicas da TABELA 4.6.	159
TABELA 5.1. Aspectos favoráveis e desfavoráveis das formações rochosas avaliadas para receptáculo de deposição de rejeitos radioativos de alta atividade	169

1. INTRODUÇÃO

A indústria nuclear, como muitas das demais atividades exercidas pelo homem, produz, além de benefícios, subprodutos indesejáveis que requerem tratamento especial. O fato de tais materiais serem perigosos ou, ainda, potencialmente úteis depende de nossa habilidade em tratá-los, acondicioná-los e armazená-los.

Várias alternativas tem sido propostas para a estocagem dos rejeitos radioativos, em fundos oceânicos, em camadas de gelo polar e em formações geológicas. Esta última mostra-se viável pelo fato de que elas podem proporcionar uma segurança máxima até que a radioatividade decaia para níveis não perigosos.

Este trabalho trata do armazenamento de rejeitos radioativos em formações geológicas. Foram escolhidos três tipos de rochas, a saber, o sal gema, o granito e o basalto, e levantadas as suas potencialidades no que se refere à geologia, tectônica e sismicidade, hidrogeologia, demografia e vias de acesso. Tais informações constituem a base da macro-análise necessária ao estudo dos sítios favoráveis ao armazenamento dos rejeitos radioativos.

O processo de seleção de sítios para o armazenamento de rejeitos é semelhante ao de pesquisa mineral. Com base em informações sobre a geologia, a tectônica e sismicidade, e as vias de acesso selecionam-se as áreas mais promissoras. A esse processo acrescentam-se os conhecimentos sobre a meteorologia, demografia, hidrogeologia e outros, determinando os locais mais favoráveis à deposição de rejeitos. Depois de selecionadas, tais áreas passam por um processo de micro-análise onde são estudadas, em detalhe, cada uma das propriedades do local. A esse estudo associa-se a análise de viabilidade técnica e econômica. Os resultados globais desse estudo levam à qualificação do local do repositório.

Neste trabalho, realiza-se a macro-análise das propriedades geológicas necessárias à seleção de local. Propõe-se que esses resultados sejam de valia para estudos posteriores mais pormenorizados.

1.1 - Objetivos

O objetivo deste trabalho é realizar um levantamento regional e preliminar das ocorrências de rochas apropriadas ao armazenamento dos rejeitos radioativos no Brasil considerando os aspectos geológicos, tectônicos e sísmicos, hidrogeológicos, de recursos minerais, geomorfológicos, demográficos e de vias de acesso. Além disso, apresenta-se toda uma sistemática de micro-análise que con-

duz a qualificação do repositório.

As considerações gerais sobre o armazenamento dos vários tipos de rejeitos, também, estão descritos.

1.2 - Histórico

A utilização dos materiais radioativos em pequena escala até 1940, não apresentou problemas sérios de armazenamento dos rejeitos radioativos. Contudo, o desenvolvimento relativamente acelerado durante os anos de 1940 a 1945 da indústria nuclear nos Estados Unidos e desde então na Grã Bretanha, Canadá e outros países com uma produção anual de rejeitos totalizando vários milhões de curies, exigiu estudos mais cuidadosos sobre o assunto.

No período que se estendeu de 1946 até o início dos anos 60 foram depositados ao longo da costa Atlântica e Pacífica dos Estados Unidos, milhares de tambores contendo resíduos radioativos de baixa atividade. Para manter um controle sobre o uso indiscriminado dos oceanos como meio de armazenamento dos resíduos, o Comitê Nacional de Normas de Proteção Radiológica publicou um guia de recomendações em 1954 e que foram sumarizados por Rodger e Fineman^{/80/}.

Em 1955, Seligman^{/85/} realizou experiências para determinar as características do movimento dos efluentes radioativos em condições diversas de marés e de ventos; e a diluição dos radioelementos com o tempo. Seguindo o trabalho de Seligman, Dunster^{/31/} estimou os efeitos dos efluentes radioativos liberados no mar sobre o homem e o meio ambiente, como também o limite máximo a ser liberado em um determinado local. Dentro dessa linha de pesquisa Fair e Mac Lean^{/35/} estudaram os efeitos devidos às descargas experimentais dos efluentes no mar.

Ainda em 1955, pesquisadores da Universidade de John Hopkins como Renn^{/78/}, tendo dedicado vários anos ao problema de armazenamento no mar, avaliaram suas implicações econômicas e de segurança ao público.

Na Conferência das Nações Unidas realizada em 1958 sobre a Legislação dos Oceanos foi adotada a resolução que atribui à Agência Internacional de Energia Atômica o controle da descarga de materiais radioativos no mar. Em consequência, após a 2a. série de reuniões, a AIEA publicou em 1961 as normas regulamentares que também foram submetidas ao Comitê Consultivo de Assuntos Científicos^{/49/}.

A partir dos anos 60 despertou-se um grande interesse para a deposição

dos materiais radioativos nos solos. Um passo importante foi tomado em Maio de 1963 quando a Comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos licenciou e autorizou o uso dos locais sob a administração do Laboratório Nacional de Oak Ridge e da Estação Nacional de Testes de Reatores em Idaho. No entanto as pesquisas efetuadas em Oak Ridge para a deposição dos rejeitos de baixa atividade em cavidades já podem ser observadas a partir de 1951. Witowski¹⁰⁰ / apresentou um resumo das experiências desenvolvidas em Oak Ridge a partir dessa data. O problema da deposição em outras instalações como a de Hanford, Idaho Falls e Savannah River começam a ser estudadas extensivamente. Em todos esses locais os estudos basearam-se fundamentalmente na geologia e hidrologia, além do comportamento químico dos radionuclídeos no solo. Theis⁹⁴ / faz um relato das condições geológicas desses locais. Brown e Parker²⁶ / apresentaram estudos sobre a colocação dos radionuclídeos no solo. Segundo Brown e Parker o terreno de armazenamento deve possuir características de retenção que impeçam os radionuclídeos de atingirem o lençol freático. Por outro lado Mawson⁶⁶ / defende a teoria de que os elementos radioativos devem ser colocados diretamente na água do lençol de modo a serem transportados e retidos nos sedimentos percolados pelo mesmo. Brown, McConiga e Rowe²⁷ / descreveram os fatores geológicos e hidrológicos que influenciam a taxa e a direção do fluxo do lençol freático em Hanford. Foram adotados nesses estudos os métodos microgeológicos e microhidrológicos para definir o provável comportamento da água e dos radioisótopos. Os critérios para a avaliação de locais para a estocagem de rejeitos sólidos no solo é apresentado por Peckham e Beltar⁷⁴ / , Richardson⁷⁹ / , Mawson e Russel⁶⁷ / e Cherry , Grisak e Jackson²⁹ / . Segundo Cherry os locais podem ser classificados em : a) locais de médio prazo apropriados para rejeitos que decaem a níveis seguros dentro de poucas dezenas de anos e cuja proteção depende principalmente das barreiras de engenharia previstas, b) locais de longo prazo destinados a rejeitos de meia vida longa e cuja proteção para os rejeitos depende principalmente das condições hidrogeológicas. Um resumo dos critérios de seleção de locais é também apresentado por Morgan⁷⁰ / onde são destacados as características geológicas, topográficas, hidrogeológicas, meteorológicas, as condições de solo, de transporte e os custos. Discussão detalhada desses fatores com ênfase à aplicação para os rejeitos de baixa e média atividade é apresentada no regulamento publicado pela Agência Internacional de Energia Atômica⁵⁰ / .

Em 1966 iniciou-se nos E.U.A. o reprocessamento comercial de combustíveis para os reatores de água leve com a operação da usina da "Nuclear Fuel Services" em West Valley, Nova York. Os resíduos produzidos pelas usinas de reprocessamento , principalmente os líquidos de alta atividade, somadas aos provenien

tes das usinas com finalidades militares em operação desde a 2a. Guerra Mundial, acarretaram sérios problemas quanto a sua eliminação. A experiência com estocagem desses rejeitos não tem sido animadores. De 1958 a 1974, foram detectados nas instalações de Hanford dezoito vazamentos, totalizando 429.400 galões. Spitsyn, Balukova e Ermakova⁹⁰ / abordaram a possibilidade da ocorrência de acidentes com os tanques de estocagem dos rejeitos líquidos de alta atividade, realizando um estudo sobre a migração de radionuclídeos no solo. Os projetos dos tanques de estocagem, assim como a sua segurança são discutidos na norma pública pela AIEA⁵¹ /. Outra alternativa para a estocagem dos rejeitos líquidos de alta atividade foi proposta nos E.U.A. em 1957 pela Divisão de Ciências da Terra da Academia Nacional de Ciências⁴⁶ /. Ela propunha a estocagem dos rejeitos através de injeções em cavidades profundas resultantes de aquíferos isolados ou campos petrolíferos esgotados. Discussões sobre a sua praticabilidade foram apresentadas mais tarde por Laguna e Blomeke⁵⁷ /. Eles relatam as experiências efetuadas pela indústria do petróleo para o armazenamento de salmouras em campos de petróleo secos. Theis no trabalho apresentado em Genebra⁹⁵ / também tratou sobre esse método de estocagem.

Para evitar os eventuais acidentes provocados pela estocagem dos rejeitos líquidos de alta atividade em tanques, surgiram diversas tentativas para solidificá-los e posteriormente armazená-los em formações geológicas apropriadas. As experiências para incorporá-los em materiais sólidos como vidro, cimento e outros têm sido desenvolvidas desde a década de 50. Contribuições expressivas nesse campo podem ser observadas na Conferência Internacional de Genebra realizada em 1958. Goldman, Servizi, Daniels, Tebbut, Burns e Lauderale³⁹ / estudaram a possibilidade de solidificar os rejeitos em materiais carâmicos. Mais tarde, no Simpósio promovido pela AIEA em Viena, diversos outros trabalhos sobre solidificação foram apresentados. Alleman, Moore e Upson² / relataram os resultados da solidificação por calcinação em Hanford. Winshe, Davis Jr, Goodlett e Webster⁹⁹ / discutem o método de calcinação com enxofre, no estado fundido. Segundo Zimakov, Kolychev, Kolichenko e Martinov¹⁰² / o método de solidificação mais seguro para os rejeitos é a vitrificação.

O conceito original para a deposição dos rejeitos sólidos em formações geológicas foi proposta nos E.U.A. também em 1957 pela Academia Nacional de Ciências⁴⁶ / que sugeriu as formações salinas como as mais apropriadas para tal fim. Em 1965 por solicitação da então USAEC (Comissão de Energia Nuclear Americana) foi iniciado o projeto piloto de deposição dos rejeitos solidificados de alta atividade pelo Laboratório Nacional de Oak Ridge na mina de sal próxima a Lyons, Kansas⁶⁵ /. Na Alemanha as pesquisas iniciaram-se em 1963 quando o

Ministério Federal para Energia Atômica recomendou ao Serviço Geológico Alemão os estudos sobre a deposição dos rejeitos nas rochas salinas. Em 1965 foi adquirida a mina de sal de Asse próxima a Brunswick, no norte do país, e desde 1967 milhares de tambores com rejeitos de baixa e média atividade já foram estocados, para um programa inicial de testes / 56 /. As possibilidades sobre o aproveitamento de outras formações geológicas como folhelhos, basaltos, granitos também tem sido investigadas. Lomenick / 64 / relata os programas de estudos sobre os repositórios em diferentes formações geológicas, tais como calcário, granito, xisto e serpentinito desenvolvidos nos E.U.A. Piper / 76 / sintetizou as informações disponíveis sobre os argilitos e as rochas metamórficas, localizadas na reserva da Usina de Savannah River e as discutiu suas potencialidades para o armazenamento de rejeitos radioativos. Os dados sobre as temperaturas máximas, com as profundidades mínimas e as dimensões do repositório em rochas graníticas foram estabelecidos por Bourks e Hodkinson / 10 /. Åkesson e Hök / 1 / sugeriram um novo conceito de armazenamento em formações graníticas. As cavidades teriam a forma esférica e seriam protegidas internamente por uma espessa camada de argila para impedir a infiltração da água. Os rejeitos seriam acondicionados em grandes esferas de concreto. O formato esférico das cavidades e dos recipientes permitiriam uma máxima estabilidade mecânica do repositório.

Atualmente, as pesquisas sobre estocagem de rejeitos têm-se concentrado no aproveitamento das diversas formações geológicas potenciais e uma das sérias preocupações é quanto a escolha do local para repositório. Recentemente, foram publicados vários trabalhos pela Agência Internacional de Energia Atômica, sobre a deposição de rejeitos em massas rochosas, dos quais podemos citar dois relatórios importantes: "Site investigations for repositories of solid radioactive waste in deep geological formations" / 54 / e "Site selection factors for repositories of solid high-level and alpha-bearing waste in geological formations" / 53 /.

1.3 - Organização do trabalho

Neste Capítulo 1 está contido o histórico sobre o armazenamento dos rejeitos radioativos.

No Capítulo 2 estão descritas as etapas do ciclo do combustível, a origem e as categorias dos rejeitos radioativos.

Os conceitos básicos do armazenamento dos vários tipos de rejeitos, estão expostos no Capítulo 3.

O levantamento das ocorrências de rochas, de sal gema, de granitos e de basaltos no território brasileiro, assim como as descrições das características geomorfológicas e hidrográficas, demográficas e de vias de acesso, geológicas , de estruturas tectônicas e sismicidade hidrogeológicas e de recursos minerais , são apresentados no Capítulo 4.

As conclusões e as referências bibliográficas são tratadas, respectivamente, nos Capítulos 5 e 6.

No Apêndice A encontra-se o Mapa Sismotectônico do Brasil que mostra as principais falhas e os epicentros dos sismos.

2. ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO DOS REJEITOS RADIOATIVOS

2.1 - O ciclo do combustível nuclear

A indústria nuclear compreende todas as atividades ligadas ao uso de reatores de potência para produzir eletricidade a partir de materiais físséis assim como a produção e utilização de radioisótopos e radiações na medicina, indústria e pesquisa.

As etapas necessárias ao processo de produção de energia de fissão nuclear são conhecidas como ciclo do combustível nuclear. Para a operação de um reator de água leve as etapas são:

1. Mineração do urânio
2. Beneficiamento do minério de urânio (concentração e purificação)
3. Conversão do concentrado de urânio (U_3O_8) em hexafluoreto de urânio (UF_6)
4. Enriquecimento isotópico
5. Conversão do hexafluoreto de urânio enriquecido UF_6 em óxido de urânio
6. Fabricação dos elementos combustíveis
7. Irradiação do combustível no reator
8. Reprocessamento
9. Gerenciamento dos resíduos radioativos.

As três opções básicas para a operação do ciclo do combustível nuclear são:

- Opção I - Operação do ciclo do combustível sem reciclagem do urânio e plutônio.
- Opção II - Operação do ciclo do combustível com reciclagem somente do urânio.
- Opção III - Operação do ciclo do combustível com reciclagem do urânio e do plutônio.

As descrições das operações executadas em cada uma das 3 opções estão feitas a seguir.

2.1.1 - Opção I - Operação do ciclo do combustível sem reciclagem do Urânio e Plutônio.

A opção de não reciclagem está esquematizada na Figura 2.1. Nesta opção, as fontes de rejeitos são provenientes da usina nuclear e das instalações de armazenamento do combustível irradiado.

O urânio natural é retirado das minas subterrâneas ou a céu aberto, transferido às usinas de beneficiamento onde é processado e convertido para óxidos de urânio, que posteriormente é transformado em hexafluoreto de urânio nas usinas de conversão. No processo de enriquecimento ocorre a separação dos isótopos não físséis (^{238}U) dos físséis (^{235}U). Nas instalações de fabricação, o urânio enriquecido (^{235}U a - 3%) é convertido em dióxido de urânio que são peletizados, sinterizados e introduzidos nos tubos de elementos combustíveis. O combustível é colocado no reator onde ocorre a irradiação e a produção de energia. Quando os elementos combustíveis se tornam ineficientes são retirados do reator e estocados inicialmente num reservatório de água devido à sua alta radioatividade e elevada taxa de geração de calor. Posteriormente, os elementos combustíveis são acondicionados em recipientes adequados e transferidos para um sítio de armazenamento temporário ou a um repositório.

2.1.2 - Opção II - Operação do ciclo do combustível com reciclagem somente do Urânio.

Um esquema da opção com reciclagem do urânio é dado na Figura 2.2. Os rejeitos radioativos mais importantes nesta opção são os de alta atividade provenientes da usina de reprocessamento, e contém a maioria dos produtos de fissão. Cerca de 70% dos rejeitos da usina de reprocessamento estão contaminados com elementos transurânicos.

A mineração, o beneficiamento e as operações de conversão em hexafluoreto de urânio são semelhantes às executadas na Opção I. As principais diferenças estão no volume de material processado e de rejeitos gerados.

Uma diferença entre as opções acima mencionadas é notada no processo de enriquecimento onde o hexafluoreto de urânio natural é adicionado ao hexafluoreto de urânio levemente enriquecido proveniente da usina de reprocessamento. O hexafluoreto levemente enriquecido é submetido a um enriquecimento maior e posteriormente processado para dióxido de urânio e elementos combustíveis. Seguindo a irradiação, o combustível é estocado para permitir o decaimento dos radionuclí -

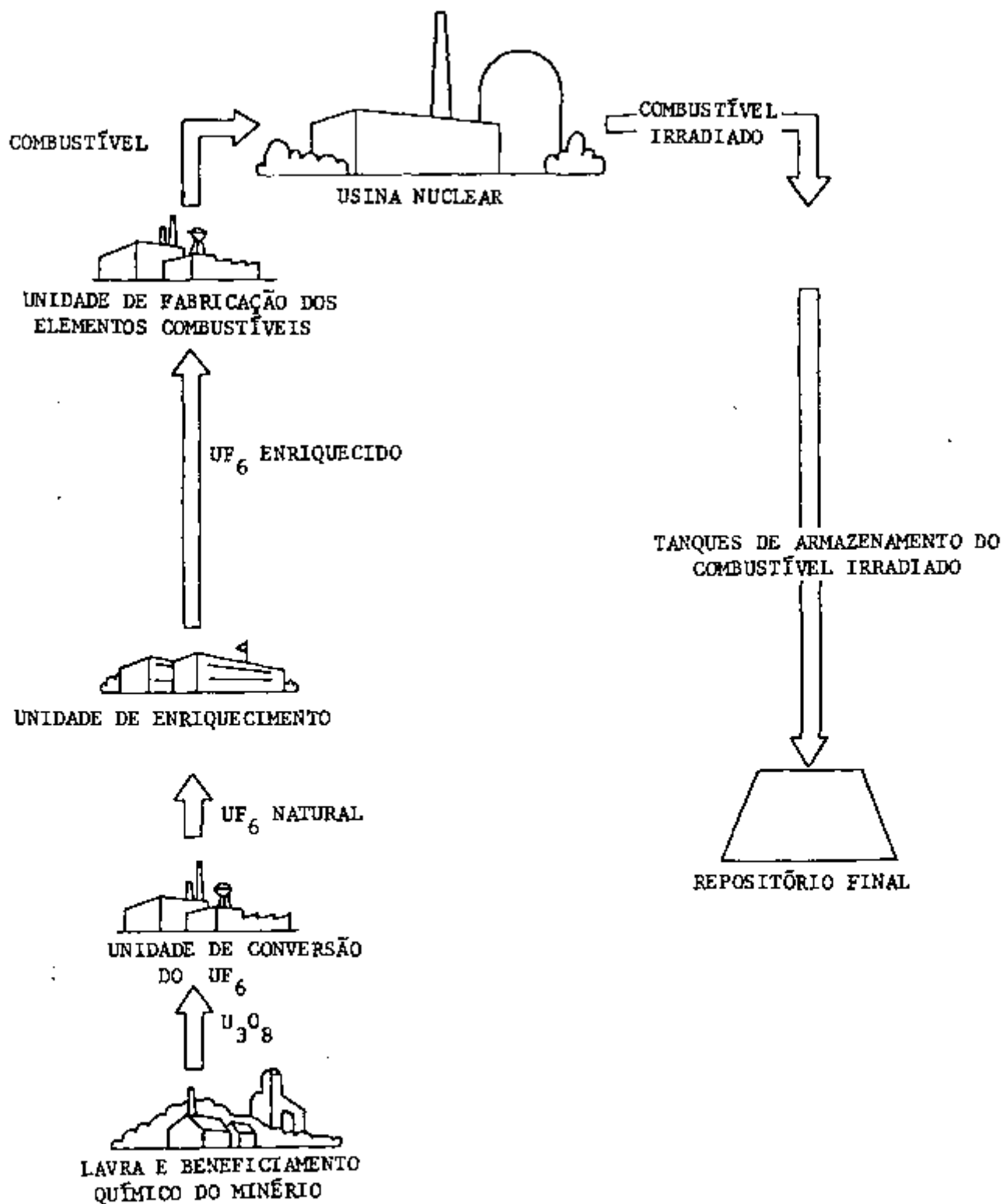


FIGURA 2.1. - OPÇÃO I - CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR SEM RECICLAGEM DO URÂNIO E DO PLUTÔNIO / 4 /

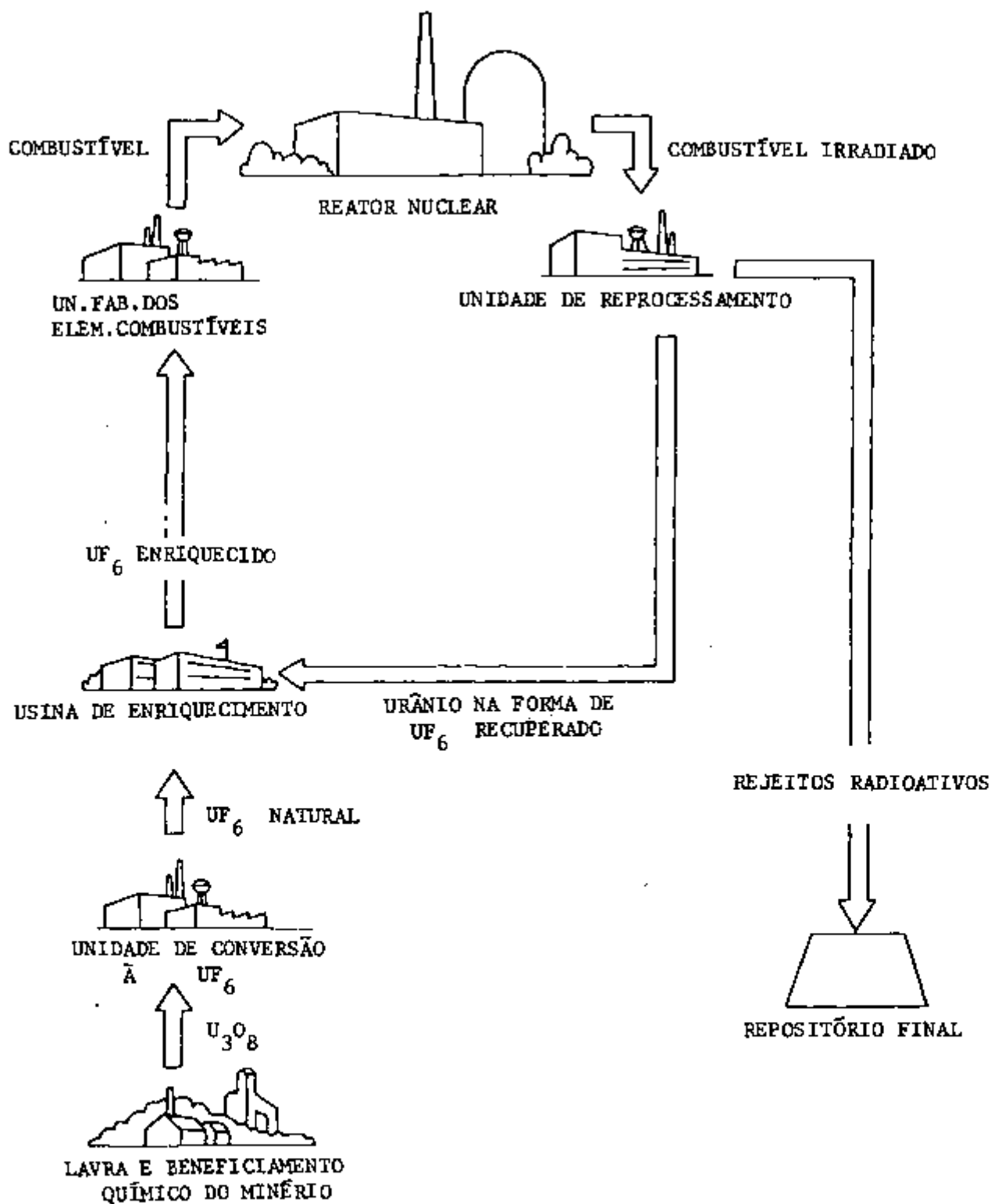


FIGURA 2.2. - OPÇÃO II - CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR
COM RECICLAGEM SOMENTE DO URÂNIO / 4 /

deos de meia vida curta e reduzir a taxa de geração de calor. Após o resfriamento, os combustíveis são transferidos à usina de reprocessamento, para recuperação do ^{235}U não fissionado.

2.1.3 - Opção III - Operação do ciclo do combustível com reciclagem do Urânio e Plutônio.

A Figura 2.3 mostra o esquema da opção reciclagem do Urânio e Plutônio. Os rejeitos gerados no reprocessamento são, essencialmente, os mesmos da opção anterior, com exceção do PuO_2 que nesta opção é utilizado na usina de fabricação de óxidos mistos de urânio e plutônio. Os rejeitos provenientes das operações anteriores à irradiação são os mesmos das opções anteriores.

Os processos especificados nesta opção são o reprocessamento e fabricação de óxidos mistos de urânio e plutônio. Parte do urânio natural da usina de conversão em hexafluoreto é enviado na forma de UO_2 , para as usinas de fabricação de óxidos mistos. Semelhante à opção anterior, o urânio levemente enriquecido, proveniente do reprocessamento, é convertido em UF_6 e enviado ao enriquecimento. Posteriormente, são convertidos em UO_2 e enviados para a fabricação de elementos combustíveis. O conjunto de elementos combustíveis após sofrerem a irradiação são enviados à unidade de reprocessamento donde se recupera o ^{235}U e o plutônio.

É preciso denotar que o ciclo combustível nuclear correspondente à Opção I é, de longe, o ciclo predominante em termos comerciais no mundo, atualmente.

2.2 - Fontes de rejeitos radioativos

As operações do ciclo do combustível geradora de rejeitos radiativos são tão descritas a seguir.

2.2.1 - Mineração

O urânio pode ser obtido por meio de duas operações de mineração, subterrânea ou a céu aberto. A mineração subterrânea envolve tipicamente a abertura de poços, galerias, túneis e instalação de elevadores, bombas de sucção de águas subterrâneas e outros equipamentos necessários. Por outro lado, a mineração a céu aberto tipicamente envolve grandes escavações, instalação de bombas para retirada de água superficial, remoção da cobertura de solo.

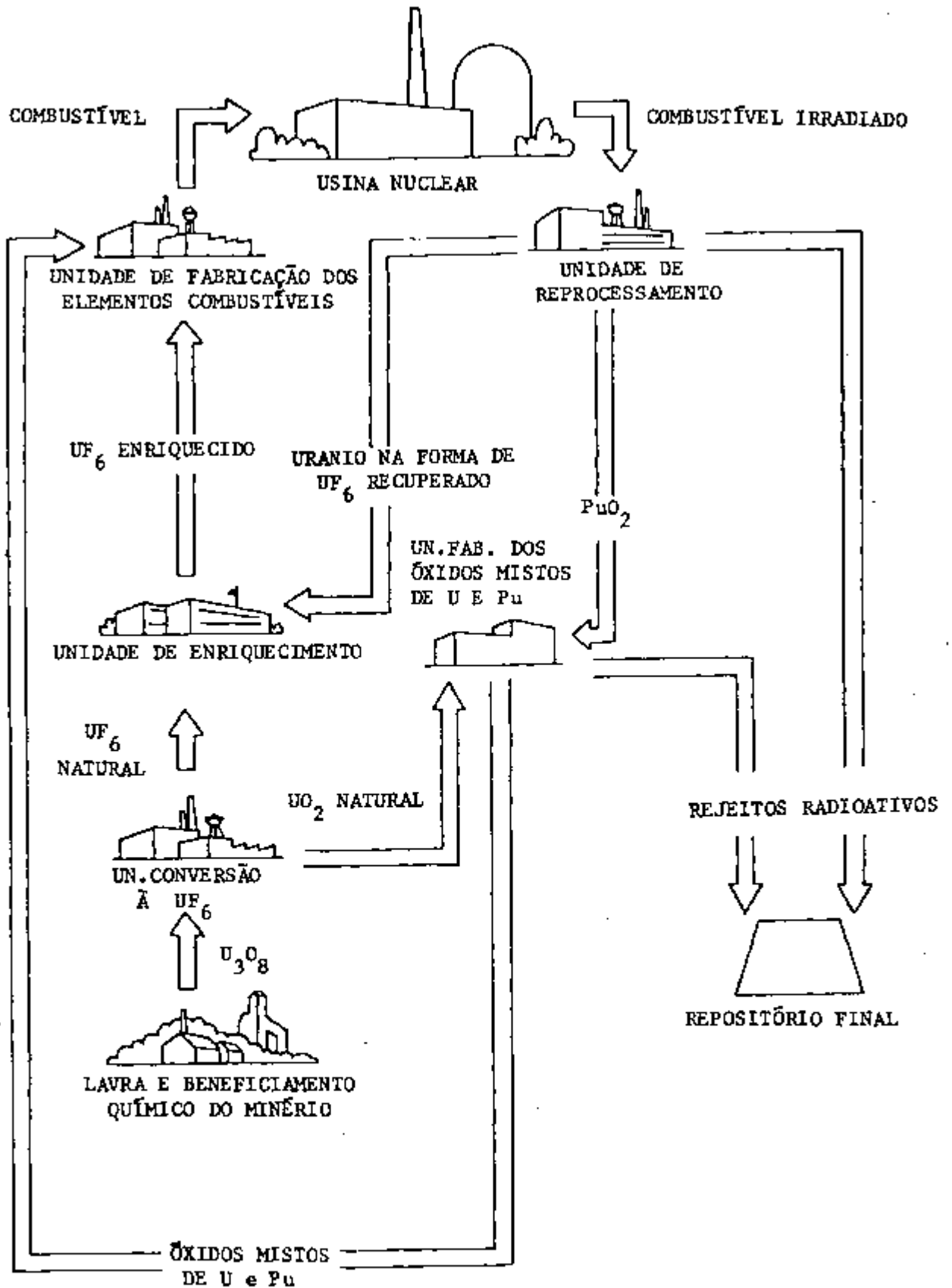


FIGURA 2.3. - OPÇÃO III - CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR COM RECICLAGEM DO URÂNIO E DO PLUTÔNIO / 4 /

Os rejeitos produzidos pela mineração são distribuídos em materiais gasosos, sólidos e líquidos.

Rejeitos gasosos - compreende as partículas de urânio em suspensão e do radônio e seus produtos de decaimento liberados na atmosfera quando o minério é exposto e fragmentado durante as operações de mineração.

Rejeitos sólidos - os rejeitos sólidos primários produzidos pela mineração são a cobertura de solo e a rocha estéril.

Rejeitos líquido - grande quantidade de rejeitos líquidos provenientes da mineração a céu aberto é a água de drenagem da mina. O urânio dissolvido em suspensão e seus produtos de decaimento estão presentes nessa água.

2.2.2 - Beneficiamento do minério

O urânio é extraído do minério de urânio através de processos químicos e mecânicos e convertidos em um produto semi-refinado, comumente chamado "yellow cake" que contém de 70 a 90% de U_3O_8 .

Dois métodos foram desenvolvidos nas operações que envolvem o beneficiamento, nos E.U.A.: o processo de lixiviação ácida e o processo de lixiviação com carbonato de sódio.

A escolha depende das características do minério processado. No Brasil (Poços de Caldas) é utilizado o processo de lixiviação ácida que permite a produção de 80% de todo "yellow cake". Os passos básicos no processo de lixiviação ácida incluem:

1. O minério é triturado, e o material moído e misturado é transferido para os tanques de lixiviação.

2. O minério moído é misturado com ácido sulfúrico e um reagente oxidante. O resíduo é separado e o produto licoroso é enviado às unidades de extração com solvente.

3. No processo acima descrito, o urânio é purificado e concentrado.

4. O urânio é precipitado com amônia e transferido como pasta fluída.

5. O concentrado é centrifugado para separação dos resíduos líquidos.

6. O concentrado é calcinado e pulverizado.

7. O concentrado de urânio é acondicionado para transporte.

Nas operações de beneficiamento são produzidos os gasosos, líquidos e sólidos.

Rejeitos gasosos - consiste de ar, normalmente, carregado de gases radioativos e partículas sólidas.

Rejeitos líquidos - consiste de soluções contendo produtos químicos provenientes dos processos de trituração, lixiviação e operações de limpeza dos equipamentos.

Rejeitos sólidos - são compostos, principalmente, de partículas de argila e fragmentos de rocha matriz.

2.2.3 - Conversão em Hexafluoreto de Urânio

O concentrado de urânio é convertido em hexafluoreto de urânio para posterior processo de enriquecimento.

Para conversão em hexafluoreto de urânio existem dois processos:

- a) Processo a fluor seco que consiste das seguintes operações:
1. Processo inicial de amostragem e pesagem.
 2. Redução do U_3O_8 , em camadas fluidizadas com amônia.
 3. Fluoração em camadas fluidizadas com HF anidro para formar UF_4 .
 4. Destilação fracionada para formar o UF_6 refinado.
- b) O processo de extração por solvente consiste das seguintes operações:
1. Processo inicial de amostragem e pesagem.
 2. Digestão a quente, em ácido nítrico.
 3. Extração por solvente com tributilfosfato.
 4. Reextração do urânio como nitrato uranilo para solução aquosa.
 5. Calcinação para UO_3 .
 6. Redução a UO_2 em camadas fluidizadas, com amônia.
 7. Fluoração em dois estágios para formação de UF_4 .
 8. Fluoração para formar UF_6 com fluor elementar.

Os rejeitos produzidos na conversão em hexafluoreto depende de processo utilizado.

No processo a fluor seco os rejeitos aparecem na forma sólida e gasosa

enquanto que, no de extração por solvente, os rejeitos são líquidos.

2.2.4 - Enriquecimento Isotópico

O hexafluoreto de urânio produzido no processo descrito acima é usado nas operações de enriquecimento isotópico cuja finalidade é aumentar a concentração do isótopo físsil ^{235}U no urânio natural.

O enriquecimento isotópico proporciona ao urânio natural uma porcentagem de 2 a 4% de ^{235}U necessária para o funcionamento dos reatores moderados a água leve.

Existem 3 processos de enriquecimento isotópico:

1. Ultra-centrifugação - baseia-se no seguinte processo: uma mistura de 2 gases contidos num cilindro em alta rotação é separada, com a componente de maior massa molecular concentrando-se na superfície mais externa, e a componente mais leve concentrando junto ao eixo do cilindro.

2. Difusão gasosa - baseia-se no fenômeno de dispersão molecular. Numa mistura de gases, as moléculas de menor massa tem maior velocidade e chocam-se com maior frequência com as paredes do recipiente. Se essas paredes tiverem poros que permitem apenas a passagem de moléculas individuais e não permitem o escoamento de gás como um todo, dar-se-á início ao processo de separação.

3. Jato centrífugo - método a ser utilizado no Brasil é efetuado pelo mesmo mecanismo básico da centrifugação. Porém, os problemas mecânicos são evitados pois as forças centrífugas são geradas por deflexão de um jato em alta velocidade acionado por diferenças de pressão consistindo de hexafluoreto de urânio e um gás leve auxiliar.

O hexafluoreto de urânio misturado com um gás leve expande-se através de uma parede fixa curva. No fim da deflexão, o fluxo é dividido em uma fração leve e uma fração pesada por meio de uma lâmina. O gás auxiliar leve, presente em grande quantidade aumenta a velocidade do UF_6 , e portanto aumenta a intensidade da força centrífuga que determina a separação. Além disso, o gás auxiliar impede a sedimentação do UF_6 na parede curva, contribuindo para a separação isotópica.

Os rejeitos produzidos no processo de enriquecimento isotópico são:

Rejeitos gasosos - consiste de urânio carregado pelo ar.

Rejeitos sólidos - compreende as partículas dispersas nos líquidos utilizados nas operações de limpeza. São, normalmente, acondicionados, e estocados

próximos à usina.

Rejeitos líquidos - são provenientes das operações de limpeza (contendo nitrato, fluoretos e ferro) e das instalações auxiliares de produção (contendo fluoretos, nitratos, cloretos, ferro e amônia).

2.2.5 - Fabricação de Elementos Combustíveis

A fabricação de elementos combustíveis consiste dos seguintes processos:

- a) O UF_6 é convertido em UO_2 .
- b) São fabricados pastilhas de UO_2 e sinterizados.
- c) As pastilhas são inseridas em tubos de "zircaloy".
- d) Os tubos são selados, soldados nas extremidades.
- e) Os tubos (elementos combustíveis) são agrupados e a esse conjunto dá-se o nome de conjuntos combustíveis.

Os rejeitos originados neste processo e nas operações de limpeza dos equipamentos são:

- a) Rejeitos líquidos - consiste, principalmente, de líquidos contendo urânio e ^{234}Th , que é produto de decaimento do ^{238}U .
- b) Rejeitos sólidos - consiste, principalmente, de CaF_2 contaminado, que, normalmente, é acondicionado e estocado no próprio local da usina.
- c) Rejeitos gasosos - compreende o ar carregado de partículas provenientes do processo de conversão do UF_6 em UO_2 e das operações de recuperação do urânio contido nos equipamentos danificados.

2.2.6 - Irradiação do Combustível no Reator

Uma parte do combustível depois de irradiado é transferido para um tanque apropriado e estocado por um período de 120 a 180 dias para permitir o decaimento dos núclídeos de meia vida curta e a diminuição do calor produzido. Após esse período, o combustível irradiado pode ser enviado à usina de reprocessamento ou ser estocado em um local apropriado. A maioria das substâncias radioativas que ocorrem na usina nuclear são provenientes do circuito primário. Elas consistem de materiais dispersos no circuito primário e são classificadas em produtos de ativação e produtos de fissão.

Produtos de ativação - Os produtos de ativação conhecidos são o ^{16}N (mais importante em termos de blindagem) o ^{17}N , ^{19}O e o ^{13}N . Outros elementos resultantes da corrosão dos equipamentos e dos materiais estruturais do reator que se tornam ativados quando submetidos à radiação emitida no cerne são: ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{54}Fe , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co e o ^{95}Zr .

Produtos de fissão - Os nuclídeos mais importantes são os isótopos de xenônio, criptônio, iodo e o trítio. Quantidades pequenas de produtos de fissão formam-se no moderador devido a contaminação da parte externa do elemento combustível pelo urânio.

Os rejeitos produzidos na Usina Nuclear são:

Rejeitos sólidos - consiste, principalmente, de resinas de troca iônica utilizadas na purificação do moderador, dos materiais usados na limpeza e descontaminação da usina, das substâncias concentradas no evaporador. As resinas, como as substâncias concentradas no evaporador, são estocadas no período de 6 meses para posteriormente serem acondicionadas em recipientes metálicos e estocados em local apropriado. Os materiais contaminados, como papéis, roupas, etc., são prensados, acondicionados e estocados. Os materiais maiores, como as guias das barras de controle, as barras de controle e outros componentes quando danificados, são retalhados, descontaminados, acondicionados e estocados.

Rejeitos gasosos - consiste de nuclídeos na forma gasosa que podem causar a contaminação do ar no prédio do reator. Essa contaminação pode dar-se de 2 formas:

- a) Ativação do ar, próximo ao vaso de pressão.
- b) Escape de substâncias gasosas radioativas resultante de falhas no circuito primário.

As substâncias radioativas que escapam do circuito primário são retiradas na usina e continuamente filtradas, diluídas e liberadas na atmosfera.

Rejeitos líquidos - os rejeitos líquidos passam por um sistema de tratamento composto de evaporadores, filtros e trocadores iônicos.

2.2.7 - Instalações de Estocagem do Combustível Irradiado

Uma instalação de estocagem do combustível irradiado inclui uma série de operações que são: o armazenamento, a refrigeração (normalmente pela transferência de calor para o ambiente através de um sistema secundário de refrigeração e troca de calor) a proteção, a inspeção e controle dos materiais radioativos li

berados do combustível danificado. Os tanques de armazenamento constituem-se de uma fonte de rejeitos radioativos sólidos secos e úmidos que compreende, principalmente, produtos utilizados na remoção de materiais radioativos introduzidos nos tanques pelo combustível irradiado. São, de modo geral, os materiais retidos nos diversos meios absorvedores e incluem também os filtros, as resinas de troca iônica e as camadas absorvedoras de iodo, quando danificados.

As descrições e características dos tanques de estocagem serão mencionadas na seção 3.3.

2.2.8 - Usinas de Reprocessamento

As usinas de reprocessamento geram os rejeitos radioativos de maior atividade, provenientes da recuperação do urânio e do plutônio. O reprocessamento consiste-se desde a operação de recebimento do combustível irradiado até a fabricação e acondicionamento do dióxido de plutônio e do hexafluoreto de urânio.

A tecnologia de reprocessamento do combustível irradiado nas usinas, existentes ou em desenvolvimento baseia-se no método aquoso conhecido como processo Purex que será descrita abaixo.

As etapas do reprocessamento do combustível são:

- a) Recebimento de combustível irradiado em recipiente de proteção.
- b) Estocagem do combustível por tempo suficiente para o decaimento da radioatividade a níveis compatíveis com os critérios usados nas operações.
- c) Desmantelamento dos conjuntos de combustíveis e seu retalhamento em pedaços pequenos.
- d) Lixiviação do combustível com ácido nítrico.
- e) Preparação da solução ácida para o processo de extração por solvente.

O processo Purex consiste das seguintes etapas:

- a) Extração por solvente que separa dos produtos de fissão, as partes de urânio e plutônio.
- b) Purificação de urânio e plutônio para separá-los dos produtos residuais de fissão.
- c) Conversão do urânio para UF_6 e plutônio para PuO_2 .

A Figura 2.4 identifica as várias etapas do reprocessamento.

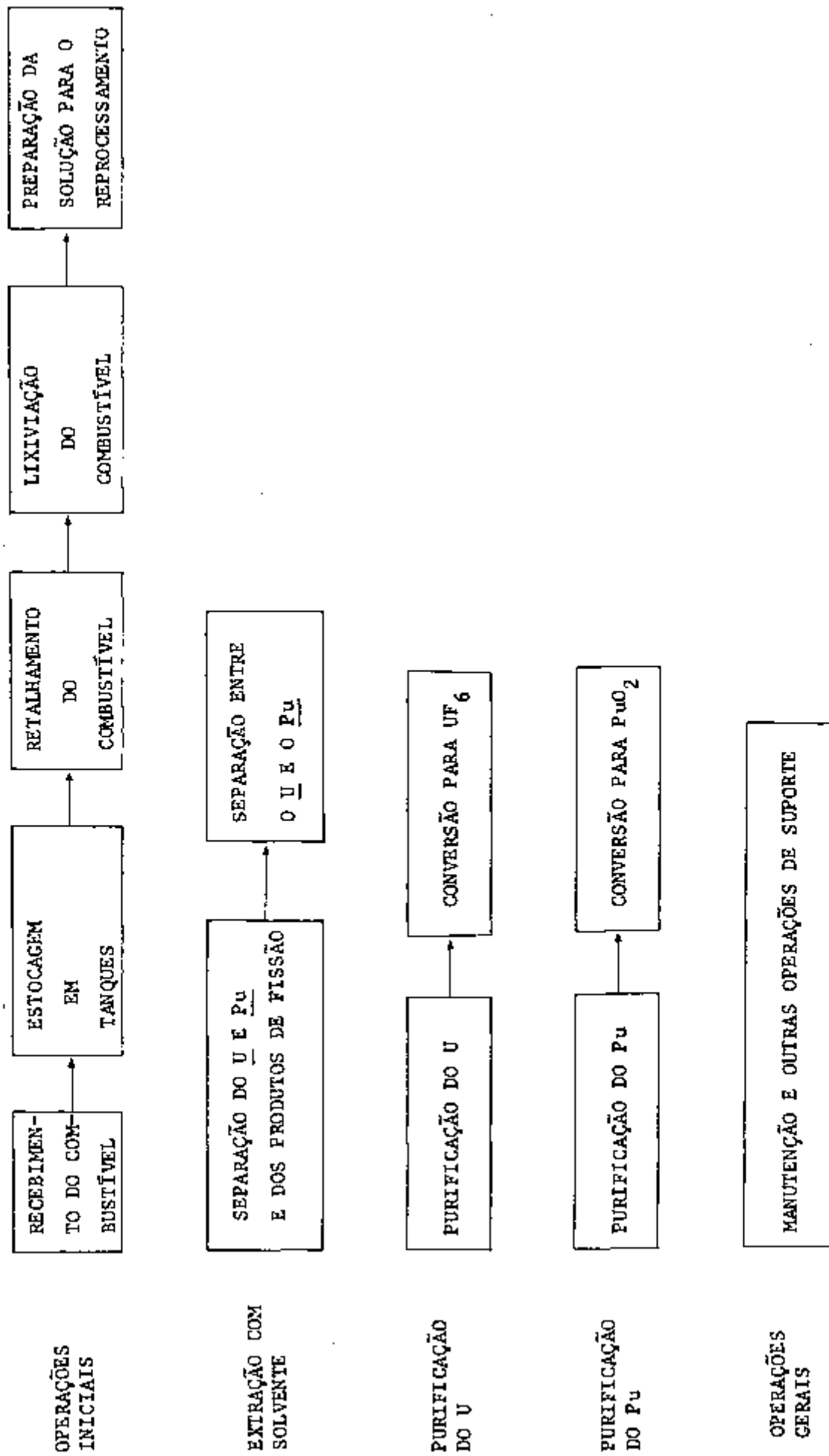


FIGURA 2.4. - ETAPAS PRINCIPAIS DURANTE O REPROCESSAMENTO / 4 /

Descrição das etapas de reprocessamento.

1. Primeira etapa - consiste na lavagem dos recipientes para remover a radioatividade externa e a transferência dos conjuntos combustíveis do recipiente para os tanques de estocagem .

As soluções de descontaminação dos recipientes, as soluções de regeneração e de limpeza dos tanques e os filtros e as resinas dos tanques constituem os resíduos originados nesta operação.

2. Separação com extração por solvente - a descontaminação e a separação pelo processo de extração por solvente transfere, inicialmente, o urânio e o plutônio para a fase orgânica deixando na solução de ácido nítrico, pequenas quantidades de urânio e plutônio e também os produtos de fissão. Esta solução é denominada rejeito de alta atividade. Posteriormente, há a separação do urânio do plutônio por transferência seletiva do plutônio para o ácido nítrico. Os rejeitos provenientes das operações do reprocessamento consistem de rejeitos de alta atividade, rejeitos gasosos, rejeitos produzidos na purificação dos solventes e rejeitos formados na combustão de solventes gastos.

3. Purificação e conversão do urânio - o processo de purificação do urânio envolve a extração por solvente, utilizando a mesma tecnologia já aplicada na etapa de descontaminação e separação.

Nesta etapa os rejeitos são provenientes, principalmente, da purificação dos solventes e tratamento dos materiais na forma gasosa, e consistem de filtros, partes danificadas do sistema de tratamento de gases e mistura de sólidos coletados nos diversos meios absorvedores da usina.

4. Purificação e conversão do plutônio - a purificação do Pu é realizada através do processo de extração por solvente do nitrato de plutônio para remover os produtos residuais de fissão e seguida da conversão do nitrato de Pu para oxalato insolúvel que é calcinado para formar o dióxido. Os rejeitos dessa etapa contêm, relativamente, poucos produtos de fissão e são provenientes, principalmente, das operações de purificação dos solventes. Incluem-se também os rejeitos sólidos, notadamente, as partículas coletadas nos filtros.

5. Etapa geral - essa etapa inclui as operações gerais de manutenção , descontaminação de áreas e equipamentos, reaproveitamento e preparação de reagentes e soluções. etc. A manutenção envolve amplas atividades e geram rejeitos que incluem os filtros, materiais não combustíveis e alguns líquidos provenientes dos laboratórios.

Os rejeitos produzidos na Usina de Reprocessamento pode ser classificados em 5 categorias:

a) Rejeitos de alta atividade - são aqueles rejeitos aquosos resultantes da operação do primeiro ciclo de extração por solvente, associados aos rejeitos concentrados dos demais ciclos em uma usina de reprocessamento do combustível irradiado/ 34 /.

As características dos rejeitos de alta atividade estão descritos na seção 3.4.

b) Rejeitos de atividade intermediária - incluem as soluções de nitrato de mercúrio provenientes do sistema de tratamento do rejeito gasoso, as soluções de limpeza dos tanques de estocagem, as soluções aquosas resultantes das operações de descontaminação de partes da usina, as soluções aquosas resultantes da lavagem de regeneração dos solventes e soluções inutilizadas provenientes dos laboratórios. Esses resíduos sofrem tratamentos onde são neutralizados e concentrados e posteriormente são estocados em tanques apropriados, para que ocorra a precipitação de sais cristalizados. Uma outra forma de estocagem é solidificá-los juntamente com os rejeitos de alta atividade.

c) Rejeitos de baixa atividade - consiste, principalmente, das soluções aquosas resultantes do segundo e terceiro ciclo de purificação do urânio e plutônio, dos vapores condensados gerados nos concentradores e no sistema de tratamento de gases, e dos líquidos provenientes de limpeza dos solventes usados na purificação do plutônio.

Outras características são mencionadas na seção 3.2.

d) Rejeitos gasosos - esses rejeitos compreendem os efluentes gasosos originados no tanque de dissolução através da extração por solvente e nos sistemas de ventilação. Os efluentes atravessam as camadas de zeólito prata para remoção do iodo e dos filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air Filters) e para posteriormente serem eliminados para o meio ambiente. Todos os produtos de fissão, xenônio e criptônio são eliminados dessa maneira.

e) Rejeitos sólidos - a classe de rejeitos sólidos, consistindo de sólidos úmidos, incluem os filtros usados nos tanques de estocagem, resinas de troca iônica empregados na purificação dos líquidos contaminados dos tanques, sílica gel do estágio final de purificação do urânio, materiais retidos nos filtros do sistema de tratamento do rejeito líquido usado na conversão do nitrato de plutônio para o óxido de plutônio. Outros rejeitos sólidos são: fragmentos dos encamisamentos de elementos combustíveis, equipamentos danificados, filtros dos siste

mas de ventilação, cinzas do processo de fluoração de urânio, camadas de zeólita utilizadas na absorção do iodo, etc. Os rejeitos sólidos combustíveis são incinerados em fornos enquanto que, os não combustíveis são acondicionados em recipientes e estocados.

2.2.9 - Usinas de fabricação dos óxidos mistos de U e Pu.

Nessas usinas, o plutônio proveniente da usina de reprocessamento combina-se com o urânio natural para produzir os óxidos mistos.

As operações envolvidas na produção dos óxidos mistos são:

- a) Mistura de PuO_2 e UO_2 em pó.
- b) Compressão.
- c) Fabricação das pastilhas.
- d) Sinterização a alta temperatura das pastilhas.
- e) Retificação das pastilhas.
- f) Limpeza e inspeção das pastilhas.
- g) Introdução das pastilhas nos tubos de encamisamentos.
- h) Descontaminação dos elementos combustíveis e soldagem nas extremidades.

Os materiais produzidos na usina e que estão contaminados com elementos transurânicos podem ser classificados em não combustíveis e combustíveis.

Rejeitos não combustíveis - podem ser originados, nas áreas de operação da usina que consistem, principalmente, de metais e vidros e no interior dos compartimentos isolados que são os recipientes, equipamentos metálicos e encamisamentos danificados.

Rejeitos combustíveis - podem ser gerados tanto no interior dos compartimentos isolados, como nas outras áreas da usina. Incluem-se nessa classe de rejeitos, roupas, papéis, polietileno, látex, cloreto de polivinil, etc.

2.3 - Categorias de rejeitos radioativos

2.3.1 - Introdução

A utilização inicial de materiais radioativos em pequena escala não apresentou problemas sérios no contexto global de gerenciamento de rejeitos. Mais

tarde, com o advento da indústria nos países mais desenvolvidos, necessitou-se encontrar uma classificação adequada para os rejeitos radioativos produzidos durante o ciclo do combustível.

Atualmente, várias instituições existentes, optaram por modelos empíricos pelos quais eles classificam os rejeitos em categorias coerentes com a tecnologia empregada. As categorias elaboradas podem bem satisfazer os problemas de cada país, mas não encontra uma identidade com os empregados nos demais centros, tornando assim, a padronização um assunto muito complexo.

Entretanto, tem uso corrente em todo mundo, os termos: "baixa atividade", "atividade intermediária" e "alta atividade" empregados para descrever as diferentes concentrações de materiais radioativos. Infelizmente, essas expressões não possuem definições quantitativas aprovadas internacionalmente, o que as tornam um pouco restrita.

Somente poucos países, têm incluído em seus regulamentos, as definições das categorias de rejeitos.

2.3.2 - Categorias de rejeitos radioativos propostas pela Agência Internacional de Energia Atômica para fins de armazenamento e deposição.

A Agência Internacional de Energia Atômica - A.I.E.A. / 52 /, com base na experiência internacional adquirida no tratamento, armazenamento e deposição de rejeitos radioativos classifica-os em diferentes categorias, que levam em consideração inúmeros parâmetros, entre os quais pode-se mencionar:

- Estado físico
- Composição química
- Tipo de radiação emitida na desintegração dos radionuclídeos presentes
- Meia-vida do radionuclídeo
- Nível de radioatividade
- Nível de contaminação
- Efeitos mecânicos, térmicos e biológicos.

Embora, todos esses parâmetros sejam considerados no acondicionamento dos rejeitos radioativos, a sua classificação com respeito ao armazenamento e deposição pode ser resumida em diferentes categorias, conforme indicadas nas

Tabelas 2.1 e 2.2 .

No presente estudo foram empregados alguns termos apropriados às exigências deste trabalho. Utilizou-se a denominação "rejeito de alta atividade" para designar o material em cuja composição se encontra a maior parte dos produtos de fissão gerados no primeiro ciclo de extração por solvente, na unidade de repro-cessamento. O combustível irradiado, independente do ciclo do combustível, como os rejeitos contaminados com elementos transurânicos, serão considerados separadamente. Esse "rejeito de alta atividade" se constitui em objeto de maior interesse para o presente trabalho.

A denominação "rejeito de atividade intermediária " não foi utilizada devido à ausência de uma definição amplamente aceita, para esse rejeito.

TABELA 2.1. - CLASSIFICAÇÃO DOS REJEITOS / 52 /

CATEGORIA	MEIA-VIDA	NÍVEL DE RADIÇÃO	CARACTERÍSTICAS
I	Longa	Alto	Alta atividade beta/gama Quantidade significativa de emissor alfa Alta radiotoxidade Alta produção de calor
II	Longa	Médio	Média atividade beta/gama Quantidade significativa de emissor alfa Média radiotoxidade Baixa produção de calor
III	Longa	Baixo	Baixa atividade beta/gama Quantidade significativa de emissor alfa Baixa e média radiotoxidade Significante produção de calor
IV	Curta	Médio	Média atividade beta/gama Quantidade insignificante de emissor alfa Média radiotoxidade Baixa produção de calor
V	Curta	Baixo	Baixa atividade beta/gama Quantidade insignificante de emissor alfa Baixa radiotoxidade Insignificante liberação de calor

OBS. Insignificante indica uma característica que, geralmente, pode ser ignorada para o propósito de armazenamento, satisfazendo critérios da autoridade competente.

TABELA 2.2. - CORRELAÇÃO CATEGORIA/PROCEDÊNCIA / 52 /

CATEGORIA	PROCEDÊNCIA DE REJEITOS
I	<p>Elementos combustíveis irradiados acondicionados em recipientes cerâmicos ou metálicos</p> <p>Partes estruturais de elementos combustíveis irradiados</p> <p>Rejeitos líquidos de alta atividade gerados no reprocessamento</p> <p>Rejeito solidificado em matriz monolítica</p>
II	<p>Partes estruturais do elemento combustível (reprocessado) contaminados com produtos de fissão e actínides</p>
III	<p>Lamas contaminadas durante o reprocessamento</p> <p>Resinas</p> <p>Solventes</p> <p>Equipamentos</p>
IV	<p>Resinas</p> <p>Concentrados</p> <p>Líquidos solidificados</p> <p>Filtros de Centrais Nucleares</p>
V	<p>Roupas</p> <p>Equipamentos de laboratório</p> <p>Lavas</p> <p>Ferramentas</p> <p>Lavanderia</p> <p>Papéis, trapos, plásticos, tapetes</p>

3. ARMAZENAMENTO DOS REJEITOS RADIOATIVOS

3.1 - Introdução

Muitos métodos têm sido propostos, nos últimos anos, para o armazenamento de rejeitos radioativos. Porém, há 2 alternativas básicas a serem consideradas dentro do contexto de gerenciamento de rejeitos radioativos no ciclo do combustível.

- Confinamento dos rejeitos na Terra
- Eliminação dos rejeitos da biosfera

3.1.1 - Confinamento dos rejeitos na Terra

Essa primeira alternativa corresponde ao isolamento dos rejeitos em depósitos superficiais ou profundos na crosta terrestre.

Podemos definir, neste caso, 3 outros conceitos:

- Armazenamento ou estocagem - designa uma operação de confinamento que permite a recuperação posterior do rejeito.

- Deposição - consiste na operação de armazenamento definitivo que não supõe a recuperação posterior do rejeito.

Repositório - compreende todas as instalações de estocagem do rejeito radioativo.

Quatro ambientes podem ser definidos como candidatos ao confinamento dos rejeitos radioativos:

a) Fundos oceânicos

A filosofia básica da deposição de rejeitos radioativos no mar apoia-se na grande capacidade de diluição e dispersão das massas líquidas⁴⁷, não se constituindo, portanto, em requisito necessário a manutenção da integridade dos recipientes durante o tempo de decaimento da radioatividade para níveis inofensivos.

As recomendações internacionais em vigência requerem apenas que os recipientes mantenham-se íntegros durante os períodos de manuseio e transporte, bem como durante a descida e impacto no leito oceânico.

O conhecimento adquirido até o presente momento, sobre os processos oceânicos, é insuficiente para construir um modelo ideal do movimento dos radio-nuclídeos liberados do fundo do mar, através do ambiente marinho / 97 /.

Esse método está sendo utilizado pela Inglaterra, França e Holanda, e largamente estudada pelo Japão.

b) Camadas de gelo polar

A alternativa de estocagem de rejeitos radioativos em camadas polares não é atraente devido, principalmente, à discutida estabilidade do gelo a longo prazo. Sabe-se que as calotas de gelo passam por oscilações em períodos de aproximadamente 10.000 anos, quando se registram mudanças climáticas, relativamente, rápidas.

c) Depósito no solo

Trata-se do armazenamento de rejeitos próximo à superfície com pretensão ou não de recuperá-los futuramente. Esses depósitos estão sujeitos à infiltração de águas, erosão, animais escavadores, atividades do homem, etc. Os depósitos superficiais foram explorados para o armazenamento de rejeitos radioativos desde o início da pesquisa sobre armas nucleares, em 1940.

A Figura 3.1 exemplifica um sistema de armazenamento superficial.

d) Depósito em formações geológicas profundas

Apesar de existirem diversos conceitos sobre o isolamento dos rejeitos radioativos na biosfera, durante o tempo necessário para o seu decaimento, a única alternativa que parece ser viável, sob diversos pontos de vista, é o armazenamento dos rejeitos em formações geológicas profundas.

A Figura 3.2 mostra um exemplo desse repositório.

O principal atrativo desta alternativa é o fato de muitas formações geo

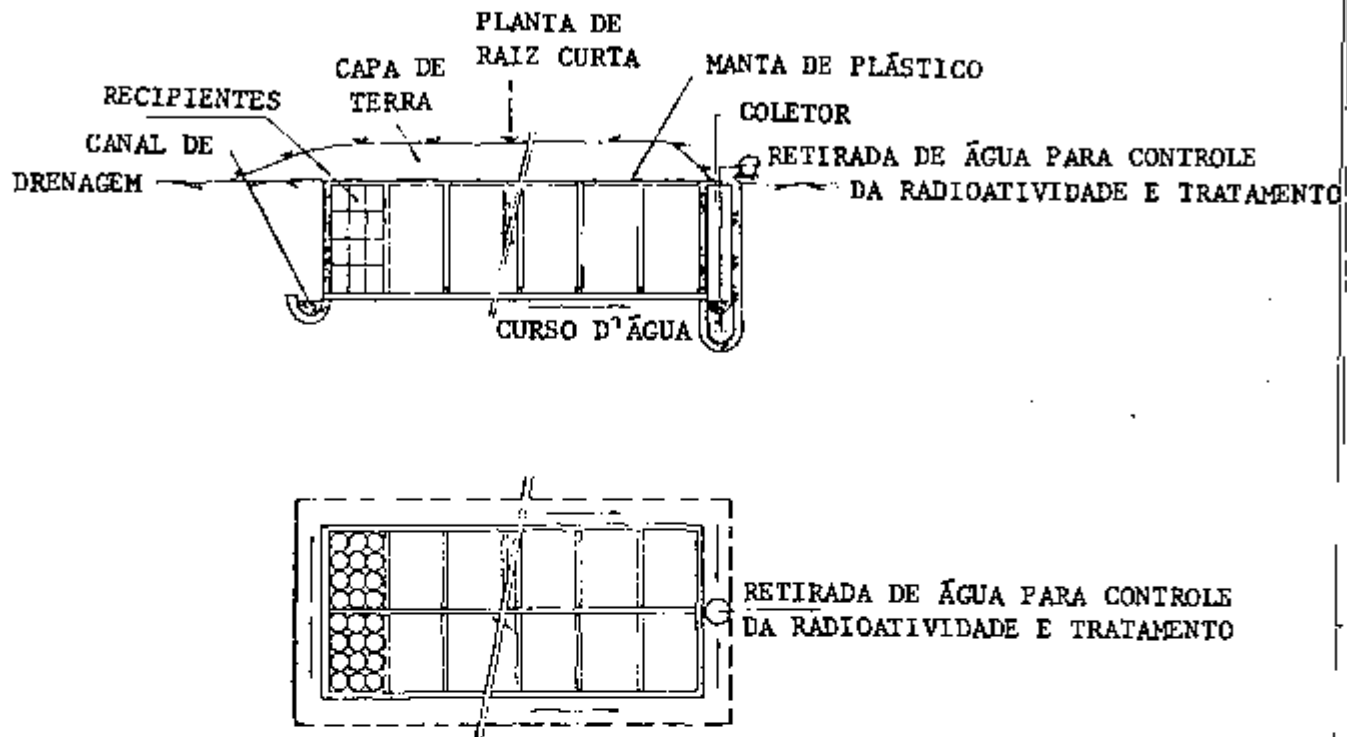


FIGURA 3.1. - PROJETO DE ARMAZENAMENTO DE REJEITOS
NO SOLO. / 63 /

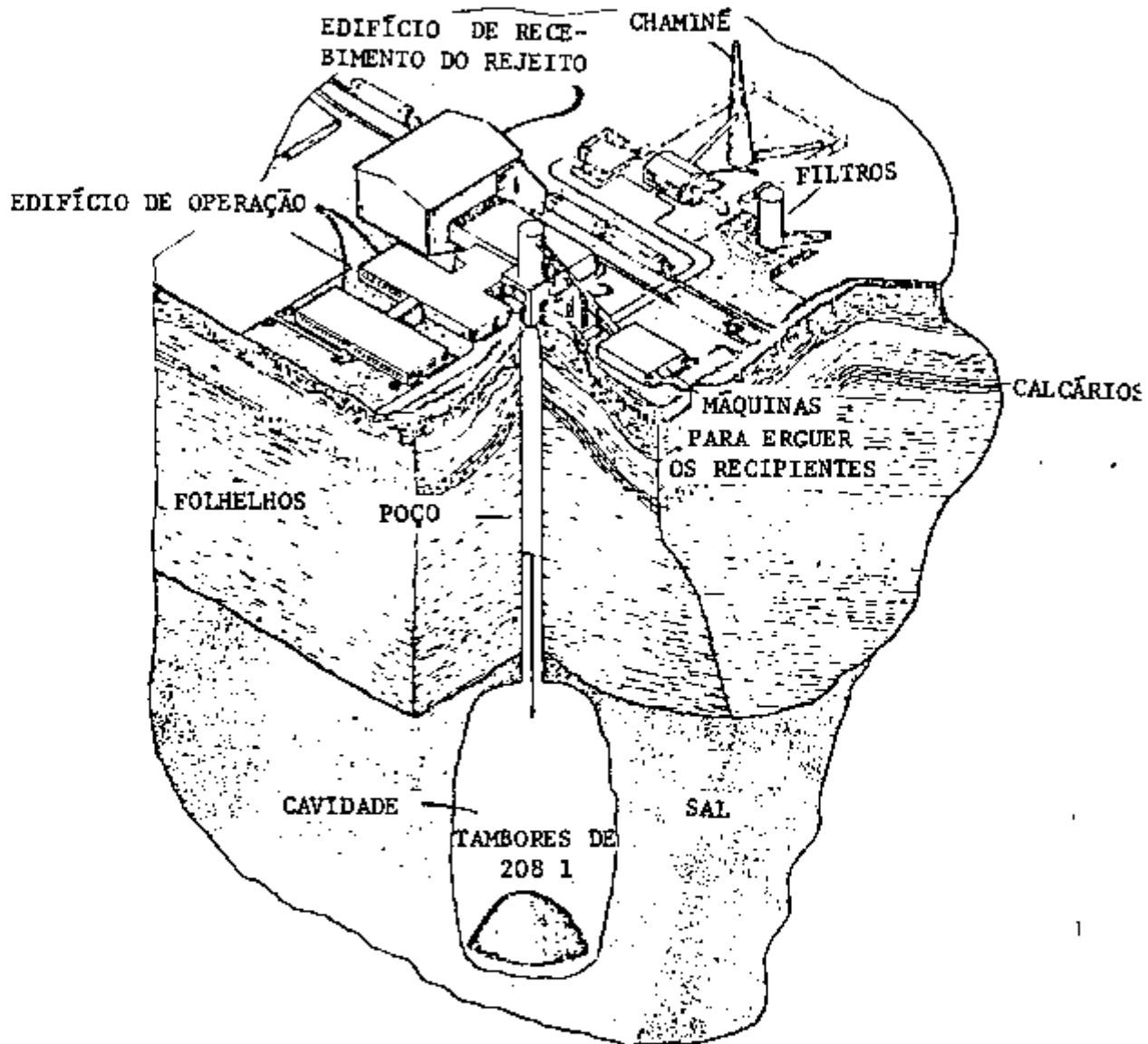


FIGURA 3.2. - CONCEPÇÃO DE DEPOSIÇÃO EM FORMAÇÕES DE SAL GEMA / 4 /

lógicas terem permanecido estáveis durante milhões de anos. Além disso, as formações geológicas detêm os três requisitos básicos para a deposição segura de materiais radioativos: resfriamento, proteção e isolamento. A rocha envolvente age como um dissipador de calor, proporcionando o resfriamento. A profundidade de deposição fornece uma proteção adequada contra a radiação, e a dimensão e integridade das formações rochosas permite o isolamento, evitando o escape de material para a biosfera.

As formações apropriadas para a deposição dos rejeitos são, o sal gema, granitos, xistos, rochas carbonáticas e metamórficas como as existentes no pré-Cambriano. Entre estas, o sal gema é considerado como a formação ideal, embora, outras rochas possam, em condições ideais, proporcionar um isolamento adequado.

3.1.2 - Eliminação dos rejeitos da biosfera

Dois métodos podem ser empregados na eliminação dos rejeitos:

a) Transmutação

Consiste em bombardear os radionuclídeos com partículas provenientes de reações nucleares, com o objetivo de transformá-los em novas espécies para proporcionar um decaimento mais rápido e/ou emitir níveis de radiações mais baixas. Tais reações seriam efetuadas em aceleradores, reatores de fusão ou reatores term nucleares controlados. A praticabilidade desse método depende sobretudo do desenvolvimento do processo de separação química e fracionamento dos rejeitos radioativos.

b) Estocagem extraterrestre

Os mecanismos para este método de eliminação utilizariam-se dos foguetes e naves espaciais. Esta alternativa torna-se inviável, na atual situação, considerando principalmente as limitações de peso, o elevado custo envolvido e as perspectivas de ocorrências de falhas nos veículos espaciais, ocasionando a recêntrada destes na atmosfera, com a carga de rejeitos radioativos.

3.2 - Armazenamento dos rejeitos de baixa atividade

3.2.1 - Introdução

O termo "baixa atividade" refere-se a todos os rejeitos radioativos que não sejam os rejeitos de alta atividade provenientes do reprocessamento de elementos combustíveis e os contaminados com elementos transurânicos. Esses rejeitos, constituem-se em maioria volumétrica dos rejeitos gerados pelo ciclo do combustível, e contêm pequena quantidade de radioatividade. Os principais radionuclídeos contidos neste rejeito são o ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs e outros produtos de fissão. Esses radioisótopos com meia vida máxima de aproximadamente 30 anos, decaem para níveis inofensivos em dezenas ou centenas de anos e requerem o armazenamento durante esse período de decaimento.

Os rejeitos de baixa atividade gerados no ciclo do combustível dividem-se em 3 categorias: (1) rejeitos sólidos úmidos, (2) rejeitos secos compactáveis e (3) rejeitos secos não compactáveis.

Os rejeitos sólidos úmidos originam-se durante o processo de tratamento da água da usina. Incluem-se nessa categoria os filtros, as resinas gastas e o concentrado do evaporador.

Os rejeitos secos compactáveis compreendem: papéis, roupas, filtros de ventilação, absorvedores de carvão vegetal, etc.

Os rejeitos não compactáveis são as ferramentas inutilizadas, tubos de laboratórios, etc.

Os rejeitos de baixa atividade antes de serem acondicionados e armazenados passam por um processo de tratamento com a finalidade de reduzir o seu volume e proporcionar uma máxima segurança.

- Tratamento

Os principais processos de tratamento, em uso, são: a compactação mecânica, a incineração e a solidificação. A compactação mecânica embora reduza o volume, aumenta a atividade por unidade de volume do rejeito. A incineração consiste em converter o rejeito a cinzas. A solidificação provoca um aumento no volume e no peso do rejeito, porém reduz a atividade específica.

- Armazenamento

Embora exista a estocagem em instalações na superfície, trataremos da estocagem sob o solo.

A tecnologia adotada atualmente para os rejeitos de baixa atividade consiste em armazená-los nos depósitos localizados em sub-superfície. Correspondem a trincheiras ou valas abertas no solo a pouca profundidade, cobertas posteriormente com mesmo material removido durante a escavação ou protegidas por camadas de concreto, para evitar o contato das plantas ou animais com os rejeitos e minimizar a infiltração da água.

Para assegurar o confinamento permanente dos rejeitos é imprescindível analisar as características do local que podem afetar o depósito.

3.2.2 - Característica do local

Os fatores naturais que determinam a seleção de locais para o armazenamento no solo são: o clima, o tipo de solo e estrutura geológica, a hidrologia, particularmente em relação às águas subterrâneas e a proximidade aos grandes centros urbanos / 50 /.

a) Clima

As áreas de clima constantemente úmido tornam-se as mais impróprias devido à maior probabilidade de ocorrer infiltração de água no solo. Como consequência drástica pode se dar a corrosão dos recipientes e a liberação dos radionuclídeos para o meio ambiente. É interessante notar que diversos depósitos de rejeitos de baixa atividade localizados na costa leste dos EUA apresentaram ocorrências de infiltração de radioatividade para além das fronteiras desses depósitos ao contrário dos depósitos localizados em climas desérticos do oeste americano que apresentaram estabilidade no processo de confinamento.

Embora o vento e a água constituam os meios naturais de transporte, as águas de sub-superfície são as grandes responsáveis pela propagação dos radionuclídeos provenientes dos rejeitos armazenados.

b) Hidrologia

As análises das condições hidrológicas dos depósitos de baixa atividade

seguem basicamente o mesmo padrão dos rejeitos de alta atividade. Essas investigações procuram determinar a profundidade e espessura dos aquíferos, a dureza, os conteúdos sólidos, pH e a composição química da água, além de avaliar o rendimento do aquífero. O conhecimento desses dados permite estabelecer uma transmissividade média da formação aquífera, associada com a permeabilidade do meio. Apesar das informações acima se relacionarem com os problemas de armazenamento de rejeitos, o interesse da pesquisa hidrológica está centralizada em identificar o comportamento ou o fluxo da água no aquífero.

Na determinação dos fatores hidrológicos, também se incluem os riscos apresentados pelas águas superficiais, quando se infiltram no solo. Um diagrama representativo de um simples modelo hidrológico é mostrado na Figura 3.3 .

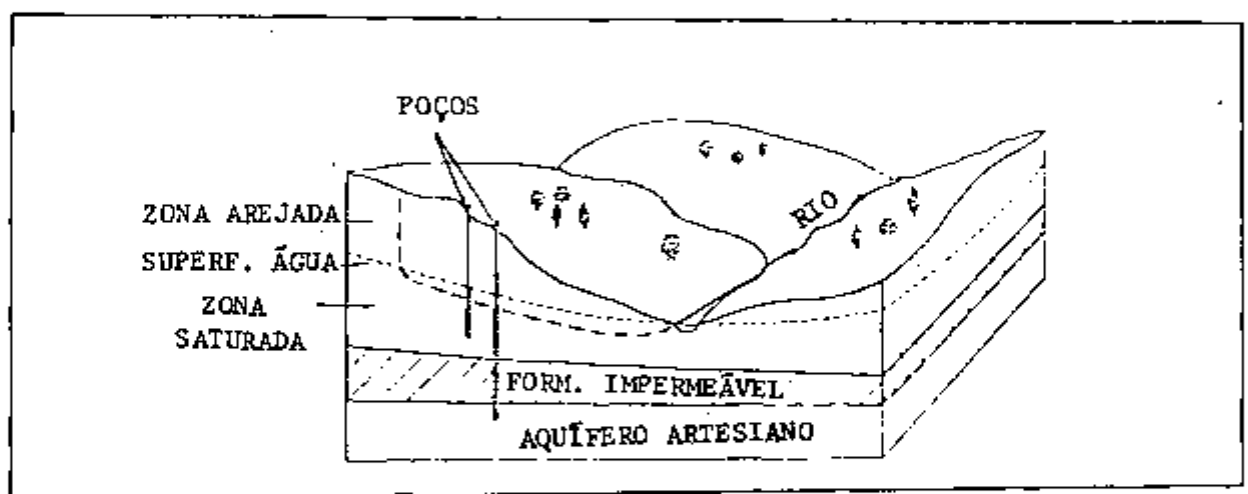


FIGURA 3.3.- DIAGRAMA REPRESENTATIVO DE UM MODELO HIDROLÓGICO /50/

Quando a água da chuva se precipita na superfície do solo, ela pode assumir 3 diferentes cursos. Primeiro, ela pode escoar pela superfície e integrar-se a uma corrente ou córrego; este representa o modo mais rápido de remoção. Segundo, a água pode penetrar na superfície e infiltrar-se pelo solo, parcialmente seco, até atingir uma zona saturada. E, por último, a água pode sofrer uma evaporação ou ser absorvida pelas raízes dos vegetais após ter se infiltrado no solo, parcialmente seco. O segundo caso representa a maneira direta da água entrar em contato com os recipientes dos rejeitos acarretando riscos sérios. A pou

ca unidade presente no solo, conhecido como zona arejada, aumenta com a profundidade, e o grau de saturação cresce continuamente sem demonstrar uma descontinuidade entre a zona saturada e insaturada. Apesar do termo "superfície da água" ser adotado em casos normais, ele representa o nível superior da zona saturada que tem continuidade com o nível do rio. Essa continuidade deve-se ao fato de que a água proveniente das infiltrações no solo, tem seu fluxo dirigido para a corrente do rio. Se eventualmente, ocorrer uma liberação de radionuclídeos dos rejeitos armazenados na zona arejada, pela água de infiltração, certamente, o rio será contaminado, provocando graves consequências ao homem e aos animais que se utilizam dessas águas.

A Figura 3.4. apresenta o desenvolvimento de um modelo, indicando os caminhos críticos.

c) Geologia e estudos sub-superficiais

As análises hidrológicas não são completas sem um perfeito entendimento das características geológicas associadas / 87 / e / 72 /. Para se estudar precisamente o horizonte sucessivo das camadas, devem ser coletadas e analisadas as amostras dos materiais geológicos. A finalidade desses estudos está relacionada diretamente com a permeabilidade das várias formações / 86 / e ao isolamento de seus componentes mineralógicos para a obtenção das medidas de troca iônica e absorção. Para as rochas consolidadas, as análises podem ser efetuadas nas próprias amostras coletadas através do método convencional de perfuração rotativa. Para as rochas sedimentares permeáveis são feitas análises físicas e avaliações da permeabilidade em amostras inalteradas, enquanto que, para as rochas essencialmente impermeáveis a presença do fluxo de água, restrita às fissuras, só podem ser constatadas em estudos "in situ".

As pesquisas para os materiais inconsolidados e granulares, podem ser executadas através de métodos convencionais de perfuração porém, obedecendo a um esquema de amostragem. Nos solos parcialmente secos, os furos de sondagens são executados através de brocas ou à percussão; as amostras são recolhidas utilizando-se de instrumentos apropriados para cada tipo de solo. Para os solos com muito cascalho e pedregulho, as análises tornam-se difíceis. Quando os solos possuem grãos menores e mais uniformes, como as areias, são utilizados os métodos de perfuração por lavagem, principalmente, para os solos não perturbados, independentes do seu estado seco ou saturado. Um exame visual das amostras não perturbadas podem indicar a homogeneidade do solo ou um contraste na composição das sucessivas lâminas. Essas observações são imprescindíveis durante as análises da permeabilidade do meio.

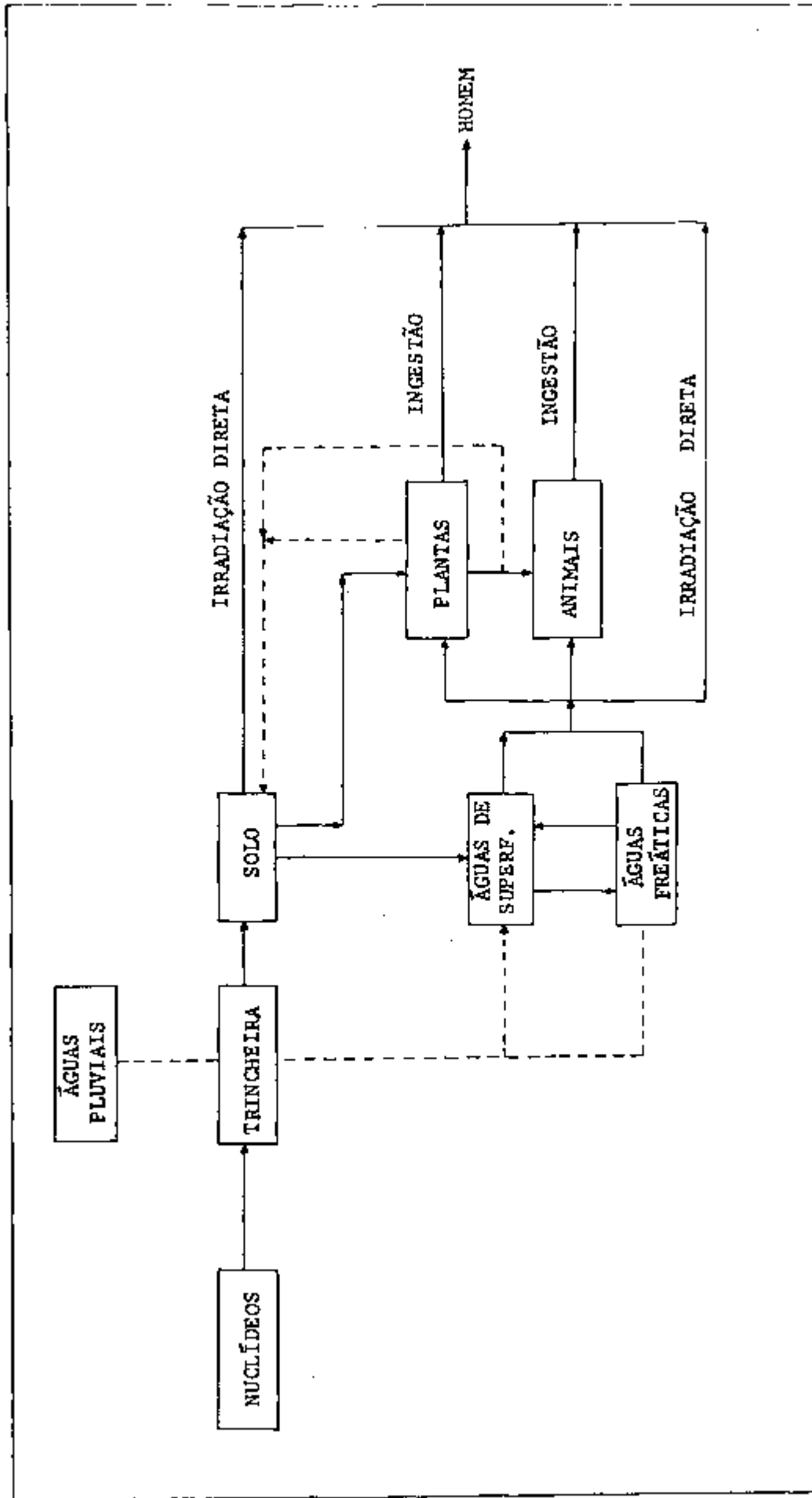


FIGURA 3.4. - DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO INDICANDO OS CAMINHOS CRÍTICOS

Os materiais laminados têm diferentes permeabilidades de acordo com a direção do fluxo da água e são designados de anisotrópicos. Para analisar-se a permeabilidade das amostras de solos granulares não perturbados em laboratório, induz-se a água ao longo do eixo de cada amostra cilíndrica orientada verticalmente. O fluxo induzido corresponde ao mesmo fluxo vertical observado em campo, onde ele atravessa transversalmente as camadas de solo dispostas normalmente na posição horizontal. O exame visual pode também indicar a distribuição da fração fina do solo (silte, argila) que inclui os componentes minerais de argila, em toda a matriz ou se ela ocorre concentrada em pequenos blocos na amostra. Esse fato é importante uma vez que, a capacidade de absorção está intimamente relacionada com a quantidade e distribuição dos minerais de argila. No entanto, o grande interesse dos materiais de argila está associado com sua capacidade essencialmente impermeável que pode proporcionar uma barreira aos eventuais aquíferos.

Um sumário do significado dos fatores naturais descritos acima, é apresentado na Tabela 3.1. Além dos fatores climáticos, hidrológicos e geológicos, estão mencionados, também, as condições dos rejeitos, com as respectivas indicações das características favoráveis e não favoráveis.

3.2.3 - Projetos dos repositórios

Os repositórios, que compreendem normalmente as valas ou trincheiras para o armazenamento de rejeitos de baixa atividade, são projetados para proporcionar máxima segurança e proteção aos operadores e à população contra os perigos de radiação durante as operações anormais em casos de acidentes, ou eventualmente nas operações normais. O confinamento integral dos rejeitos radioativos nos repositórios devem estar assegurados por um período de tempo, suficiente para torná-los inofensivos.

De modo geral, as características naturais de um sítio, cuidadosamente selecionado, podem garantir uma contenção adequada para os rejeitos. No entanto, a pouca disponibilidade de sítios ideais, exige o auxílio de técnicas complementares para manter o equilíbrio das características do sítio.

As características hidrológicas, como vimos, constituem os fatores essenciais para a aceitabilidade de um determinado sítio. Quando elas não demonstram uma segurança adequada para os rejeitos, são utilizados sistemas adicionais para impedir as eventuais infiltrações das águas das chuvas e são requeridos tam

TABELA 3.1. - AVALIAÇÃO DOS FATORES PARA A ESTOCAGEM DOS REJEITOS DE BAIXA ATIVIDADE / 50 /

FATORES	CARACTERÍSTICAS FAVORÁVEIS	CARACTERÍSTICAS DESFAVORÁVEIS
Estado físico dos rejeitos	Sólidos	Líquidos, lamas não solidificadas
Composição química dos rejeitos	Alcalino, neutro, baixa salinidade	Ácido, altamente salino
Composição radioquímica dos rejeitos	Presença de radionuclídeos de meia vida curta	Presença de (a) radionuclídeos de meia vida longa (b) espécies aniônica
Situação geográfica	Baixa precipitação, distantes das fontes de água, distantes dos grandes centros de população	Alta precipitação, próxima aos rios e lagos, próxima aos grandes centros urbanos
Geologia (geoquímica)	Materiais uniformes não consolidados, solos com alta capacidade de absorção, baixo conteúdo de cálcio solúvel	Rochas fraturadas, materiais inertes, alto conteúdo de cálcio ou outros sais solúveis
Hidrologia	Nível de água profundo, lento movimento da água, lenta migração de íons	Nível de água próximo à superfície, rápida migração de íons

bém, bons sistemas de drenagem que serão dotados de canaletas circundantes de material impermeável que conduzirão as águas para fora do local de armazenamento. São previstos sistemas de drenagem e bombeamento das águas de forma a evitar ao máximo, o contato da água com os recipientes contendo os rejeitos. As águas drenadas são conduzidas a um depósito coletor onde são analisadas e posteriormente evacuadas.

As Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 apresentam os esquemas adotados para as trincheiras e para a sua drenagem e recobrimento.

No Brasil, os repositórios de rejeitos de baixa atividade serão gerenciados pela própria CNEN, que está elaborando as Normas Nacionais de acordo com as recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica para o armazenamento desses materiais.

Nos Estados Unidos, existem vários repositórios em operação, tanto os depósitos comerciais como os administrados pelo Departamento de Energia. Nos depósitos de Oak Ridge, Tennessee, os rejeitos estão armazenados em trincheiras escavadas no folhelho intemperizado. O modelo desenvolvido para o armazenamento é apresentado na Figura 3.8. Consiste de uma trincheira com 3 metros de profundi

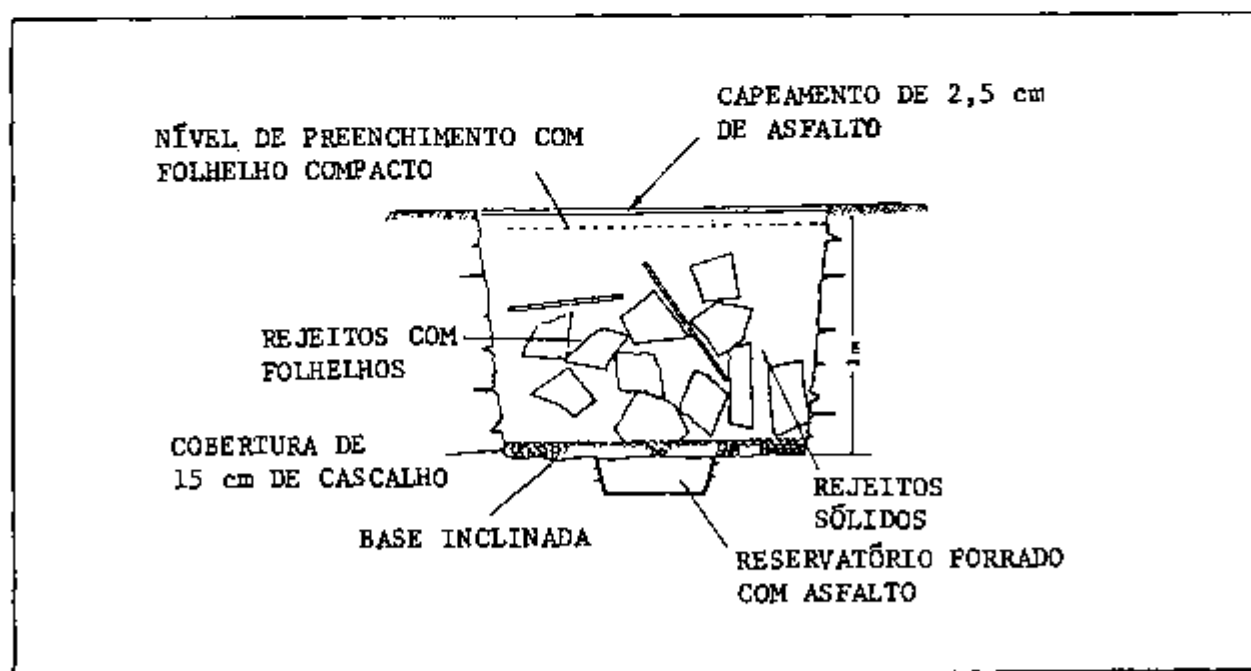


FIGURA 3.8. - SECÇÃO TRANSVERSAL DE UMA TRINCHEIRA PARA REJEITOS SÓLIDOS DE BAIXA ATIVIDADE / 50 /

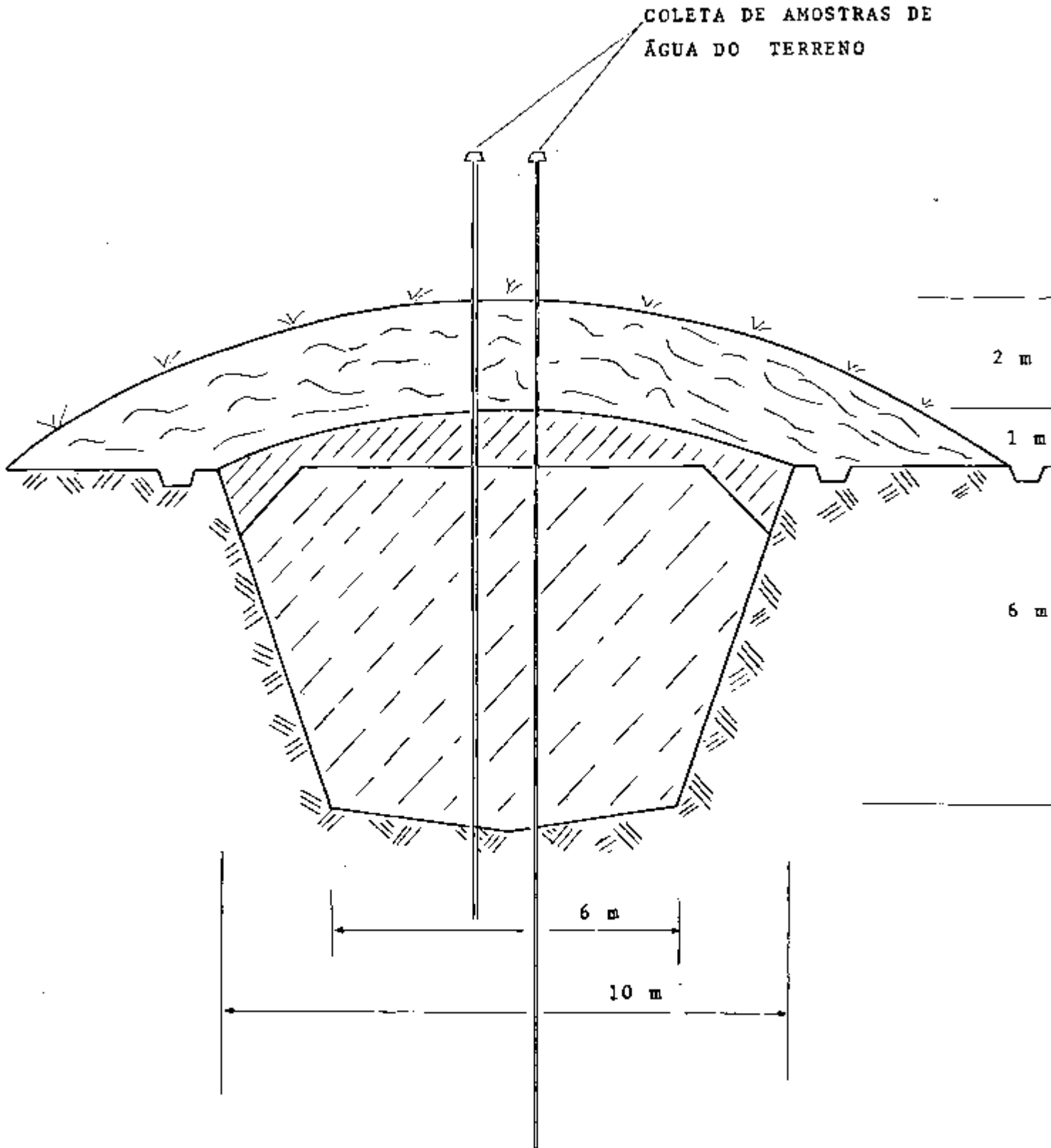


FIGURA 3.5. - MODELO DE TRINCHEIRA RECOBERTA

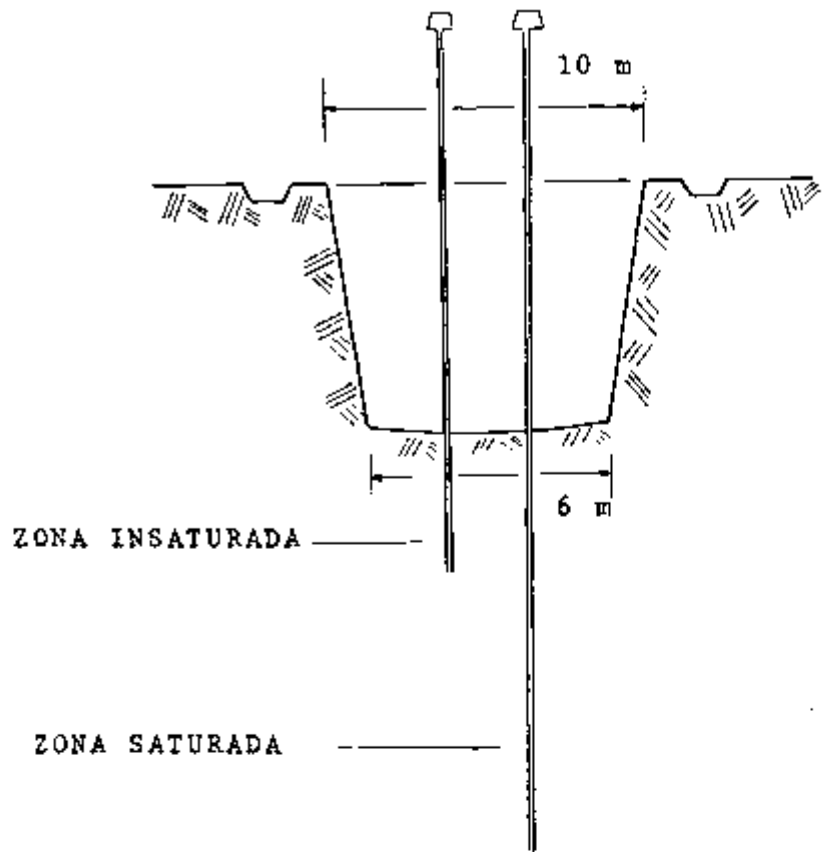


FIGURA 3.6. - DETALHES DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UMA TRINCHEIRA RECOBERTA

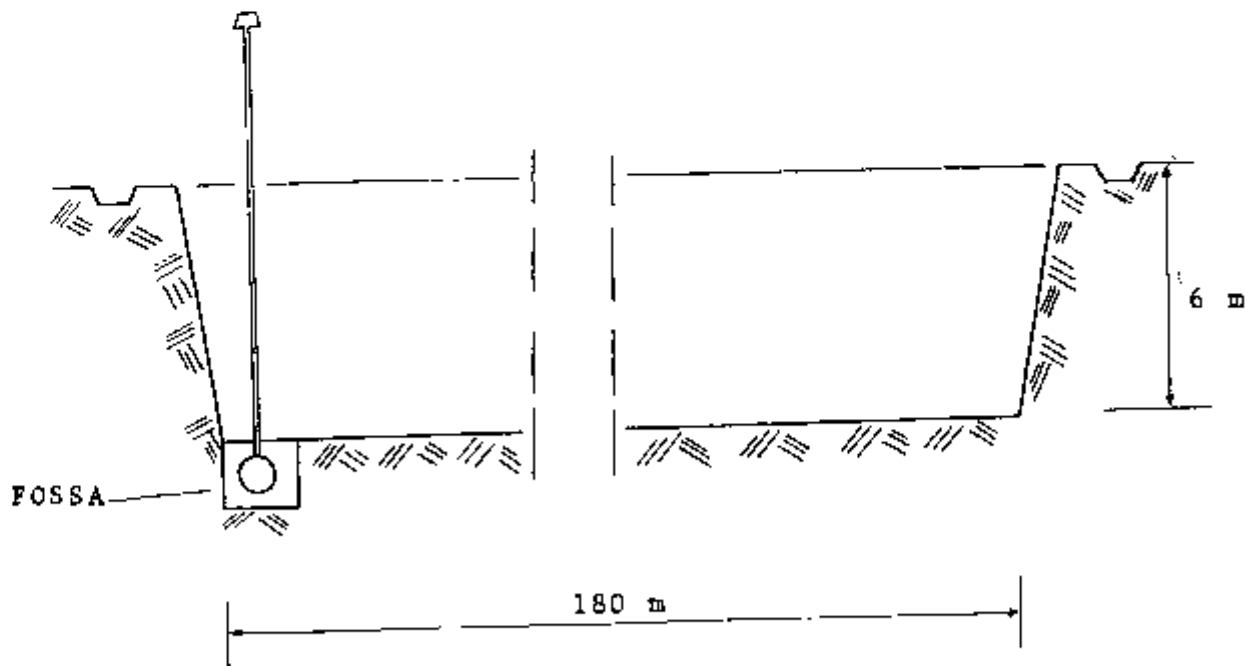


FIGURA 3.7. - DETALHES DA SECÇÃO LONGITUDINAL DE UMA TRINCHEIRA RECOBERTA

dade por 4,5 metros de largura provida de uma cobertura de 15 cm de cascalho na base que mostra leve inclinação de uma das extremidades para um pequeno reservatório, forrado com asfalto, e instalado para remover e amostrar a água através de bombeamento. Após o preenchimento da trincheira com os rejeitos misturados com o folhelho removidos da escavação, o topo é compactado e coberto com uma camada de 2,5 cm composta de asfalto e cascalho.

Na Alemanha⁵, os rejeitos de baixa atividade foram armazenados em uma mina de sal gema em Asse, a qual deixou de ser economicamente explorada em 1964. No seu interior existem cerca de 100 câmaras com dimensões médias de 60 metros de comprimento, 40 metros de largura e 15 metros de altura, distribuídas em níveis que vão de 490 a 800 metros de profundidade. Nessa última, são armazenados os tambores com rejeitos sólidos de baixa atividade. A manipulação dos tambores é feita por meio de guindastes especiais, e os tambores são empilhados por trás de blocos de concreto. Durante as operações não ocorreram problemas de exposições das pessoas à radiação, como também não houve contaminação da mina. Nesse sentido, foram tomadas precauções para que os túneis de acesso tenham o piso recoberto com material plástico para facilitar uma eventual necessidade de descontaminação.

3.3 - Armazenamento do combustível irradiado

3.3.1 - Introdução

Os elementos combustíveis, após serem irradiados no reator para a produção de energia, devem ser estocados de modo a permitir o resfriamento com o decaimento radioativo de certos elementos de meia vida curta. O período mínimo necessário para a estocagem varia de 90 a 180 dias⁶⁸, permitindo após, o manuseio seguro dos elementos combustíveis nas etapas posteriores.

As Tabelas 3.2 e 3.3 mostram, respectivamente, composição isotópica e a quantidade total de calor gerado no combustível irradiado.

O sistema de estocagem, normalmente utilizado, consiste no armazenamento dos elementos combustíveis irradiados em tanques de água localizados próximo ao reator ou nas usinas de reprocessamento. A capacidade de estocagem nas usinas PWR de 1.000 MWe, normalmente, varia de 100 a 250 toneladas de material pesado, enquanto que na unidade de reprocessamento, a capacidade desses tanques varia de acordo com as dimensões da usina. Nos Estados Unidos, a usina de reprocessamento de Barnwell, Carolina do Norte, possui tanques com capacidade para receber 360 toneladas e os da usina de Midwest, Illinois podem armazenar 90 toneladas de material pesado.

As operações executadas nos tanques de estocagem são semelhantes tanto na usina nuclear como na usina de reprocessamento e consistem de: armazenamento, inspeção e controle dos materiais radioativos liberados dos elementos combustíveis danificados. Nos tanques de estocagem é gerada uma série de rejeitos radioativos compostos de materiais empregados na remoção da radioatividade introduzida na água dos tanques pelo combustível irradiado. Incluem-se também, as resinas de troca iônica e os filtros que foram empregados para manter a água limpa e descontaminar o ar que circula nas instalações dos tanques.

3.3.2 - Tanques de estocagem

Os tanques de água são os mais comuns para a estocagem dos elementos combustíveis irradiados. Além de proporcionar alta eficiência, a água

TABELA 3.2. - COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DO COMBUSTÍVEL IRRADIADO, EM ÁTOMOS-GRAMA EM FUNÇÃO DO TEMPO APÓS A RETIRADA DO REATOR. / 23 /

Nuclídeos	tempo em anos						
	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
⁹⁰ Sr	6,06	4,25	3,27x10 ⁻¹	1,20x10 ⁻¹⁰	0,0	0,0	0,0
¹³⁷ Cs	8,82	7,17	8,96x10 ⁻¹	8,32x10 ⁻¹⁰	0,0	0,0	0,0
²³⁵ U	3,78x10 ¹	3,78x10 ¹	3,84x10 ¹	4,32x10 ¹	5,80x10 ¹	6,01x10 ¹	5,96x10 ¹
²³⁶ U	2,01x10 ¹	2,02x10 ¹	2,10x10 ¹	2,59x10 ¹	2,90x10 ¹	2,82x10 ¹	2,17x10 ¹
²³⁷ Np	2,05	2,06	2,35	5,39	6,25	6,08	4,54
²³⁸ Pu	6,87x10 ⁻¹	6,48x10 ⁻¹	3,22x10 ⁻¹	3,10x10 ⁻¹	0,0	0,0	0,0
²³⁶ U	2,01x10 ¹	2,02x10 ¹	2,10x10 ¹	2,59x10 ¹	2,90x10 ¹	2,82x10 ¹	2,17x10 ¹
²³⁷ Np	2,05	2,06	2,35	5,39	6,25	6,08	4,54
²³⁸ U	3,96x10 ³	3,96x10 ³	3,96x10 ³	3,96x10 ³	3,96x10 ³	3,96x10 ³	3,96x10 ³
²³⁹ Pu	2,20x10 ¹	2,19x10 ¹	2,14x10 ¹	1,67x10 ¹	1,31	1,24x10 ⁻⁸	8,47x10 ⁻⁹
²⁴⁰ Pu	8,84	8,84	8,07	3,21	3,15x10 ⁻⁴	3,57x10 ⁻¹¹	3,86x10 ⁻¹¹
²⁴¹ Pu	3,93	2,56	3,57x10 ⁻²	1,05x10 ⁻⁵	4,95x10 ⁻⁶	2,61x10 ⁻⁹	0,0
²⁴² Am	4,47x10 ⁻⁸	4,29x10 ⁻⁸	2,84x10 ⁻⁸	4,69x10 ⁻¹⁰	0,0	0,0	0,0
²⁴³ Am	3,43x10 ⁻¹	3,40x10 ⁻¹	3,40x10 ⁻¹	3,14x10 ⁻¹	1,39x10 ⁻¹	3,99x10 ⁻⁵	3,88x10 ⁻⁹
²⁴⁴ Cm	1,00x10 ⁻¹	7,11x10 ⁻²	2,26x10 ⁻³	2,71x10 ⁻¹⁸	2,83x10 ⁻¹⁸	2,60x10 ⁻¹⁷	1,24x10 ⁻¹⁶

TABELA 3.3. - QUANTIDADE TOTAL DE CALOR GERADO NO
 COMBUSTÍVEL IRRADIADO / 83 /

Calor gerado (watts)

Tempo (anos)	Produtos de fissão	Actinídeos	Isótopos dos materiais es- truturais	Total
1	$1,03 \times 10^4$	$4,41 \times 10^2$	$4,71 \times 10^{-2}$	$1,12 \times 10^4$
10	$1,05 \times 10^3$	$2,09 \times 10^2$	$1,16 \times 10^2$	$1,38 \times 10^3$
10^2	$1,07 \times 10^2$	$1,71 \times 10^2$	$1,07 \times 10^{-1}$	$2,78 \times 10^2$
10^3	$2,22 \times 10^{-2}$	$4,80 \times 10^2$	$2,70 \times 10^{-4}$	$4,80 \times 10^1$
10^4	$2,05 \times 10^{-2}$	$1,33 \times 10^1$	$1,24 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^1$
10^5	$1,32 \times 10^{-1}$	$0,15 \times 10^{-1}$	$8,06 \times 10^{-5}$	$9,28 \times 10^{-1}$
10^6	$8,80 \times 10^{-4}$	$3,40 \times 10^{-1}$	$4,00 \times 10^{-5}$	$3,41 \times 10^{-1}$
10^7	$3,92 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-6}$	$4,04 \times 10^{-6}$	$1,16 \times 10^{-1}$

dos tanques permite uma proteção adequada contra a radiação e um resfriamento dos materiais estocados. Geralmente, nesses tanques, são estocados, materiais danificados, resultantes das operações de manuseio dos elementos combustíveis.

A configuração dos tanques normalmente, é igual para todas as usinas nucleares. Tem formato retangular, com cerca de 9 a 18 metros de comprimento por 6 a 12 metros de largura e 12 metros de profundidade. Os tanques são construídos de concreto, revestidos com placas de aço inoxidável de espessura entre 0,47 a 0,64 centímetros.

Os elementos combustíveis irradiados são retirados do reator por um sistema manual de transporte horizontal através de um canal de transferência. Posteriormente, são transferidos para o tanque de estocagem e, já na posição vertical, são colocados nas prateleiras de estocagem que os mantêm separados entre si, como mostra a Figura 3.9. Devido à alta atividade dos elementos combustíveis irradiados, é necessário um espaçamento entre eles num tanque de água. A área de estocagem, portanto, varia de acordo com a quantidade de combustível a ser descarregado em cada reabastecimento, que normalmente num reator PWR são substituídos 1/3 do combustível total. A Tabela 3.4 mostra a capacidade do tanque de estocagem de acordo com o número de conjunto de elementos combustíveis contidos no reator.

A maioria das usinas nucleares, ultimamente, tiveram seus tanques de estocagem remodelados de modo a aumentar a capacidade de armazenamento em até 3 vezes, a capacidade original utilizando-se de malhas de armazenamento compactadas.

TABELA 3.4. - CAPACIDADE DO TANQUE DE ESTOCAGEM DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS / 43 /

Potência do reator (MWe)	Número de conjuntos de elementos combustíveis		
	Núcleo reator	Descarregado em c/ reabastecimento	Capacidade do tanque de estocagem
500 - 600	121	40	162
700 - 800	157	52	210
1.000 - 1.100	193	64	260

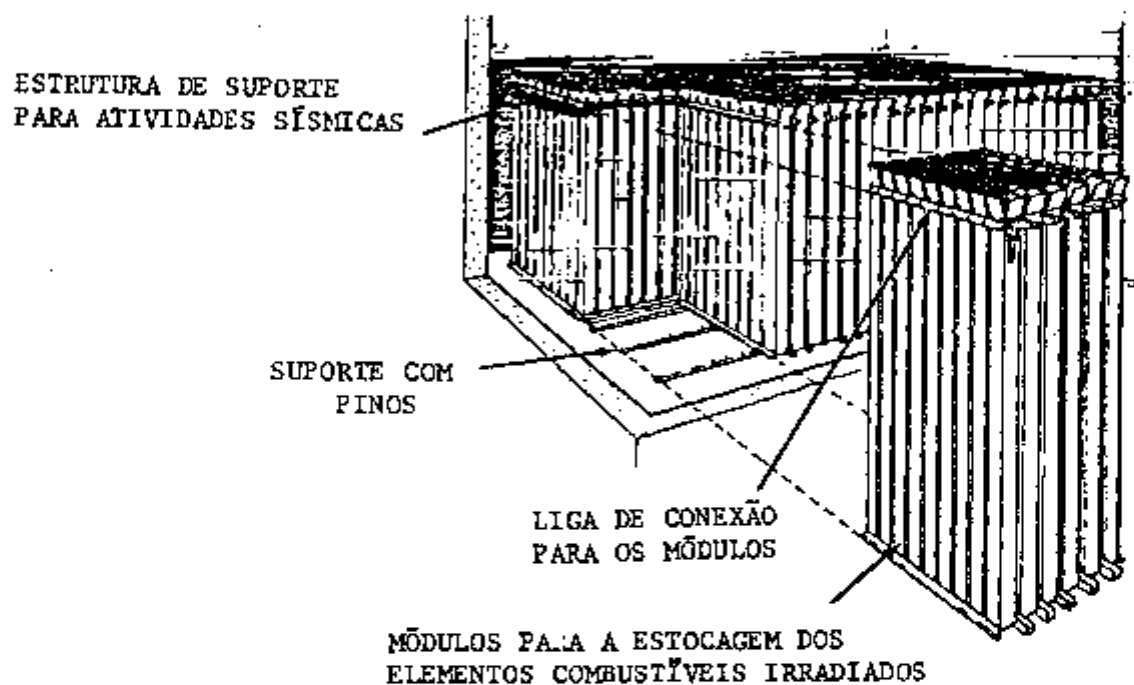


FIGURA 3.9. - PROJETO DE TANQUE DE ÁGUA PARA A ESTOCAGEM DOS
ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS IRRADIADOS / 4 /

3.3.3 - Requisitos necessários para a estocagem em tanques

a) Criticalidade

O conceito de criticalidade, que é uma consideração muito importante para a estocagem do combustível irradiado, envolve um sistema de rearranjo dos elementos combustíveis para evitar uma reação em cadeia dos nêutrons.

A dinâmica da reação em cadeia depende da quantidade relativa e da distribuição espacial dos materiais. Os materiais que merecem atenção são o ^{235}U , ^{238}U e os materiais estruturais que absorvem os nêutrons e a água do tanque.

b) Prateleiras

A maioria das prateleiras de um tanque de estocagem são feitas de aço inoxidável e alumínio e construídas de tal forma que permite um suporte seguro dos elementos combustíveis. Uma prateleira típica está ilustrada na Figura 3.10.

As prateleiras têm, normalmente, de 4,3 a 4,5 metros de altura, sustentadas por 1 ou 2 bases. Elas permitem um espaçamento de 50,80 a 53,34 cm entre os centros dos combustíveis em um arranjo quadrado. A área destinada para cada conjunto combustível de 48,38 a 54,83 cm² é 51,6 a 58,05 cm², respectivamente.

As prateleiras são projetadas de modo a assegurar uma refrigeração adequada ao combustível irradiado, através do fluxo de água no tanque. Para isso, é necessário um espaçamento suficiente para permitir a circulação natural da água em torno das prateleiras durante as condições normais ou anormais.

Nos projetos das prateleiras são considerados os fatores sísmicos para assegurar a operação contínua, mesmo durante a ocorrência desses eventos. As prateleiras devem permanecer intactas, na posição vertical e manter a distância entre os conjuntos combustíveis.

c) Sistemas de refrigeração e purificação da água

Há algumas diferenças nos métodos de refrigeração dos tanques nas várias usinas, mas todas elas empregam sistemas, basicamente, similares ao que é descrito a seguir. A Figura 3.11 mostra o diagrama de um sistema típico de resfriamento no tanque de estocagem.

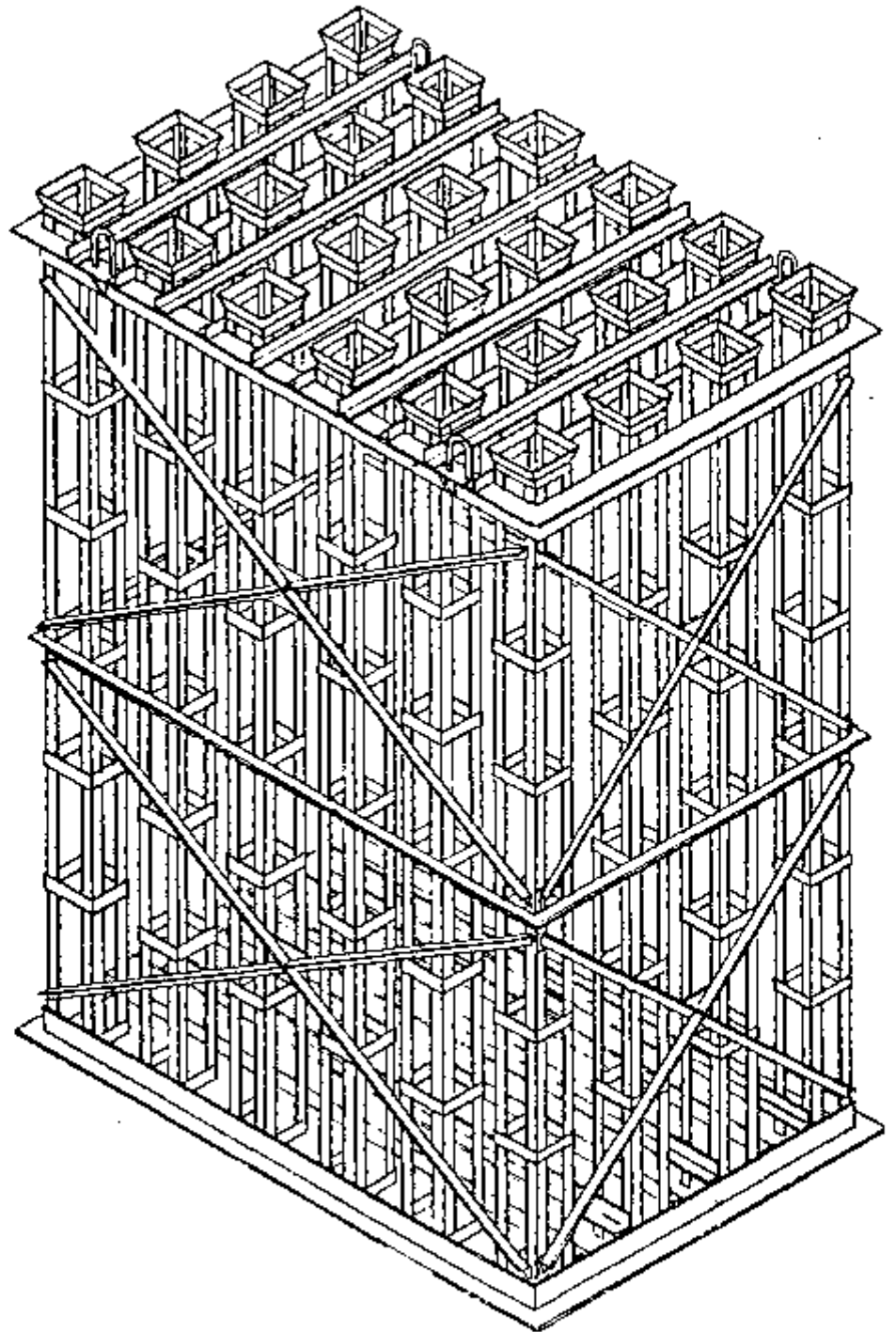


FIGURA 3.10 - PRATELEIRA TÍPICA PARA A ESTOCAGEM DOS
ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS IRRADIADOS / 43 /

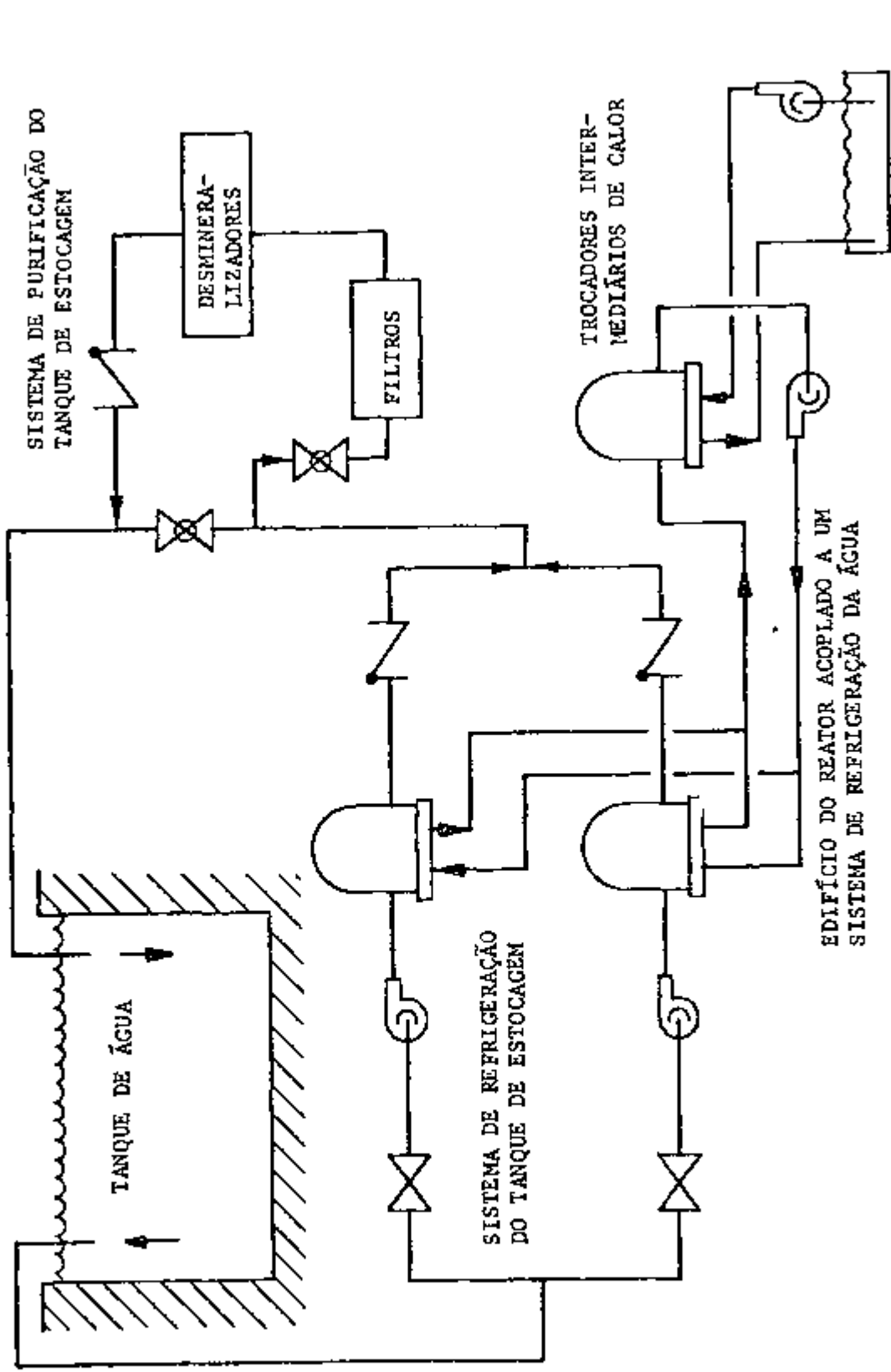


FIGURA 3.11. - SISTEMA DE PURIFICAÇÃO E REFRIGERAÇÃO DO TANQUE DE ESTOCAGEM / 43 /

A refrigeração, no tanque de elementos combustíveis, consiste da circulação natural da água. A entrada do sistema de refrigeração está localizado no topo do tanque assim como as bombas, para evitar a redução do nível de água quando há paralisação das operações normais. A água fria de retorno ao tanque é conduzida ao fundo através da circulação natural.

Em casos normais, a temperatura máxima permissível da água é de aproximadamente $69,5^{\circ}\text{C}$ / 43 /.

O sistema de purificação da água é, normalmente, incorporado ao sistema de refrigeração do tanque e toda a operação pode ser efetuada manualmente ou não. A finalidade do sistema é remover os vários tipos de contaminação que podem acumular-se no tanque. Algumas fontes de contaminação da água compreende os produtos de fissão e os produtos de ativação encontrados na superfície do combustível, as varetas de combustível danificados e os resíduos provenientes da área de operação.

O sistema de purificação consiste de filtros e desmineralizadores. Os filtros removem as partículas da água do tanque e os desmineralizadores, os materiais dissolvidos. Esse sistema procura diminuir o nível de radioatividade e manter a água limpa para permitir a observação dos trabalhos efetuados sob a água.

d) Eventos sísmicos

No projeto de instalação de estocagem, em tanques, do combustível irradiado devem ser considerados as probabilidades de ocorrências de abalos sísmicos.

Esse critério estabelece, basicamente, que, durante as operações anormais ocasionadas pelas atividades sísmicas, os conjuntos de elementos combustíveis estocados nos tanques não entrem em criticalidade.

O funcionamento do sistema de refrigeração, também, não deve ser afetado, uma vez que é necessário manter os elementos combustíveis, na água, até a temperatura de 118°C (temperatura máxima permissível no tanque) / 43 /. Isto requer que o sistema projetado proporcione um suprimento contínuo de água para os tanques de estocagem.

3.3.4 - Acondicionamento

Esta operação será necessária se for adotado a alternativa de não repro-

cessar o combustível irradiado e armazená-lo definitivamente em uma formação geológica.

O combustível irradiado é acondicionado antes da deposição para aumentar a segurança durante o manuseio e garantir a contenção dos produtos de fissão. O conjunto dos elementos combustíveis é acondicionado em recipientes de aço inox com hélio para proporcionar uma atmosfera inerte em torno dos mesmos e auxiliar na transferência de calor.

3.3.5 - Deposição do combustível irradiado

Os assuntos contraditórios em torno da recuperação e reciclagem do urânio e plutônio contidos no combustível irradiado não tem permitido o desenvolvimento da tecnologia de deposição desses materiais. Assim, são poucos os estudos sobre a deposição geológica encontrados na literatura.

O método para a deposição do combustível irradiado em formações geológicas é, basicamente, semelhante à dos rejeitos de alta atividade, diferindo, no entanto, em alguns aspectos. Cada recipiente contendo os conjuntos de elementos combustíveis são manuseados ao ar livre, transferidos até ao nível da câmara de armazenamento da mina por um poço vertical e estocados na massa rochosa.

A deposição dos recipientes do combustível irradiado difere da deposição dos rejeitos de alta atividade nos seguintes aspectos:

- O combustível irradiado contém produtos gasosos de fissão (Criptônio - 85; Xenônio - 131 e Iodo - 131). Sem o reprocessamento, estes gases são retidos nas varetas dos elementos combustíveis e tão logo ocorra a sua deposição admite-se que os gases sejam liberados no repositório.

- O plutônio é estocado juntamente com os elementos combustíveis.

- Os produtos de fissão presentes no combustível irradiado não estão vitrificados, assim, a longo prazo, as liberações deverão ser maiores em casos de danos nos recipientes ou no repositório.

- Admite-se que os impactos ambientais decorrentes da deposição do combustível irradiado sejam semelhantes aos da deposição dos rejeitos de alta atividade.

- A probabilidade de criticalidade do combustível irradiado durante a deposição na formação geológica é bastante remota, uma vez que os espaçamentos entre os recipientes, para permitir a remoção do calor, é cerca de 10 vezes maior que o necessário (0,5 metros) para ocorrer a criticalidade⁴. Ainda não foram avaliados os riscos de criticalidade provenientes da deposição desses materiais.

3.4 - Armazenamento dos rejeitos de alta atividade

3.4.1 - Introdução

Os rejeitos líquidos de alta atividade são definidos como sendo os rejeitos aquosos originados das operações do primeiro ciclo de extração por solvente nas instalações para reprocessamento do combustível irradiado /³⁴/. Somente o ciclo do combustível envolvendo o reprocessamento dá origem aos rejeitos de alta atividade.

Os rejeitos de alta atividade contêm essencialmente todos os produtos de fissão não voláteis, elementos transurânicos e aproximadamente 0,5% de urânio e plutônio que se encontravam inicialmente no combustível irradiado. A Tabela 3.5 mostra a radioatividade dos principais produtos de fissão presentes no rejeito de alta atividade gerados a partir do reprocessamento de uma tonelada de combustível. A Tabela 3.6 mostra a radioatividade do urânio e plutônio (0,5%) e dos elementos transurânicos.

Dos vários tipos de rejeitos produzidos na reciclagem do urânio no ciclo do combustível, os rejeitos de alta atividade, apesar de constituírem uma pequena fração do volume total de rejeitos, requerem uma maior proteção e dissipação do calor para proporcionar uma máxima segurança durante a deposição no repositório. A Tabela 3.7 mostra a quantidade de calor gerado, após vários períodos de resfriamento, a partir do decaimento dos produtos de fissão e dos elementos transurânicos considerando uma tonelada de combustível irradiado. Os rejeitos líquidos de alta atividade devem ser solidificados na usina de reprocessamento, que normalmente ocorre após ter sido estocado em tanques especiais por um período de 10 anos /⁸³/. Quando solidificados, os rejeitos são estocados provisoriamente na própria usina de reprocessamento para reduzir o calor gerado. Após esse período, os rejeitos são armazenados em um repositório final. Como, atualmente, não se tem definido um local adequado para o repositório final, nos Estados Unidos, os rejeitos solidificados de alta atividade são estocados provisoriamente nas instalações em superfície.

A Figura 3.12 mostra a sequência das etapas para os rejeitos de alta atividade.

TABELA 3.5. - Radioatividade dos principais produtos de fissão no rejeito de alta atividade a partir do reprocessamento de uma tonelada do combustível (Queima 33.000 MWd/tv com Potência 30 MW/t-PWR).

/ 53 /

Nuclídeos	Meia Vida	Atividade em curies/tonelada de urânio reprocessado após			
		1 ano	10 ¹ anos	10 ² anos	10 ³ anos
Estrôncio-90	28 a	7,5x10 ⁴	6,0x10 ⁴	6,5x10 ³	0
Ítrio-90	64 h	7,5x10 ⁴	6,0x10 ⁴	6,5x10 ³	0
Zircônio-93	1500000 a	1,9x10 ⁰	1,9x10 ⁰	1,9x10 ⁰	1,9x10 ⁰
Zircônio-95	65 d	5,7x10 ³	0	0	0
Niôbio-95	35 d	1,3x10 ⁴	0	0	0
Tecnécio-99	210000 a	1,4x10 ¹	1,4x10 ¹	1,4x10 ¹	1,4x10 ¹
Rutênio-103	40 d	1,5x10 ²	0	0	0
Rutênio-106	1,0 a	2,1x10 ⁵	4,2x10 ²	0	0
Ródio-106	0,5min	2,1x10 ⁵	4,2x10 ²	0	0
Antimônio-125	2,7 a	6,2x10 ³	6,2x10 ²	0	0
Telúrio-125 m	58 d	2,6x10 ³	2,5x10 ²	0	0
Telúrio-127 m	100 d	6,0x10 ²	0	0	0
Iodo-129	1700000 a	3,8x10 ⁻²	3,8x10 ⁻²	3,8x10 ⁻²	3,8x10 ⁻²
Césio-134	2,0 a	1,5x10 ⁵	7,3x10 ³	0	0
Césio-135	3000000 a	2,9x10 ⁻¹	2,9x10 ⁻¹	2,9x10 ⁻¹	2,9x10 ⁻¹
Césio-137	30 a	1,0x10 ⁵	8,5x10 ⁴	1,1x10 ⁴	0
Bário-137 m	2,6min	9,8x10 ⁵	7,9x10 ⁴	9,9x10 ³	0
Cério-144	280 d	3,2x10 ⁵	1,0x10 ²	0	0
Praseodímio-144	17min	3,2x10 ⁵	1,0x10 ²	0	0
Promécio-147	2,6 a	7,5x10 ⁴	7,0x10 ³	0	0
Samário-151	90 a	1,1x10 ³	1,1x10 ³	5,2x10 ²	1,4x10 ⁻¹
Európio-152	12,5 a	1,1x10 ¹	6,4x10 ⁰	3,5x10 ⁻²	0
Európio-154	16 a	6,5x10 ³	4,4x10 ³	8,9x10 ¹	0
Európio-155	1,8 a	4,3x10 ³	1,4x10 ²	0	0
Atividade total/t urânio		1,7x10 ⁶	3,1x10 ⁵	3,4x10 ⁴	2,1x10 ¹

TABELA 3.6. - Radioatividade do urânio, plutônio e dos elementos transurânicos. (Reprocessamento 150 dias após a retirada dos elementos combustíveis do reator. Queima 33.000 MWd/tv com potência 30 MW/t - PWR) / 53 /

Atividades em curies/tonelada de urânio reprocessado após									
Nuclídeos	Meia Vida	1 ano	10 ¹ anos	10 ² anos	10 ³ anos	10 ⁴ anos	10 ⁵ anos	10 ⁶ anos	
Urânio-234	240000 a	4,0x10 ⁻³	6,6x10 ⁻³	2,6x10 ⁻²	4,6x10 ⁻²	4,5x10 ⁻³	3,5x10 ⁻²	4,2x10 ⁻³	
Urânio-235	700000000 a	8,6x10 ⁻⁵	8,6x10 ⁻⁵	8,6x10 ⁻⁵	8,7x10 ⁻⁵	1,2x10 ⁻⁴	3,5x10 ⁻⁴	3,7x10 ⁻⁴	
Urânio-236	230000000 a	1,4x10 ⁻³	1,4x10 ⁻³	1,5x10 ⁻³	1,7x10 ⁻³	3,1x10 ⁻³	4,0x10 ⁻³	3,9x10 ⁻³	
Urânio-238	4500000000 a	1,6x10 ⁻³	1,6x10 ⁻³	1,6x10 ⁻³	1,6x10 ⁻³	1,6x10 ⁻³	1,6x10 ⁻³	1,6x10 ⁻³	
Neptúlio-237	2100000 a	3,4x10 ⁻¹	3,4x10 ⁻¹	3,5x10 ⁻¹	3,7x10 ⁻¹	3,7x10 ⁻¹	3,6x10 ⁻¹	2,7x10 ⁻¹	
Neptúlio-239(β)	2.3 d	1,8x10 ¹	1,8x10 ¹	1,7x10 ¹	1,6x10 ¹	7,1x10 ⁰	2,0x10 ⁻³	0	
Plutônio-236	2.9 a	1,3x10 ⁻³	1,4x10 ⁻⁴	0	0	0	0	0	
Plutônio-238	88 a	9,0x10 ⁻¹	1,0x10 ²	5,3x10 ¹	8,2x10 ⁻²	0	0	0	
Plutônio-239	24000 a	1,6x10 ⁰	1,6x10 ⁰	1,7x10 ⁰	2,0x10 ⁰	4,0x10 ⁰	5,6x10 ⁻¹	0	
Plutônio-240	6600 a	2,6x10 ⁰	4,5x10 ⁰	8,9x10 ⁰	8,3x10 ⁰	3,3x10 ⁰	3,2x10 ⁻⁴	0	
Plutônio-241(β)	14 a	4,8x10 ²	3,2x10 ²	5,0x10 ⁰	2,6x10 ⁻¹	1,3x10 ⁻¹	1,6x10 ⁻⁴	0	
Plutônio-242	370000 a	6,9x10 ⁻³	6,9x10 ⁻³	6,9x10 ⁻³	7,2x10 ⁻³	7,6x10 ⁻³	0,7x10 ⁻³	1,3x10 ⁻³	
Americio-241	430 a	1,5x10 ²	1,6x10 ²	1,4x10 ²	3,4x10 ¹	1,3x10 ⁻¹	1,6x10 ⁻⁴	0	
Americio-242(β)	16 h	4,0x10 ⁰	3,9x10 ⁰	2,6x10 ⁰	4,2x10 ⁻²	0	0	0	
Americio-242 m	150 a	4,0x10 ⁰	3,9x10 ⁰	2,6x10 ⁰	4,2x10 ⁻²	0	0	0	
Americio-243	7400 a	1,8x10 ¹	1,8x10 ¹	1,7x10 ¹	1,6x10 ¹	7,1x10 ⁰	2,0x10 ⁻³	0	
Cúrio-242	160 d	4,1x10 ³	3,2x10 ³	2,1x10 ⁰	3,5x10 ⁻²	0	0	0	
Cúrio-243	30 a	5,3x10 ⁰	4,4x10 ⁰	6,3x10 ⁻¹	0	0	0	0	
Cúrio-244	18 a	2,4x10 ³	2,4x10 ³	1,7x10 ³	5,5x10 ⁻¹	0	0	0	
Atividade total		7,3x10 ³	2,4x10 ³	3,1x10 ²	7,8x10 ¹	2,3x10 ¹	2,7x10 ⁰	3,2x10 ⁰	

TABELA 3.7. - QUANTIDADE DE CALOR GERADO NO REJEITO DE ALTA ATIVIDADE / 53 /

(Reprocessamento 150 dias após a retirada do reator)
(Queima 33000 MW d/t U com Potência 30 MW/t - PWR)

FONTES DE CALOR	GERAÇÃO DE CALOR EM W/t URÂNIO REPROCESSADO APÓS			
	1a	3a	10a	30a 100a
Produtos de fissão	7900	3500	1000	500 100
Elementos transurânicos	240	90	70	40 9,6

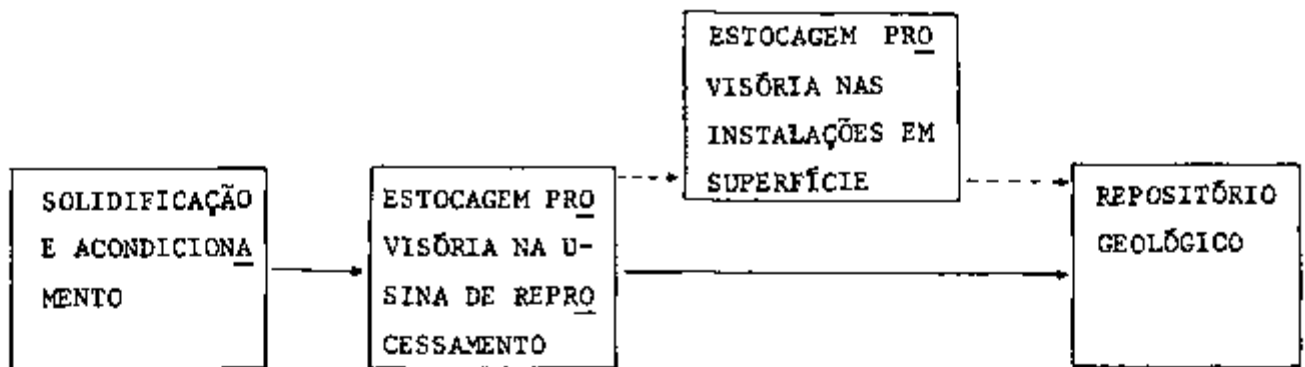


FIGURA 3.12. - ETAPAS DE ESTOCAGEM DOS REJEITOS DE ALTA ATIVIDADE / 4 /

3.4.2 - Tanques de estocagem de rejeitos líquidos de alta atividade

Os tanques de estocagem para os rejeitos de alta atividade tem sofrido nos últimos 30 anos considerável evolução desde que foi utilizada na 2a. Guerra Mundial em Hanford (EUA). Os conhecimentos destas instalações é refletida nos projetos de tanques das usinas comerciais em operação.

A evolução dos projetos desses tanques e a complexidade dos mais modernos meios desenvolvidos em Hanford (EUA) podem ser observados nas Figuras 3.13 (antes de 1952); 3.14 (após 1952); 3.15 (1968) e 3.16 (1974).

Os projetos dos tanques de estocagem alcançaram grande desenvolvimento e, hoje, demonstram alta eficiência quanto aos vazamentos e problemas operacionais. A dispersão acidental de rejeitos são minimizadas pelo uso de pequenos tanques de estocagem que requerem um baixo inventário de rejeitos líquidos, reduzindo os riscos potenciais. Essas liberações são também evitadas através de sistemas adicionais de segurança. Os sistemas de refrigeração são projetados cuidadosamente para manter os rejeitos em baixa temperatura e para impedir a acumulação de concentrações indesejáveis de hidrogênio.

Um dos projetos desenvolvidos nos EUA é o BNFP (The Barnwell Nuclear Fuel Plant) pertencente à Allied General Nuclear Services - AGNS, que consiste de um tanque de aço inoxidável com uma abóbada de concreto e de aço inoxidável, providos de circuladores de ar e de uma espiral de refrigeração para a transferência de calor. Como os tanques de estocagem correspondem a uma parte integral da usina os seus efluentes são tratados juntamente com os da usina.

Esses efluentes consistem, principalmente, de óxidos de nitrogênio resul

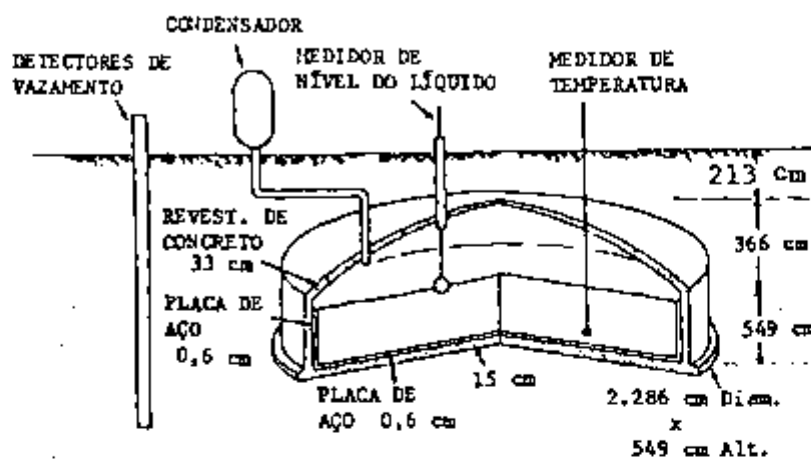


FIGURA 3.13. - TANQUE TÍPICO PARA ESTOCAGEM DE REJEITOS NÃO GERADORES DE CALOR / 34 /

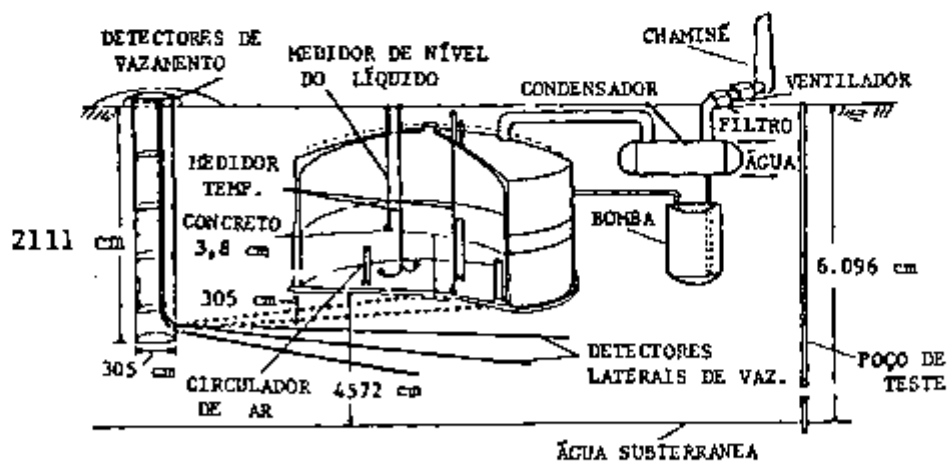


FIGURA 3.14. - CONTROLES DE SEGURANÇA EM TANQUES DE ESTOCAGEM PARA REJEITOS DE ALTA ATIVIDADE / 34 /

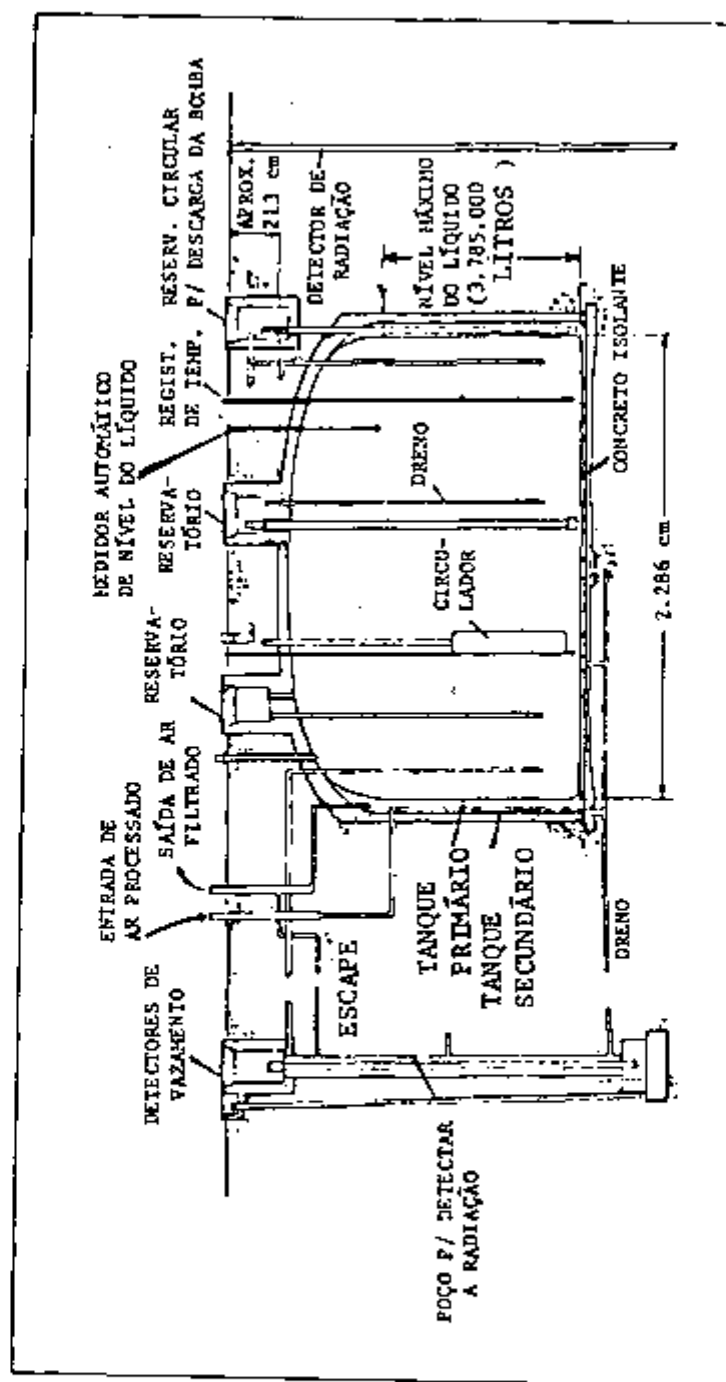


FIGURA 3.15. - TANQUE DE ESTOCAGEM COM PAREDE DUPLA PARA REJEITOS GERADORES DE CALOR / 34 /

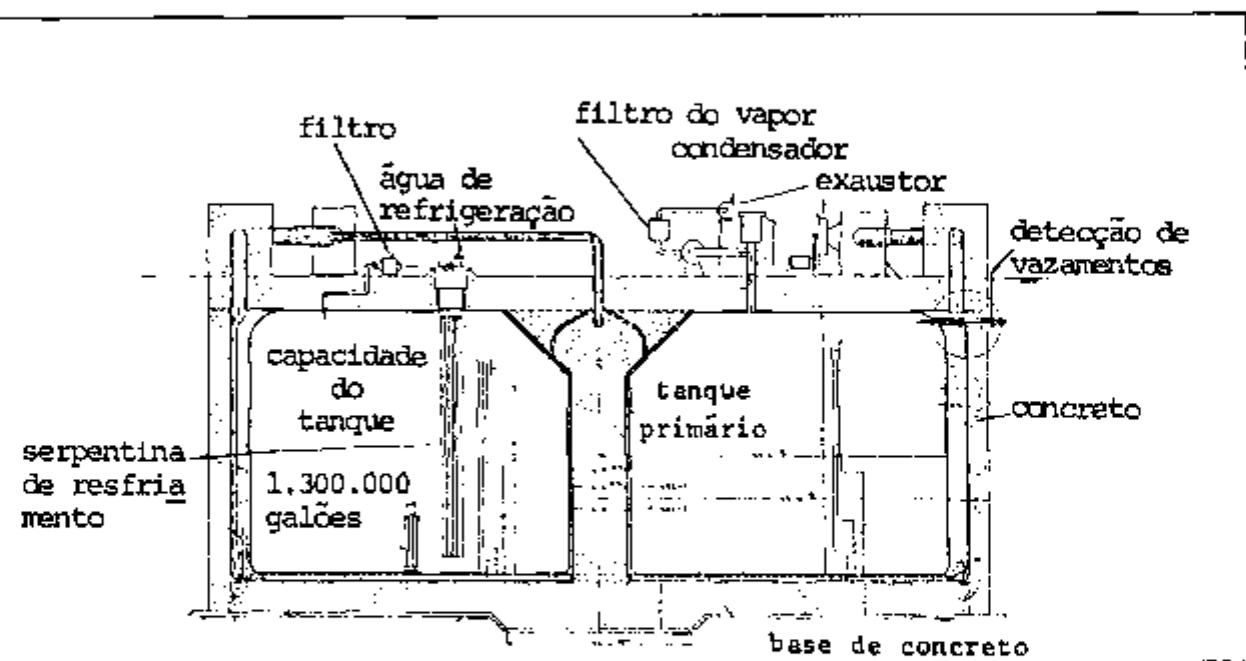


FIGURA 3.16. - DETALHES DO TANQUE DE ESTOCAGEM (1974-1978) / 34 /

tantes da solução de ácido nítrico, alguns radionuclídeos voláteis e materiais gasosos composto de água, hidrogênio e oxigênio produzidos por radiólise.

3.4.3 - Solidificação

A solidificação consiste no tratamento de rejeitos líquidos de alta atividade para reduzir os riscos da dispersão em casos de acidentes durante o seu transporte e armazenamento. Estabilidade térmica e química, insolubilidade e a capacidade de resistência aos impactos são os principais requisitos para selecionar o melhor processo de solidificação.

Os processos de solidificação podem ser classificados em 3 categorias:

- Vitrificação
- Secagem e calcinação
- Outros processos

Vitrificação

O processo de vitrificação tem sido desenvolvido há mais de 20 anos. Com o desenvolvimento da tecnologia nesses anos, a vitrificação foi preferivelmente incluída nos programas de muitos países, como mostra a Tabela 3.8 .

TABELA 3.8.- TIPOS DE PRODUTOS RESULTANTES DO PROCESSO DE VITRIFICAÇÃO EM VÁRIOS PAÍSES / 34 /

PAÍSES	TIPO DE PRODUTO
Inglaterra	Vidro de borosilicato
França	Vidro de borosilicato
Alemanha	Vidro de borosilicato ou com fosfato
Rússia	Vidro com fosfato
Índia	Vidro de borosilicato

A maior vantagem da vitrificação é a condutividade térmica que proporciona a contenção de significativo volume de rejeitos geradores de calor. Baseadas nas condições abaixo mencionadas, um recipiente pode conter aproximadamente 2,5 toneladas de rejeito vitrificado.

- Composição dos rejeitos
- Composição do vidro
- Recipientes de 30 cm de diâmetro, preenchidos e dispostos em uma profundidade de 2,4 m
- Temperatura máxima de 800°C
- Circulação livre do ar de refrigeração.

Os métodos envolvidos no processo de vitrificação são:

- Fusão no recipiente
- Fundidor cerâmico contínuo em forno rotativo
- Fusão contínua em forno rotativo.

Secagem e Calcinação

A primeira instalação em escala piloto para a solidificação de rejeitos líquidos iniciou-se com a calcinação dos rejeitos provenientes da Usina de Reprocessamento Químico de Idaho (EUA), em 1963. Apesar desses rejeitos terem uma radioatividade de 10 a 100 vezes menor que os rejeitos líquidos de alta atividade, o sucesso das operações demonstrou a praticabilidade do processo.

A calcina produzida por todos os calcinadores tem muitas propriedades em comum, diferindo principalmente no tamanho e densidade das partículas. Algumas propriedades em comum da calcina que podem afetar o processo são a condutividade térmica, os conteúdos voláteis e a propriedade de lixiviação. A condutividade térmica da calcina é normalmente de 2 a 3 vezes menor que o produto consolidado. Assim, devido a alta geração de calor nos rejeitos de alta atividade, a estocagem da calcina é feita em recipientes de pequeno diâmetro ou providos de um sistema especial de remoção de calor.

Os principais métodos de solidificação por calcinação são:

- Calcinação em camadas fluidizadas

- Calcinação em recipientes
- Calcinação em forno rotativo
- Calcinação por pulverização

Outros processos de solidificação

Numerosas outras alternativas tem surgidas para a solidificação de rejeitos. No entanto, elas não alcançaram o progresso atingido pelos dois processos anteriores.

3.4.4 - Estocagem provisória de rejeitos solidificados de alta atividade na usina de reprocessamento

O principal objetivo da estocagem provisória é reduzir continuamente o calor gerado pelo decaimento radioativo de modo a manter os recipientes a uma temperatura segura (inferior a 800°C). Há vários projetos de refrigeração porém, o método mais comum é a estocagem dos recipientes em tanques de água que proporcionam proteção adequada para as pessoas envolvidas na operação, transferência de calor através da troca água/água, além de permitir um confinamento para os rejeitos sólidos que eventualmente venham a escapar dos recipientes.

Descrição do tanque

Os recipientes são estocados em tanques revestidos de aço inoxidável, preenchidos com água. O calor gerado pelo decaimento radioativo é transferido para a água do tanque e posteriormente liberado para a atmosfera através de torres de refrigeração, como mostra a Figura 3.17.

Os tanques de água são mantidos a temperatura aproximada de $66,72^{\circ}\text{C}$ em condições normais de operação.

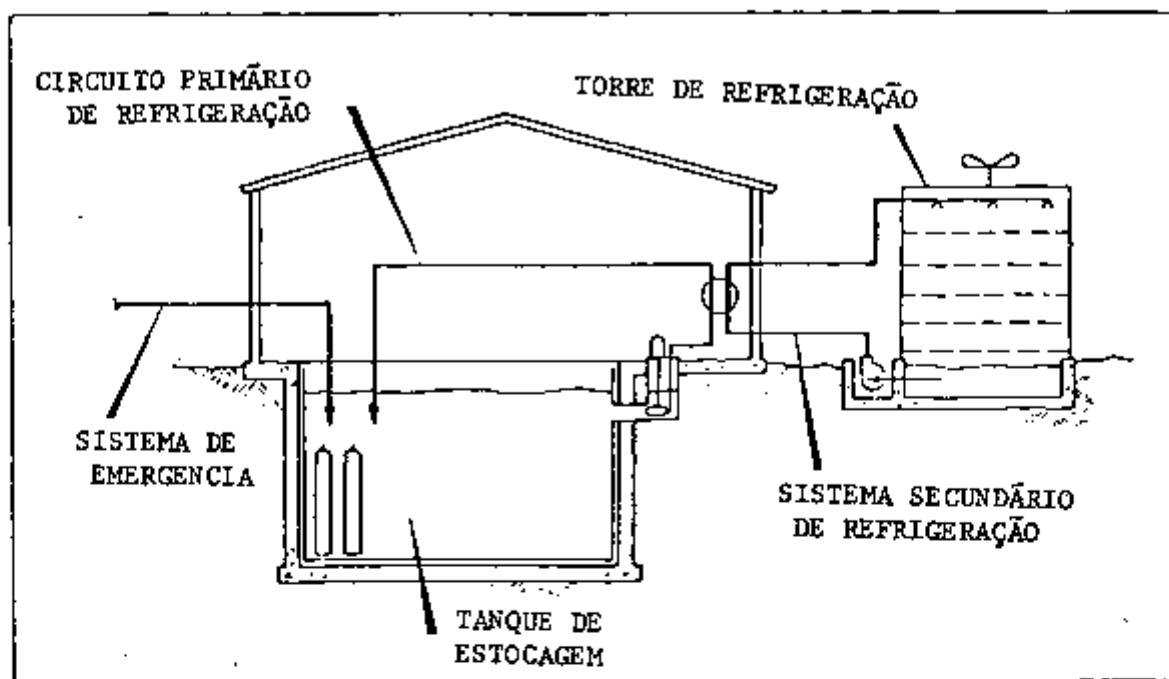


FIGURA 3.17. - PROJETO DO TANQUE DE ÁGUA/SISTEMA DE REMOÇÃO DO CALOR / 34 /

Em casos de acidentes são acionados os sistemas adicionais como as bombas, sistemas de fornecimento de água, e trocadores de calor, tão logo a água atinja a temperatura de ebulição. Para minimizar a corrosão dos recipientes de aço inoxidável e do revestimento do tanque durante a estocagem deve se manter a pureza da água através de sistemas de filtração e desmineralização.

A radioatividade liberada durante as operações pode resultar de falhas nos recipientes, nos tanques de estocagem, nos sistemas de refrigeração, de erros de operação e de consequências dos eventos externos, terremotos e furacões.

3.4.5 - Estocagem provisória nas Instalações em Superfície

Como, atualmente, não se têm definido os locais para a deposição dos rejeitos solidificados de alta atividade, foi proposta a estocagem provisória em superfície até que se encontre soluções para a deposição em formações geológicas.

Os principais objetivos dessa instalação são:

- Assegurar uma proteção adequada ao homem contra a radiação gerada pelos rejeitos solidificados.
- Assegurar uma operação segura da instalação além de permitir uma recuperação dos rejeitos em casos normais e acidentais.
- Assegurar uma proteção ao meio ambiente
- Proporcionar uma estocagem segura dos rejeitos por um período suficiente para que a radioatividade decaia a níveis não perigosos.

Descrição da instalação

O rejeito é acondicionado em um recipiente de aço inoxidável selado dentro de um casco de aço-carbono, para estocagem. O casco é colocado dentro de uma blindagem de concreto mantendo uma distância aproximada de 15 a 30 cm entre o casco e a face interna da blindagem para permitir o fluxo do ar e remover o calor dos rejeitos. O conjunto todo, chamado de unidade de estocagem é colocado sobre um suporte de concreto e transportado para a área de estocagem ao ar livre.

A Figura 3.18 exemplifica o conceito de unidade de estocagem.

As instalações de estocagem provisória compreende 2 principais conjuntos: local de estocagem e edifício de recebimento e agrupamento dos cascos.

O edifício de recebimento inclui as seguintes áreas:

- Área de recebimento
- Área de testes e soldagem dos cascos
- Área de reunião das unidades de estocagem
- Corredor para transferência
- Área de suporte
- Área destinada a pessoas

Os recipientes de rejeito são retirados dos cascos em locais afastados da área de recebimento e, quando necessário, são descontaminados nas câmaras de pulverização. Os recipientes defeituosos são colocados dentro de embalagens de aço carbono e selados temporariamente antes de serem transferidos para as unidades de testes e soldagem. A área de recebimento inclui um compartimento onde o

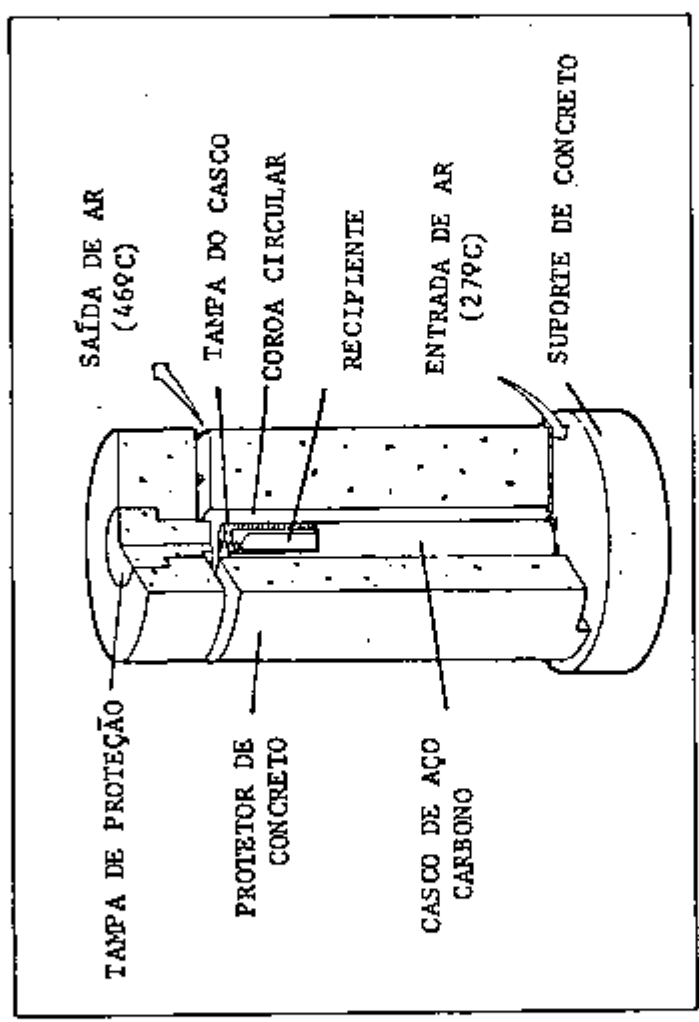


FIGURA 3.18. - RECIPIENTE DE ESTOCAGEM EM CASCO LACRADO / 34 /

recipiente de rejeito é introduzido em um casco de transferência.

O edifício de agrupamento das unidades de estocagem é provido de equipamento de manuseio e fixação necessárias para:

- O recebimento das unidades de estocagem
- Reuní-los e inspecioná-los
- Facilitar os movimentos dessas unidades dentro do edifício
- Colocá-los em um veículo para transporte à área de estocagem.

A área de estocagem é subdividida em lotes para acomodar 1.000 unidades de estocagem. A Figura 3.19 ilustra uma instalação de estocagem provisória em superfície.

Durante as operações normais da instalação de estocagem, podem ocorrer liberações contínuas de quantidades mínimas de radionuclídeos para o meio ambiente. A dose estimada para uma população humana situada em um raio de 80,45 metros é menor que 5×10^{-3} rem/pessoa/ano. Em casos de acidentes graves, provocados pela ruptura dos recipientes, a dose anual no corpo de um indivíduo a 1.000 metros da instalação, foi estimada em aproximadamente 85 mrem.

No entanto, os recipientes como todos os constituintes da unidade de estocagem são projetados para evitar as possibilidades de ocorrência de tais eventos.

3.4.6 - Deposição no repositório geológico

Essa etapa final, que consiste na deposição final dos rejeitos solidificados em formações geológicas apropriadas, é tratada pormenorizadamente na seção 3.7.

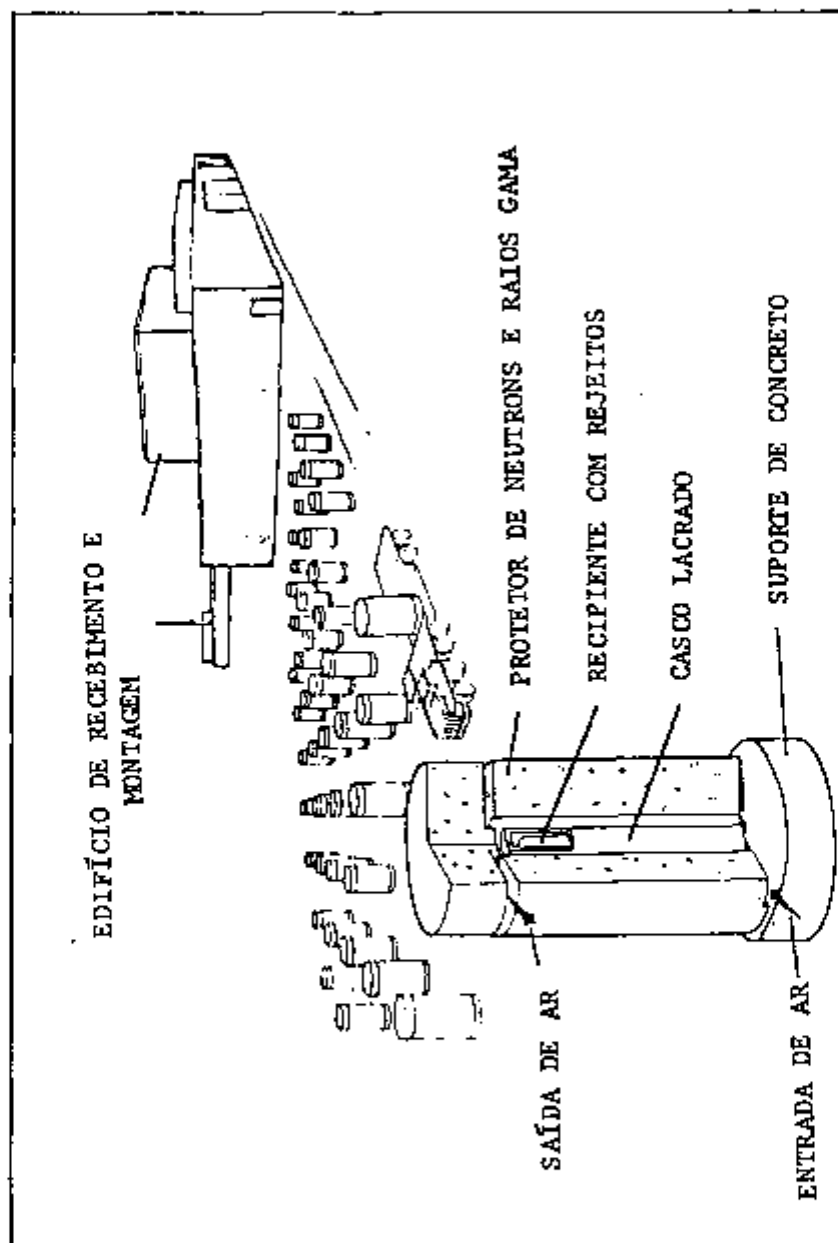


FIGURA 3.19. - INSTALAÇÃO DE ESTOCAGEM PROVISÓRIA EM SUPERFÍCIE /34 /

3.5 - Armazenamento dos rejeitos contaminados com elementos transurânicos

3.5.1 - Introdução

Os rejeitos sólidos contaminados com elementos transurânicos são originados nas operações da usina de reprocessamento do combustível. Este tipo de rejeito consiste de líquido solidificado, filtros, materiais provenientes do desencamisamento do elemento combustível e refugos em geral. Nesta unidade, os conjuntos de elementos combustíveis são retalhados e passam por um processo de lixívia ácida para retirar as pastilhas do encamisamento. Do processo, resultam pequenos pedaços de material do encamisamento com pequena quantidade residual de combustível, acessórios compactos, grades de suporte do combustível, espaçadores e outros materiais de papel, plástico, etc.

Os rejeitos contaminados com elementos transurânicos podem ser classificados em materiais combustíveis e não combustíveis que devem ser tratados adequadamente antes de serem armazenados.

Os materiais combustíveis, que constituem grande parte dos rejeitos contaminados com elementos transurânicos, passam por um processo de redução de volume. O sistema selecionado é baseado no princípio da incineração por ar controlado que, além de proporcionar uma redução de volume, transforma o resíduo resultante da combustão, quimicamente inerte. Outras alternativas, tais como, a compactação e a fixação do rejeito retalhado em concreto, não apresentam os mesmos resultados obtidos pela incineração.

Os materiais não combustíveis compreende os materiais do desencamisamento, as ferragens, os equipamentos com defeitos, os filtros de ventilação, escórias em geral e as substâncias líquidas e sólidas dispersas. Um dos métodos empregados no tratamento dos materiais de desencamisamento consiste em utilizar betume, cimento e areia como matriz neutra que podem proporcionar boa resistência à lixívia, blindagem e dissipação de calor. Os equipamentos com defeitos como os agitadores, bombas, tubulações, etc, são descontaminados, reduzidos de volume e acondicionados em recipientes padrões. Os filtros, utilizados nos processos de tratamento do gás, são compactados e acondicionados em recipientes. As escórias, em geral, que incluem roupas, luvas, materiais plásticos, instrumentos de vidro usados em laboratório, não necessitam de tratamento especial, são apenas incinerados e as cinzas immobilizados com cimento. As substâncias líquidas e sólidas dis-

persas como as resinas de troca iônica, os solventes degradados, são incorporados em cimento ou evaporados e seguidos do acondicionamento dos rejeitos sólidos.

Dentre todos, devem ser dedicados maior atenção aos materiais de desencamisamento do elemento combustível e às ferragens utilizadas no conjunto de elementos combustíveis devido à sua atividade específica, geração do calor, e pelo fato de que suas propriedades físicas e radiológicas são pouco conhecidas. Basicamente, o material do desencamisamento deve ser tratado na própria usina de reprocessamento. Além do processo de tratamento já mencionado, podemos citar outras opções de tratamento, a conversão química, atualmente em estudo pela "Sandia Laboratories" não tem apresentado uma redução apreciável do volume do rejeito; a volatilização e a incineração.

Embora existam várias alternativas para o tratamento desses materiais, em desenvolvimento ou apenas em forma conceitual, nenhum deles foi aplicado em escala comercial. Assim, pelo fato de termos um grande volume de rejeito não tratado, uma alta atividade devido a presença dos elementos transurânicos e problemas relativos a auto-combustão, propõe-se a estocagem provisória do material do desencamisamento na unidade de reprocessamento por um período de 10 anos, uma vez que a atividade total decai de um fator igual a 10 quando resfriada durante tal período. A taxa de geração de calor também decai na mesma proporção.

3.5.2 - Estocagem provisória

Os recipientes, contendo os materiais do desencamisamento, são armazenados nos tanques de estocagem que permitem uma recuperação posterior dos rejeitos / 34 /

Os tanques de estocagem são desenvolvidos para proporcionar uma alta integridade para os rejeitos como, também, permitir a remoção do calor gerado, através da circulação da água no tanque.

A Tabela 3.9 mostra os efluentes químicos e radiológicos que podem ser liberados durante a estocagem provisória.

Efluentes químicos

- gases : SO_x , NO_x , Hidrocarbonetos, CO, partículas
- outros gases : F^- , Cl.

Efluentes radiológicos

- gases : ^{222}Rn , ^{226}Ra , ^{230}Th , Urânio, ^{14}C , Tritio,
 ^{85}Kr , ^{129}I , ^{131}I , produtos de fissão &
transurânicos.

TABELA 3.9. - Efluentes Químicos e Radiológicos liberados durante a estocagem provisória. / 34 /

3.5.3 - Deposição no repositório geológico

Para uma maior segurança propõe-se o armazenamento dos rejeitos contaminados com elementos transurânicos em formações geológicas, semelhantes aos rejeitos de alta atividade, que estão descritos na seção 3.7.

3.6 - Critérios para seleção de locais

A escolha de um tipo de rocha ou local para deposição de rejeitos radioativos deve ser baseada em uma série de critérios ou fatores, quantitativos na medida do possível.

No programa em desenvolvimento pelo Canadá / 92 / , os fatores a serem considerados foram agrupados em: fatores locais e ambientais, fatores relativos à massa e à substância rochosa e fatores legais e políticos.

Os fatores locais e ambientais são:

- Sismicidade
- População e densidade industrial
- Acesso

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

Os fatores relativos à massa e à substância rochosa são:

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

Os fatores legais e políticos são:

- Propriedade da terra
- Possíveis conflitos com outros usos do solo
- Direitos existentes
- Segurança do local
- Propriedade do rejeito
- Propriedade do repositório

Para uso no Reino Unido⁴⁰ / foram definidos os seguintes critérios:

- Litologia e distribuição espacial da formação geológica
- Característica físico-química da formação em relação ao rejeito e recipientes
- Condições hidrogeológicas e hidrológicas

- Efeitos de mudança climática
- Rotas de infiltração para a superfície
- Viabilidade de engenharia
- Interação entre os diversos critérios

Para este trabalho são descritos os principais critérios baseados nos propostos pela Agência Internacional de Energia Atômica / 53 / cuja publicação marca a 1ª tentativa de compilar todas as informações necessárias à seleção de locais para a deposição de rejeitos de alta atividade.

3.6.1 - Topografia

Em geral, o relevo baixo e a inclinação suave do terreno caracterizam a topografia ideal para o repositório de rejeitos. Como serão necessários as ferrovias e as rodovias para o transporte de rejeitos, é essencial que a topografia seja amena.

Em certos casos, as características superficiais de uma área refletem as condições sub-superficiais. Assim, uma topografia irregular pode indicar condições geológicas e hidrogeológicas complexas em sub-superfície, do mesmo modo que uma superfície mais regular pode indicar a presença de rochas profundas sem perturbações. Para os corpos espessos de sal gema, é essencial que prevaleçam relevos baixos e moderados, já que eles podem produzir cargas diferenciais sobre as formações salinas. Para os repositórios em regiões costeiras, a superfície do terreno deve estar acima dos níveis mais altos devido às eventuais incursões marinhas durante o tempo de operação do repositório.

3.6.2 - Tectônica e Sismicidade

As áreas estáveis tectonicamente e com baixa sismicidade são as mais favoráveis para a instalação de repositórios de rejeitos.

Todas as instalações situadas em superfície, os poços e as galerias subterrâneas são susceptíveis a avarias durante os violentos terremotos. Em casos extremos, pode ocorrer a interrupção temporária das atividades operacionais e até causar o rompimento das barreiras geológicas de alguns tipos de rochas.

A longo prazo, um dos maiores riscos geológicos que pode afetar a integridade de um repositório é a presença de falhas localizadas próximas à área de deposição. As rochas de comportamento plástico como o sal gema, os argilitos e os folhelhos podem se recompor das fraturas. No entanto, para as rochas quebradiças como os granitos, os basaltos e os calcários, essas fraturas normalmente originam vias de livre circulação da água subterrânea reduzindo assim a capacidade da rocha em armazenar os rejeitos.

Em geral, as regiões que passam por um longo período geológico de estabilidade tectônica apresentam uma baixa frequência de eventos sísmicos. Reciprocamente, aquelas áreas que passaram por processos orogênicos em períodos geológicos recentes provavelmente possuem alta incidência de atividades sísmicas.

3.6.3 - Estrutura

a) Mergulhos ou inclinações

Nas rochas sedimentares, a excessão dos diápiros salinos, o mergulho ou inclinação preferencial das camadas, deve ser geralmente de poucos graus de modo a facilitar os trabalhos subterrâneos e as operações em sub-superfície de transporte de rejeitos. Para manter a consistência e a uniformidade é aconselhável que as escavações se restrinjam aos horizontes estratigráficos ou aos acamamentos que quase sempre acompanham o mergulho da camada. Os mergulhos abruptos indicam que as rochas foram sujeitas a severas tensões tectônicas que normalmente fraturam rochas quebradiças e originam aberturas para a livre circulação da água subterrânea. Para rochas plásticas, as deformações associadas a camadas inclinadas tem um efeito mínimo sobre o movimento da água já que a massa rochosa tende a se recompor das fraturas, não permitindo a passagem da água. Por outro lado, nas rochas quebradiças as fraturas permanecem abertas e podem permitir movimentos das águas subterrâneas.

As rochas ígneas e metamórficas devido à sua origem são, geralmente, mais consistentes litologicamente do que as rochas sedimentares. Assim sendo, o mergulho ou a inclinação das fraturas, falhas, juntas ou outras estruturas dessas rochas cristalinas podem afetar a potencialidade em armazenar os rejeitos radioativos.

b) Falhas e juntas

Em geral, a presença de falhas e juntas tem efeito negativo nas rochas consideradas apropriadas para o armazenamento de rejeitos, uma vez que elas constituem descontinuidades físicas nas massas rochosas. Elas podem afetar as escavações iniciais como também a estabilidade estrutural dos poços ou galerias.

O mais importante, é que elas constituem as principais vias para circulação de água em muitas rochas, especialmente nas rochas cristalinas.

As maiores falhas que podem ser observadas na superfície da Terra podem provocar rompimentos de grandes extensões nas rochas, às vezes, com vários quilômetros e devem ser evitados na seleção de áreas para repositórios de rejeitos. Por outro lado, os pequenos dobramentos que ocorrem em muitas rochas poderão influir na seleção de locais somente após ser avaliados outros fatores como sua natureza e extensão, tipos de rochas e hidrologia. Em geral, as falhas e as juntas situadas próximas à superfície são mais espaçadas e dessa forma mais livre para o movimento das águas subterrâneas.

Em muitas rochas metamórficas o preenchimento interno (cristalização) das juntas e fraturas ou outros processos tais como a dissolução e subsequente recristalização bem como o enrijecimento, podem proporcionar uma condição apropriada de impermeabilização. Porém as perturbações geológicas adversas podem afetar mais a integridade das rochas quebradiças do que aquelas de comportamento plástico.

Em resumo, as áreas favoráveis para o armazenamento de rejeitos são aquelas desprovidas ou com poucas falhas e juntas e neste caso devem ser averiguadas e evitadas durante os trabalhos de escavações.

c) Diapirismo

Quando em profundidade existem altas pressões diferenciais sobre o sal gema ou a outras camadas de rochas de comportamento plástico pode ocorrer o fluxo da massa rochosa e originar estruturas diapíricas como os domos e os anticlinais. Estas estruturas podem ser apropriadas para o armazenamento de rejeitos, desde que conhecida a sua estabilidade durante o tempo de vida do repositório.

3.6.4 - Condições de sub-superfície

a) Profundidade da zona de deposição

Devido aos processos de intemperismo muitas rochas situadas a profundidades de cerca de 100 metros, podem conter inúmeras fraturas capazes de permitir a circulação da água. Este processo juntamente com a remoção da superfície através da erosão demonstram que as zonas mais propícias para o armazenamento de rejeitos radioativos devem-se localizar a profundidades mínimas de 200 a 300 metros de profundidade.

Para rochas de sal é aconselhável restringir as operações de escavação até a profundidade de 1.500 metros devido ao aumento progressivo da taxa de fluxo plástico das rochas salinas quando submetidas a valores elevados de pressão. Para os folhelhos as profundidades não devem ultrapassar os 1.500 metros. Nas rochas quebradiças como os calcários, granitos e basaltos podem ser abertas galerias com profundidades superiores a 1.500 metros, no entanto, devido ao alto custo dos testes e das avaliações a estes níveis, a sua utilização é limitada. Dessa forma, torna-se claro que a profundidade mais comum para a deposição varia de 300 a 1.500 metros, sendo que, sob certas condições, profundidades inferiores a 300 metros podem ser também apropriados.

Uma outra consideração para o armazenamento de rejeitos em sub-superfície é o aumento gradual da temperatura com a profundidade na crosta terrestre. Nas áreas de gradiente geotérmico normal, o aumento da temperatura é de aproximadamente $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Entretanto, há muitas áreas com gradientes geotérmicos significativamente altos ou baixos. Excepcionalmente os gradientes geotérmicos podem aumentar de 80° a $100^{\circ}\text{C}/\text{km}$, sendo este fenômeno muito comum em áreas de vulcanismo recente que devem ser excluídos para os projetos de repositório.

b) Configuração de formação, espessura e extensão

Em geral, a formação deve possuir extensões laterais e verticais suficientes para que qualquer fratura procedente das áreas vizinhas do repositório possa ser absorvida ou amortecida impedindo assim uma redução da potencialidade das rochas hospedeiras. Além disso, essas rochas devem possuir dimensões suficientes para proporcionar uma adequada dissipação do calor. Geralmente, nas rochas plásticas como o sal e o folhelho são necessários um volume menor para absorver as fraturas e recompor-se, do que as rochas quebradiças, como o calcário, granito

e basalto, que se deformam elasticamente. Quando as rochas quebradiças estão envolvidas por outras rochas de comportamento plástico, o volume da rocha hospedeira pode ser bem menor.

c) Consistência, uniformidade e homogeneidade

Em geral, as rochas que possuem alto grau de homogeneidade ou consistência são consideradas as mais favoráveis para armazenar os rejeitos. No entanto, os limites aceitáveis para esses valores não foram ainda estabelecidos com precisão uma vez que eles dependem da natureza e das características das rochas e dos minerais, dos tipos de rejeitos e do projeto do repositório. Para as rochas sedimentares como o calcário, sal gema e anidrita é comum encontrar camadas homogêneas com 30 cm ou mais de espessura, separadas através de rupturas preenchidas com folhelho e/ou com outros minerais. A natureza e a localização dessas rupturas são importantes nos trabalhos de escavações e quando elas estão muito espaçadas, são utilizadas como referência para os trabalhos de aberturas subterrâneas. Por outro lado, as rupturas pouco espaçadas podem produzir instabilidade das galerias devido à tendência da rocha em separar-se ao longo dessas fraturas.

A presença de minerais hidratados ou outros constituintes da rocha que tem tendência de reagir com os rejeitos podem ser prejudiciais para o repositório, especialmente quando se trata de rejeitos geradores de calor. O calor dissipado pode afetar a rocha que contém quantidade significativa de impureza e, principalmente, influir nas massas rochosas contínuas que ocorrem próximas à zona de deposição.

d) Natureza e extensão das camadas encaixantes

Embora exista uma contenção natural das rochas hospedeiras para os rejeitos, às vezes, é necessário uma proteção adicional que pode ser obtida através da existência das camadas adjacentes a essas rochas. Camadas espessas de folhelhos ou rochas de comportamento plástico são normalmente as mais apropriadas porque se deformam sem se fraturar quando ocorre uma expansão térmica das rochas hospedeiras.

As rochas adjacentes mais desfavoráveis são aquelas que contém grande volume de água subterrânea, principalmente, nas camadas sobrejacentes porque no caso da presença de fraturas na rocha hospedeira essa água pode entrar em contato com os rejeitos. O perigo de contaminação da água subterrânea pode ser minimizada quando há uma camada impermeável de aproximadamente 300 metros ou mais,

sobre a camada de deposição.

3.6.5 - Hidrologia

a) Águas superficiais

A simples presença de águas superficiais, lagos, açudes e rios, nos locais apropriados para repositórios não necessariamente excluem a sua utilização para deposição. Contudo, deve ser constatado que essas águas não irão interferir nas operações, a curto prazo, de uma instalação de armazenamento ou por em perigo os acomodamentos geológicos, a longo prazo, de algum depósito de rejeito.

As planícies de inundação ou outros locais vulneráveis às enchentes são consideradas inconvenientes para instalar os repositórios uma vez que, em condições extremas pode ocorrer a inundação das instalações subterrâneas pelas águas superficiais através dos poços ou furos de sondagens.

Durante o longo período geológico, as correntes de águas superficiais podem passar por mudanças radicais no seu regime de fluxo. Portanto, os efeitos futuros do comportamento das correntes superficiais devem ser prognosticadas para assegurar que o acomodamentos geológicos possam ser mantidos por um período de tempo necessário para o armazenamento de rejeito.

b) Águas subterrâneas

A água subterrânea constitui um verdadeiro perigo para os rejeitos radioativos armazenados em formações geológicas. Assim, a natureza e as características das formações aquíferas que se encontram próximas às zonas potenciais ao armazenamento, bem como as rochas hospedeiras, são elementos importantes para a avaliação de locais.

Em muitas áreas, especialmente de climas áridos, a água subterrânea é de grande importância já que ela constitui a principal fonte de abastecimento para as indústrias, a agricultura e ao homem. Assim, qualquer atitude que acarrete a contaminação dessas águas, não será aceita.

I - Natureza e ocorrência do fluxo da água subterrânea

As rochas hospedeiras devem estar livre da água subterrânea embora ,

as formações situadas acima ou abaixo possam conter zonas de águas disseminadas. Para as rochas de comportamento plástico, as distâncias tanto horizontais como verticais entre o lençol de água e as zonas de armazenamento, podem ser menores do que para as rochas de comportamento elástico. Massas espessas de sal gema que se encontram a pouca profundidade, normalmente, estão em contato com as águas subterrâneas ao longo de seus limites superiores. Neste caso, os níveis de armazenamento devem estar em torno de 100 metros abaixo da zona de água e a tal distância que a taxa de dissolução do sal gema não seja capaz de expor os recipientes de rejeitos durante o período necessário. A maneira ideal para as rochas duras e quebradiças é que elas estejam isoladas de qualquer aquífero, por espessas camadas de folhelhos impermeáveis.

II - Direção, velocidade e volume do fluxo da água subterrânea

Para avaliar adequadamente os regimes hidrológicos de um local apropriado, devem ser determinados a direção do fluxo da água, a velocidade linear e taxa de volume de tais movimentos. Será necessário determinar no campo, as três dimensões geométricas dos diversos tipos de rochas, a porosidade, a condutividade hidráulica de cada tipo e os gradientes hidráulicos de cada um.

Os métodos convencionais de investigação para determinar as propriedades hidráulicas das rochas podem tornar-se ineficientes principalmente quando as rochas possuem condutividade baixa. Normalmente, os procedimentos dos testes necessitam de ser adotados. Estes testes especiais podem incluir trabalhos de bombeamento de poços com o uso de traçadores isotópicos e injeção de água abaixo das pressões críticas. O uso de traçadores pode ser útil para avaliar a porosidade efetiva baseados em observações da velocidade da água.

Em geral, as velocidades das águas subterrâneas não podem ser medidas diretamente mas podem ser estimadas uma vez que elas são proporcionais à condutividade hidráulica, à porosidade efetiva e ao gradiente hidráulico. A velocidade real de um ponto particular pode se desviar consideravelmente do calculado, devido às variações da porosidade efetiva e da permeabilidade em qualquer corpo gerador de água. Como exemplo, temos que a velocidade real nas rochas cristalinas pode ter uma variação muito grande devido às diferentes geometrias das fraturas.

Teoricamente, a viabilização de uma formação geológica para deposição de rejeitos pode ser dada por qualquer combinação da condutividade e do gradiente que aponte um regime hidrológico com velocidades extremamente baixa da água subterrânea no local do repositório e capaz de impedir o escape de radionuclídeos pa

ra a biosfera. Os erros e as incertezas são próprios destas determinações pois os processos geológicos futuros, mudanças climáticas e ações induzidas pelo homem podem alterar drasticamente os regimes hidrológicos.

Alguns sedimentos argilosos, geralmente, são considerados impermeáveis mas, na realidade, comportam-se como membranas semipermeáveis. A energia necessária para conduzir a água através da membrana, pode ser fornecida pela compactação dos sedimentos, pelo gradiente hidráulico ou mesmo pelo gradiente elétrico ou térmico. Quando a água passa por difusão molecular através de uma membrana semipermeável, um mecanismo de filtração de íons entra em operação, criando gradientes de salinidade nos fluidos. Conseqüentemente, podem originar pressões osmóticas nas seqüências dos sedimentos argilosos. O movimento de radionuclídeos nos sedimentos argilosos pode ser extremamente baixo, mas esta probabilidade deve ser demonstrada em laboratório e mesmo em testes "in situ" nas rochas hospedeiras de interesse.

3.6.6 - Propriedades físicas e químicas

As propriedades físicas e químicas das rochas são muito importantes na avaliação dos vários tipos de formações geológicas para o armazenamento de rejeitos, uma vez que elas determinam as características da circulação das águas subterrâneas, da dissipação do calor por decaimento radioativo, dos efeitos da radiação, da estabilidade das escavações e da forma do rejeito.

a) Permeabilidade, porosidade e dispersividade

As rochas que possuem baixa permeabilidade (espaços porosos interconectados) são favoráveis para o armazenamento. Isto está relacionado, principalmente, com a facilidade de executar as escavações em ambientes secos. As rochas de baixa permeabilidade também possuem baixa porosidade natural (vazio intergranular ou intersticial) com exceção das camadas argilosas e para alguns calcários. Por outro lado, o movimento de fluidos através de um meio poroso depende da porosidade efetiva ou cinética. Ela determina a velocidade real de deslocamento dos fluidos em meios porosos. Esta porosidade efetiva pode ser consideravelmente mais baixa que a porosidade total. Pode-se defini-la como sendo a velocidade de infiltração dividida pela velocidade real medida "in situ" por meio de traçadores.

Para muitos tipos de rochas tais como o sal, o calcário e o granito, a

porosidade natural é baixa (menor que 5%), o mesmo acontecendo com a permeabilidade natural.

A dispersividade em meio permeável é também um parâmetro muito importante, pois governa o deslocamento das substâncias dissolvidas na água em movimento. É expressa pelo coeficiente de dispersão, que depende da velocidade de deslocamento do fluido e pode ser medida também por meio de traçadores.

b) Comportamento mecânico das rochas

Para as rochas potencialmente apropriadas para o armazenamento dos rejeitos é necessário estabelecer que as deformações permanentes ou passageiras (deslocamento, pressão e tensão) nelas induzidas não irão prejudicar a longo prazo, a integridade do repositório. Essas deformações são produzidas pelo fechamento natural das escavações. Em casos de estocagem de rejeitos que liberam calor, as deformações podem se dar por expansão térmica das rochas afetadas. As rochas de comportamento plástico geralmente sofrem pequenas acomodações durante o longo período geológico, fechando aberturas subterrâneas, sem provocar fraturamentos na rocha.

Na maioria dos casos de escavações subterrâneas em rochas friáveis, estas podem resistir durante todo o tempo de vida do repositório. Entretanto, podem ocorrer fraturamentos e deformações nas paredes e nos tetos das escavações que podem modificar as formas e as dimensões das cavidades originais. Essas escavações podem enfraquecer mecanicamente as rochas e provocar desmoronamentos ou rápidas deformações que, às vezes, quando atingem a superfície do solo pode permitir a circulação da água para a zona de armazenamento e conseqüentemente prejudicar o repositório.

c) Efeitos térmicos

Os rejeitos de alta atividade solidificados podem ser resfriados durante um certo período, em um repositório, para reduzir a taxa de calor inicialmente alta produzida pelo decaimento dos produtos de fissão. Embora, a taxa de geração de calor diminua consideravelmente após o período de resfriamento, há ainda o calor residual, que poderá ser liberado no repositório.

As rochas apropriadas para a deposição de rejeitos de alta atividade geradores de calor devem possuir propriedades térmicas que permitam a rápida dissipação do calor e cuja estabilidade não seja afetada pelas elevadas temperaturas .

O sal gema possui a mais alta condutividade térmica em relação às demais rochas existentes, mas apresenta altas taxas de deformação quando submetidas às elevadas temperaturas. Essa última característica é, às vezes, útil porque permite que se promova naturalmente o isolamento das cavidades preenchidas com os recipientes.

Por outro lado, para as rochas friáveis, a deformação acelerada devido às elevadas temperaturas é prejudicial, já que ela pode originar fraturas e dano ao meio geológico. Para as rochas argilosas, o calor pode provocar transformações nas suas propriedades físicas.

Para determinar os efeitos impostos pelo aumento térmico na distribuição da temperatura e na estabilidade estrutural dos diversos tipos de rochas, devem ser analisados os seguintes parâmetros: condutividade térmica, calor específico, coeficiente de expansão, tensão de ruptura e taxa de deformação lenta.

d) Inclusões de gases e líquidos

Em muitos evaporitos podem ocorrer inclusões de pequenas quantidades de gases e líquidos. Estas inclusões podem afetar negativamente as operações do repositório, quando da deposição de rejeitos de alta atividade geradores de calor, pela decrepitação da rocha e migração da salmoura em direção às fontes de calor, ou seja, aos recipientes de rejeitos. Em alguns depósitos de sal, abaixo do ponto de decrepitação, aproximadamente 250°C , pequenas cavidades preenchidas com salmoura, (com dimensões variando de pouco milímetros a microscópicos) podem "migrar" em direção às fontes de calor, sendo possível transformar-se em cavidades maiores pela incorporação de outras menores, durante a migração. O mecanismo de migração do fluido nas cavidades dá-se pela difusão dos íons de sódio e de cloro das partes mais quentes da cavidade para as mais frias, devido à solubidade do NaCl que é ligeiramente maior a altas temperaturas.

Para outros tipos de rochas, a migração dos fluidos, como descrito acima, não causa maiores consequências. No entanto, poderá ocorrer fraturamentos localizados se essas rochas forem submetidas a temperaturas superiores aos seus pontos de decrepitação.

Frequentemente, durante as escavações nas seqüências sedimentares, são encontrados pequenos bolsões de gás que causa explosões e deformações nas galerias e túneis. Em muitos casos, as pressões induzidas em torno das aberturas podem ser aliviadas através de sondagens no teto e na base das galerias. O gás, se en-

contrado em pequenas quantidades, pode ser eliminado através de sistemas normais de ventilação. Em casos extremos onde camadas ricas de material carbonatado estão intercalados com rochas, como o folhelho ou sal, a presença de infiltrações de metano e de outros gases é difícil de ser controlada. A localização dessas cavidades preenchidas com gás deve ser feita antes, através de métodos geofísicos.

e) Minerais formadores de água

Quantidades significantes de minerais hidratados podem criar condições adversas em rochas consideradas apropriadas para a deposição de rejeitos de alta atividade geradores de calor, já que esses minerais liberam água quando submetidos a altas temperaturas. Um dos minerais mais problemáticos é o gipso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que ocorre em quantidades variáveis, principalmente, nas porções superiores da sequência evaporítica. Esse mineral sofre desidratação sob condições normais de pressão, num intervalo de temperatura entre 110° a 220°C , com aquecimento rápido. Em condições de aquecimento lento, como ocorre em um repositório, o gipso pode desidratar-se em temperaturas mais baixas ou num intervalo de tempo menor do que o mencionado. O gipso contém 21% em peso de água, de modo que, 1 m^3 de gipso puro é capaz de liberar cerca de 480 litros de água.

Outros minerais salinos hidratados são encontrados em sequência evaporíticas, tais como, a poliatita, a carnalita, a bloedita e a epsomita. Localmente, a quantidade de tais minerais pode ser significativa e a maioria sofre desidratação a temperaturas maiores que a do gipso. No entanto, se esses minerais ocorrerem junto ao horizonte de deposição deve-se determinar as suas quantidades, distribuições e características de perda da água.

3.6.7 - Transporte de rejeitos

O transporte é uma importante etapa do sistema de gerenciamento de rejeitos. O regulamento para a Segurança de Transporte de Materiais Radioativos publicados pelo IAEA (Safety Series nº 6) é uma base apropriada para tratar deste aspecto. Esta norma é adotada no Brasil, pela Comissão Nacional de Energia Nuclear. Contudo, é preciso salientar que as considerações e os procedimentos de transporte são diferentes para diversos tipos de rejeitos.

Na escolha de um local para repositório de rejeitos, é essencial que na região existam sistemas adequados de transporte como ferrovias e rodovias, de fácil acesso e situada não muito distante da fonte geradora de rejeitos.

3.6.8 - Densidade de população

Quando um local é aceito para o armazenamento de rejeitos após cuidadosos estudos baseados nos fatores técnicos de seleção, o repositório nela instalada não deve apresentar qualquer perigo à população.

3.6.9 - Recursos minerais

As formações geológicas consideradas favoráveis para a deposição de rejeitos radioativos, ou mesmo aqueles adjacentes, podem constituir fontes minerais ou naturais. A possibilidade de utilizar essas formações para armazenar os rejeitos, impede uma futura extração dos materiais minerais. Qualquer mineração que se efetuar próximo a essa área, deve ser empreendida após estudos de compatibilidade das operações, dos impactos nos níveis do repositório resultantes da extração do minério, e das possibilidades de contaminação das fontes pelos rejeitos radioativos.

3.6.10 - Considerações econômicas e sociais

Além dos critérios já mencionados para a avaliação de locais, são considerados, também, os fatores econômicos e sociais, na fase final do processo de seleção, que incluem: o uso de área para fins industriais, de recreação, agrícolas e urbanísticos, e os aspectos legais sobre o uso e direitos de propriedade do local.

3.7 - Deposição geológica dos rejeitos de alta atividade e os contaminados com elementos transurânicos

A deposição de rejeitos contaminados com elementos transurânicos e especialmente os de alta atividade é um problema sério que a indústria nuclear deve resolver. Das soluções concebidas, a alternativa de deposição de rejeitos em formações geológicas apropriadas tem sido considerada como a mais realista e viável.

3.7.1 - Alternativas para a deposição geológica dos rejeitos em questão

As alternativas em estudo para deposição definitiva de rejeito líquido

ou sólido em formações geológicas são:

- a) Caverna subterrânea
- b) Fusão da rocha hospedeira
- c) Matriz de furos para injeção
- d) Fraturamento hidráulico por injeção
- e) Furo profundo

Cabe-nos esclarecer que com exceção da 1ª alternativa, todas as demais destinam-se aos rejeitos líquidos e solidificados de alta atividade.

A questão importante e comum a todas estas alternativas é a capacidade da formação geológica conter os rejeitos 100.000 anos ou mais.

a) Caverna subterrânea

A alternativa de escavações subterrâneas foi proposta originalmente para formações salinas acamadas mas pode ser aplicada a outros tipos de rocha. Incluem-se nesta alternativa, a utilização de minas desativadas, como é o caso da Mina de sal de Asse, na Alemanha e velhas minas de ferro escavadas em granito, na Suécia.

Na Mina de Asse, explorada de 1916 a 1964, cerca de 100 câmaras foram abertas para a extração do sal, e correspondem a um sistema com 15 andares que vão desde a profundidade de 490 até 800 metros, com um volume total de cerca de 3,5 milhões de $m^3 / 5 /$.

Para os canadenses / 92 /, o conceito de caverna subterrânea consistiria de uma rede de túneis, provavelmente em um nível único a profundidade entre 300 a 2.000 metros. Os rejeitos seriam conduzidos por um poço até uma caverna subterrânea e dali distribuídos pelos túneis onde seriam colocados em nichos escavados no piso.

b) Fusão da rocha hospedeira

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

O método básico consistiria na injeção do rejeito líquido numa cavidade subterrânea a cerca de 200 metros de profundidade sob o local da instalação de reprocessamento. O líquido entraria rapidamente em ebulição, devido à energia de decaimento radioativo. Para manter a cavidade à temperatura e pressão convenientes o sistema seria resfriado à água. O vapor resultante seria recirculado num sistema fechado. Em determinado período, com a adição de rejeitos e contínua evaporação, o conteúdo da cavidade e a rocha envolvente entrariam em fusão obstruindo os acessos à cavidade. Finalmente, o material fundido iria solidificar-se aprisionando permanentemente o rejeito radioativo numa matriz insolúvel.

Outro método sugere a colocação do rejeito solidificado no recipiente em cavidades profundas. Os recipientes e seu conteúdo fundiriam-se em uma esfera de rocha como na opção descrita anteriormente.

No método da deposição em grande profundidade (Deep rock disposal), seria utilizado apenas um furo de grande diâmetro (0,3 a 3 metros) e profundidades que variam de 2 a 3 Km, e não necessitando de cavidade subterrânea / 62 /. Os rejeitos sólidos seriam colocados no fundo do poço e provocariam a fusão da rocha hospedeira. Correntes de convecção natural proporcionariam a mistura do rejeito com a rocha. Após a solidificação completa, que se supõe levar de 5 a 20 anos, o poço poderia ser preenchido com concreto e o topo do mesmo seria selado com material vítreo de baixo ponto de fusão. A Figura 3.20 exemplifica esse método.

c) Matriz de furos para injeção

Esta alternativa envolve a injeção de rejeito líquido em aquíferos isolados ou campos petrolíferos abandonados. Nos Estados Unidos, esta técnica vem sendo aplicada há longo tempo por companhias de petróleo para reinjetar nos campos petrolíferos a salmoura trazida à superfície durante a produção de óleo. Mais recentemente, a técnica tem sido usada com maior frequência para a deposição de efluentes industriais e rejeitos radioativos de baixa atividade contendo trítio.

d) Faturamento hidráulico por injeção

Este conceito envolve a mistura de rejeito líquido com cimento para formar uma calda que é injetada no fundo de um poço profundo (1.000 metros). A formação geológica mais apropriada ao processo é o folhelho de baixa permeabilidade com camadas aproximadamente horizontais de modo que o fraturamento produzido pela injeção seja também horizontal. Esta técnica é uma operação de rotina para a deposição de rejeitos líquidos de atividade média, executada pelo Laboratório Na-

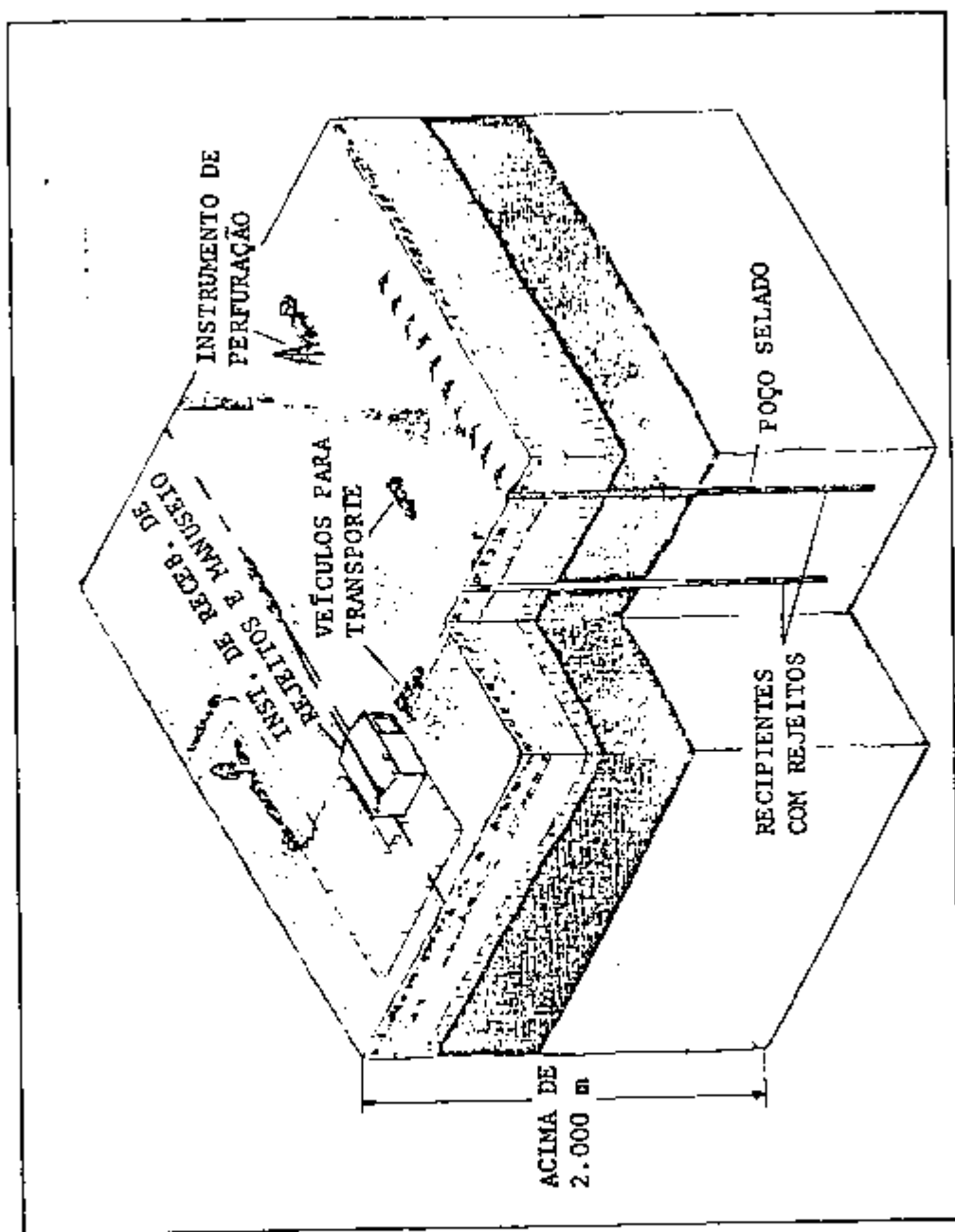


FIGURA 3.20. - CONCEPÇÃO DE REPOSITÓRIO EM FORMAÇÕES GEOLÓGICAS PROFUNDAS / 4 /

cional de Oak Ridge / 62 / ,

e) Furo profundo

A deposição em furos profundos de até 16 Km tem sido sugerida como método seguro de confinamento prolongado dos rejeitos. O método, entretanto, encontra muitas dificuldades técnicas e econômicas.

Na consideração de todas as alternativas, para a deposição dos rejeitos radioativos, tem havido um concenso geral nos seguintes aspectos:

- O transporte a grandes distâncias de rejeitos líquidos de alta atividade deve ser evitado.
- As formações geológicas estáveis representam, no momento, a única alternativa realística para deposição dos rejeitos radioativos.
- O rejeito de alta atividade deve ser solidificado para proporcionar uma máxima segurança durante a sua deposição.

3.7.2 - Formações geológicas

As formações geológicas consideradas as mais favoráveis para a deposição dos rejeitos são classificadas em 4 grupos básicos:

- Evaporitos
- Outras rochas sedimentares
- Rochas ígneas
- Rochas metamórficas

3.7.2.1 - Evaporitos

Evaporitos são rochas sedimentares químicas que se formaram a partir da evaporação de grande volume de água salgada. Um membro da família dos evaporitos, o sal gema, tem notável significado para a deposição de rejeitos radioativos.

O evaporito marinho formou-se através da precipitação química durante a evaporação do mar nas bacias que foram posteriormente isoladas do oceano. Um ciclo típico de formação do evaporito marinho normalmente se inicia com a deposição

de uma argila muito fina seguida do dolomito e/ou anidrita. A principal massa de um ciclo de evaporação consiste de sal gema com frequentes veios de potássio na culminação do ciclo. Em muitas bacias, os diferentes componentes do ciclo podem ser verificados tanto na sequência vertical como na lateral e suas interrelações devem ser determinadas em casos de segurança do repositório.

a) Sal gema

O sal gema ou halita, cloreto de sódio (NaCl) é o evaporito mais comum na Terra. Na natureza ele ocorre geralmente em 2 formas estruturais:

- em camadas salinas
- em domos salinos.

Os depósitos de camadas de sal gema estão situados no mesmo local e na maioria das vezes, na mesma forma em que foram precipitados durante a evaporação do mar. A espessura das camadas de sal gema variam muito podendo atingir centenas de metros e ocupando bacias de milhares de Km².

As diferentes densidades apresentadas pelo sal gema e pelos sedimentos adjacentes, às vezes, em combinação com zonas tectonicamente fracas ou com processos e forças tectônicas originam os domos salinos. Os domos salinos típicos são intrusivos com seções horizontais, circulares, elípticas ou alongadas, alguns tendo flancos sobressaindo, apresentando uma seção transversal semelhante a um cogumelo. Embora o topo de muitos domos chegam a estreitar-se próximo à superfície, a porção principal dessas estruturas geológicas está situada geralmente a profundidades superiores a 2.000 metros, às vezes, atingindo profundidades maiores que 10.000 metros.

Os depósitos de sal gema são explorados intensivamente para a produção de sal de modo que, as escavações realizadas neles podem ser utilizadas para fins de estocagem. Um exemplo prático, é o caso da Mina de Asse, na Alemanha, explorada comercialmente desde o ano de 1916 até o ano de 1964, que durante a fase de testes tem armazenado rejeitos de baixa e média atividade. Nesta mina, cerca de 100 câmaras foram abertas para a extração do sal e correspondem a um sistema com 15 andares que vão desde a profundidade de 490 até 800 metros.

A Figura 3.21 mostra o corte vertical da mina, mostrando as câmaras e os túncis que são amplamente ventilados e iluminados, sendo a iluminação favorecida pelo fato do sal ser muito branco. Dentro da mina pode-se facilmente, empre

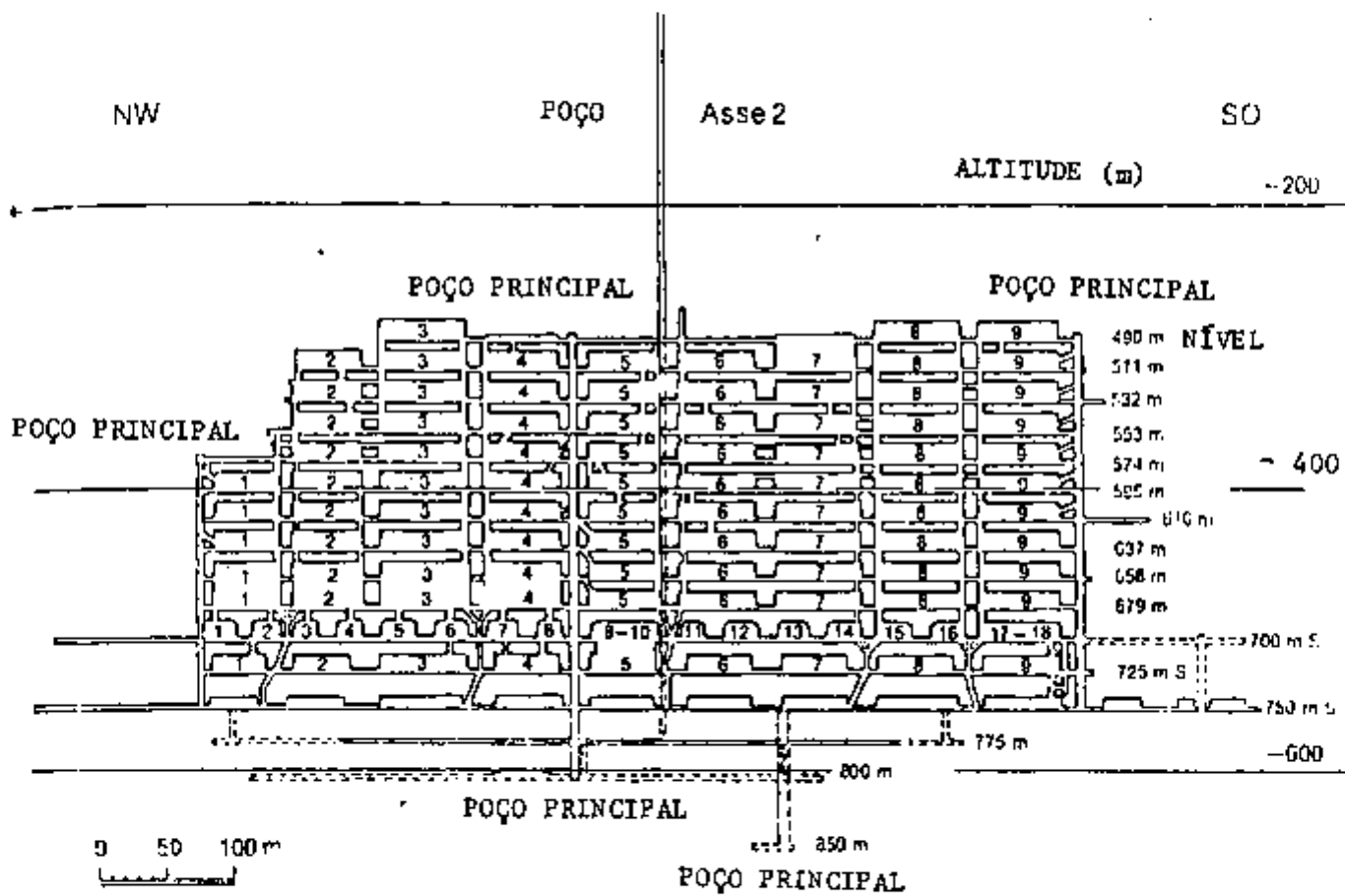


FIGURA 3.21. -CORTE VERTICAL DA MINA DE ASSE / 5 /

gar o transporte motorizado.

A Figura 3.22 esquematiza o sistema de armazenamento de rejeitos de atividade intermediária na mina. Pode-se notar que a cavidade foi escavada diretamente no sal gema, sem qualquer suporte. Possui dimensões da ordem de 45 metros de largura, 60 metros de comprimento e 15 metros de altura, com o túnel superior de acesso terminando na câmara de descarga com controle remoto. É equipado também com um sistema de ventilação e um circuito fechado de TV, através do qual se faz a monitoração dos recipientes.

Nos Estados Unidos, foi idealizado um projeto para deposição de rejeitos de alta atividade no sal gema, localizado a Nordeste do Novo México. A formação geologicamente estável do sal está a uma profundidade de 600 metros, conforme mostra a Figura 3.23.

As principais vantagens das formações naturais de sal gema como repositório de rejeitos são:

- O sal gema é essencialmente impermeável para líquidos e gases devido à sua plasticidade e à ausência de porosidade intersticial. Sua plasticidade normalmente impede a ocorrência de fissuras e juntas devido às pressões que existem sob a Terra.

- Nas camadas de sal ou dos domos salinos, a possibilidade de ocorrer água subterrânea é muito reduzida. Apesar da solubidade do sal gema na água, essas formações são extremamente resistentes. Quando o topo do domo salino atinge a água subterrânea, pode-se iniciar a lenta dissolução do sal e persistir por longos períodos. Durante o processo de dissolução os constituintes menos solúveis do sal, como anidrita e argila, formam uma capa rochosa que, também, pode conter gipsso e enxofre. Em alguns casos, esta capa rochosa serve como proteção contra a dissolução.

- Além da sua propriedade plástica, o sal gema mostra uma resistência à compressão. Assim, apesar da sua alta plasticidade, o sal apresenta uma resistência à compressão elevada, semelhante à do concreto, isto é, entre 200 e 300 kgf/cm², ou mesmo maior. Portanto, em muitos depósitos de sal podem ser feitas escavações com grande segurança, sem necessidades de escoramentos, se bem que são necessárias análises "in situ".

- Comparado com outras formações rochosas, o sal gema tem alta condutividade térmica, aproximadamente 12×10^{-3} cal/cm.s.°C (4,8 W/m°C) nas condições de temperatura da mina. Isto é benéfico, considerando a dissipação do calor prove-

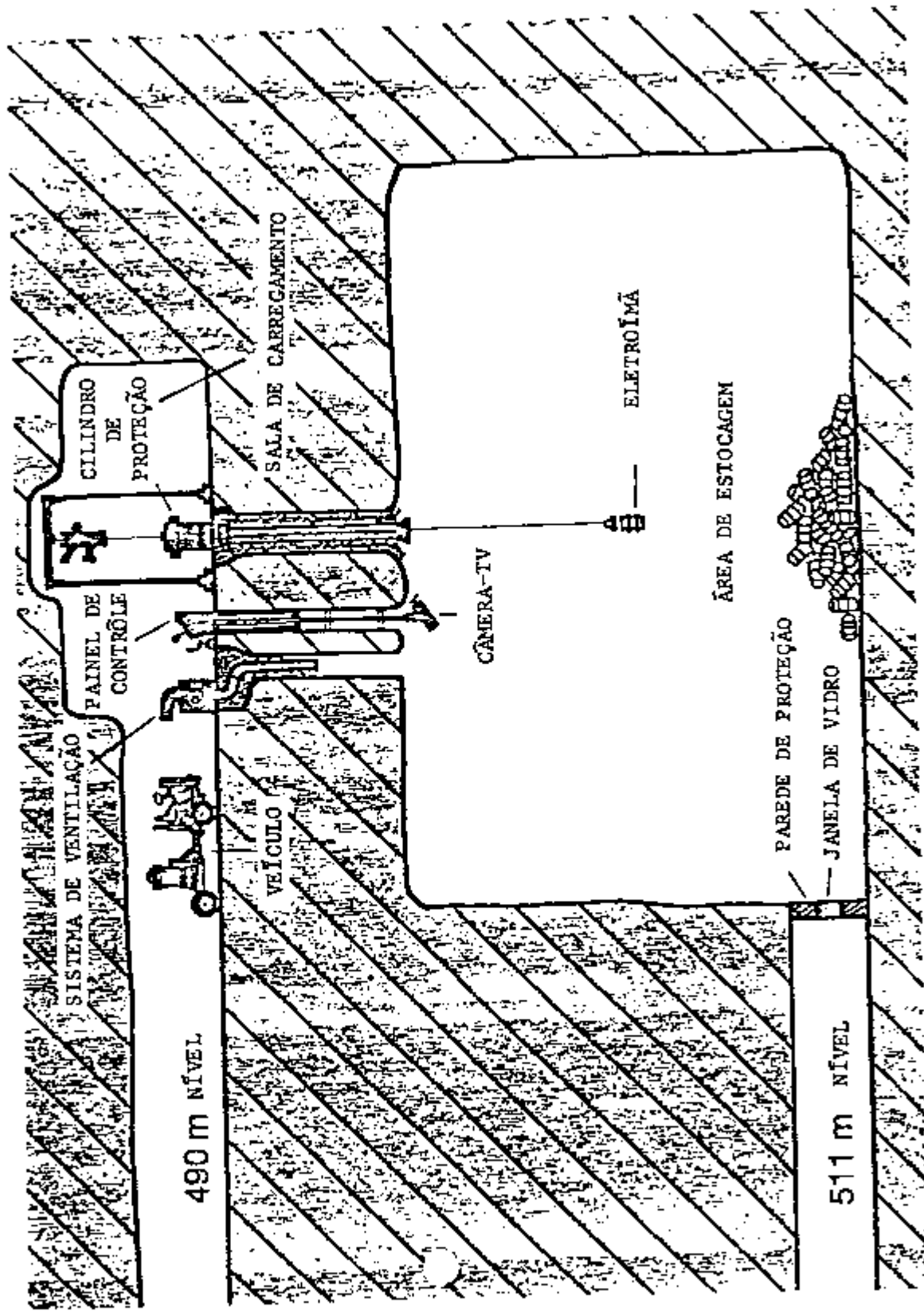


FIGURA 3.22. - CORTE DO SISTEMA DE CAVIDADE PARA ARMAZENAMENTO DE MATERIAL DE ATIVIDADE INTERMEDIÁRIA (MINA DE ASSE) / 5 /

ÁREA DE ESTOCAGEM
PARA OS RESÍDUOS
PROVENIENTES DA
MINERAÇÃO

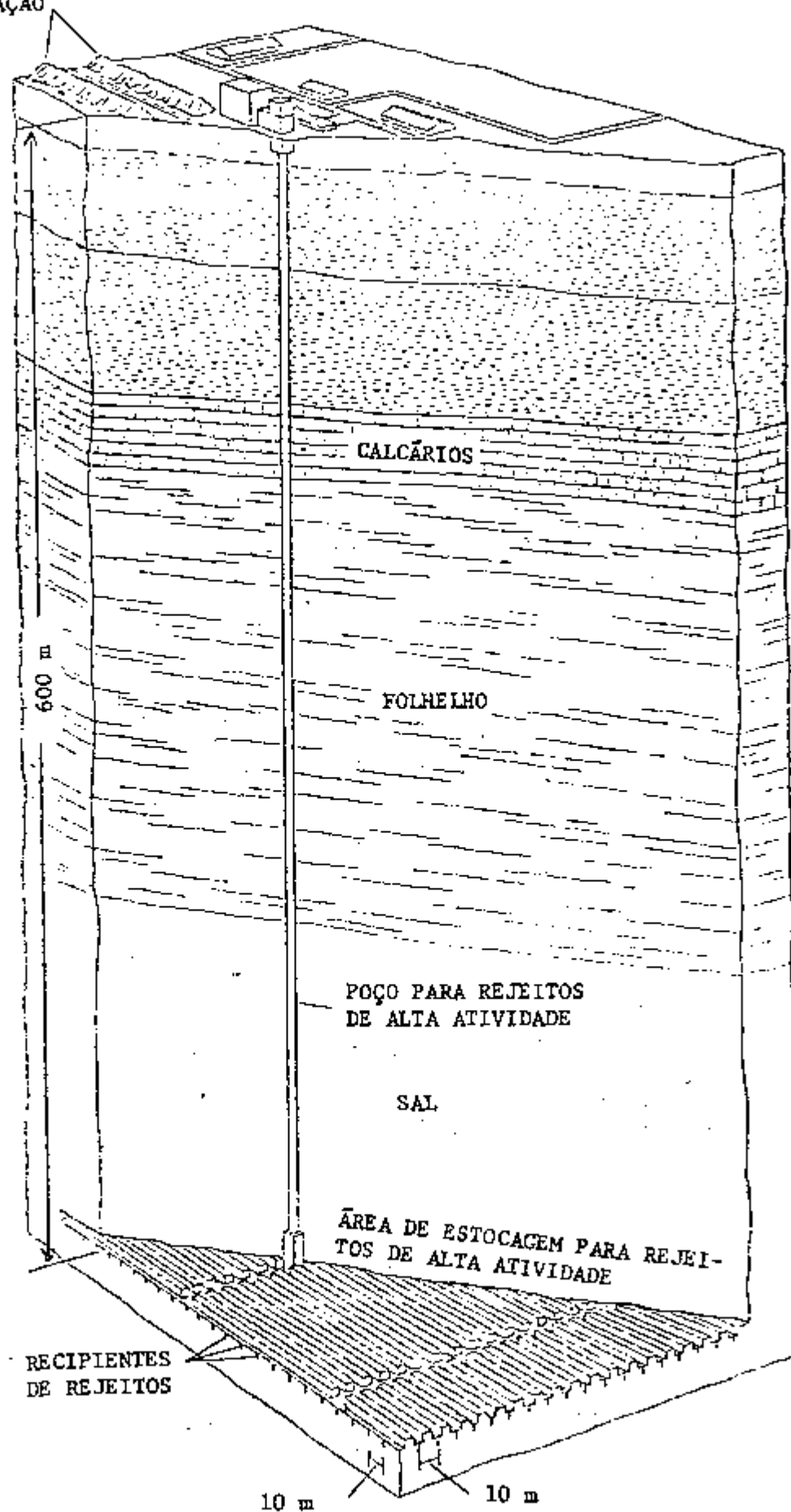


FIGURA 3.23.- CONCEPÇÃO DE DEPOSIÇÃO EM FORMAÇÕES DE SAL GEMA / 30 /

niente dos rejeitos de alta atividade,

- As rochas salinas podem ser mineradas facilmente a custo relativamente baixo. Portanto, é economicamente viável planejar e construir os repositórios.

Por outro lado, as rochas salinas têm algumas desvantagens que podem incluir, a dissolução pela água subterrânea, o diapirismo contínuo, a presença de inclusões de salmoura e a ausência de propriedades de absorção que reduzem a migração dos radionuclídeos. No entanto, deve-se observar os seguintes aspectos:

- A dissolução das rochas salinas nas suas bordas podem ser contornadas pela locação dos repositórios a pontos distantes das possíveis zonas de dissolução.

- A possibilidade de diapirismo ativo de um domo salino pode ser determinada através de investigações sistemáticas que permitam a escolha de estruturas inativas ou com movimentos lentos.

- As inclusões de salmoura não constituem problemas desde que estejam em quantidades reduzidas.

- A ausência de propriedades de absorção no sal gema não é uma desvantagem significativa já que tais propriedades são de importância, se os radionuclídeos forem transportados pela água subterrânea.

Em resumo, o sal gema apresenta um meio propício à deposição de rejeitos radioativos. Entretanto, cada local potencial tem de ser cuidadosamente investigado, considerando os fatores de seleção.

b) Anidrita

Anidrita é o nome empregado para o mineral sulfato de cálcio anidro (CaSO_4) e para rocha formada principalmente desse mineral. A anidrita é o primeiro a ser depositado no ciclo de evaporação e, principalmente, próximo à costa ou nas zonas limites das bacias marinhas. Somente nestes lugares é que são hoje encontradas as formações maciças de anidritas. Uma outra característica é que a anidrita, geralmente, é encontrada a profundidades variando entre 50 a 100 metros.

Normalmente, a profundidades rasas, a anidrita é hidratada e transforma-se em gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) por adição química da água. Anidritas puras são raramente encontradas. Por outro lado, a anidrita ocorre nos depósitos salinos em finas camadas, com espessuras variando de milímetros a centímetros.

Em comparação com outros evaporitos, o comportamento da anidrita é muito elástico na curva tensão/deformação. A força de resistência à compressão da anidrita pode atingir valores superiores a 1.000 kgf/cm^2 .

Além disso, a anidrita, embora menos solúvel que o sal gema exibe alta solubilidade comparado às demais rochas quando em contato com a água subterrânea. A praticabilidade de utilizar a anidrita para deposição de rejeitos radioativos solidificados pode ser determinada somente através de investigações de cada local.

c) Gipso

É o sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) natural, depositado em consequência da evaporação de mares.

Grande número de depósitos de gipso existentes foram originados a partir da anidrita, através de processos de hidratação que ocorreram durante a história geológica. Assim, muitos corpos de gipso mantêm ainda um núcleo de anidrita, embora depósitos primários de gipso também existam.

As potencialidades dos depósitos de gipso para armazenar os rejeitos radioativos parecem ser baixas. Devido a sua gênese geológica estes depósitos estão normalmente situados muito próximo à superfície. Os depósitos de gipso mostram, comumente, não só marcas de dissolução superficial mas também de dissolução sub-superficial, cujos processos originam os fenômenos cársticos.

d) Sais de potássio

A potencialidade teórica para uso de camadas de potássio como repositório está muito próxima às do sal gema. No entanto, deve se considerar, simultaneamente, a ocorrência de espessas camadas de sal gema e o valor econômico do potássio como material natural para a produção de fertilizantes. Por outro lado, a cavidade resultante poderá ser utilizada para a deposição de rejeitos. Certos minerais hidratados de potássio, tais como a carnalita, podem não ser apropriados como meios para repositório devido à sua baixa resistência estrutural e à presença da água de cristalização.

3.7.2.2. Outras rochas sedimentares

a) Formações argilosas

Algumas formações argilosas, que possuem boa plasticidade e estão livres de circulação de águas subterrâneas, são as mais apropriadas para a instalação de repositórios.

O termo formações argilosas cobre uma vasta variedade de materiais, como argilas, argilito, siltitos, folhelhos, ardósias e mesmo margas. A característica comum de todas as rochas argilosas, é que elas contêm uma quantidade significativa de minerais de argila. Devido à história geológica dos vários sedimentos argilosos, as suas propriedades físicas e conseqüentemente sua plasticidade, podem variar muito. Durante a deposição, os sedimentos argilosos possuem extrema porosidade e podem conter entre 70 a 80% de água. Com o decorrer do tempo e com a compactação, as partículas de argila sofrem um rearranjo que provoca a liberação de grande fração de fluidos aprisionados nos interstícios. Nas seqüências argilosas onde ocorre uma compactação normal, a 100 ou 200 metros de profundidade, normalmente, resulta na redução do teor de água para valores da ordem de 20 a 25%. Além disso, a plasticidade dos sedimentos argilosos é também afetada pela composição mineralógica, pelo tamanho e forma das partículas, pela presença de íons nos fluidos e pela história geológica da formação.

Da enumeração dos vários e diferentes fatores, pode-se ver que é quase impossível definir padrões de plasticidade para esses sedimentos. Esses valores devem ser avaliados para cada formação e para cada local em particular. Se a capacidade for muito acentuada, a rocha flui a qualquer esforço causando problemas sérios para a deposição de rejeitos radioativos. Por outro lado, se a plasticidade for muito pequena, as rochas argilosas tornam-se friáveis e quebradiças, permitindo a formação de fissuras, rupturas ou mesmo zonas de permeabilidade nas proximidades de superfície ou dos planos de falhas.

Deve reconhecer-se, também, que a plasticidade natural de uma formação argilosa pode ser modificada pelos efeitos térmicos, próximos aos recipientes dos rejeitos radioativos.

As formações argilosas que possuem propriedades físicas apropriadas para a deposição de rejeitos, como a boa plasticidade, contêm, também, significativa quantidade de água. No entanto, deve-se salientar que a água contida em algumas formações de argila ou argilitos pode, na prática, ser considerada imóvel desde que a permeabilidade destas formações seja tão baixa que não permita o movimento da água.

As principais vantagens das formações argilosas em comparação com as for

rações de sal são:

- Os minerais de argila são insolúveis em água.
- Muitos minerais de argila exibem boa capacidade de absorção reduzindo, assim, a migração dos radionuclídeos.

Por outro lado, as desvantagens são:

- A presença de fluidos intersticiais e de minerais hidratados podem reduzir efeitos prejudiciais no recipiente do rejeito.
- A condutividade térmica dos sedimentos argilosos é aproximadamente 3 a 4 vezes menor que a do sal; os efeitos térmicos nas proximidades do recipiente podem modificar a plasticidade da formação e a capacidade de absorção de alguns minerais de argila.
- Pode-se encontrar obstáculos durante as escavações nas formações argilosas.

Os volumes e taxas de circulação de fluidos através das áreas específicas dos sedimentos ou rochas argilosas são difíceis de serem avaliadas.

Concluindo, os sedimentos argilosos, especialmente alguns argilitos, oferecem considerável potencialidade para conter os rejeitos.

b) Formações de calcário

Além dos sedimentos argilosos, os calcários e as rochas carbonáticas correspondem ao próximo grupo de rochas sedimentares. Os calcários e as rochas carbonáticas, consistem, principalmente, de carbonato de cálcio, não contendo impurezas de argila superior a 20 e 40% de outros minerais não carbonáticos. O calcário é o mais importante e amplamente distribuído entre as rochas carbonáticas. O calcário consiste principalmente de carbonato de cálcio (CaCO_3). Um calcário especial de cor verde a branca, mole e não resistente, de composição específica de microorganismos é chamada de pedra sabão. Se o cálcio está substituído pelo magnésio, o mineral e a respectiva rocha são denominados de dolomito, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. O sinônimo do dolomito é o calcário magnesiano. Devido à similaridade de composição de calcário, dolomito e pedra sabão, eles serão discutidos em conjunto.

Normalmente, os calcários ocorrem em camadas claramente definidas, variando de poucos centímetros a muitos metros de espessura. As zonas de falhas nos calcários podem ser constituídas de extensas fraturas e, normalmente, capazes de permitir o movimento de grande volume de água. A resistência à compressão dos calcários compactos com baixa porosidade é da ordem de 1.000 kgf/cm^2 . A curva de tensão/deformação do calcário mostra um comportamento elástico muito rígi-

do com um mínimo de elasticidade, o que resulta na fragilidade da rocha.

As rochas carbonáticas são solúveis na água, especialmente, se esta água contém alguma quantidade de ácido. Os resultados dessa solubilização são evidenciados pelos fenômenos cársticos e por cavernas.

Em muitas regiões, particularmente na Europa, as formações de pedra-sabão são amplamente utilizadas para fins de suprimento de água e, portanto, nestes locais torna-se impraticável o seu uso para efeito de deposição de rejeitos. Por essas razões, o calcário por si só não apresenta alta potencialidade para deposição dos rejeitos. No entanto, quando ocorre em associação com outros tipos de rochas que possuem as características satisfatórias, os calcários podem oferecer condições para deposição de rejeitos. É o caso, por exemplo, da ocorrência de formações calcárias completamente secas, protegidas por camadas espessas de folhelhos que possuem plasticidade, impermeabilidade e capacidade de absorção adequadas.

Em vista dos calcários e dos dolomitos não possuírem a característica plástica adequada e a propriedade de evitar a circulação da água subterrânea, eles não são considerados candidatos primordiais para a deposição de rejeitos radioativos.

c) Sedimentos arenosos

Os arenitos constituem um outro grande grupo de rochas sedimentares. Eles ocorrem, normalmente, em seqüências gradativas a partir dos sedimentos argilosos, seguidos pelos siltitos até chegar nos arenitos puros. Estes últimos contêm, geralmente, água nos seus espaços porosos e nas juntas, não sendo, portanto, favoráveis para fins de deposição de rejeitos. Entretanto, em condições geologicamente particulares, os arenitos que são constituídos de grãos muito finos associados a uma quantidade significativa de argilas e/ou são efetivamente impermeáveis devido à cimentação, podem ser considerados apropriados para deposição. Semelhante às rochas calcárias, os corpos de arenitos que estão envolvidos por uma camada de argilito, podem constituir uma rocha hospedeira para os rejeitos radioativos.

3.7.2.3. Rochas ígneas

As rochas ígneas, que são formadas por solidificação de material magmático, dividem-se em plutônicas ou intrusivas (formadas em profundidade) e vulcânicas ou extrusivas (formadas em superfície).

As rochas ígneas intrusivas apresentam, geralmente, textura média ou grosseira, dependendo da profundidade da intrusão, do grau de resfriamento e da presença de constituintes voláteis no magma. As rochas ígneas extrusivas possuem textura fina, às vezes, vítrea. Apresentam-se, geralmente, sob a forma de derrames e tufo vulcânicos, constituídos por fragmentos de tamanho variado resultantes de atividade vulcânica explosiva.

As rochas ígneas variam, individualmente, em dureza e resistência dependendo do tamanho e composição dos cristais, do modo de solidificação e da existência de vazios.

As rochas plutônicas possuem baixa porosidade e permeabilidade enquanto que as vulcânicas apresentam porosidade e permeabilidade de muito baixa a extremamente alta.

a) Rochas ígneas plutônicas

Os tipos mais comuns são, granitos, granodioritos, dioritos e gabros. Destes, granito é o mais conhecido e largamente aceito para deposição de rejeitos radioativos devido à sua baixa porosidade e alta resistência mecânica. Há uma grande variedade de granitos classificados de acordo com os seus constituintes mineralógicos. Contudo, os constituintes essenciais de todos os granitos são, o feldspato, o quartzo e, às vezes, mica. Os granitos situados próximo à superfície, normalmente, ocorrem em grandes massas divididas em blocos através de sistemas de falhas que são originadas durante o seu resfriamento. O granito pode ser considerado um exemplo típico de rocha de comportamento elástico. A resistência à compressão, para os granitos com grãos médios, é de 1.500 a 2.200 kgf/cm².

Os granitos, quando maciços, são praticamente impermeáveis, entretanto, quando cortados por sistemas de juntas e fraturas, tornam-se permeáveis ao fluxo da água subterrânea. Existem algumas evidências de que em áreas tectonicamente estáveis, os granitos mais profundos, a cerca de 1.000 metros, possam ser livres de circulação da água subterrânea pois as fraturas são mantidas fechadas pelo efeito de pressão de carga. Ao longo dessas fraturas, muitas vezes, ocorre intemperismo que pode originar minerais caracterizados por boa capacidade de absorção, sendo este fator importante para reduzir a mobilidade de muitos radionuclídeos.

b) Rochas ígneas vulcânicas

Entre as mais representativas, podemos destacar os basaltos e os tufos.

b.1) Basalto

O basalto é equivalente neovulcânico dos gabros plutônicos e constitui 98% de todas as rochas ígneas vulcânicas. Portanto, semelhante ao granito, pode ser encontrado em toda parte do mundo.

Os principais constituintes dos diferentes basaltos são os minerais ultrabásicos do piroxênio, olivina e grupo dos feldspatos plagioclásicos.

O basalto, normalmente, ocorre em finas a espessas camadas como resultado da extrusão ou afluxo de materiais vulcânicos. Geralmente, os corpos de basalto estão intercalados por restos fósseis, cinzas vulcânicas, zonas intemperizadas ou superfícies altamente irregulares que permitem o movimento da água. As juntas são comuns, permitindo infiltração da água. A água subterrânea em contato com os basaltos, normalmente, adquire alta alcalinidade e saturação em alumina e sílica. Semelhante aos granitos, os basaltos não possuem a característica de absorção, no entanto, os minerais zeólitos, normalmente, depositados e encontrados nas fraturas e juntas podem, às vezes, reduzir a migração dos radionuclídeos.

A resistência à compressão do basalto, pode atingir valores altos, aproximadamente 4.000 kgf/cm^2 . Os basaltos constituídos de grãos finos são os que possuem alta resistência à compressão, cuja curva tensão/deformação tende a aproximar-se à do aço.

b.2) Tufos vulcânicos

Os tufos vulcânicos são rochas originadas da consolidação de materiais expelidos das erupções vulcânicas. Quando os materiais piroclásticos estão misturados ou intercalados nos sedimentos, a rocha resultante é denominada de tufito. Os tufos são semelhantes a muitas rochas vulcânicas apresentando a forma de platôs (planaltos) ou de cones de acumulação. Em consequência, os tufos, geralmente, têm a composição mineralógica semelhante às suas associadas as rochas vulcânicas.

Alguns tufos são densos e compactos, porém sua resistência à compressão, de 200 a 300 kgf/cm^2 , é, razoavelmente baixa, comparada com outras rochas ígneas vulcânicas. A desvitrificação das partículas de vidros contidas nos tufos, frequentemente, conduzem à formação dos minerais zeólitas, proporcionando, assim,

boa capacidade de absorção.

A escolha de uma formação de tufo, para a instalação de depósitos de rejeitos, dependerá exclusivamente da sua espessura e extensão.

3.7.2.4. Rochas metamórficas

São aquelas originadas de rochas pré-existentes magmáticas ou sedimentares por processos especiais de transformação, formando-se novos minerais e nova textura. Exibem, normalmente, estruturas paralelas (foliação) que provêm da orientação dos minerais.

As rochas metamórficas (quartzito, anfibolito, mármore, gnaiss, filito, xisto e outras) são consideradas mais resistentes, menos permeáveis que seus equivalentes sedimentares, sendo no entanto, menos resistentes e mais permeáveis que a maioria das rochas ígneas intrusivas. Examinemos alguns tipos / 33 / :

O quartzito é muito resistente, quimicamente inerte e tem o maior valor de condutividade e expansão térmica de todas as rochas aqui discutidas. A maioria dos quartzitos tem baixa porosidade e permeabilidade, especialmente a pouca profundidade.

O mármore não apresenta propriedades físicas marcadamente diferentes de seu correspondente sedimentar, o calcário. Mostra a maior solubilidade das rochas metamórficas e é estável em meio ácido. Em virtude de sua alta permeabilidade, o mármore é inadequado para fins de armazenamento de rejeitos radioativos.

O anfibolito é uma rocha de granulação grosseira constituída de anfibólito e plagioclásio e de quantidades pequenas de granada, quartzo e epidoto. É derivado, principalmente, do basalto, gabro e rochas de composição similar. Das principais rochas metamórficas, o anfibolito tem a maior resistência, sendo menos susceptível ao fraturamento que o quartzito, e é, portanto, menos permeável a pouca profundidade. A permeabilidade muito baixa indica que o anfibolito pode ser viável para o armazenamento de rejeitos radioativos.

O gnaisse é uma rocha de granulação grossa e apresenta bandas alternadas de minerais granulares e minerais xistosos. Sua composição mineral, embora variável, consiste de feldspato abundante e quantidades menores de quartzo, mica, anfibólito e granada. Apresenta a maior resistência, depois do anfibolito, e a maior condutividade térmica, depois do quartzito. Em virtude de sua heterogeneidade, suas propriedades físicas e químicas não são constantes. O gnaiss, em geral, tem permeabilidade muito baixa.

O xisto apresenta condutividade térmica menor do que o quartzito, anfi-

bolito e gnaisse, e tem a menor resistência de todas as principais rochas metamórficas. Em virtude de sua ampla variação na mineralogia e gênese, suas propriedades físicas e químicas variam muito. Por isso, sua adequabilidade para armazenar os de rejeito radioativo, dependerá do tipo litológico em questão.

O filito é uma rocha metamórfica que apresenta foliação, sendo intermediária entre o xisto e a ardósia na sequência metamórfica. É derivado de rochas sedimentares de granulação fina que experimentaram deformação mecânica e recristalização. Tanto o filito como a ardósia são altamente foliáceos.

A ardósia é uma rocha metamórfica homogênea de textura tão fina que não permite a identificação dos constituintes minerais a olho nú. É mais resistente que o calcário, embora esta diferença seja pequena.

Tanto a ardósia como o filito possui a capacidade de troca iônica. A ardósia, localmente, pode ser adequada para deposição de rejeitos radioativos, se levarmos em consideração a baixa permeabilidade, especialmente a grandes profundidades. A ardósia tem condutividade térmica baixa, mas sua expansão térmica é tão alta quanto a do quartzito.

O serpentinito é uma rocha máfica hidratada que por isso se comporta plasticamente a profundidades e temperatura elevadas, embora seja competente próxima à superfície e a baixa temperatura.

3.7.3. Programas para definição de locais

Nos Estados Unidos está se desenvolvendo um programa denominado "National Waste Terminal Storage", que objetiva o desenvolvimento de um repositório Federal para deposição de rejeitos radioativos de alta atividade. O programa, embora possa variar de uma formação geológica para outra, é caracterizado por 7 etapas distintas / 101 / :

- a.- Identificação das formações de interesse
- b.- Campanhas de reconhecimento
- c.- Testes "In situ"
- d.- Estudos geológicos das áreas
- e.- Estudos detalhados de confirmação
- f.- Estabelecimento de instalação piloto
- g.- Extensão das operações da instalação piloto

a) Identificação das formações de interesse

Neste processo, é feita, primeiramente, uma revisão baseada apenas no reconhecimento geral, das propriedades geológicas e/ou propriedades fundamentais do tipo de rocha envolvida. Se a revisão for promissora, empreende-se uma campanha de reconhecimento.

b) Campanhas de reconhecimento

Têm como finalidade a coleta de todos os dados disponíveis sobre as propriedades e características da formação, relevantes à deposição de rejeito. Estas informações podem incluir, estrutura, estratigrafia, profundidade e espessura, hidrologia, mineralogia e petrologia, recursos naturais e características gerais da superfície.

c) Testes "in situ"

Uma vez identificada uma formação como possível candidata a abrigar o repositório, serão conduzidos um conjunto de testes "in situ", simultaneamente aos estudos geológicos da área. Os testes variarão da simples instalação de aquecedores elétricos em nichos nos afloramentos de superfície, até testes extensivamente instrumentados, em cavidades construídas, especialmente, na profundidade de uma instalação piloto futura.

d) Estudos geológicos das áreas

Estes estudos, que se seguem à campanha de reconhecimento, incluem sondagens a uma densidade aproximada de 6 a 10 furos por 2.590 Km², mapeamento geológico, estudos hidrológicos, levantamentos geofísicos e estudos geológicos adicionais. Ao final destes estudos, a conveniência da área é revista novamente e, caso pareça adequada, serão identificados uma ou mais locações específicas para investigações mais detalhadas.

e) Estudos detalhados de confirmação

São destinados a locações específicas de cerca de 5,2 - 13,0 Km² cada. As investigações envolvem sondagens e testes em cada locação e estudos geológicos específicos suplementares.

f) Estabelecimento de instalação piloto

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

g) Expansão das operações da instalação piloto

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

O programa da Atomic Energy of Canada Limited - AECL, é similar ao programa americano. No entanto, o programa enfatiza o estudo de rochas pré-Cambrianas do escudo canadense. Em linhas gerais, as etapas seriam^{/92/}:

a) Seleção de rochas plutônicas através de trabalhos geológicos existentes, mapas, relatórios e imagens diversas. Cerca de 20 a 30 locais estão sendo escolhidos.

b) Seleção de cerca de 6 locais entre os mais promissores para reconhecimento de campo. Envolve mapeamento e amostragem.

c) Estudo detalhado dos 3 sítios mais promissores. Envolve mapeamento geológico de detalhe, sondagens, monitoração sismológica, geofísica regional e estudos hidrológicos e hidrogeológicos. O programa será avaliado em conjunto com os resultados dos estudos de laboratório e investigações que foram conduzidas paralelamente em outros meios rochosos (sal e serpentinito).

d) Se a rocha plutônica mostrar-se apropriada, será escolhido um sítio para ser estudado extensivamente.

Paralelamente às etapas de avaliação da rocha, serão realizados estudos de laboratório e experiências "in situ", similares ao programa americano.

A constatação de que os programas canadense e americano são similares, nos permitiria concluir que o programa brasileiro deverá ater-se, também àque-

Las linhas gerais. É obvio que o sucesso do Programa Nuclear Brasileiro, particularmente no que se refere à implantação de Usina de Reprocessamento, depende de uma solução segura e satisfatória para o problema de deposição de rejeitos ra di o a t i v a d a d e a t i v i d a d e.

4 - OCORRÊNCIAS DE ROCHAS PARA O ARMAZENAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS NO BRASIL

Um dos problemas para o armazenamento dos rejeitos radioativos, principalmente os rejeitos de alta atividade e os contaminados com elementos transurânicos, consiste na avaliação de locais apropriados. Os estudos atuais indicam, como observamos anteriormente, o armazenamento seguro desses rejeitos em formações geológicas.

O imenso território brasileiro apresenta, em seu arcabouço geológico, vários tipos de rochas que podem ser favoráveis para estocar definitivamente os rejeitos radioativos. No entanto, uma consulta à vasta bibliografia geológica, permite reconhecer a notável lacuna existente entre o grande número de detalhes e muito local, e os poucos de síntese.

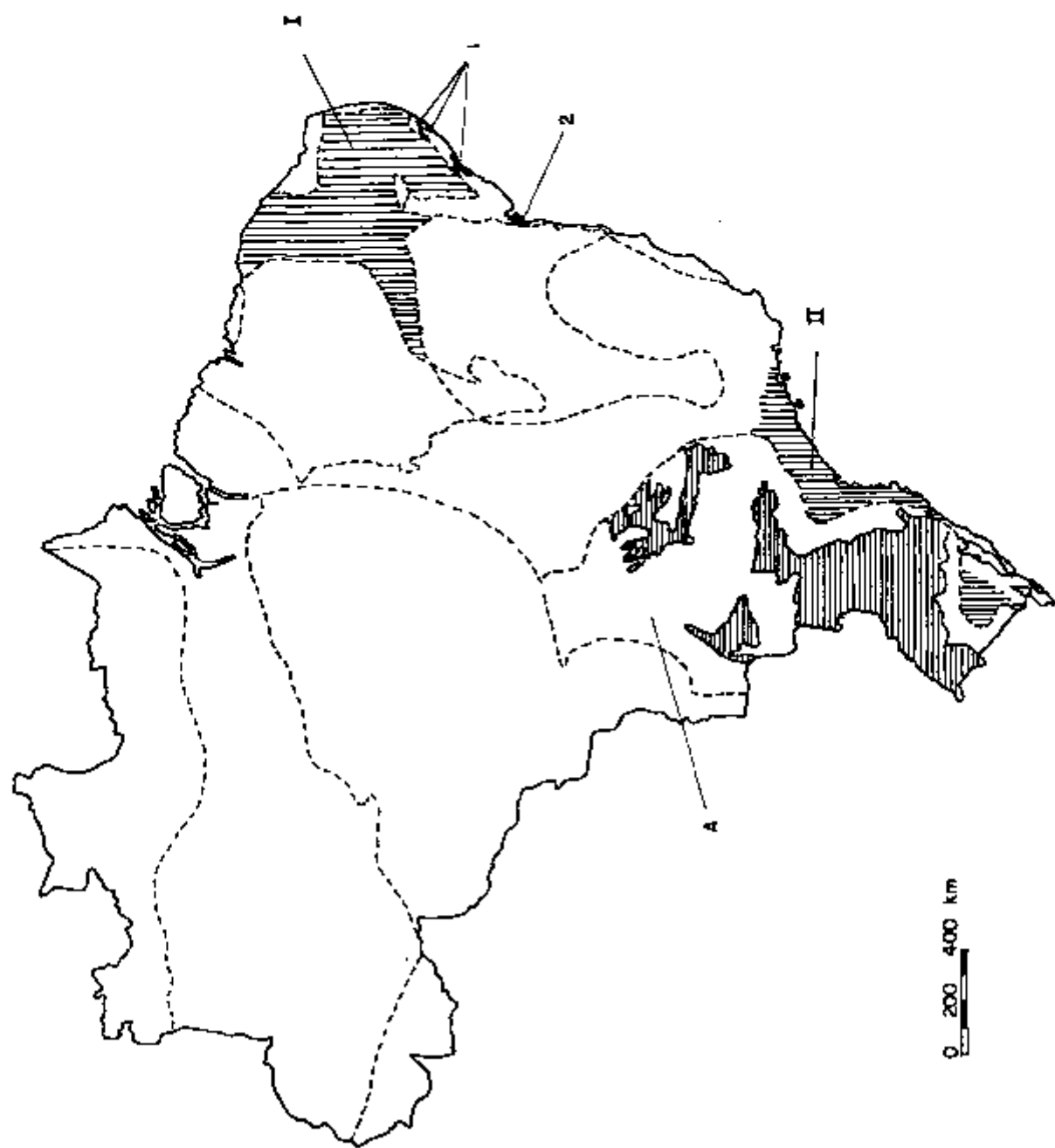
Assim sendo, para o presente trabalho, propomos o estudo de três tipos de rochas: o sal gema, o granito e o basalto, as quais consideramos importantes, dadas às suas numerosas ocorrências, às suas grandes extensões e à disponibilidade de informações.

Para o sal gema, descrevemos as ocorrências até então descobertas, nas bacias sedimentares de Sergipe-Alagoas e do Recôncavo. Para as rochas graníticas, nos limitamos a apresentar as grandes ocorrências de corpos localizados nas Regiões de Dobramentos Nordeste e Sudeste, devido às proximidades da costa litorânea e futuramente das centrais nucleares de admitirmos a filosofia de implantação dessas centrais ao longo do litoral. E por último, destacamos a principal ocorrência de rochas basálticas no Brasil, a Formação Serra Geral, que está localizada na bacia sedimentar do Paraná.

A Figura 4.1 ilustra a localização das ocorrências de rochas citadas.

As ocorrências acima mencionadas estão descritas em caráter regional e preliminar, quanto aos aspectos geomorfológicos e hidrográficos, demográficos e de vias de acesso, geológicos, de estruturas tectônicas e sismicidade, hidrogeológicos e de recursos minerais. Julgamos que esses critérios principais atendem às finalidades do trabalho, embora, como foi visto na seção 3.6, a escolha de um depósito requiera amplos conhecimentos das condições específicas do local.

É preciso notar que, a exploração dos sais de potássio na Bacia de Sergipe-Alagoas pela Petromisa em minas subterrâneas ocasionará possibilidades de utilização posterior das câmaras de mineração subterrânea para o armazenamento



LEGENDA

SAL GEMA

- 1 - Bacia de Sergipe-Alagoas
- 2 - Bacia do Recôncovo

REGIÕES DE DOBRAMENTOS COM OCORRÊNCIAS DE CORPOS GRANÍTICOS

- I - R. D. Nordeste
- II - R. D. Sudeste

BASALTO

- A - Bacia do Paraná

--- Limite dos elementos tectônicos

FIGURA 4.1 - OCORRÊNCIAS DE SAL GEMA, GRANITOS E BASALTO.

de rejeitos de alta atividade. Uma sugestão é feita às autoridades do setor para que um planejamento nesse sentido seja feito antes que o projeto acabe por eliminar esta possibilidade futura. Contudo, é mister apontar para o fato que a localização de usinas de reprocessamento deve ser compatível com a localização das ocorrências de sal gema. Por exemplo, caso as usinas de reprocessamento sejam localizadas junto ao mar no Espírito Santo, o transporte marítimo até as minas de sal gema na Bacia de Sergipe-Alagoas oferece vantagens significativas.

4.1 - Ocorrências de sal gema

Há notícias de numerosas ocorrências de sal gema nas bacias sedimentares do Brasil: no Nordeste, de há muito são elas conhecidas em formações sedimentares do Estado de Sergipe, e já investigadas, inclusive por particulares; na região de Carmópolis, o sal gema contém boa porcentagem de carnalita, em vários poços perfurados para pesquisa de petróleo. Na parte sudeste da Bacia do Recôncavo diversos poços revelaram a presença de sal gema, e todas as ocorrências conhecidas estão depositadas em sedimentos da Formação Aliança Inferior.

A deposição do sal entre camadas sedimentares efetua-se por evaporação de águas salgadas em ambientes restritos (lagos salgados, lagunas, mares isolados, etc.). As camadas salinas são originalmente lenticulares, de espessura muito variável e dimensão horizontal também variada de acordo com a forma da bacia de evaporação. Existem depósitos de sal de diversas idades, desde o Permiano até o Triássico, ou mais recentemente. As jazidas de sal gema, atualmente conhecidas no Brasil, ao que parece apresentam-se em camadas, e não em domos.

4.1.1 - Bacia de Sergipe-Alagoas

Estima-se que os depósitos de sal na Bacia de Sergipe-Alagoas se estendem por 3.000 Km², quase um terço da área terrestre dessa bacia (Mapa da situação Figura 4.2). No momento, a ocorrência mais notável, por sua pequena profundidade, possança e presença comprovada de sais é a área de Carmópolis, em Sergipe. Em Alagoas, a ocorrência de sal está associada com a parte inferior da Formação Muribeca (Membro Maceió).

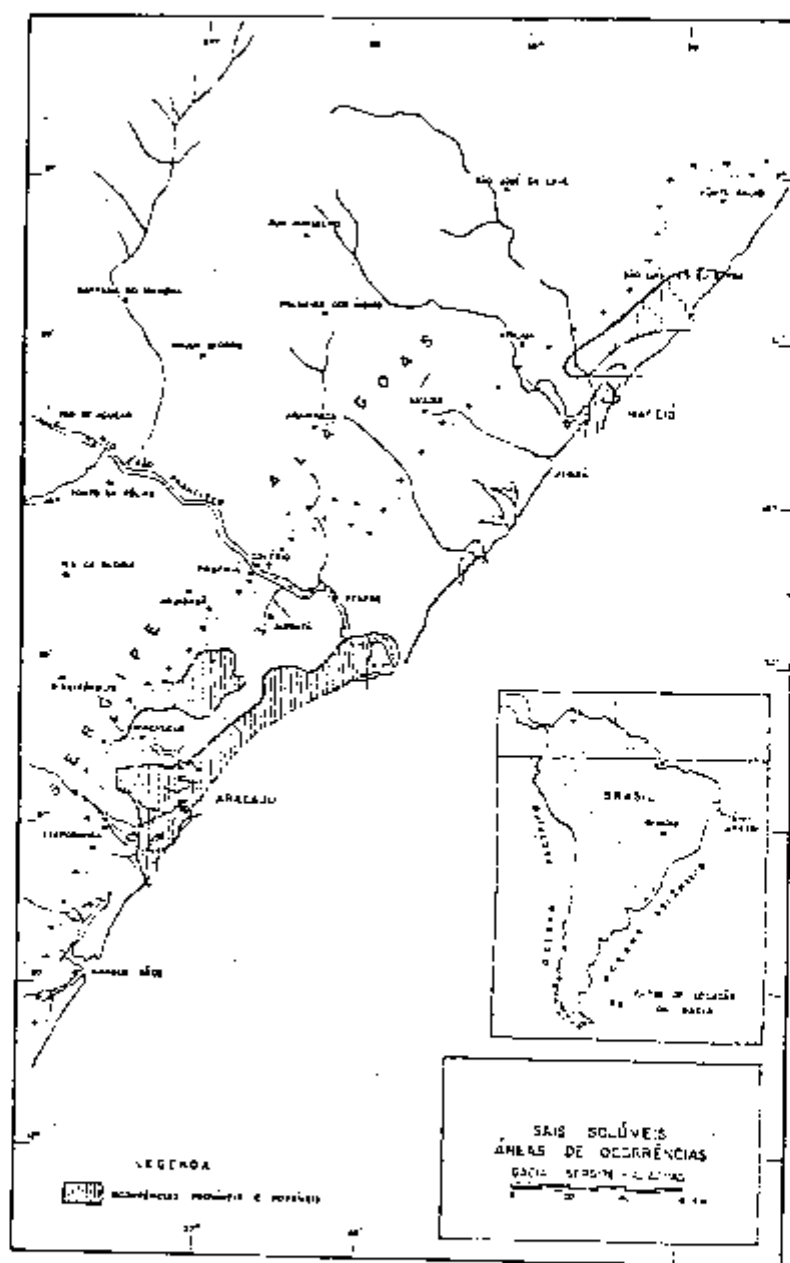


FIGURA 4.2. - MAPA DAS OCORRÊNCIAS DO SAL GEMA NA BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS / 93 /

4.1.1.1 - Geomorfologia e hidrografia

A unidade morfológica que domina na região são os chamados tabuleiros terciários que se desenvolvem sobre os sedimentos da Formação Barreiras e formam uma superfície que vai de poucos metros e ultrapassa os 100 metros a partir da costa para o interior.

Os tabuleiros acham-se em vias de disseção por um ciclo erosivo estabelecido no Quaternário e em franco desenvolvimento, em que a erosão linear predomina, resultando daí os vales em "V" esculpido pela rede hidrográfica assim estabelecida / 21 /.

A rede hidrográfica na região é mais intensa na área correspondente ao Estado de Sergipe. Nesta área o padrão de drenagem vai de dendrítico a subdendrítico. Destacam-se os rios Vaza-Barris, São Francisco e Sergipe.

4.1.1.2 - Demografia e acesso

Dois grandes centros urbanos destacam-se nas áreas de ocorrências de sal gema, as cidades de Aracaju e Maceió, que interligadas constituem uma faixa litorânea com densidade superior a 50 hab/Km².

Além dessas, cidades menores podem ser observadas na região, como São Luiz do Quitunde, Japarutuba, Siriri e Carmópolis que apresentam uma população variável de 5.000 a 20.000 habitantes.

A principal rodovia que passa pela região é BR-101. Das ferrovias, aparecem a Rede Nordeste e a Rede Baiana.

4.1.1.3 - Geologia

a) Discussão estratigráfica

Em Sergipe, a seção de evaporitos, localizada num intervalo estratigráfico perfeitamente definido, portadora de características litológicas bem típicas, compõe uma unidade litológica mapeável, que foi individualizada como Membro Ibura pertencente à Formação Muribeca. Por outro lado, a ocorrência de Alagoas, por seu caráter isolado, é informalmente denominada "camadas de evaporitos Pari-

puera" pertencendo ao Membro Maceió, que constitui a porção inferior da Formação Muribeca.

A Figura 4.3 mostra a coluna estratigráfica da Bacia de Sergipe-Alagoas.

b) Discussão litológica

Geralmente o sal não está depositado em leito contínuo e homogêneo. Rochas clásticas, principalmente folhelhos orgânicos, vem intercaladas, em quantidades variáveis. O sal apresenta-se em leitões espessos, e mais raramente, sob a forma de finas intercalações com o folhelho. Muitas vezes, impurezas argilosas ou orgânicas escurecem bastante o sal gema.

Das ocorrências em Sergipe, a mais bem estudada litologicamente é a de Carmópolis-Sirizinho-Taquari-Vassouras-Sta Rosa de Lima. Em face do grande interesse econômico da jazida, em 1965 se procedeu a uma testemunhagem contínua de quase todo o intervalo de sais solúveis como mostra a Figura 4.4, efetuadas pelo Prof. Sylvio Fróes, no Instituto Nacional de Tecnologia. A análise das amostras permitiu estabelecer três zonas distintas no intervalo de sal de 523 a 603,5 metros na base abrindo a seqüência evaporítica, uma zona de sal gema de elevada pureza, com finas intercalações de folhelho, e traços de sais avermelhados na espessura de 22 metros; em continuação, uma zona de sais vermelhos contendo quantidades variáveis de carnalita, com algumas intercalações de folhelho, zona esta de carnalita que tem a espessura total de 31,5 metros; finalmente no topo do intervalo analisado foi identificada uma zona de sais vermelhos magnesianos sem potássio, associados também com sal gema, com intercalações de folhelho pútrido, na espessura de 21 metros. As características da seqüência evaporítica completa do poço analisado é considerada mais ou menos típica para a área de Carmópolis.

Ponderados estes fatos, pode-se formular algumas generalizações sobre a seqüência evaporítica na área de Carmópolis. Na base ocorrem geralmente raros e finos leitões de calcários que deverão marcar o início da deposição evaporítica. Depois se acha a zona de sais, que poderá compreender vários ciclos, cuja seqüência é: sal gema, sal gema com carnalita (sais radioativos) e sal gema com sais magnesianos terminando com silvita e halita. Por fim encerrando a seqüência evaporítica, com intercalações de folhelhos orgânicos que, em maior, ou menor quantidade estão presentes em todo o intervalo descrito.

ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DOS SAIS DE POTÁSSIO

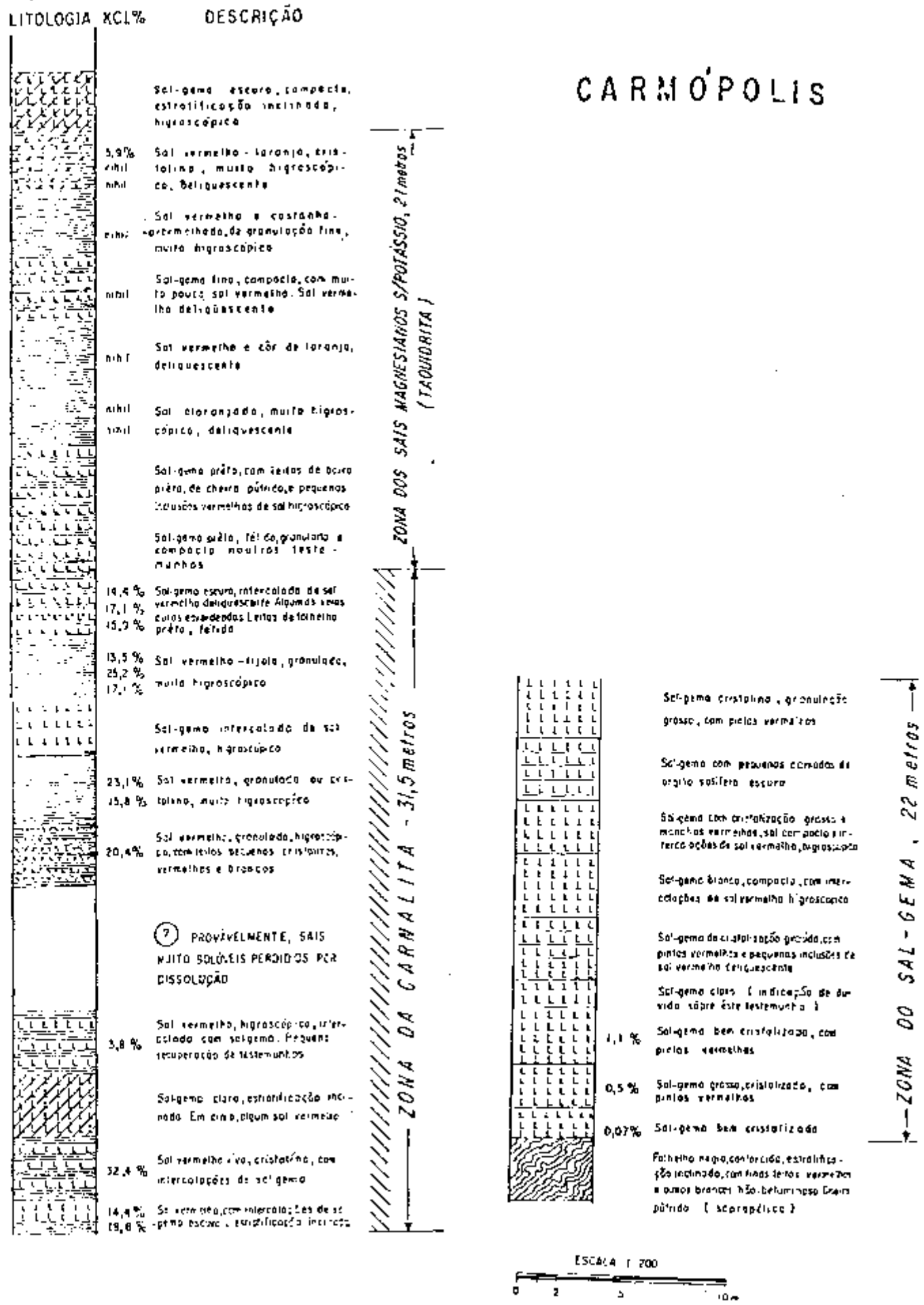


FIGURA 4.4. - ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DOS SAIS DE POTÁSSIO EM CARMÓPOLIS

De modo geral, a deposição evaporítica tem início com os sais solúveis e termina com a zona de sais insolúveis gipsita/anidrita, calcários e dolomitos.

Em Alagoas, dos poços perfurados pelo C.N.P., foram encontrados cerca de 80 metros de sal gema de alta pureza. A firma Sal Gema do Nordeste durante as perfurações em Campo de Tabuleiros dos Martins descobriu sal gema com espessura da ordem de 100 metros / 93 /.

c) Áreas de ocorrências

Os depósitos de sal em Sergipe estão distribuídos por cerca de 2.000 Km², em subsuperfície, com duas áreas principais de ocorrência: a primeira perlonga a faixa costeira desde as vizinhanças da embocadura do rio Vaza-Barris até a foz do rio São Francisco; a outra desenvolve-se ao norte da linha que passa pela cidade de Carmópolis a Divina Pastora. Ainda não há informação sobre a ocorrência em superfície. A área situada na borda norte do Baixo de Japarutuba, na faixa de contato entre a Formação Riachuelo e os sedimentos pré-Aptianos, do sul da cidade de Japoatã até Siriri, é a que maiores probabilidades contém da presença de afloramentos do intervalo equivalente à zona salífera.

Em Alagoas foram encontrados leitos de sal em três zonas aparentemente isoladas: em Pontal de Cururipa, na região de Maceió e na área que vai do Aeroporto dos Palmares em direção a Barra de Santo Antônio. Avalia-se em perto de mil Km² a extensão dessas ocorrências, restritas à subsuperfície.

A Figura 4.5 mostra as áreas de sal.

d) Possanças e reservas totais

Na Figura 4.5 está o mapa de isópacas dos sais solúveis totais na faixa terrestre da Bacia Sergipe-Alagoas. Foi preparado a partir das espessuras efetivas de sal atravessadas pelos poços e interpretado de acordo com os atuais conhecimentos estruturais e estratigráficos sobre a bacia. O mapa da Figura 4.4 mostra a percentagem efetiva de sais solúveis do intervalo total com sal, a qual denota a percentagem de intercalações de rochas clásticas.

As maiores espessuras efetivas de sal conhecidas na bacia foram atravessadas nos baixos regionais, bem delineados pelos mapas Bouguer: da ordem de 400 metros no Baixo de Taquari, de 100 a 300 metros nos Baixos de Mosqueiro, de Japarutuba (Carmópolis) e de Siriri (em Sergipe); e de 150 metros no Baixo de Pari-

pueira (em Alagoas). Ressalve-se que não são espessuras contínuas, e sim com intercalações de rochas clásticas. Em Sergipe, os sais solúveis ocupam, em média de 80% do intervalo, ao passo que em Alagoas se apresentam bem mais dispersos na coluna, com clásticos finos intercalados.

A ocorrência de Carmópolis contém a mais rica reserva potencial de sal solúvel da bacia. Situada no flanco sudeste do Baixo de Japarutuba, ainda não está inteiramente delimitada, e é muito provável que se prolongue para o norte, em toda a extensão do Baixo.

Em Taquari, a espessura efetiva do sal parece ter seus 400 metros, podendo vir a ser registradas espessuras ainda maiores. Além da presença provada de potássio, esta ocorrência, com a profundidade média de 450 metros, é a mais próxima à superfície. São possíveis profundidades menores na área de Vassouras, Sta Rosa de Lima e Treme. A reserva inferida de sais solúveis atinge 20 bilhões de toneladas. A porcentagem efetiva de sal (Figura 4.4) no intervalo salífero varia de 60 a 90%, com os valores mais altos anotados na parte oeste do depósito, onde as intercalações de folhelho são menos frequentes.

Na Tabela 4.1 (anexa à Figura 4.5) estão assinaladas as reservas geológicas ou inferidas de sais solúveis totais na faixa terrestre da bacia, distribuídas pelas diversas áreas de ocorrência que se vêem no mapa da Figura 4.5 o qual é uma interpretação generalizada dos contornos estruturais no topo da primeira indicação de sal.

4.1.1.4 - Estrutura tectônica e sismicidade

A tectônica salífera afetou os sedimentos das Formações (superiores à Formação Muribeca) Riachuelo, Cotinguiba e Piacabuçu, com maior ou menor intensidade, dependendo da magnitude ascensional do sal. Não se constituíram domos perfurantes, formando-se apenas estruturas arredondadas ou alongadas. Desenvolveram-se numerosas falhas de crescimento contemporâneo associadas à tectônica salífera, as quais, entretanto, não afetam os estratos pré-Muribeca.

Regionalmente, na bacia, além do sistema principal de falhas com direção nordeste existem mais 2 sistemas com direção Noroeste e Norte.

A Figura 4.6 mostra o mapa estrutural da Bacia Sergipe-Alagoas.

TABELA 4.1. - RESERVAS GEOLÓGICAS DE SAL
BACIA DE SERGIPE/ALAGOAS / 93 /

(* ver FIGURA 4.5)

ÁREA	LOCALIZAÇÃO *	ESPESSURA EFETIVA MÁX. M	PROFUNDI- DADE TÓPO, M	RESERVA EM BILHÕES DE TONELADAS
SERGIPE				
A	Baixo de Japaratinga (incl. Carnópolis)	275	400-1000	35
B	Baixo de Divina Pastora	230	500	5
C	Faixa Costeira (Socorro-Aracaju- Pirambu)	100	1000-1500	10
D	Baixo de Mosqueiro	250	1500-2500	5
E	Baixo de Japaratinga (parte costei- ra-ilha das Flores)	100	1500-2400	5
ALAGOAS				
F	Baixo de Maceió	80?	900-1200	0,5
G	Baixo de Paripueira	250	1000-1500	20
Total:				80,5 bilhões de toneladas

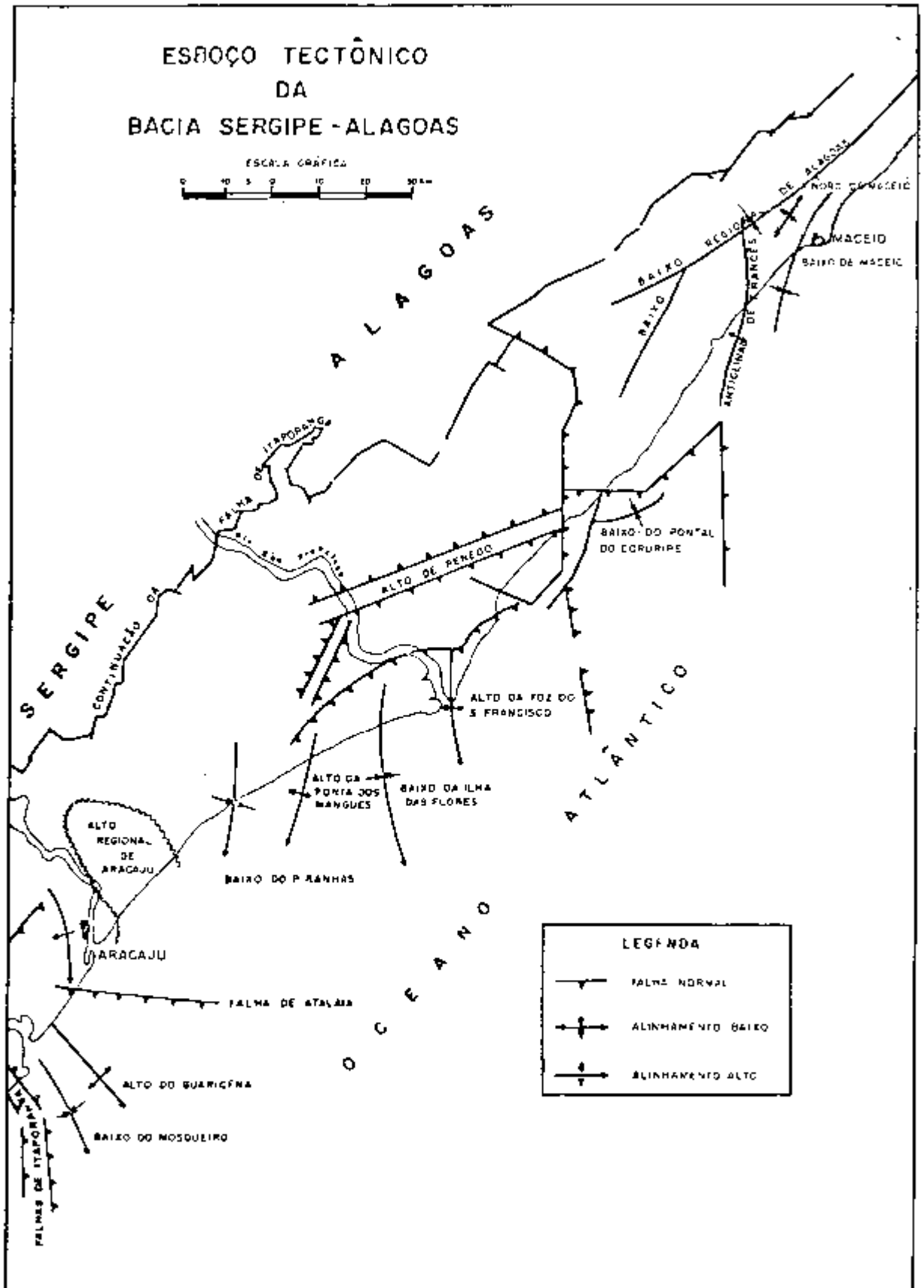


FIGURA 4.6. - MAPA ESTRUTURAL DA BACIA SERGIPE-ALAGOAS / 21 /

4.1.1.5 - Hidrogeologia

Podem ser distinguidas na região três sub-províncias hidrogeológicas: a sub-província da Bacia Sergipe-Alagoas, e a sub-província dos depósitos Cenozóicos / 21 /.

Na espessa sequência de sedimentos que compõe a sub-província da Bacia Sergipe-Alagoas considera-se como parte integrante da mesma o pacote de arenitos, siltitos e argilas variegadas constituinte do grupo de Barreiras, uma vez que este grupo forma com o Membro Marituba da Formação Piacabuçu um sistema aquífero onde o potencial de água subterrânea é o mais elevado da região. A litologia predominante pelítica (folhelhos, argilitos, siltitos) e química (calcários e evaporitos) torna a sequência restante, sotopostos a Marituba, de baixa potencialidade de água.

A sub-província dos depósitos Cenozóicos tem por arcabouço os sedimentos do grupo de Barreiras e os depósitos quaternários formados por aluviões, dunas, recifes e mangues. Em um e outro caso as ocorrências do Grupo Barreiras formam com os depósitos flúviomarinhas constituintes das planícies aluviais, um sistema aquífero.

4.1.1.6 - Recursos minerais

O sal gema da Bacia de Sergipe-Alagoas é explorado, atualmente, na porção situada no Estado de Alagoas com a implantação, na região de Maceió, do projeto da SAL GEMA - Indústria Química S/A que utiliza o sal gema na produção de soda cáustica, cloro e de dicloroetano. Como o sal gema localiza-se a grande profundidade, para a sua extração é utilizado o método da diluição, mediante a injeção de água nas minas, por um sistema de tubulações, através do qual desce a água e retorna à superfície a salmoura / 17 /.

Em 1984, deverá estar concluído o complexo de Taquari-Vassouras, em Sergipe, onde haverá mineração profunda, sob a responsabilidade da Petromisa, para a extração dos sais de potássio (silvita). A mina disporá de dois "shafts" (poços de mina) de cinco metros de diâmetro com profundidade média de 500 metros

e de uma rede dupla de galerias de desenvolvimento e exploração, uma para o transporte do minério e a outra para a circulação de ar e de veículos, a estender-se por 25 Km / 75 /.

Atualmente, os principais campos de petróleo, nessa bacia, são: Carmópolis, Sirizinho, Riachuelo, Caioba, São Miguel dos Campos e Guaricema / 14 /.

4.1.2 - Bacia do Recôncavo

Desde longo tempo conhecem-se afloramentos sedimentares do Membro Aliança Inferior contendo leitos de evaporitos, principalmente anidrita. A presença destes evaporitos faz supor a ocorrência de condições favoráveis para precipitação de sais solúveis durante a deposição do Aliança Inferior.

Vários poços perfurados no Recôncavo, que atravessaram o Membro Aliança Inferior nela encontraram camadas de evaporitos (gipsita e anidrita). No sudoeste do Recôncavo, alguns poços penetraram possíveis camadas de sal gema de notável espessura (cerca de 60 metros ou mais). Estas ocorrências de sal gema confirmaram as possibilidades levantadas há muito pela geologia de subsuperfície. Tudo indica que a área de ocorrência pode estar restrita a sudoeste da Bacia do Recôncavo.

4.1.2.1 - Geomorfologia e hidrografia

Os tipos de relevo encontrados na região são:

a) Relevos suaves, a leste da folha de Maragogipe, com elevações máximas em torno de 30 a 45 metros e médias de 5 a 15 metros.

b) Áreas muito baixas, em regra alagadiças, junto à costa do continente; geralmente recobertas de espessas camadas de solo e sujeitas a recobrimento de águas salgadas nas marés altas.

A área é recortada de pequenos rios e riachos que fluem no sentido geral oeste-leste e, na maioria desembocam diretamente na Bahia de Todos os Santos ou no Oceano Atlântico. O mais caudaloso é o Jaguaribe, que banha a cidade de Nazaré e tem apenas 30 quilômetros de extensão.

4.1.2.2 - Demografia e acesso

Na área de ocorrência de sal gema destacam-se como maiores centros urbanos, as cidades de Jiribatuba e de Nazarê em cuja vizinhança ocorre uma densidade de aproximadamente 104 hab/Km².

A principal rodovia próxima a essa região é a BR-101. Quanto à ferrovia destaca-se a Rede Baiana.

4.1.2.3 - Geologia

A ocorrência de sal gema está contida no Membro Inferior da Formação Aliança que pertence a Bacia do Recôncavo. A Figura 4.7 ilustra a posição estatigráfica desta formação na Bacia.

A Formação Aliança, a única do Recôncavo de prometer um conteúdo de apreciáveis depósitos de sais solúveis, demanda estudo mais detalhado que permita determinar a natureza e as condições geológicas da posição do sal gema nela contido. Os sedimentos Aliança depositaram-se em condições muito diversas das demais formações cretáceas do Recôncavo. Seus afloramentos cobrem o embasamento cristalino ao oeste e ao sul das áreas em consideração. No sul da Bacia Cretácea do Recôncavo, parecem estender-se apenas até a localidade de Maraú, estando ausentes da Bacia Almada (Ilhéus). Por outro lado, diferentes dados geológicos vêm confirmando que, muito provavelmente, a bacia de deposição da Formação Aliança (e outras formações cretáceas do Recôncavo) se prolongaria até a África antes da migração daquele continente, o qual, segundo fartos indícios, estaria associado ao continente sul-americano até o fim do Cretáceo Inferior. Para que ocorresse de posição de sal solúvel, deve-se aceitar que esta formação, no sul do Recôncavo, se depositou em área fechada, isolada do mar e sujeita a evaporação relativamente intensa por longo tempo geológico.

A Figura 4.8 mostra a seção geológica NW-SE com possíveis ocorrências de sal gema.

Segundo estudos da Petrobrás (c.f. Leite / ⁶¹ /) as dimensões inferidas do sal gema são as seguintes:

- a) Possível extensão dos depósitos de sal gema.

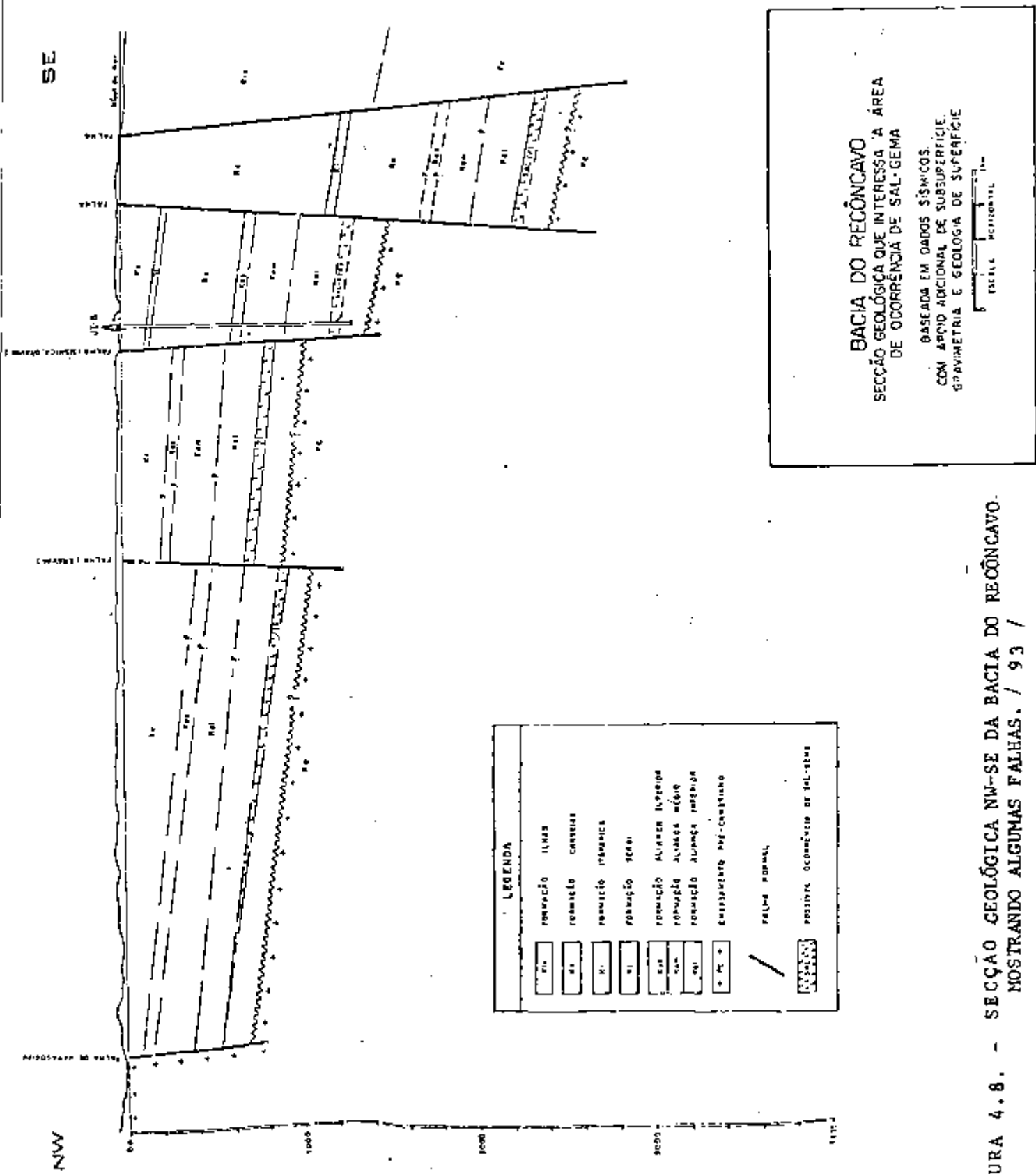


FIGURA 4.8. - SEÇÃO GEOLÓGICA NW-SE DA BACIA DO RECÔNCAVO. MOSTRANDO ALGUMAS FALHAS. / 93 /

Apesar de muito escassos os conhecimentos geológicos para avaliar-se a extensão dos depósitos economicamente exploráveis, até a profundidade 1.000 metros, pode-se reunir essas possibilidades à área situada a oeste de Jiribatuba - Ilha de Matarandiba, incluindo a Ilha de Carapeba, e correspondente a um horst (segundo dados gravimétricos) com cerca de 100 Km^2 : 5 quilômetros na direção E-W por 20 quilômetros na direção N-S.

b) Espessura inferida do sal gema

Um dos poços perfurados pela Petrobrás atravessou uma provável camada de sal de 66 metros, um outro poço penetrou 36 metros de sal, mas aí foi interrompido, sem ter travessado a possível camada de sal gema. Atribuiu-se uma espessura média de 50 metros de sal gema explorável.

c) Cubagem inferida

Os dados supra e numerados autoriza a prever na área o volume possível de sal gema explorável: $20.000 \text{ m} \times 5.000 \text{ m} \times 50 \text{ m} = 5 \times 10^9 \text{ m}^3$.

Em tonelagem, considerando-se igual a 2,2 a densidade do sal gema:

$$5 \times 10^9 \times 2,2 = 11 \times 10^9$$

d) Reserva inferida

Aceitando-se a porcentagem de recuperação de 70% (limite máximo) na hipótese de mineração econômica por galeria, a profundidade média da ocorrência (1.000 metros) tem-se a reserva inferida:

$$11 \times 10^9 \times 0,7 = 7,7 \times 10^9 \quad \text{ton.}$$

Por outro lado, com a mineração por poços (obtenção de salmoura mediante simples dissolução do sal gema no sub-solo, por injeção de água) determinaria a reserva inferida de :

$$11 \times 10^9 \times 0,3 = 3,3 \times 10^9 \quad \text{ton.}$$

O grau de certeza da estimativa depende da extensão da área em que se supõe a continuidade da ocorrência, e do método tecnológico da mineração, o qual, se aperfeiçoado, poderá elevar o fator de recuperação.

4.1.2.4 - Estrutura tectônica e sismicidade

Regionalmente, a Bacia do Recôncavo de origem puramente tensional, comprimidos num "graben", apresenta duas falhas principais limitantes da bacia e que configuram os bordos E e W da mesma. A principal falha localizada na margem oriental é a conhecida falha de Salvador. Possui um rejeito superior a 4.000 metros e com uma direção geral NE-SW.

A principal estrutura ocidental é a chamada falha de Maragogipe (Figura 4.8) com rejeito bem mais modesto e da ordem de 400 m. Sua direção é predominante N-S com variações para SW, especialmente na parte meridional.

Dois outros sistemas de falhas menores predomina na bacia; as de direção NE e NW. Um grande número de falhamentos de superfícies, especialmente as de direção NE, foram mapeadas pela Petrobrás, ao longo da borda norte da baía de Todos os Santos e margem ocidental e oriental da Bacia.

Merecem destaques as falhas de Candeias e São João, com rejeitos de até 1.000 m e 450 m respectivamente.

Os abalos sísmicos na região foram observados em 1724, 1769 e 1912 nas cidades de Salvador, Itaparica e Jequiçá⁴². Estabilidades das falhas do sistema da falha de Salvador e do seu prolongamento na falha de cisalhamento Itaju do Colônia-Itabuna deve ser apontado como causa dos tremores.

4.1.2.5 - Hidrogeologia

A complexidade estrutural da Bacia sedimentar do Recôncavo, especialmente o grande número de falhamentos, dificulta em muito o estudo hidrogeológico da região. Os diversos grupos e formações pelo fato de possuírem características litológicas próprias, constituem um sistema hidrodinâmico onde aparecem diversos aquíferos superpostos, nos quais podemos citar as Formações : Sergi, Ilhas, São Sebastião, Marizal e Grupo Barreiras, segundo a sequência estratigráfica da mais velha para a mais nova. Dentre elas as mais importantes, são as Formações Mari-

zal e São Sebastião que apresentam diversos poços surgentes. Localmente pode ocorrer água salgada em profundidade, indicando condições de circulação.

4.1.2.6 - Recursos minerais

As informações de sal gema resultaram numa única ocorrência indiretamente cadastrada, no Município de Vera Cruz, em virtude do caráter sub-superficial dos evaporitos encaixados em rochas da Formação Aliança / 16 /.

O Projeto Cadastramento de Ocorrências Minerais do Estado da Bahia / 16 / faz menção à existência de um volume de sal gema suficiente para atender ao consumo do complexo industrial em instalação pela Dow Química do Brasil.

Os principais campos de petróleo em produção no Recôncavo são: Água Grande, Buracica, Taquípe, Dom João, Candeias, Miranga e Araçás / 14 /. A produção de gás natural no Recôncavo provém, principalmente, de: Água Grande, Candeias, Taquípe, Araçás e Miranga / 7 /.

4.2 - Rochas graníticas

Uma das mais destacadas feições das Regiões de Dobramentos Nordeste e Sudeste é dada pela grande distribuição areal, pelo número e tipos de seus corpos granitóides. Este fato chamou, há longa data, a atenção dos mais diversos pesquisadores, não só em função de sua problemática geológica, estrutural, petrográfica e petrológica (genética), mas também devido aos recursos minerais que frequentemente a eles se associam, constituindo várias províncias metalogenéticas mais ou menos definidas.

4.2.1 - Região de Dobramentos Nordeste

A Região de Dobramentos Nordeste, descrita anteriormente sob o nome Caririana e Sergipana / 3 /, apresenta uma série de faixas de dobramentos e maciços medianos como mostra a Figura 4.9.

Nos 420.000 Km² de extensão da região onde predominam exposições de ro-

REGIÃO DE DOBRAMENTOS NORDESTE

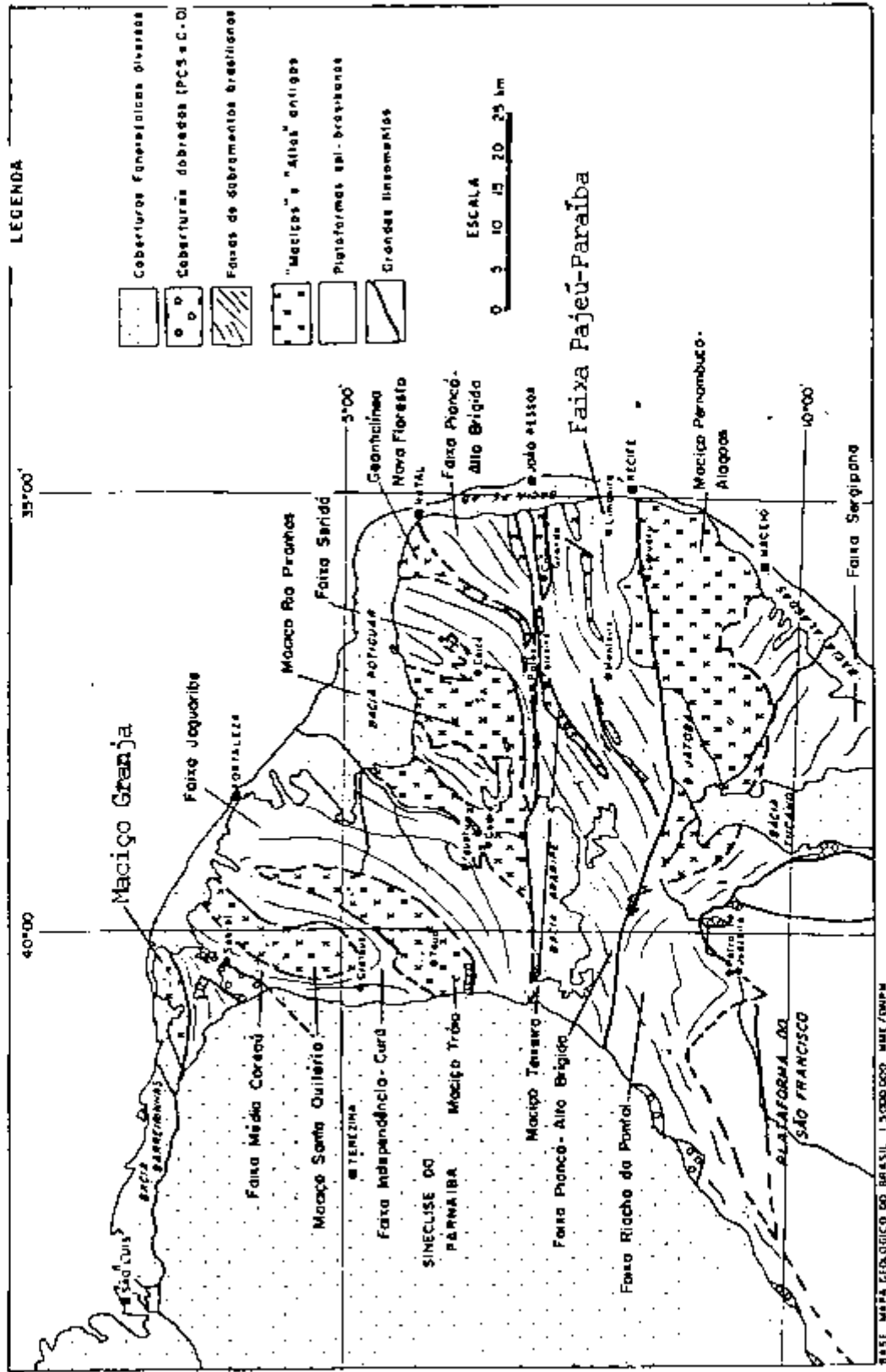


FIGURA 4.9. - OS MACIÇOS MEDIANO E AS FAIXAS DE DOBRAMENTOS DA REGIÃO DE DOBRAMENTOS NORDESTE / 23 /

chas cristalinas, há um considerável acervo, em número, forma, dimensões e tipologias de corpos graníticos

4.2.1.1 - Geomorfologia e hidrografia

O relevo das rochas cristalinas na Região de Dobramentos Nordeste varia de 200 a 800 metros podendo ser subdividido em vários elementos. A maior parte da região possui um relevo pouco ondulado ou quase plano. Nesta superfície encontram-se embutidos os vales fluviais, geralmente abertos, que possuem vários níveis de terraços, e sobre ela erguem-se serras e chapadas.

Na região, a maior parte das bacias hidrográficas é formada por cursos temporários, que deixam de correr na estação seca. No entanto, no período chuvoso, o regime desses rios é torrencial, com cheias violentas. O principal rio perene é o São Francisco que desce de terras mais úmidas do sul.

4.2.1.2 - Demografia e acesso

A Região de Dobramentos Nordeste é constituída por áreas desiguais quanto à densidade demográfica, sendo que na porção oriental concentram-se a maioria da população. A densidade média varia de 10 a 50 hab/km², encontrando-se regiões densamente habitada como nos municípios de Itabaiana, Propriá, Patos, Caruaru e Arcoverde com densidade demográfica superior a 100 hab/km². A população rural se adensa, principalmente próximo aos cursos d'água, embora temporários, permanecendo vazios os interflúvios.

A região está suprida por um bom contingente de rodovias destacando-se entre elas as BR-116, BR-230 e BR-232. Quanto as ferrovias aparece a Rede Nordeste tina.

4.2.1.3 - Geologia

Os principais corpos graníticos que se distribuem pela região são / 25 /

1) Corpos graníticos nas Plataformas

A presença de corpos graníticos pré-Brasileiros é intensiva e extensiva na parte norte da plataforma do São Francisco, pouco ao sul, do rio topônimo. Destacam-se os grandes batólitos sincinemáticos, de composição predominantemente granodiorítica a tonalítica de Campo Formoso, Niquaçu, Cansanção - Sta Luz e quartzo monzonítica de Carrapichel e Tapiranga.

2) Corpos graníticos nas Faixas de Dobramentos

Alguns corpos graníticos isolados nas faixas de dobramentos, com atributos pré-tectônicos, mas sensivelmente atingidos pelos eventos brasileiros, são apontados por alguns autores. Entre eles, os corpos graníticos de Ipueiras e Serra Negra, em Caicó, alguns corpos, ao sul do Araripe, em Boa Vista e Taperoá, Pb.

3) Granodioritos e Tonalitos Conceição

Tratam-se de corpos graníticos de formas aproximadamente ovóides e sub-circulares, com diâmetro maior na ordem dos 5 aos 40 km, em geral, posicionados nos flancos das principais linhas axiais de dobramento e em paralelismo com elas. Ocasionalmente, ocorrem ao longo dessas linhas axiais e dentro das faixas de dobramento.

Seus contatos são usualmente bem marcados, discordantes a subdiscordantes com as encaixantes, desenvolvendo inclusive auréolas de metamorfismo de contato, com minerais típicos, como ocorre na localidade típica, em Conceição na Pb, na Serra da Englabelada, no Congo, Pb.

O número destas ocorrências, já devidamente caracterizadas e individualizadas no mapeamento regional, é em torno de 30 unidades em toda a região.

A composição destas rochas, é variável desde quartzo-dioritos até quartzo-monzonitos, médios a grosseiros, leuco a mesocráticos, em geral.

Os principais representantes destes tipos são os corpos de:

a) Afogados de Ingazeira, Itapetim, Serra do Silva, Caboclo, em Pernambuco e muitos outros menores.

b) Englabelada (Congo), Sumé, Conceição, Emas, São José do Bonfim e Condado na Paraíba.

c) São José de Espinhara ,Serra Negra do Norte, Floranea, Laginha e Jucurutu, no Rio Grande do Norte.

4) Granitos e Granitóides tipos Itaporanga

Nesta tipologia incluem-se as mais significativas ocorrências de rochas graníticas da região, em número, extensão e variedades petrográficas.

Formas subovóides, subcirculares e irregulares são encontradas, com diâmetro maior desde alguns poucos quilômetros até mesmo de uma centena de quilômetros (São Miguel, Teixeira). O número é expressivamente grande, sendo de 10 a 15 por unidade geotectônica, estando mapeados cerca de uns oitenta corpos em toda a região.

A distribuição destas rochas é irregular, com intensificações locais. Há uma maior afinidade das ocorrências com os altos tectônicos (maciços médios). Nas faixas de dobramentos ocorrem com maior frequência, sem serem exclusivos, nas zonas axiais do dobramento.

A textura é comumente anisotropa, com sinais de orientação e os contatos gradam, até em escala de afloramento, com rochas migmatíticas. A matriz dessas rochas é bastante variável, podendo ser granítica ou não, sendo usualmente granodiorítica e em alguns casos quartzo-diorítica e diorítica (Pocinhos); sendo apenas em composição global uma rocha granítica.

Variações tipológicas dos granitos e granitóides Itaporanga.

Alguns tipos serão citados, sendo que alguns são nomeados apenas informalmente até que um mapeamento geológico regional completo seja feito²⁵ /.

a) Granitos finos a médios, equigranulares, de composição granítica (tipo Serra da Pindoba, RN), adamelítica e granodiorítica (Jatuda, Pe), eventualmente bastante claros (Jutai, Pe).

b) Granitos gnaissificados, com foliação bem desenvolvida (tipo Serra das Pinturas, RN), e granitos finos bem orientados, caracterizados por uma riqueza excepcional em quartzo (até 50% da rocha).

c) Granitóides porfiróides de composição monzonítica e sienítica (tipos Toritama, Pe; Surubim, Pe e Chaval, Ce).

d) Corpos graníticos de pequeno e médio porte, em geral, de composição granodiorítica, como aqueles reconhecidos ao norte de Floraneia, RN e nas imediações de Caicó, por Ebert / 32 /.

5) Granitos finos tipo Itapetim

São corpos graníticos de fina textura, que ocorrem sob a forma de diques cortando as sequências metamórficas dobradas e as graníticas sincinemáticas. Mais restritamente são encontrados sob a forma de pequenos stocks desenvolvendo metamorfismo de contato periférico.

A composição predominante é granítica, semelhante a global do Itaporanga, subalcalina, sendo biotida o máfico presente.

A presença de stocks graníticos, finos, róseos dessa natureza tem sido esparsamente registrados, como em Bodó, Acauã, no Rio Grande do Norte e nas imediações da Pedra Lavrada e Picuí, com os quais se tem vinculado mineralizações scheelitíferas.

6) Granitos associadas aos lineamentos

a) Tipo Catingueira - são rochas graníticas peralcalinas, quartzo-sienitos e mesmo sienitos, em forma de filões e diques de diferentes dimensões, introduzidas nos lineamentos e falhas associadas da Paraíba e Cariris Velhos, na região Centro-ocidental da Paraíba, de Engenheiros Ávidos a Patos. Tratam-se de rochas claras, bastante ricas em microclina, com anfibólios e piroxênios, sódicos e pobres em quartzo.

b) Tipo Moderna - Na região central de lineamento Pernambuco, continuando pela zona cizalhada de falha transcorrente de Congo, Pb, ocorre uma série de pequenos e médios maciços estratóides deformados, com composição granodiorítica e monzonítica.

7) Granitos e Granodioritos Intrusivos

a) Sul e sudeste do Araripe (Tipo Serrita) - Inseridos numa ampla faixa de xistos verdes, referidos ao Grupo Cachoeirinha, ocorre cerca de duas dúzias de bossas circulares, com diâmetros médios da ordem inferior a 10 quilômetros, arrançadas nas direções Ne e E-W. A composição destes corpos é bastante variável

e insuficientemente descrita. São granitos cinzentos, granitos róseos com tendências a tonalito, granodioritos, com textura média a grosseira, raramente porfirítica. A presença de máficos é variável, biotida e hornblenda, em tipo e intensidade.

b) Norte da Faixa Sergipana (Tipo Itabi) - Desde a Bahia, ao sul de Mucururê até Propriá em Sergipe, a Faixa de Dobramentos Sergipana é prolongada por uma série de exposições alinhadas de rochas granodioríticas, de formas irregulares, bastante consistentes em aparência e composição. São biotita-granodioritos róseos claros, de grãos médios, algo muscovíticos. A lineação é fraca e a inclusão de xenólitos é frequente.

8) Stock de Meruoca e Mocambo

Estes stocks localizam-se e alinham-se marginalmente a oeste do lineamento Sobral-Pedro II. São rochas graníticas róseas, grosseiras, com pórfiros apresentando fácies ricas em ortoclásio e quartzo, com oligoclásio subordinado e também fácies de granitos monzoníticos. O batólito Meruoca tem uma área de aproximadamente 400 km² enquanto que o batólito Mocambo, cerca de 180 km². Pouco a leste de Sobral, na Serra da Barriga, ainda de um sistema de falhas paralelas ao lineamento principal da região, ocorre um pequeno batólito circular (mais ou menos 6 quilômetros de diâmetro) de biotita-granito grosseiro.

9) Rochas graníticas filoneanas e outras

A ocorrência de corpos graníticos estratóides e filoneanos do Nordeste ainda está em fase incipiente de catalogação das ocorrências mais conspícuas, com raras observações estruturais e petrográficas. Em geral, estas rochas aparecem apenas nas legendas dos mapas, quando o fazem, sob a designação de diques ácidos e básicos.

Abaixo, estão relacionados as ocorrências mais significativas do Nordeste, em posse e concentração:

a) Região de Arcoverde, Pe - Diversos tipos de granitóides filoneanos e estratóides foram mapeados por Santos / 82 / na região de Arcoverde-Sertania, em Pernambuco. São microgranitóides ricos em biotita e biotita-hornblenda-granitóides grosseiros.

b) Monteiro-Sumê-Congo (Alto Paraíba) - Nesta região do Alto Paraíba, destacam-se um autêntico enxame de diques ácidos, orientados N30°W, em sua maioria, e cortando discordantemente as rochas pré-existentes. Tratam-se de riólitos e granitos monzoníticos finos.

c) São João do Cariri - Cabaceiras, Pb. - Na região a noroeste de Cabaceiras, Caldasso / 28 / mapeou cerca de 10 corpos filonéanos, irregulares em forma e dimensão. São granitos róseos, equigranulares finos e médios, não tectonizados.

10) Granito anarogênico de Cabo, Pe.

O granito do Cabo de Santo Agostinho, Pe, constitui em pequeno stock de cerca de 5 km², distante 20 km ao sul de Recife. Fica pouco ao sul do lineamento Pernambuco. Trata-se de um granito alcalino, rico em ortoclásio, quartzo e plagioclásio albitico, com fluorita como principal acessório.

4.2.1.4 - Estrutura tectônica e sismicidade

A Região de Dobramentos Nordeste apresenta uma estrutura bastante complexa, consequência de uma forte tectônica de compressão, que atuou sobre a mesma, resultando nos dobramentos em anticlinais e sinclinais e nas deformações rúturais-fraturas, fendas e falhas.

Estes falhamentos têm sido designados de forma diversa, e que Brito Neves / 24 / procurou distinguir em dois grupos, os lineamentos e as falhas profundas, estas, em geral subordinadas aqueles. Kegel / 55 / define lineamento como sendo uma zona de estrutura tectônica especial, bem prolongada, estendendo-se por vezes através de continentes inteiros, porém de largura relativamente estreita comparada com a extensão.

Os lineamentos mais importantes na região são os de Pernambuco e de Patos, com direção aproximadamente E-W e o lineamento de Sobral-Pedro II, no noroeste do Ceará, com direção NE-SW. Subordinados aos lineamentos, ocorrem os sistemas de falhas situados dentro do contexto das faixas de dobramento, com características gerais similares aos do lineamentos, mas em proporções relativamente menores.

O grande lineamento de Pernambuco passa pela Serra das Russas e pela

zona das cidades de Caruaru, Pesqueira, Arcoverde e Floresta e, ao que parece, se estende até a região de Paulistânia, (Estado do Piauí), está caracterizando-se por estruturas muito complicadas e confusas / ⁹ /. Ao sul do lineamento, todas as estruturas do embasamento apresentam-se muito complicadas. Até em Sergipe e na Bahia setentrional, as estruturas gerais procedentes do sul, mantêm um comportamento relativamente simples e homogêneo, caracterizado pela predominância de direções S-N. Nas proximidades do lineamento, estas estruturas complicam-se intensamente, com a tendência de passar para direções SW-NE e W-E. Além disso, ocorrem diversas linhas, moderadamente prolongadas, de direção SW-NE.

O lineamento da Paraíba passa da região de João Pessoa pela região de Patos e de Caririáçu. Ao norte desse lineamento, as estruturas do cristalino apresentam flexões passando da direção W-E, logo ao norte da linha, para SW-NE e finalmente para S-N, no Rio Grande do Norte.

O lineamento Sobral-Pedro II, de direção NE-SW, a NNE-SSW, delimita o maciço de Santa Quitéria de uma faixa rúptil, a ele relacionada, no extremo noroeste do Ceará / ²⁴ /. O lineamento comanda uma série de falhas paralelas, transcorrentes, desenvolvendo importantes zonas de cisalhamento, por toda a região que lhe é adjacente.

A Figura 4.10 mostra os principais lineamentos.

Na região foram sentidos inúmeros abalos sísmicos, tentando-se verificar que os de maior magnitude ocorreram em zonas de falhamento. Os sismos mais consideráveis ocorreram na região de Pereiro, zona fronteiriça do Estado do Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba onde, durante os meses de janeiro e fevereiro de 1968, registram-se abalos de magnitude 4,9 na escala Richter e valor de intensidade de VI na escala modificada de Mercalli / ⁸ /. Berrocal, Barros e Oliveira / ⁸ /, apontaram como causadores dos frequentes tremores na região de Pereiro, os falhamentos de grande extensão. Admitem, também, que as falhas que delimitam a Bacia sedimentar Potiguar também parecem influir na instabilidade da região.

4.2.1.5 - Hidrogeologia

A ocorrência de águas subterrâneas nos corpos graníticos tem-se limitado às juntas, fraturas, diáclases ou falhas devido à característica de impermeabilidade dessas rochas, ou ao manto de intemperismo-espessura máxima observada

de 15 m na região nordestina que apresenta certa permeabilidade / 9 /.

Na Região de Dobramentos Nordeste existe uma predominância de sistemas de fraturas longitudinais (que alcançam dezenas de quilômetros de extensão) e, menos notadamente, de fraturas transversais, que correspondem a fendas de tensão no sentido radial ao arqueamento / 20 /. Segundo Siqueira / 89 /, as fraturas transversais e angulares apresentam-se mais abertas e formam trama mais densa, fornecendo maior volume de vazios. Em observações na região notou-se uma predominância de fraturamento angular nas rochas graníticas / 22 /.

Os maciços graníticos, mesmo possuindo intenso fraturamento, tem valor hidrogeológico limitado, pois sempre assumem, como na Região de Dobramentos Nordeste, posição morfológica elevada em relação à topografia geral / 37 /.

A capacidade de drenagem e armazenamento de água dos sistemas de juntas nos granitos e em outros tipos de rochas cristalinas decresce rapidamente com a profundidade. As experiências adquiridas em vários programas de perfuração de poços na parte cristalina da Região de Dobramentos Nordeste, mostraram que não pode ser esperada a existência d'água a profundidades maiores, pois devido à tendência geral de soerguimento do escudo brasileiro e consequente erosão intensa, já cerca de 60 a 90 metros não existem mais espaços vazios em volume considerável / 18 /.

Na Região de Dobramentos Nordeste a ocorrência de água subterrânea, não faz parte de um sistema contínuo de circulação hidrogeológica, trata-se de reservatórios isolados de água estagnante sem uma mais intensa comunicação hidráulica, com as encaixantes predominantemente foliadas (xistos e fílitos).

4.2.1.6 - Recursos minerais

As potencialidades das rochas graníticas estão relacionadas às mineralizações associadas a esses corpos e à utilização na construção civil como britas ou como blocos ou chapas para uso em colunas, monumentos, revestimentos internos e externos, e outros.

Farina / 36 / ressalta a importância dos maciços graníticos de Meruoca, Mocambo e da Serra da Barriga, todos situados no Estado do Ceará. As mineralizações, conhecidas até o momento, estão relacionados ao stock de Mocambo e suas zonas de contato. Trata-se da ocorrência de ferro (hematita) da Fazenda Au

gustura, no Município de Sobral e de duas ocorrências de fluorita. É registrada a presença de fluorita em drusas juntamente com quartzo e epidoto, em afloramentos de íntima associação com a mineralização ferrífera.

O Perfil Analítico dos Mármores e Granitos / 6 / faz menção ao uso do granito Marron Imperial correspondente à zona produtora de Bom Jardim, em Pernambuco.

4.2.2 - Região de Dobramentos Sudeste

A Região de Dobramentos Sudeste substitui a antiga designação Faixa de Dobramentos Ribeira / 45 /. É composta por uma sucessão de faixas com disposição geral NE-SW, alternadamente constituída de rochas epimetamórficas (faixas de dobramentos) e rochas meso e catazonais (maciços medianos) como mostra a Figura 4.11 .

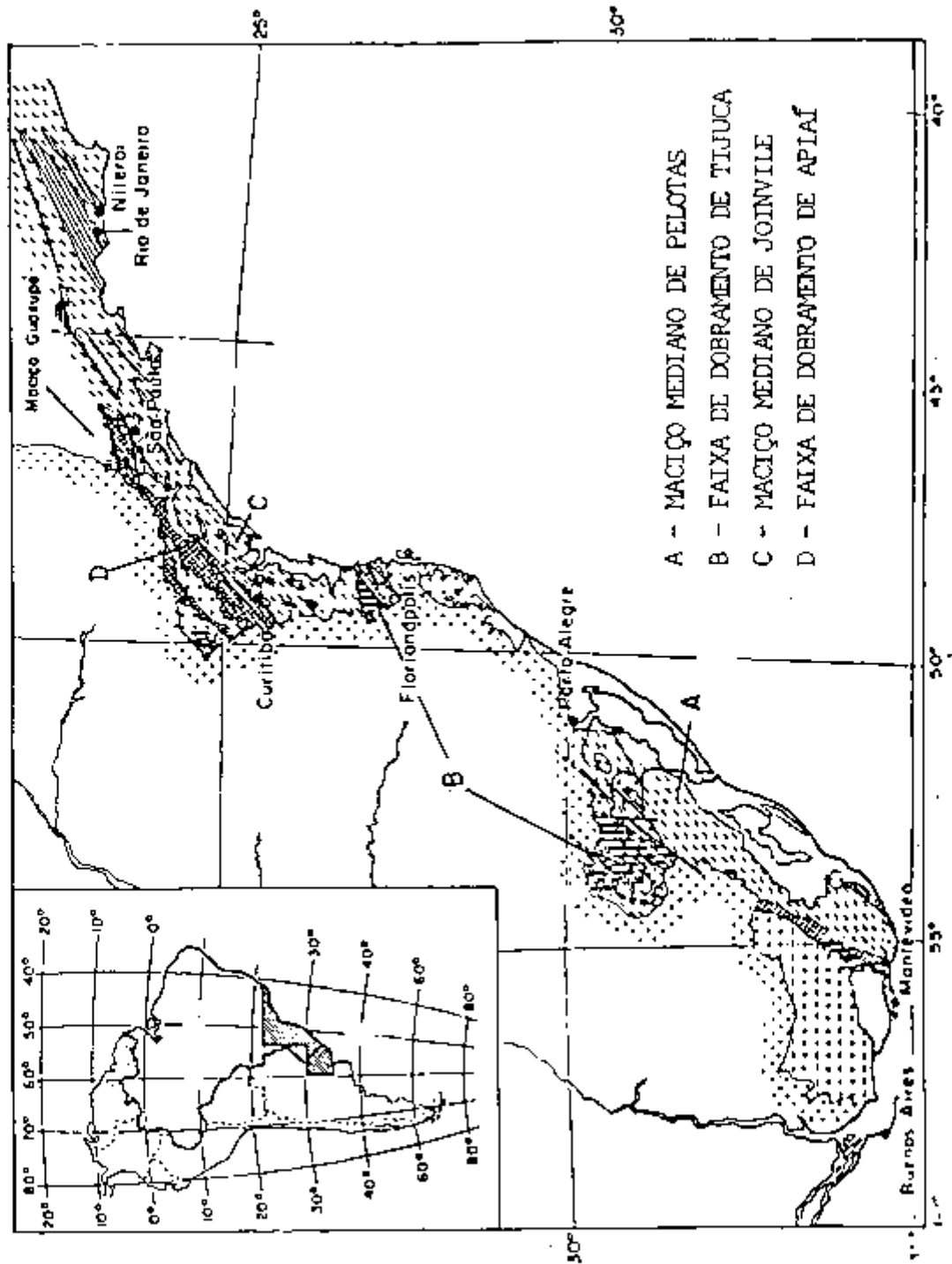
As faixas de dobramentos são constituídas por metasedimentos clásticos grosseiros e finos (conglomerados, arenitos, ritmitos, siltitos, argilitos) , clasto-químicos (arenitos calcíferos e margas) e químicos (calcários, calcários dolomíticos e dolomitos) enquanto que os maciços são formados por granulitos , charnockitos, rochas ultrabásicas, gnaisses, migmatitos, granitóides, xistos , anfibolitos. Tanto as Faixas de Dobramentos como os Maciços Medianos são cortados por abundantes corpos graníticos.

4.2.2.1 - Geomorfologia e hidrografia

A Região de Dobramentos Sudeste apresenta os mais diversificados quadros geomorfológicos, resultantes de tectônica de arqueamentos, falhamentos e fraturamentos que afetaram o embasamento cristalino a partir do Mesozóico e , pelo desenvolvimento, no presente de um modelado tropical úmido com características de um vasto domínio morfoclimático.

Nesta região são encontradas as mais elevadas altitudes médias regionais, entre 1.200 - 1.800 metros, na Serra da Mantiqueira sustentadas pelas rochas do Maciço Guaxupé e pela Faixa de Dobramentos Apiaí . Outra unidade morfoestrutural abrange a Serra do Mar constituída por rochas do Maciço Joinville, e que na região de Ribeira de Iguape, recebe o nome de Serra de Parana-

REGIÃO DE DOBRAMENTOS SUDESTE



- A - MACIÇO MEDITANO DE PELOTAS
- B - FAIXA DE DOBRAMENTO DE TIJUCA
- C - MACIÇO MEDITANO DE JOINVILLE
- D - FAIXA DE DOBRAMENTO DE APIAÍ

FIGURA 4.11. - OS MACIÇOS MEDITANO E AS FAIXAS DE DOBRAMENTOS DA REGIÃO DE DOBRAMENTOS SUDESTE / 45 /

biacaba. As altitudes são variáveis, entre 800 a 1.800 metros, ou mesmo mais de 2.000 metros nos pontos culminantes.

As rochas graníticas localizadas no Estado de São Paulo, em geral, possuem relevo muito dissecado, tornando-se algo colinoso, como podem ser observados no granito Cunhaporanga¹²/. Neste estado, em geral, o padrão de drenagem é dendrítico ou subparalelo, com vales abertos ou em "V". Localmente, pode haver condicionamento tectônico, principalmente no granito Agudos Grandes¹¹/. Considerando-se ainda, o Estado de São Paulo, destaca-se nessa região, como principal rio, o Ribeira de Iguape.

4.2.2.2 - Demografia e acesso

A Região de Dobramentos Sudeste constitui uma região habitada, com densidade média em toda região superior a 50 hab/km², e onde se observa uma aglomeração de cidades. Nos corpos graníticos, descritos para cada faixa e maciço, concentram-se grandes centros urbanos como: Sorocaba, Itu, São Roque, Encruzilhada do Sul, Caçapava do Sul, todos com população superior a 35.000 habitantes. Merecem destaques outras cidades como: Piedade, São Sepé, Registro, Socorro, Apiaí, Piraí do Sul e Paraibuna, Morro da Fumaça, Jaguaruna, Imaruí, Itariri, Bairro do Turvo.

Passam pela região duas rodovias principais, a BR-116, que liga São Paulo a Porto Alegre e a BR-101 ligando Curitiba a Porto Alegre. Esses dois acessos principais possuem inúmeras ramificações, algumas representadas por vias asfaltadas, outras representadas por estradas de terra, que promovem as ligações intermunicipais. A região é servida pela FEPASA através da linha Santos - Juquiá e pela R.F.F.S.A. que liga as cidades do sul do País.

4.2.2.3 - Geologia

As principais ocorrências de rochas graníticas estão distribuídas conforme mostra a Figura 4.12 e a Tabela 4.2⁹⁸/.

a) Rochas granitoides do Maciço Mediano de Pelotas.

Os granitos do Maciço Mediano de Pelotas ocorrem aglutinados em dois grandes complexos situados na zona tectônica entre o Maciço Mediano de Pelotas e a Faixa de Dobramento Tijuca. São os complexo Gaúcho e Pedras grandes, respec-

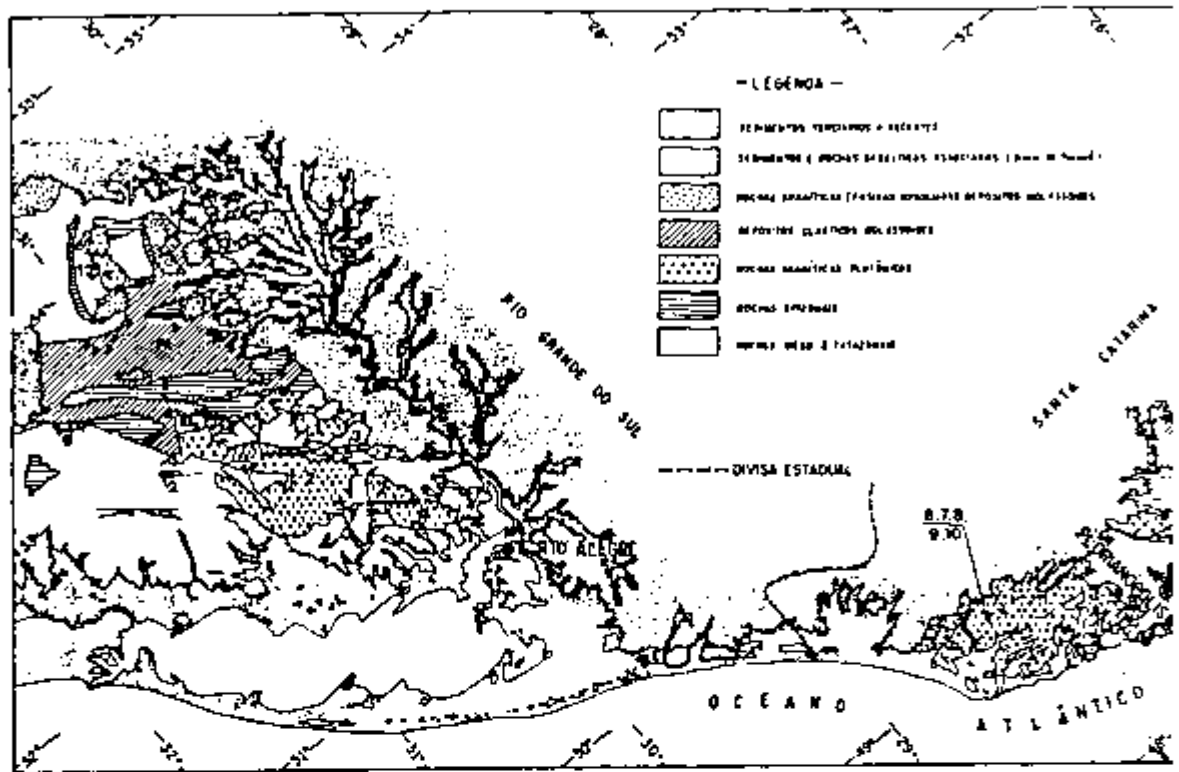


FIGURA 4.12. - PRINCIPAIS CORPOS GRANÍTICOS DA REGIÃO DE DOBRAMENTOS SUDESTE / 98 /

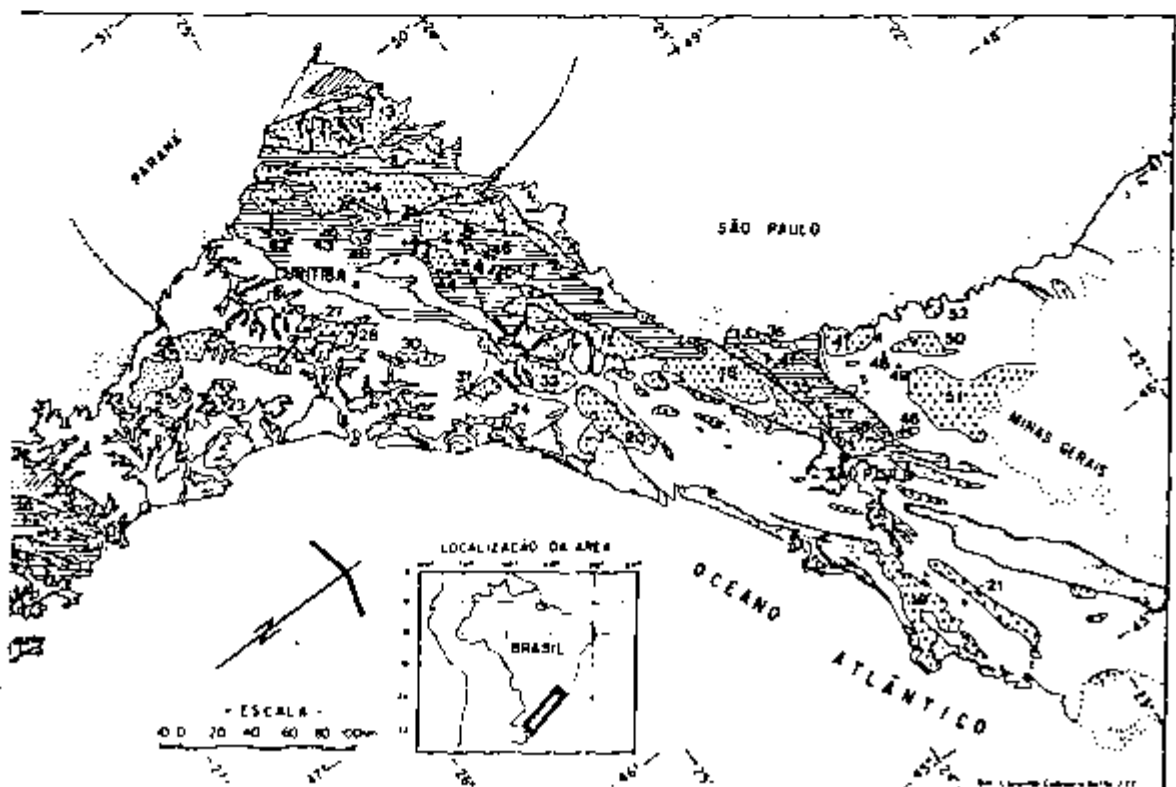


FIGURA 4.12. - PRINCIPAIS CORPOS GRANÍTICOS DA REGIÃO DE DOBRAMENTOS SUDESTE (Cont.) / 98 /

TABELA 4.2. - PRINCIPAIS CORPOS GRANÍTICOS DA REGIÃO
DOBRAMENTOS SUDESTE / 98 /

A: MACIÇO MEDIANO DE PELOTAS

- | | | |
|------------------|--------------------|----------------------|
| 1. Encruzilhada | 4. Campina | 7. Jaguaruna |
| 2. Dom Feliciano | 5. Prestes | 8. Rio Chicão |
| 3. Cordilheira | 6. Morro da Fumaça | 9. Imaruá |
| | | 10. Palmeira do Meio |

B: FAIXA DE DOBRAMENTO TIJUCA

- | | | |
|--------------------|--------------|----------------|
| 11. Caçapava | 13. São Sepé | 15. Valsungana |
| 12. Jaguari-Lavras | 14. Ramada | 16. Guabirubá |

C: MACIÇO MEDIANO DE JOINVILE

- | | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 17. Agudos Grandes | 22. Corupá | 27. Anhangava |
| 18. Piedade | 23. Morro Redondo | 28. Graciosa |
| 19. Cachoeira | 24. Mandira | 29. Marumbi |
| 20. Itariri | 25. Dona Francisca | 30. Barra do Turvo |
| 21. Paraibuna | 26. Pirai | 31. Guaraú |
| | | 32. Itapeuna |

D: FAIXA DE DOBRAMENTO APIAI

- | | | |
|-------------------|-------------------|--------------------|
| 33. Cunhaporanga | 37. Itaqui | 42. Cerne |
| 34. Três Córregos | 38. Cantareira | 43. Piedade |
| 35. São Roque | 39. Serra Grande | 44. Itaóca |
| 36. Sorocaba | 40. Morro Grande | 45. Espírito Santo |
| | 41. São Francisco | 46. Apiaí |

E: MACIÇO MEDIANO DE GUAXUPÉ

- | | | |
|-------------|---------------|----------------|
| 47. Itú | 49. Nazaré | 51. Socorro |
| 48. Atibaia | 50. Morungaba | 52. Jaguariuna |

tivamente situados ao sul de Porto Alegre e Florinópolis e com áreas de cerca de 10.000 e 8.400 km². O primeiro é formado pelos granitos Dom Feliciano, Encruzilhada, Prestes, Cordilheira, Arroio dos Ladrões, Figueiras, Cerro Frio e Campi-
nas; o segundo pelos granitos Imarú, Morro de Fumaça, Rio Chicão, Jaguaruna e
Palmeira do Maio. A composição dos diversos granitos varia de quartzo diorítica
a granítica.

b) Rochas granitoides da Faixa de Dobramento Tijucas.

Os granitos nesta faixa são relativamente raros. Podem ser agrupados em
2 tipos: 1) os intrusivos nas epimetamórficas e 2) os associados aos depósitos
molassóides. Os primeiros são representados pelos granitos Caçapava do Sul, Ja-
guari-Lavras, Valsungana e Guabiruba e os segundo pelos granitos São Sepé, Ra-
mada e Subida. Os primeiros são corpos mesotectônicos de dimensões médias e cir-
cunscritos, e ocorrem sob a forma de domos. São rochas de composição variável en-
tre diorítica e granítica, predominando amplamente esta. A textura é predomina-
ntemente equigranular. Os granitos do segundo grupo são de composição granodiorí-
tica e granítica, predominando amplamente esta. Sua textura é geralmente equigrā-
nular, e ortoclásio é o feldspato alcalino mais frequente.

c) Rochas granitoides do Maciço Mediano de Joinville.

Os granitos do Maciço Mediano de Joinville ocorrem grosseiramente agru-
pados segundo 3 faixas distintas com orientação geral NE-SW. A primeira faixa
(NW) situa-se ao longo do contato, essencialmente tectônico, entre o Maciço Me-
diano de Joinville e a Faixa de Dobramento Apiaí. Os principais representantes
desta faixa são os complexos de Agudos Grandes e Piedade formando, possivelmente,
um só grande complexo com cerca de 200 por 20 km e com disposição geral paralela
às estruturas regionais. Esta faixa ostenta composição variável entre quartzo-
diorítica e granítica, predominando os termos adamelíticos. São constituídos tan-
to de rochas equigranulares quanto predominantemente porfiróides. A faixa cen-
tral é bastante semelhante à faixa NW, sendo formada por um número maior de cor-
pos mas de menores dimensões em relação à faixa NW. A faixa SE é formada por
corpos reduzidos (60-200 km²) de tendência alcalina, alinhados grosseiramente se-
gundo duas linhas.

d) Rochas granitoides da Faixa de Dobramento Apiaí.

As rochas graníticas perfazem cerca de 50% de áreas de exposição da Fai

xa de Dobramento Apiaí / 45 / . Constituem complexos batolíticos com várias centenas de km² (granitos Cunhaporanga, Três Córregos, São Roque, Sorocaba, Itagui, Cantareira, Serra Branca), corpos com dimensões intermediárias (granitos Morro Grande, Itaoca, São Francisco, São Miguel Arcanjo, Mairiporã) e bossas e "stocks" com dimensões reduzidas (granitos Cerne, Piedade, Varginha, Espírito Santo, Apiaí, Capuava, Barreiro, Perús, Tico-Tico, Pirapora). As massas graníticas com dimensões pequenas a médias ou são expansões laterais de corpos maiores, ou intrusões independentes. Os corpos maiores ostentam usualmente forma alongada, paralela às estruturas regionais.

e) Rochas granitoides do Maciço Guaxupé.

As rochas graníticas do Maciço Guaxupé ocorrem distribuídas em 3 áreas com características distintas. A área SE situa-se junto ao contato tectônico entre o Maciço Guaxupé e a Faixa de Dobramento Apiaí. É de composição variada, entre granodiorítica a granítica, predominando esta. Sua textura é equigranular ou porfiróide. A área central tem composição diorítica e granítica. A área norte possui corpos isolados circunscritos de dimensões médias a pequenas.

4.2.2.4 - Estrutura tectônica e sismicidade

O estilo tectônico da Região de Dobramentos Sudeste é complexo.

Na área mais estudada, compreendida entre os paralelos 21º e 25º, a Região de Dobramentos Sudeste é caracterizado por uma estrutura em blocos, seccionada por várias falhas, como mostra a Figura 4.13, com centenas de quilômetros de extensão, atitude sub-vertical e espessas zonas cataclásticas. Possuindo caráter transcorrente, as falhas foram ativas no fim do Ciclo Brasileiro, podendo ter, pelo menos em parte, idade mais antiga.

As falhas mais importantes na área são a seguir denominadas:

- Falha de Jundiuvira, situada a oeste de São Paulo, prolonga-se no rumo de Delfim Moreira, passando aproximadamente pelo rebordo da Serra da Mantiqueira.

- Falha de Buquira, estende-se no rumo de Piquete e Passa Quatro, passando pelo sopé da Mantiqueira.

- Falha do Alto da Fartura, reconhecida entre as regiões de Guararema e

da Serra do Quebra Cangalha, prolonga-se no rumo de Resende (R.J.).

- Falha de Taxaquara prolonga-se por Guararema, São Luiz do Paraitinga, Cunha e vai atingir o extremo leste paulista para, já no Estado do Rio de Janeiro, conectar-se com o lineamento de Além Paraíba.

- Falha de Cubatão, prolonga-se rumo a Paraibuna e nas proximidades de Redenção da Serra vai se juntar à de Taxaquara.

Outras falhas internas aos compartimentos, separam blocos que também recebem designações próprias. Dentre elas, as do Jaguari e de Monteiro Lobato. Existem alguns lineamentos fotogeológicos expressivos que podem corresponder a falhas menores, ainda não caracterizadas.

Na região do vale do Rio Ribeira de Iguape, de maneira geral as falhas principais que afetaram a área são, aparentemente, do tipo empurrão, e acompanham a xistosidade de direção nordeste-sudoeste. Entre as principais falhas podem ser mencionadas a Falha de Caucaia, de Figueira, dos Agudos Grandes e do Morro Agudo / 13 / . Afora estes falhamentos principais existem as falhas que fazem parte do sistema NE-ENE, do sistema noroeste e do sistema nordeste. As fraturas observadas possuem uma ligeira predominância na direção NE, paralelos à foliação das rochas afetadas / 13 / .

No âmbito das rochas graníticas observam-se nelas, sistemas regulares de fraturas que, em geral, entrecortam-se ortogonalmente. Este notável sistema de diaclasamento foi usado pela CPRM / 13 / , como um bom critério para a individualização em fotografias aéreas desses maciços graníticos.

Separando os granitos Agudos Grandes e Ibiúna aparece a falha de Caucaia que possui extensão superior a uma centena de quilômetros. Nos batólitos granitoides de Três Córregos e Cunhaporanga observa-se que são cortados ou bordados por imensas falhas, de Caucaia e de Castro. A falha de Cubatão na altura do rio Quilombo, sofre uma inflexão para SW, perdendo-se no granito Areado. A falha dos Agudos Grandes na altura em que toma a direção N50ºE separa as rochas do complexo granítico Agudos Grandes.

A Região de Dobramentos Sudeste, do ponto de vista da atividade sísmica, ocupa no Brasil o segundo lugar depois da Bacia do Acre, mas somente pelo número de eventos registrados e não pela intensidade dos mesmos. O grande número de eventos registrados quase todos por pessoas que sentiram o tremor em parte podem ser atribuídos a relativamente densa população desde os tempos coloniais. Assim,

tremores de fraca intensidade foram sentidos simultaneamente numa dúzia de lugares ou mais / 42 /.

4.2.2.5 - Hidrogeologia

Foram efetuados poucos estudos hidrogeológicos no cristalino da Região de Dobramentos Sudeste. O potencial de águas subterrâneas dessa região não é suficientemente conhecido, bem como muitos fatores que influenciam a hidrogeologia de áreas fraturadas.

Na Região de Dobramentos Sudeste, no trecho situado no Estado de São Paulo, observou-se que a largura de zonas fraturadas tem variado entre poucos metros até mais de 1.500 metros / 96 /. Nos granitos dessa região ocorrem sistemas de diaclasamento bem acentuados, mas que se fecham a aproximadamente 150 metros de profundidade, onde os espaços diminuem por compressão ou preenchimento. Acumula-se a água subterrânea, principalmente, nos primeiros 100 m de profundidade devido à intercomunicação relativamente grande existente entre os sistemas de diáclases até essa profundidade. Abaixo de 150 m não foi verificada mais nenhuma entrada, pois se bem que a pressão hidrostática seja grande, as diáclases já são quase fechadas, o que impede o acúmulo de água / 60 /.

4.2.2.6 - Recursos minerais

Como vimos, as rochas graníticas estão largamente distribuídas por toda a Região de Dobramentos Sudeste. Em muitas localidades, o granito é lavrado e utilizado como brita para a engenharia civil, como também na forma de cascalho para a conservação de vias de acesso e de transporte. Como pedra de revestimento, apenas algumas ocorrências poderiam ser úteis, não só devido às suas propriedades físicas, mas, também, à sua beleza.

Na região do vale do Ribeira de Iguape foram cadastradas algumas ocorrências de granito que correspondem, principalmente, pedreiras em lavra ou abandonadas / 13 /.

Quanto às mineralizações direta ou indiretamente associadas aos corpos graníticos das diversas unidades estruturais da Região de Dobramentos Sudeste pode-se dizer que elas são variáveis / 98 /. No Maciço Mediano de Pelotas ocorrem

Sn e W; na Faixa de Dobramento Tijuca, Sn, Cu, e Au e na Faixa de Dobramento Apiaí, Pb e Zn como metais de importância econômica. Nos Maciços Medianos de Joinville e de Guaxupé não são conhecidas mineralizações metálicas notáveis.

4.3 - Basalto

4.3.1 - Bacia do Paranã

Os basaltos de Formação Serra Geral, pertencentes à vasta bacia sedimentar do Paranã, representam um dos mais importantes vulcanismos do globo. A área coberta pelos basaltos é de cerca de 720.000 km² em território brasileiro sendo que 56% afloram de forma praticamente contínua e no restante, são recobertos pelos sedimentos das Formações Caiuá e/ou Bauru.

4.3.1.1 - Geomorfologia e hidrografia

Os extensos derrames basálticos da Formação Serra Geral na sua forma tabular elevada, condiciona a formação de uma festonada e expressiva "cuesta", a chamada Serra Geral que, limitando o Planalto Basalto-Arenítico, recebe denominações regionais diversas e, alcança altitudes entre 1.000 a 1.200 metros na parte leste, junto à escarpa para, progressivamente, declinar de altitudes (100 a 300 metros) em direção ao oeste.

A superfície do planalto basáltico é entalhada por rios em profundos vales. Este entalhamento obedece, em parte, a uma orientação imposta pela tectônica e pela direção das juntas dos basaltos. A região basáltica é drenada por sistemas hidrográficos constituídos, na porção norte pelos rios Paranaíba e Grande, na porção oeste pelos rios Dourados, Brilhante e Vacaria, e na porção sul pelos rios Paranapanema, Ivaí, Piquiri, Iguaçu, Uruguai, Canoas e Pelotas.

4.3.1.2 - Demografia e acesso

Sobre os terrenos basálticos da Formação Serra Geral estão concentradas grandes cidades como Ribeirão Preto, Araraquara, Botucatu, Jaú, dentro do Estado de São Paulo; Dourados, no Estado de Mato Grosso; Londrina, Maringá, Cascavel,

Arapongas, Apucarana, Pitanga, Laranjeiras do Sul, no Estado do Paraná; Chapecó, Concórdia, Campos Novos, Caçador, no Estado de Santa Catarina, e Passo Fundo, Santo Angelo, Caxias do Sul, Santiago, Alegrete, no Estado do Rio Grande do Sul. A densidade demográfica nas porções paulista e paranaense, compreendida por aquelas cidades, varia de 100 a 300 hab/km². Nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, a densidade varia de 50 a 100 hab/km². Nos domínios mato-grossense, goiano e mineiro, a densidade situa-se entre 10 a 50 hab/km².

Nessa região existe uma intensa rede rodoviária, principalmente na porção compreendida pelos Estados de São Paulo e Paraná. Quanto às ferrovias podemos citar a Rede Paulista, a Rede Paraná-Catarinense e a Rede Sul Rio Grandense.

4.3.1.3 - Geologia

A Formação Serra Geral compreende a sequência de derrames de lavas basálticas com intercalações de lentes e camadas arenosas que capeiam as formações gondwânicas da Bacia do Paraná.

O contato inferior da Formação Serra Geral com os arenitos da Formação Botucatu é discordante e com as unidades mais antigas marca-se por discordância erosiva, jazendo a formação, em certos locais, diretamente sobre rochas do embasamento. O contato superior é discordante com as Formações Caiuá e Bauru. A Figura 4.14 mostra a coluna estratigráfica da Bacia do Paraná com a posição da Formação Serra Geral.

Dados radiométricos indicam que a idade do principal vulcanismo situa-se no Cretáceo Inferior (120-130 m.a.). Derrames precursores teriam ocorrido já no Jurássico Superior / 58 /.

a) Espessuras da lava basáltica

O mapa de isópacas das lavas basálticas, Figura 4.15, evidencia claramente a espessura máxima dos derrames, localizada na parte norte da bacia, onde atinge mais de 1.400 metros, que, porém vai se adelgaçando em afloramentos pouco espessos nos limites dos mesmos sob a forma de escarpas.

Na região sul da bacia verifica-se o oposto. Os derrames afloram nas escarpas atlânticas com grandes espessuras, que vão diminuindo em direção ao interior da bacia. O traçado de isópacas é dificultado nos derrames do sul pela

BACIA DO PARANÁ

CRONOESTRATIGRAFIA		LITOESTRATIGRAFIA				ESPESS. MAX. (M)	DESCRIÇÃO SUMÁRIA				
ERA	SISTEMA	SERIE	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA						
CENOZOICO	Q			S/DENOMINAÇÃO		35	Solos e Aluviões				
				S/DENOMINAÇÃO		70	Sedimentos quaternários recentes				
MESOZOICO	CRETÁCEO	SUP	SÃO BENTO	BAURU		500	Argilas, Siltos e calcários de rios, com algumas arenitas. Mudez e flocos de carbonatos de base				
				SERRA GERAL		400	Arenito calcário e/ou carbonífero, arenoso				
				BOTUCATU + PIRAMBÓIA		300	Depositos de basalto telúrico e/ou intertélúrico de tipo alto com raras arenitas				
						200	Arenito médio fino a médio com arenoso e/ou calcário. Flocos de calcário, calcários e carboníferos. Arenite e Siltos argilosos com raras flocos de calcário. Siltos e arenites.				
PALEOZOICO	PERMIANO	SUP	PASSA DOIS	RIO DO RASTO		800	Arenito calcário, fósforo e ferro com raras arenitas, calcários e/ou calcários de rios e/ou arenitas de rios				
				ESTRADA NOVA		700	Arenite e Siltos com arenoso				
				SALTA		110	Argilas de rios com raras arenites				
						85	Calcários de rios com raras arenites				
				TUERARÃO	MED.	PALERMO			300	Siltos arenosos com arenoso arenoso com flocos de calcário	
									400	Arenite média arenosa, fino Siltos arenosos arenoso calcário arenoso e/ou arenoso de rios - Arenite média arenosa	
							ITARARÉ		1300	Siltos e arenite e/ou calcários "litos" arenosos. Fósforo e calcário arenoso	
										Arenite média arenosa fino, arenoso e/ou calcários de rios e/ou calcários arenoso. Fósforo e/ou calcário arenoso	
				CARBONIFERO	SUP						Arenite e Siltos arenoso fino e/ou calcários arenoso
DEVONIANO	INF		PARANÁ	PONTA GROSSA		650	Siltos e Fósforo com arenoso e/ou calcários arenoso. Fósforo e/ou calcários arenoso e/ou calcários arenoso. Siltos, arenite e Fósforo arenoso arenoso				
				FURNAS		450	Arenite arenoso médio a grosso arenoso com raras flocos e/ou calcários de rios e/ou calcários arenoso, com flocos				
SILURIANO											
ORDOVICIANO											
CAMBRIANO											
PRÉ-CAMBRIANO							Depositos metamórficos de alta temperatura				

FIGURA 4.14. - COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ / 73 /

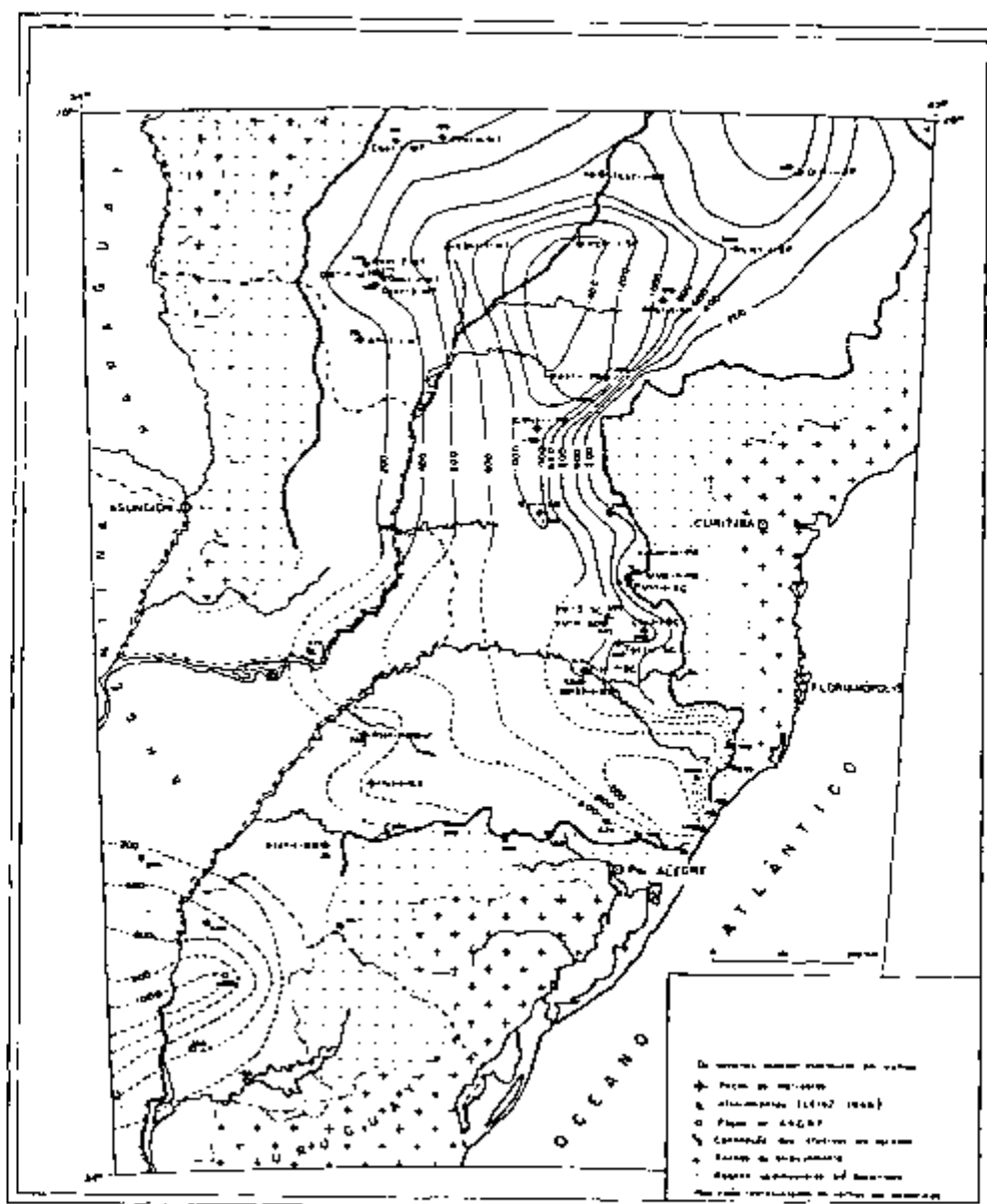


FIGURA 4.15. - MAPA DAS ISÓPACAS DAS ROCHAS BASÁLTICAS
NA BACIA DO PARANÁ / 59 /

escasses de dados de sondagem, podendo as curvas adquirir outra configuração à medida que forem sendo executadas novas perfurações.

Algumas espessuras dos derrames observadas na região constam na Tabela 4.3. As espessuras diminuem rapidamente tanto rumo N como S, atingindo valores de pouco excedentes a 100 metros na parte norte (S.P.) como também no extremo sul (R.S.-Uruguai). É interessante observar que a espessura também declina continuamente rumo W; no único perfil observável nesse sentido, no R.S., cai de 800 metros (Osório) para cerca de 200 metros em Jaguarí.

A maior espessura observada, na Formação Serra Geral, foi de 1.529 metros no poço perfurado pela Petrobrás, em Presidente Prudente / 71 /.

b) Situação espacial das rochas da Bacia do Paraná

Com base no mapa de isópacas do conjunto das rochas básicas e no das formações pós-Proterozóicas da Bacia do Paraná, foram executados perfis isométricos na tentativa de obter-se uma visão semi estereográfica da situação geológica da bacia.

Esses perfis estão representados na Figura 4.16 e permitem observar a situação do preenchimento sedimentar em seu conjunto e a distribuição do material basáltico. Ao nível médio do mar foi atribuída cota 0. Foi omitida, para efeito de simplificação, a capa sedimentar posterior ao vulcanismo, que recobre em boa parte os derrames da região norte da bacia.

Na Figura 4.16 observa-se, de um modo geral, o seguinte:

- O preenchimento sedimentar Paleozóico e Mesozóico chega a atingir espessura de mais de 3.000 metros.
- As espessuras máximas alinham-se, aproximadamente, ao longo do eixo da bacia.
- As maiores espessuras dos sedimentos nem sempre correspondem às maiores possanças de derrames.

c) Número dos derrames e suas possanças particulares

Vários são os elementos que permitem deduzir o número de corridas de

TABELA 4.3. - ESPESSURA GLOBAL DOS DERRAMES / 58 /
RIO GRANDE DO SUL

Localidade	Base (sobre o nível do mar)	Topo (sobre o nível do mar)	Espessura
Três Forquilhas ..	+ 25m	1050m (Tainhas)	1025m
Osorio	+ 60m	900m	800-850m
S. Antonio	+ 70m	900m	800m
Sander	160m	830m (Canela)	700m
Felis	160m	750m (Caxias)	570m
Venancio Aires	240m	720m Guaporé	480m
Candelaria	260m	720m (Soledade)	460m
Sta. Maria	270m	570m (Pinhal)	± 300m
Jaguarí	± 120m	+ 350m	200m
Livramento	250m		10m
Santa Catarina			
Araranguá-Pedra ..	350m	1200m	850m
Creaciuma	650m	1300m	650m
Estrada Nova	745m	± 1360m (S. Joaquim)	600m
Lages (Oeste)	980m	1200m	200m
Paraná			
Porto União	850m	1200m	350m
Guatapuava	—	—	250m
Serra Esperança ...	700m	1250m	250m
S. Paulo			
S. Pedro	720m	860m	150m
Botucatu'	800m	880m	± 80m

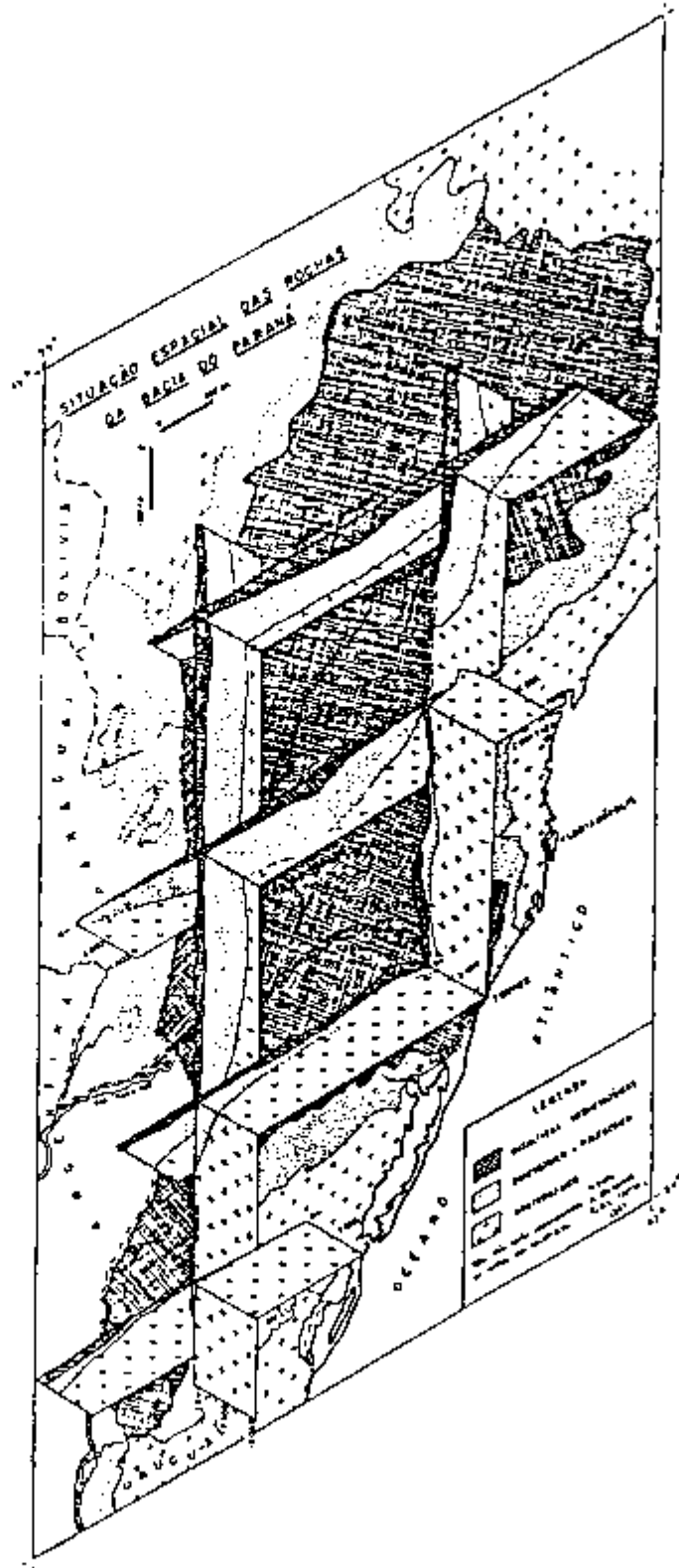


FIGURA 4.16. - SITUAÇÃO ESPACIAL DAS ROCHAS NA BACIA DO PARANÁ / 59 /

lava. As intercalações de sedimentos clásticos depositados entre os basaltos são o indício mais seguro de hiato da efusão. São sedimentos semelhantes ao arenito Botucatu, também de cor avermelhada e possuem, frequentemente, estratificação cruzada. Nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina encontram-se intercalações praticamente só a oeste da linha Lages-Santa Maria, enquanto que a orla oriental é praticamente isenta destas intercalações.

Na região de Santa Maria (R.S.) encontram-se 7 intercalações de bancos de arenitos variando entre 30 cm a 7 metros. A espessura das corridas de lava é pequena na base, tendo cerca de 6 metros apenas. A segunda é de 8 metros, e a terceira de 12 metros, a quarta de 14 metros, a quinta de 30 metros, a sexta de 25 metros, a sétima de 15 metros, ao passo que a última é de cerca de 110 metros. Encontram-se assim, um mínimo de 8 derrames sucessivos / 58 /.

Todos os dados sobre a espessura do derrame existentes na literatura referem-se à determinação por meio de intercalações de arenitos / 58 /.

d) Composição química do basalto

Poucas são as análises químicas disponíveis do basalto. Nas Tabelas 4.4 e 4.6 / 58 /, / 81 / estão transcritos parcialmente os resultados das análises químicas de basaltos cujas procedências constam, respectivamente, nas Tabelas 4.5 e 4.7. Observam-se na Tabela 4.4, nitidamente, 2 grupos com quimismo diferente. Os primeiros 7 representantes possuem teor em SiO_2 , oscilando entre 46 e 55% e o último entre 61 e 66%.

4.3.1.4 - Estrutura tectônica e sismicidade

A estrutura geológica da Bacia do Paraná é a de uma grande bacia intracratônica simétrica, na qual não atuaram esforços de compressão capazes de produzir dobramentos intensos e falhas reversas (Figura 4.17). Possuindo uma história tectônica bastante calma, a bacia foi preenchida por sedimentos segundo a orientação do eixo principal de direção norte-sul, e que durante o Devoniano sofreu ligeira inclinação para noroeste e daí até o recente tendendo para norte-nordeste.

O mapeamento de superfície tem demonstrado que as falhas, fraturas e lineações no flanco leste da bacia obedecem a duas direções preferenciais. A

TABELA 4.4. - ANÁLISES QUÍMICAS DAS ROCHAS BASÁLTICAS / 58 /

N.º	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	H ₂ O+	H ₂ O-
1	49,62	12,24	10,05	6,74	4,82	8,82	1,74	2,24	3,00	0,22	0,77	1,07
2	49,54	12,71	8,90	4,21	7,50	11,14	0,66	1,64	1,10	0,23	0,69	1,09
3	49,10	12,29	10,48	6,59	6,89	9,11	0,97	0,73	2,70	traços	0,61	0,90
4	48,44	11,32	11,00	6,74	4,08	8,50	1,64	2,01	4,00	0,45	0,17	0,94
5	55,6	13,5	6,9	5,0	4,4	7,0	1,8	2,5	1,4	traços	2,3	0,4
6	55,3	14,7	9,3	3,7	2,2	7,4	1,7	2,3	2,0	0,07	—	0,7
7	49,70	13,55	7,98	6,82	4,69	8,35	1,27	2,43	3,23	0,37	1,37	1,48
8	61,44	11,78	6,63	1,81	3,42	4,12	2,37	2,48	1,00	0,26	2,61	0,71

TABELA 4.5. - PROCEDÊNCIA DAS ANÁLISES QUÍMICAS DA TABELA 4.4 / 58 /

N.º	Localidade
1 - Basaltito	Rio Passo do Retiro Paraná
2 - Basalto	São João Santa Catarina
3 - Basaltito	Arroio Guazú - 1.º Salto Paraná
4 - Basaltito	Rio Jaboticabal São Paulo
5 - Hialo-Basalto	Três Forquilhas - altitude 450m Rio Grande do Sul
6 - Basalto	Três Forquilhas - altitude 200m Rio Grande do Sul
7 - Basaltos	(média de 5 análises prox. do Est. de Mato Grosso e Terr. de Pop. ta. Porá)
8 - Basaltito	Curral das Pedras Rio Grande do Sul

TABELA 4.6. - ANÁLISES QUÍMICAS DOS ELEMENTOS PRINCIPAIS EM ROCHAS BASÁLTICAS DA BACIA DO PARANÁ. / 81 /

Análise Nº	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	CO ₂	Total
1	46,00	17,11	3,30	4,79	6,85	0,16	3,57	7,19	2,46	1,24	0,59	4,00	2,50	0,02	99,78
2	47,00	15,55	4,00	4,33	9,04	0,19	4,58	8,40	3,16	1,69	0,55	1,24	0,30	0,02	100,05
3	47,00	13,60	3,70	6,10	8,70	0,29	4,50	8,30	3,00	1,13	0,47	2,00	1,40	0,02	100,21
4	48,20	14,80	2,90	4,90	9,98	0,28	4,60	9,13	2,10	1,07	0,28	0,93	1,07	0,02	100,26
5	48,60	13,16	2,68	6,80	6,70	0,16	6,04	9,70	2,79	1,41	0,36	1,20	0,79	0,01	100,40
6	49,10	19,80	1,10	5,50	6,92	-	7,21	8,28	0,51	0,37	tr.	0,28	1,04	-	100,11
7	49,36	12,71	1,10	4,21	8,90	-	7,56	11,14	1,84	0,66	0,23	0,89	1,06	-	99,66
8	49,52	12,24	3,00	5,74	10,03	-	4,42	8,32	2,24	1,76	0,22	0,77	1,07	-	99,33
9	49,70	13,19	3,84	7,08	7,27	1,10	3,77	7,60	2,49	1,57	0,49	1,40	1,45	-	99,95
10	65,54	13,03	0,94	2,95	2,75	0,11	1,18	3,50	2,83	3,68	0,26	2,07	0,97	-	99,81

TABELA 4.7. - PROCEDÊNCIA DAS ANÁLISES QUÍMICAS DA TABELA 4.6 / 81 /

Análise Nº	Localidade
1	Torrinha, SP, estrada Torrinhã-Santa Maria, a 5 km de Torrinhã.
2	Botucatu, SP, estrada Laranjal Paulista-Botucatu, a 16 km de Botucatu.
3	Sertãozinho, SP, no caminho para Fonte Palmital, a 7km deste último.
4	Ribeirão Preto, SP, Fazenda Experimental do Instituto Agronômico.
5	São José do Rio Preto, SP, estrada São José do Rio Preto-Potirendaba.
6	Serra Esperança, Pr.
7	São João, SC.
8	Rio Passo do Retiro, Pr.
9	Cabeceira do Rio Brilhante, MT.
10	Perfil Aratinga-Itati, RS.

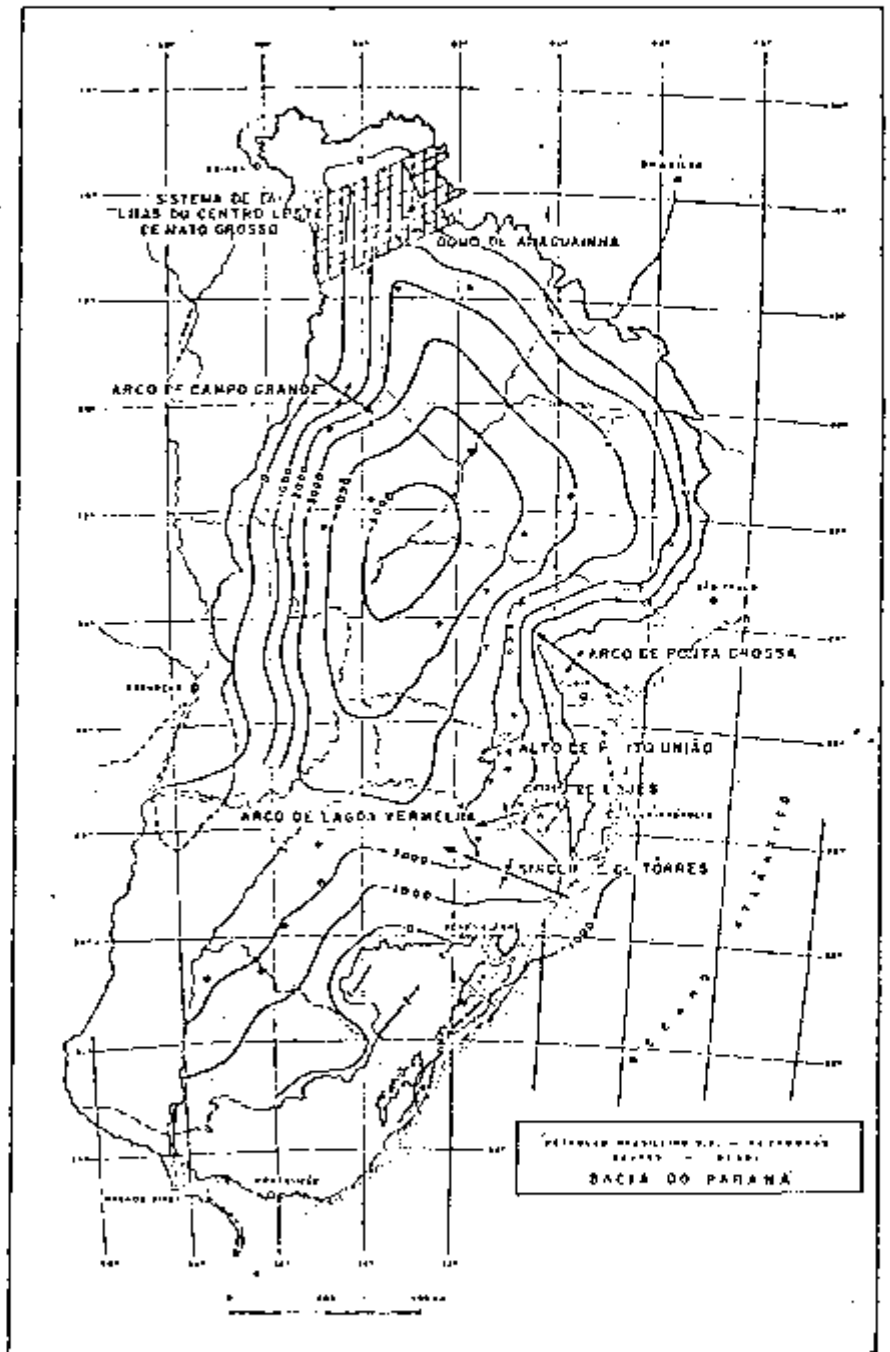


FIGURA 4.17. - MAPA ESTRUTURAL DO TOPO DO EMBASAMENTO DA BACIA DO PARANÁ / 73 /

principal é noroeste-sudeste que ocorre no noroeste da bacia e no centro leste de Mato Grosso e as secundárias norte-nordeste, sul-suldoeste. Pertencem à secundária a Falha de Barra Nova.

O sistema de falhas do centro leste de Mato Grosso (Figura 4.17) tem direção principal nordeste-sudoeste e direção secundária norte-sul. Todas as falhas encontradas são de gravidade e os blocos, extremamente alongadas na direção nordeste-sudoeste, apresentam-se predominantemente escalonados para noroeste.

Quanto às rochas basálticas, na região dos vales dos rios Paranã e Paranapanema, tem-se observado que elas exibem frequentemente as falhas / 91 /. Na região de Santa Maria, R.S., as falhas existentes são normais, com direção dominante NW, e mais raramente NE, possuindo algumas, 20 metros de rejeito / 84 /. Guidicini e Campos / 41 / faz referência a falha no município de Bom Retiro (S.C.), com 95 metros de rejeito, atingindo o arenito Botucatu e a parte basal do derrame.

O basalto, normalmente, apresenta fraturas que parecem estar ligadas geneticamente à própria formação do derrame. Esses fraturamentos seguem em geral, dois padrões distintos. Nas bordas dos derrames predomina um fraturamento horizontal, enquanto que no corpo central é preferencialmente vertical. As fraturas horizontais são geradas pela combinação de esforços de fluxo/resfriamento das lavas e pelo alívio de peso. As discontinuidades verticais são geradas por acidentes tectônicos pós-genéticos e resfriamento.

Existem referências sobre a Zona de Transcorrência Paranapanema - Santa Cruz na Bacia do Paranã. Fulfaro / 38 / descobriu na região de Paranapanema importante alto estrutural e Hasui, Carneiro e Coimbra / 45 / admitem uma ligação entre a região de Paranapanema e a Zona de Transcorrência São Paulo. Em direção para noroeste é provável também a existência de uma interligação com a deflexão de Santa Cruz. A atividade sísmica ao longo da suposta linha de fraqueza é manifestada com epicentros em Itapetininga, Londrina, Maringá, Primeiro de Maio, Iepa, Miranda e Corumbá e, reforça a tese de existência de uma zona de fraqueza que liga diretamente as faixas andinas e costeira atlântica / 42 /.

4.3.1.5 - Hidrogeologia

Em escala regional, os basaltos da Formação Serra Geral da Bacia do Paranã constituem a camada confinante do seu horizonte aquífero mais importante

(o aquífero Botucatu) e substrato onde vem se acumular as águas infiltradas nos arenitos das Formações Caiuã ou Bauru.

Em geral, em cada derrame de basalto pode-se diferenciar dois tipos texturais mais importantes: os basaltos vesiculares ou amigdalóides e os basaltos compactos microcristalinos. O primeiro, ocorre preferencialmente no topo e na base de cada derrame enquanto que o segundo, constitui o corpo central. Na textura vesicular ou amigdalóide as condições de circulação são muito variáveis, face às injunções decorrentes do preenchimento por minerais secundários e/ou da falta de intercomunicação entre os vazios. Na matriz compacta o comportamento é de microfissuras / 77 /.

Outra estrutura reservatório importante ocorre nos arenitos inter-trapeanos, cujas feições variam de totalmente friáveis até extremamente silicificados. A ocorrência de sedimentos inter-trapeanos é mais frequente no domínio inferior da sequência de derrames.

Além dessas estruturas, temos a destacar os fraturamentos já referidos na seção 4.3.1.4. As discontinuidades horizontais apresentam boa permeabilidade enquanto que as microfissuras verticais proporcionam apenas ligações hidráulicas entre estas horizontais. Na região NNE do Estado de São Paulo / 88 / de forma geral, os fraturamentos são importantes até uma profundidade de 70 a 80 metros, pois mais abaixo as fraturas encontram-se praticamente fechadas.

A zona aquífera dos basaltos nada mais é do que um prolongamento em profundidade do aquífero Bauru/Caiuã sobrejacente. Nas áreas onde a capa sedimentar é pouco espessa ou descontínua, não oferecendo condições de captação, há a transferência de água para a zona fraturada.

Nas áreas de pequena espessura de sedimentos ou ao longo das rupturas regionais mais importantes engendradas pelos sistemas de falhas, é possível que ocorram contribuições ascendentes, propiciadas pelo aquífero Botucatu subjacente, desde que os níveis piezométricos deste sejam relativamente muito mais elevados.

O nível estático é, no domínio aflorante, em geral, pouco profundo para a deposição fisiográfica do aquífero. Segundo Hausmann / 44 / uma centena de poços relacionam e indicam níveis estáticos que variam de 0,32 até 130 metros de profundidade.

4.3.1.6 - Recursos minerais

Quase toda a extensão de rocha basáltica exposta na sua superfície encontra-se intemperizada e suporta atualmente intensa atividade agrícola baseada no café, no binômio soja-trigo e em outros tipos subordinados de cultura.

A rocha basáltica fresca tem sido utilizada como brita na construção civil. No entanto, existe pouca lavra para esse tipo de rocha. Segundo dados do DNPM / 15 /, os estados produtores de basalto em forma de britas são: Paraná e São Paulo.

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - Conclusões

As conclusões são obtidas segundo os tipos de rejeitos e obedecendo a seguinte ordem: rejeitos de baixa atividade, combustível irradiado, rejeitos de alta atividade e materiais contaminados com elementos transurânicos, e no final, são tecidas considerações sobre as ocorrências de sal gema, granito e basalto no Brasil.

1) O armazenamento dos rejeitos de baixa atividade no Brasil constitui um problema que deverá ser solucionado em termos imediatos. O método de armazenamento para estes rejeitos é relativamente simples e pode compreender dois tipos de instalações: as superficiais e as sub-superficiais. Tem-se, normalmente, utilizado a segunda alternativa pois a primeira exige uma maior proteção, encarecendo o projeto.

Como no Brasil não se definiram, ainda, os locais para o armazenamento em sub-superfície, recorreu-se à estocagem provisória desses rejeitos, em princípio, em dois galpões construídos em uma pedreira desativada de biotita gnaisse situada dentro da área controlada. A capacidade de cada galpão é de 3.000 tambores de 200 litros e permite a operação por, aproximadamente, 3 anos.

Em qualquer decisão a ser tomada no Brasil quanto a escolha do tipo de depósito mais apropriado, devem ser observados critérios apropriados de avaliação de locais. Os locais selecionados devem, apresentar baixa pluviosidade e topografia relativamente plana, possuir estruturas geológicas estáveis e sem fraturas, situar-se em regiões de baixa densidade populacional e no caso em que a estocagem é feita sob o solo, este deve ser compacto e, preferencialmente, possuir alta porcentagem de minerais de argila e não apresentar condições de movimento de águas subterrâneas.

Em geral, para reduzir os riscos de transporte sugere-se que os rejeitos de baixa atividade sejam armazenados a distâncias que variam de 500 a 1.000 quilômetros das fontes geradoras. No entanto, quando os locais situados a essas distâncias não atendem os critérios expostos anteriormente recorre-se às barreiras de engenharia como a impermeabilização através do betume ou do concreto, para solucionar eventuais problemas com a infiltração de água.

Praticamente, sob o ponto de vista geológico a que estamos afetos, em todo território nacional é possível de encontrar terreno apropriado para local de armazenamento de rejeitos de baixa atividade. Critérios como demografia, meteorologia, acesso, infraestrutura e outros fatores de natureza institucional devem prevalecer na escolha final dos locais favoráveis.

2) Assim como os rejeitos de baixa atividade, o armazenamento do combustível irradiado exige solução a curto prazo. É prevista para o final de 1983, a entrada em funcionamento comercial da Usina Nuclear de Angra I e, um ano depois, a troca dos primeiros 40 conjuntos de elementos combustíveis irradiados correspondentes a 1/3 do combustível total. Num período mínimo de 90 a 180 dias eles deverão ser estocados em tanques de água na própria usina. A etapa seguinte dependerá da opção a ser adotada no Brasil.

Considerando-se que o combustível irradiado pode ser reprocessado, uma das soluções viáveis seria mantê-los estocados no tanque até a operação da usina de reprocessamento. Para que este procedimento não necessite da construção de tanques de armazenamento adicionais, tem-se procurado aumentar a capacidade do tanque original por meio de malhas de armazenamento compactadas. Esse método consiste em aumentar a densidade dos elementos combustíveis no tanque utilizando-se de prateleiras com boro.

Na Usina Nuclear de Angra I, a capacidade original do tanque é de 3 vezes a carga total de elementos combustíveis do reator. Considerando a substituição anual de 1/3 desses combustíveis irradiados obtém-se um período inicial de 9 anos para se esgotar a capacidade do tanque de estocagem. Empregando-se o método acima referido, pode-se aumentar a capacidade do tanque em até 100%, o que elevaria o período de estocagem para 18 anos.

Uma outra solução para o armazenamento dos elementos combustíveis irradiados provenientes da Usina Nuclear de Angra I seria utilizar os tanques de estocagem de Angra II ou da usina de reprocessamento, mesmo que essas usinas não estejam totalmente concluídas. Em geral, na implantação de usinas de reprocessamento, constroem-se inicialmente os tanques de estocagem.

Há a possibilidade também, da primeira carga de elementos combustíveis irradiados serem enviados para as usinas de reprocessamentos dos Estados Unidos.

Admitindo-se a alternativa de não reprocessar o combustível irradiado, a solução adequada seria armazená-los em formações geológicas. A princípio, a

deposição geológica do combustível irradiado, é semelhante às dos rejeitos de alta atividade e dos materiais contaminados com elementos transurânicos. No entanto, deve ser observado a presença, no combustível irradiado, do plutônio e de eventuais gases, ^{81}Kr , ^{131}Xe e ^{131}I , retidos nas varetas dos elementos combustíveis. O armazenamento dos rejeitos de alta atividade é analisado nos itens a seguir.

3) Como se mostrou no Capítulo 3, o rejeito de alta atividade passa por quatro estágios de estocagem desde que é originado em estado líquido até a sua deposição (já solidificado) no repositório geológico. A estocagem dos rejeitos líquidos ocorre em tanques especiais por um período de 10 anos. As etapas que constituem as estocagens provisórias não apresentam riscos sérios desde que seja efetuado um controle rígido durante as operações. A etapa final, que consiste na deposição definitiva e segura do rejeito é o problema mais sério a ser enfrentado.

4) Outro rejeito que exige contenção adequada, são os materiais contaminados com elementos transurânicos. Recomenda-se que tais materiais, assim como os rejeitos de alta atividade, sejam estocados em formações geológicas.

Do estudo das ocorrências de sal gema, granito e basalto no Brasil, podemos constatar o seguinte:

a) Os sal gemas encontrados nas Bacias de Sergipe-Alagoas e do Recôncavo podem representar, futuramente, uma alternativa viável para a deposição.

Os aspectos que podem ser considerados favoráveis ao sal gema da Bacia de Sergipe-Alagoas estão relacionados com a ausência de atividades sísmicas, a topografia moderada da região e a inexistência de água subterrânea, pois como o sal gema é altamente solúvel na água, sua simples presença denota a ausência de água. As restrições que podem ser feitas são: a localização dessas ocorrências próximas ao litoral, a curto prazo, a exploração de petróleo na mesma bacia, a extração do sal gema na região de Maceió, a implantação de um complexo mina-usina para a extração dos sais de potássio na região de Taquari-Vassouras e a previsão de instalação de uma unidade industrial piloto destinada à produção de enxofre em Castanhal.

O relevo suave da região e a ausência de água subterrânea nas vizinhanças das camadas de sal, despontam como fatores favoráveis ao sal gema da Bacia do Recôncavo. A presença de extensas falhas regionais e a ocorrência de alguns

abalos sísmicos verificados no passado, não inviabiliza, a princípio, o uso dessas rochas. Os fatores que podem ser citados como desfavoráveis são: a localização próxima ao litoral, a produção de petróleo e gás natural na bacia e a instalação de um complexo industrial para a exploração do sal gema pela Dow Química do Brasil.

b) Os inúmeros corpos graníticos que se distribuem nas Regiões de Dobramentos Nordeste e Sudeste, podem proporcionar uma contenção adequada para os rejeitos radioativos. A característica primordial destas rochas é a integridade física que elas proporcionam, quando devidamente selecionadas, e baseada na estabilidade geológica intrínseca dessas formações.

Os fatores que podem contribuir para essa praticabilidade na Região de Dobramentos Nordeste referem-se à ampla distribuição geográfica desses corpos e à provável ausência de águas subterrâneas para profundidades superiores a 100 metros onde já não ocorrem espaços vazios ou fraturas em volume considerável. A posição morfológica elevada que assumem os granitos em relação à topografia geral, pode representar um aspecto desfavorável. A ocorrência de inúmeros abalos sísmicos associados à complexa estrutura tectônica que incluem enormes dobramentos e extensas falhas não constituem problemas sérios uma vez que os sismos mais consideráveis se concentraram em uma região, na localidade de Pereiro.

O grande número de corpos graníticos na Região de Dobramentos Sudeste e a probabilidade de não ocorrer águas subterrâneas a profundidades superiores a 150 metros devido ao fechamento das diáclases por compressão ou preenchimento, constituem seus principais aspectos favoráveis. Uma característica dos corpos graníticos que pode torná-los impraticáveis, para fins de deposição, refere-se à morfologia muito acidentada assumida pelos granitos nesta região. As áreas correspondentes às porções NE do Estado de São Paulo e SW do Estado do Rio de Janeiro não apresentam condições favoráveis quanto ao aspecto tectônico e sísmico já que todo o bloco está seccionado por várias falhas com centenas de quilômetros de extensão e tem se registrado na região um grande número de eventos sísmicos.

Quanto ao aproveitamento econômico das rochas graníticas nas Regiões de Dobramentos Nordeste e Sudeste não há restrições para o uso dessas rochas como corpo para deposição porque, atualmente, são raras as explorações de granitos para extrair as mineralizações a elas associadas e não são intensas as lavras dos granitos utilizados na construção civil.

c) O basalto da Formação Serra Geral, que ocorre na Bahia do Paraná

pode ser atraente para fins de deposição de rejeitos.

Os fatores que permitem tal viabilidade são, a extensão areal que cobre grande parte da bacia e espessura das camadas que chega a atingir até 1.529 metros. A feição geomorfológica das rochas basálticas correspondente a um planalto moderado pode também constituir um aspecto favorável. A relativa estabilidade tectônica e a existência de sistemas de falhas e de extensos falhamentos isolados, no entanto, não chegam a inviabilizá-las. As rochas basálticas são pouco exploradas como recursos minerais. O único inconveniente para esses basaltos é a alta incidência de fraturas, provavelmente originados durante a consolidação do derrame, que podem acarretar a circulação da água subterrânea.

A Tabela 5.1 mostra o resumo dos aspectos favoráveis e desfavoráveis das rochas e das regiões em estudos.

5) Pelo exposto anteriormente, podemos obter a seguinte conclusão:

Em geral, os locais para a deposição dos rejeitos, principalmente de alta atividade, observados as condições geológicas, devem situar-se próximos da usina de reprocessamento. Nota-se, no entanto, que muitas vezes o processo de localização de sítios transcende a área técnica tornando-se uma decisão política a qual foge do escopo desse trabalho.

Se, conforme previsto, a usina de reprocessamento localizar no Estado do Espírito Santo, a alternativa mais viável seria recorrer-se aos basaltos da Formação Serra Geral, da Bacia do Paraná. O basalto, ao contrário dos granitos, geomorfologicamente não constitui forma acentuadas de relevo, como montanhas. O sal gema, principalmente, da Bacia de Sergipe-Alagoas, poderia constituir uma outra opção, no entanto, deve ser observado que ele, assim como a silvita e outros sais associados representam, atualmente, recursos minerais de interesse para outros fins diversos da energia nuclear. Tanto que o sal gema já se encontra em fase de lavra e a silvita associado ao sal gema brevemente será explorada durante décadas o que impediria a utilização desses sais nesse período.

Deve-se salientar que a seleção de locais é um processo interativo e dependente de vários fatores entre eles, a localização da usina de reprocessamento e o reator nuclear. Assim, no momento em que for decidido a localização de tais unidades, tornar-se-á necessário desencadear os procedimentos discutidos anteriormente para a seleção de locais.

ROCHAS	REGIÕES	ASPECTOS	
		FAVORÁVEIS	DESFAVORÁVEIS
SAL GEMA	Bacia de Sergipe-Alagoas	<ul style="list-style-type: none"> - Topografia moderada - Ausência de atividades sísmicas - Inexistência de água subterrânea 	<ul style="list-style-type: none"> - Localização próxima ao litoral - Exploração de petróleo na bacia - Mineração do sal gema e sais de potássio associados
	Bacia do Recôncavo	<ul style="list-style-type: none"> - Relevo suave - Ausência de água subterrânea 	<ul style="list-style-type: none"> - Localização próxima ao litoral - Produção de gás natural e petróleo na bacia - Instalação de um complexo para a exploração do sal gema
GRANITOS	Região de Dobramentos Nordeste	<ul style="list-style-type: none"> - Ampla distribuição geográfica - Ausência de água subterrânea para profundidades acima de 100 metros - Pouco explorado como recurso mineral 	<ul style="list-style-type: none"> - Posição morfológica elevada assumida pelos corpos graníticos
	Região de Dobramentos Sudeste	<ul style="list-style-type: none"> - Grande número de corpos graníticos - Inexistência de água subterrânea para profundidades superiores a 150 metros - Pouco explorado economicamente 	<ul style="list-style-type: none"> - Morfologia muito acidentada assumida pelos corpos graníticos - Grande número de eventos sísmicos e presença de extensas falhas *
	Bacia do Paraná	<ul style="list-style-type: none"> - Grande extensão areal - Grande espessura - Planalto moderado - Relativa estabilidade sísmica - Mineração muito rara 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta incidência de fraturas que podem permitir o movimento de água subterrânea

* Área de estudo restrita às porções NE do Estado de São Paulo e SW do Estado do Rio de Janeiro

TABELA 5.1.-ASPECTOS FAVORÁVEIS E DESFAVORÁVEIS DAS FORMAÇÕES ROCHOSAS AVALIADAS PARA RECEPÇÃO DE DEPOSITOS DE REJEITOS RADIOATIVOS DE ALTA ATIVIDADE.

6) Finalmente, as informações aqui colhidas e estudadas servirão de guia para, numa segunda etapa, realizar-se um estudo de micro-localização de repositórios em locais apropriados.

5.2 - Sugestões para trabalhos futuros

1) Estudo das interações físico-químicas das rochas graníticas, basálticas e de sal gema brasileiras com os rejeitos radioativos.

2) Estudos dos efeitos geotérmicos sobre os rejeitos radioativos.

3) Análise dos riscos potenciais ao meio ambiente em casos de acidentes nos repositórios provocados por atividades sísmicas.

4) Estudo das possibilidades futuras de incursões marinhas e seus efeitos nos repositórios localizados próximos ao litoral.

5) Estudos de mineração de radionuclídeos em formações geológicas selecionadas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ÅKESSON, B.A. & HÖK, J.H. Rock cavern with clay barrier for disposal of nuclear wastes. In: STORAGE in excavated rock caverns, symposium on..., held in Stockholm, September 5-8, 1977. (preprint).
2. ALLEMAN, R.T.; MOORE, R.L.; UPSON, U.L. Radiat heat spray calcination studies. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Treatment and storage of high level radioactive wastes: proceedings of a symposium held in Vienna, 8-12 Oct. 1962. Vienna, 1963. p.217-32.
3. ALMEIDA, F.F.M. de Origem e evolução da plataforma brasileira. Rio de Janeiro, DNPM Divisão de Geologia e Mineralogia, 1967. (Boletim, 241).
4. ALTERNATIVES for managing wastes from reactors and post-fission operations in the LWR fuel cycle. Washington, D.C. ERDA, May. 1976 (ERDA-76-43).
5. ARRUDA, P.R. Relatório da visita às minas de sal de Asse, Alemanha. Rio de Janeiro, CNEN, 1974. (Relatório de visita).
6. AZAMBUJA, J. de C.; SILVA, Z.C. da Perfil analítico dos mármore e granitos. Rio de Janeiro, DNPM, 1977. v.1. (Boletim, 38).
7. BAHIA. Governo do Estado da Bahia. Secretaria de Minas e Energia. Coordenação da produção mineral. Anuário de Mineração, ano 5. Salvador 1981.
8. BERROCAL, J.; BARROS, J.; OLIVEIRA, R. Sismotectônica do nordeste brasileiro. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Geologia: anais do 25º congresso brasileiro de geologia, São Paulo, setembro, 1971. p-129-37.
9. BEURLIN, K. A estrutura geológica do nordeste do Brasil. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Geologia: anais do 21º congresso brasileiro de geologia, Curitiba, novembro, 1967. p-150-8.
10. BOURKE, P.J. & HODOKINSON, D.P. Granitic depository for radioactive waste, size, shape and depth v. temperature. Harwell, Atomic Energy Research Establishment, UKAEA Res. Group., Mar. 1977. (AFRE-M-2900).
11. BRASIL. Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais. Projeto Sudeste do Estado de São Paulo. Relatório geológico preliminar, folha Itararé. Rio de Janeiro, DNPM/CPRM, 1972. v.1, SG-22-X-B.

12. BRASIL. Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais. Projeto Sudeste do Estado de São Paulo. Relatório geológico final, folha de Castro, parcial. Rio de Janeiro, DNPM/CPRM, abril 1974. v.3, SF-22-XA.
13. BRASIL. Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais. Projeto Sudelpa. Relatório final. Rio de Janeiro, fevereiro 1975. v.1.
14. BRASIL. Conselho Nacional do Petróleo. Atualidades do Conselho Nacional do Petróleo. Brasília D.F., maio/junho, 1979. v.11, p.16-43.
15. BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. Anuário mineral brasileiro, ano 9. Brasília, D.F., 1980.
16. BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria das Minas e Energia do Estado da Bahia. Coordenação da Produção Mineral. Projeto cadastramento de ocorrências minerais do Estado da Bahia. Área de Salvador. 1974. v.6.
17. BRASIL. PETROBRÁS. Relatório anual consolidado. Rio de Janeiro, 1979.
18. BRASIL. SUDENE. Divisão de hidrologia. Salinização das águas subterrâneas no centro do polígono das secas do nordeste brasileiro. Estudo hidrológico no Oeste de Pernambuco e Norte da Bahia. Recife, 1973. v.1, p. 55. (Hidrologia, 46).
19. BRASIL. SUDENE. Divisão de hidrologia. Estudo hidrológico para abastecimento de Serrinha, Bahia. Recife, 1968. (Hidrologia, 17). (Relatório, programa).
20. BRASIL. SUDENE. Divisão de hidrologia. Inventário hidrológico básica do Nordeste, Jaguaribe, SO. Recife, 1971. Folha nº 14, p. 69 (Hidrologia, 31).
21. BRASIL. SUDENE. Divisão de hidrologia. Inventário hidrológico básico do Nordeste. Recife, 1978. Folha nº 21, p.19. (Hidrologia, 54).
22. BRASIL. SUDENE. Divisão de hidrologia. Inventário hidrológico básico do Nordeste, Aracaju, SO. Recife, 1972. Folha nº 24 (Hidrologia, 26).
23. BRITO NEVES, B.B. de Elementos da geologia pré-cambriana do Nordeste Oriental. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Geologia: anais do 27º congresso brasileiro de geologia, Aracaju, outubro 1973. v.4, p.105-139.

24. BRITO NEVES, B.B. de Regionalização geotectônica do pré-cambriano nordestino. São Paulo, 1975. (Tese de doutoramento, Instituto de Geociências, USP).
25. BRITO NEVES, B.B. de & PESSOA, R.J.R. Consideração sobre rochas graníticas do Nordeste Oriental. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Geologia: anais do 28º congresso brasileiro de geologia, Porto Alegre, Outubro 1974. v.4, p.143-57.
26. BROWN, R.E. & PARKER, H.M. Disposal of liquid waste to the ground. In: UNITED NATIONS. Peaceful uses of atomic energy: proceedings of the international conference on... held in Geneva, 8-20 Aug. 1955. v.9 Reactor technology and chemical processing. New York, 1956. p.669-75.
27. BROWN, R.E.; McCONIGA, M.W.; ROWE, P.P. Geological and hydrological aspects of the disposal of liquid radioactive wastes. In: UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION. Sanitary engineering aspects of the atomic energy industry held at Cincinnati Ohio, Dec. 6-9, 1955. Oak Ridge Tenn., Technical Information Service Extension, 1956. n.413. (TID-7517).
28. CALDASSO, A.L. Geologia da quadrícula E-D88, folha São João do Cariri, Ph. Recife, SUDENE, 1968. (Geologia regional, 10).
29. CHERRY, J.A.; GRISAK, G.E.; JACKSON, R.E. Hydrological factors in shallow subsurface radioactive waste management in Canada. In: LAND for waste management: proceedings of the international conference on: ..., held in Ottawa, Canadá, Oct. 1-3, 1973. (Preprint).
30. COHEN, B. The disposal of radioactive wastes from fission reactors. Sci. Am., 236(6): 21, 1977.
31. DUNSTER, H.J. The discharge of radioactive waste products into the Irish sea. Pt.2. The preliminary estimate of the safe daily discharge. In: UNITED NATIONS. Peaceful uses of atomic energy: proceedings of the international conference, on..., held in Geneva 8-20 Aug., 1955, v.9 : Reactor technology and chemical processing. 1956. p. 712-5.
32. EBERT, H. Geologia do Alto Seridó. Recife, SUDENE, 1969. (Geologia regional, 11).
33. EKREN, E.B. Geologic and hidrologic considerations for various concepts of high level radioactive waste disposal in Conterminous United States. Oak Ridge Ten., USAEC Technical Information Center, 1974. (TID-27188).

34. ENVIRONMENTAL survey of the reprocessing and waste management portions of LWR fuel cycle. Washington D.C. NUREG, Oct. 1976. (NUREG-6116).
35. FAIR, D.R.R. & MacLEAN, A.S. The disposal of waste in the sea. Pt.3. The experimental discharge of radioactive effluents. In: UNITED NATIONS. Peaceful uses of atomic energy: proceedings of the international conference on..., held in Geneva, 8-20 Aug. 1955. v.9: Reactor technology and chemical processing. New York, 1956. p.718-21.
36. FARINA, M. Perspectivas metalogenéticas de alguns granitos pós-orogênicos do nordeste brasileiro. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Geologia do nordeste: atas do 8º simpósio, Campina Grande, Pb., novembro 1977. n.121-9.
37. FIGUEIREDO, J.T.N.; VASCONCELOS CHAVES, L.M.; DÁLIA, F. J.; VASCONCELOS, F.M. Relatório sobre água subterrânea do nordeste. Rio de Janeiro, DNPM, 1964. (Boletim 120).
38. FÚLFARO, V.J. Tectônica da faixa estrutural do Paranapanema. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Geologia: 28º congresso brasileiro de geologia, Porto Alegre, outubro 1974. p.537-40. (Boletim,1) (Resumo das comunicações).
39. COLIMAN, M.I.; SERVIZI, J.A.; DANIELS, R.S.; TEBBUT, T.H.Y.; BURNS, R.T.; LAUDERDALE, R.A. Retention of fission products in ceramic-glass type fusions. In: UNITED NATIONS. In: Peaceful uses of atomic energy: proceedings of the international conference on..., held in Geneva 1-13 Sept., 1958. v.18: waste treatment and environmental aspects of atomic energy. 1958. p. 27-32.
40. GRAY, D.A. Disposal of highly active solid radioactive wastes into geological formations. Relevant geological criteria for the United Kingdom. London, Inst. of Geological Sciences, 1976. (IGS-76/12).
41. GUIDICINI, G.; CAMPOS, J. de O. Notas sobre a morfogênese dos derrames basálticos. Bol. Soc. Bras. Geol., 17(1):15-28, 1968.
42. FABERLEHNER, H. Análise sismotectônica do Brasil. Notas explicativas sobre o mapa sismotectônico do Brasil e região correlacionadas. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. Geologia de engenharia: anais do 2º congresso brasileiro de geologia de engenharia, São Paulo, novembro, 1978. v.1, p.297-329.

43. HANDLING and storage of spent light water power reactor fuel. Washington D.C. NUREG, Mar. 1978. (NUREG-0404).
44. HAUSMAN, A. Comportamento do freático nas áreas basálticas do Rio Grande do Sul. Bol. Paranaense Geogr., (18-20): 177-214, 1966.
45. MASUI, Y.; CARNEIRO, C. dal R.; COIMBRA, A.M. The Ribeira folded belt. Rev. Bras. Geocien., 5(4): 257-66, 1975.
46. HESS, H.H. The disposal of radioactive waste on land. Trans. Am. Geophys. Union, 39: 467-8, 1958.
47. HOLCOMB, W.F. A history of ocean disposal of packaged low-level radioactive waste. Nucl. Saf., 23(2): 183-97, 1982.
48. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO: Geologia da região administrativa 3 (Vale do Paraíba) e parte da região administrativa 2 (litoral) do Estado de São Paulo. São Paulo, IPT, 1978.
49. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radioactive waste disposal into the sea. Vienna, 1961. (IAEA-SS-5).
50. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radioactive waste disposal into the ground. Vienna, 1965. (IAEA-SS-15).
51. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Storage tanks for liquid radioactive wastes: their design and use. Vienna, 1972. (IAEA-SS-135).
52. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Underground disposal of radioactive waste. Vienna, 1981. (IAEA-SS-54).
53. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Site selection factors for repositories of solid high level and alpha bearing wastes in geological formations. Vienna, 1977. (TRS-177).
54. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Site investigations for repositories of solid radioactive waste in deep geological formations. 1982. (TRS-215).
55. KEGEL, W. A estrutura geológica do nordeste do Brasil. Rio de Janeiro, DNPM, Divisão de Geologia e Mineralogia. (Boletim, 227).

56. KUHN, K.; ALBRECHT, E.; KOLDITZ, H.; THIELEMANN, K. Recent results and developments on the disposal of radioactive wastes in the Asse salt mine. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Management of radioactive wastes from the nuclear fuel cycle: proceedings of a symposium on..., held in Vienna, 22-26 march, 1976. v.2 p.287-302.
57. LAGUNA, W. de & BLOMEKE, J.O. The disposal of power reactor waste into deep well. Oak Ridge, Tenn. Oak Ridge National Lab. Oct. 1957. (ORNL-CF-576-23).
58. LEINZ, V. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do Sul do Brasil. São Paulo, Faculdade de Ciências e Letras - USP, 1949. (Boletim, 103 Geologia, 5).
59. LEINZ, V.; BARTORELLI, A.; ISOTTA, C.A.L. Contribuição ao estudo do magnetismo basáltico mesozóico da Bacia do Paraná. An. Acad. Bras. Cienc., Brasil 40(Supl.): 167-81, 1968.
60. LEINZ, V. & SALLENTEIN, B. Água subterrânea no Estado de São Paulo e regiões limítrofes. Bol. Soc. Bras. Geol., 11(1): 27-36, 1962.
61. LEITE, D.C. Investigações sobre as possibilidades de sal gema na parte sudoeste da bacia sedimentar do Recôncavo. Bol. tec. PETROBRÁS, 11(2): 231-42, 1968.
62. LINCOLN, R.C. & SNYDER, A.W. Disposal in continental geologic formations. Sandia Labs. Albuquerque, N. Mex., 1976. (SAND-76-5568).
63. LOPEZ PEREZ, B.; RAMOS SALVADOR, I.; GONZALES DE LA HUEBRA, A. La gestion de los residuos radiactivos. Energ. Nucl. Madrid 21(106):111-122, 1977.
64. LOMENICK, T.F. Terminal storage of radioactive waste in geologic formations. In: DUGGAN, J.I. & CLOUTIER, R.J. eds. Energy source of the future: conference on..., held in Oak Ridge, 5-23 julho, 1976. 1977. p.405-22. (CONF-760744).
65. McCLAIN, W.C.; BRADSHAW, R.L.; EMPSON, F.M. Disposal of high level solidified wastes in saltmines. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Disposal of radioactive waste into the ground: proceedings of the symposium on..., held in Vienna, 29 May-2 June 1967. 1967. p.549-62.

66. MAWSON, C.A. Waste disposal into the ground. In: UNITED NATIONS. Peaceful uses of atomic energy: proceedings of the international conference on..., held in Geneva 8-20. Aug. 1955. v.9 Reactor technology and chemical processing. New York, 1956. p.676-8.
67. MAWSON, C.A. & RUSSEL, A.E. Canadian experience with a national waste management facility. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Management of low and intermediate level radioactive waste: proceedings of the international conference held in Aix-en-Provence-France, 7-11 September 1970. 1971. p.183-94.
68. MELDONIAN, N.L. Previsão da demanda de transporte de materiais radioativos para o programa nuclear brasileiro e os aspectos de segurança. São Paulo, 1979. (Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).
69. MELO, Z.F. Evoluções finais do ciclo geotectônico brasileiro no nordeste Oriental. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Geologia: Anais do 30º congresso brasileiro de geologia, Recife, Outubro 1978. p.2438-51.
70. MORGAN, J.M. Considerations in evaluating a burial ground for solid wastes. In: UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION. Sanitary engineering aspects of the atomic energy industry, held at Cincinnati, Ohio, December 6-9, Oak Ridge, Tenn., Technical Information Service Extension, 1956. p.243-63. (TID-7517).
71. MUHLMANN, H.; SCHNEIDER, R.L.; TOMMASI, F.; MEDEIROS, R.A.; DAIMON, R.F.; NOGUEIRA, A.A. Revisão estratigráfica da bacia do Paraná. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Geologia: Anais do 28º congresso brasileiro de geologia, Porto Alegre, Outubro 1974. v.1, p.41-65.
72. NACE, R.L. Contributions of geology to the problem of radioactive waste disposal. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Disposal of radioactive wastes: proceedings of the scientific conference on..., held in Monaco, 16-21 November, 1959. Vienna, 1960. v.2, p.457-80.
73. NORTHFLEET, A.A.B.; MEDEIROS, R.A.; MUHLMANN, A. Reavaliação dos dados litoestratigráficos da Bacia do Paraná. Bol. Téc. PETROBRÁS, 12 (3): 291-346, 1969.

74. PECKMAN, A.E. & BELTER, W.C. Consideration for selection and operation of radioactive waste burial sites. In: MORGAN, JR., J.M.; JAMISON, D.K.; STEVENSON, J.D. eds. Ground disposal radioactive wastes: 2nd conference proceedings, held at Atomic Energy of Canadá, 26-29 September 1961. 1962. p.428-36. (TID-7628).
75. PETROMISA. Relatório anual. Rio de Janeiro, 1981. (Suplemento).
76. PIPER, A.M. Hypothetical prototype sites of repositories for radioactive wastes: certain metamorphic rocks and midstone. Oak Ridge, Tenn., Y-12 Plant, Mar., 1975. (Y/OWI/sub/3745/5).
77. REBOUÇAS, A.C. Recursos hídricos subterrâneos da Bacia do Paraná. São Paulo, 1976. (Tese de livre docência, Instituto de Geociências - USP).
78. RENN, C.E. Disposal of radioactive wastes at sea. In: UNITED NATIONS. Peaceful uses of atomic energy: proceedings of the international conference on... held in Geneva, 8-20 August, 1955 v.9: reactor technology and chemical processing. New York, 1956. p.718-21.
79. RICHARDSON, R.M. Northeastern burial ground studies. In: MORGAN JR. J.M.; JAMISON, D.K.; STEVENSON, J.D. eds. Ground disposal of radioactive wastes: 2nd conference proceedings held at Atomic Energy of Canadá, Chalk River, 26-29 September 1961. 1962. v.2, p.460-1.
80. RODGER, W.A. & FINEMAN, P. Ultimate disposal of radioactive waste. Oak Ridge, Tenn. USAEC Technical Information Center, May, 1957. (TID-7534).
81. RUEGG, N. Aspectos geoquímicos mineralógicos e petrográficos de rochas basálticas da Bacia do Paraná. São Paulo, 1969. (Tese de doutoramento, Instituto de Geociências, USP).
82. SANTOS, E.J. Contribuição ao estado geológico da quadrícula de Aç. Recife, SUDENE, 1968. (Geologia Regional,6).
83. SANTOS, J.M.E. Análise quantitativa dos rejeitos radioativos a serem gerados no programa nuclear brasileiro. São Paulo, 1979. (Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).
84. SARTORI, P.L.; MACIEL, Fº, C.; MENEGOTTO, E. Contribuição ao estudo das rochas vulcânicas da Bacia do Paraná na região de Sta. Maria, R.S. R. Bras. Geocienc., 5(3): 141-59, 1975.

85. SELIGMAN, H. The disposal of waste products in the sea. Part. 1. In: UNITED NATIONS, New York. Peaceful uses of atomic energy: proceedings of the international conference... held in Geneva, 8-20 August, 1955, v.9: Reactor technology and chemical processing. 1956. p.701-11.
86. SIMPSON, E.J. Investigations of the movement of radioactive substances in the ground. Part 1. Geohydrology and general considerations. In: MORGAN JR, J.M.; JAMISON, D.K.; STEVENSON, J.D. eds. Ground disposal of radioactive wastes: 2nd conference proceedings held in Atomic Energy of Canada, 26-29 September 1961. 1962. p.145-64. (TID-7628).
87. SIMPSON, E.S. Summary of current geological research in the United States of America pertinent to radioactive waste disposal on land. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Disposal of radioactive wastes: proceedings of the scientific conference on... held in Monaco, 16-21 November, 1959. Vienna, 1960. v.2 p.517-531.
88. SINELLI, O. Vulnerabilidade dos aquíferos subterrâneos da região NNE do Estado de São Paulo. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Geologia: Anais do 28º congresso brasileiro de geologia, Porto Alegre, Outubro 1974. v.7 p. 89-98.
89. SIQUEIRA, L. Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino. Água subterrânea, 2(9): 1-29, 1967.
90. SPITSYN, V.; BALUKOVA, V.D.; ERMAKOVA, T.A. Studies of sorption and migration of radioactive elements in soils. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Treatment and storage of high-level radioactive wastes: proceedings of a symposium held in Vienna, 8-12 Oct. 1962. Vienna, 1963. p. 569.
91. STEIN, D.P.; MELO, M.S. de; BRISTICHI, C.A.; ALMEIDA, M.A. de; HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; ALMEIDA, F.F.M. de. Geologia de parte dos vales dos rios Paranã e Paranapanema. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Geologia: atas do 2º simpósio regional de geologia, Rio Claro, 1979. v.2 p.291-306.
92. TAMMENAGI, H.Y. Geological disposal of radioactive wastes. The canadian development program. Chalk River, Atomic Energy of Canadá, May., 1976. (AFCL-3392).

93. TEIXEIRA, A.A.; SALDANHA, L.A.R. Bacia salífera aptiana de Sergipe-Alagoas, ocorrências de sais solúveis. Bol. téc. PETROBRÁS, 11(2):221-30, 1968.
94. THEIS, C.V. A review of the ground water geology of the major waste producing sites. In: UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION. Sanitary engineering aspects of the atomic energy industry, held in Cincinnati, Ohio, December, 6-9, 1955. Oak Ridge, Tenn., Technical Information Service Extension, 1956. p.116. (TID-7517).
95. THEIS, C.V. Problems of ground disposal of nuclear wastes. In: UNITED NATIONS. Peaceful uses of atomic energy: proceedings of the international conference on... held in Geneva 5-20 August, 1955. v.9 : Reactor technology and chemical processing. 1956. p.679-83.
96. TOGNA, R.J.B.D. Estudo das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. R. Água Subterrânea. 1(3): 19-52, 1973.
97. VAN, D. & FOSTER, W.O. Disposal of radionuclides in the sea. Inst. At. Energy Agency Bull., 21(4): 24-31, 1979.
98. WERNICK, E.; PENALVA, F. Contribuição ao conhecimento das rochas granitóides do sul do Brasil. Rev. Bras. Geocien., 8(2): 113-33, 1978.
99. WINSHE, W.E.; DAVIS, JR; M.W.; GOODLETT, C.B.; OCCHIPINTI, E.S.; WEBSTER, D.S. Calcination of radioactive waste in molten sulphur. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Treatment and storage of high-level radioactive wastes: proceedings of the symposium on... held in Vienna, 8-12 October, 1962. 1963. p.195-216.
100. WITKONSKI, E.J. Operating experience in the disposal of radioactive wastes in open pits. In: UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION. Sanitary engineering aspects of the atomic energy industry conference held in Cincinnati, Ohio, December, 6-9, 1955. Oak Ridge Tenn., Technical Information Service Extension, 1956. p.105. (TID-7517).
101. ZERBY, C.D. & McCLAIN, W.C. Waste isolation in geologic formation in the USA. Oak Ridge, Tenn., Y-12 Plant, 1976. (Y-OWJ-7).
102. ZIMAKOV, P.; KOLYCHEV, B.; KOLICHENKO, V.V.; MARTINOV, Y.P. The behaviour of radioisotopes incorporated in glass blocks. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Treatment and storage of high level radioactive wastes: proceedings of the symposium on: held in Vienna, 8-12 October 1962. p.397-410.

APÊNDICE A

Neste apêndice, apresentamos o Mapa Sismotectônico do Brasil no qual aparecem as principais falhas e os epicentros dos sismos / 42 /.

