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

# ANÁLISE PRELIMINAR SOBRE A DISPOSIÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS DE ALTA ATIVIDADE EM FORMAÇÕES GEOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

LUÍS ANTONIO TERRIBILE DE MATTOS

**Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares como parte dos requisitos para obtenção do grau de "Mestre - Área de reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear".**

**Orientador: Dr. Rui Ribeiro Franco**

**São Paulo**
**1981**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

# ANÁLISE PRELIMINAR SOBRE A DISPOSIÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS DE ALTA ATIVIDADE EM FORMAÇÕES GEOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

Luís Antonio Terribile de Mattos

Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares como parte dos requisitos para obtenção do grau de "Mestre – Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear"

I. E. A.
N.º 16606

Orientador: Dr. Rui Ribeiro Franco

SÃO PAULO
1981

A meus pais e
a Rosângela

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Rui Ribeiro Franco pela orientação e colaboração prestadas no transcorrer de nossas pesquisas .

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares por tornar possível a realização deste trabalho .

Ao Dr. José Antonio Diaz Dieguez pela colaboração .

À Sra. Sueli Anselmo Alves Heringer e à Srta. Albertisa Alves Pereira pelos trabalhos de datilografia .

Aos amigos do Centro de Engenharia Nuclear pelos incentivos .

Aos geólogos do Grupamento de Geologia Geral do Departamento de Mineralogia e Geologia Aplicada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas pelo apoio recebido .

Aos Drs. Celso de Barros Gomes e Aldo da Cunha Rebouças, do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, pelas sugestões .

Ao colega Cyro Teiti Enokihara pelas sugestões e informações .

A todos aqueles que direta e indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

# "ANÁLISE PRELIMINAR SOBRE A DISPOSIÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS DE ALTA ATIVIDADE EM FORMAÇÕES GEOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO"

Luis Antonio Terribile de Mattos

## RESUMO

Diversos estudos mostram que as formações geológicas profundas são a solução mais promissora, tanto técnica como economicamente, para a disposição segura dos rejeitos radioativos de alta atividade produzidos pela indústria nuclear.

Neste trabalho faz-se um levantamento das informações existentes sobre as rochas basálticas e graníticas do Estado de São Paulo, como também sobre suas áreas de ocorrência, com a finalidade de obter-se dados necessários ao estudo da viabilidade dessas rochas para a disposição final de rejeitos radioativos de alta atividade, que futuramente serão produzidos nas instalações nucleares brasileiras .

Os dados assim obtidos são analisados em função de alguns parâmetros fornecidos pela Agência Internacional de Energia Atômica, visando à obtenção das características favoráveis e desfavoráveis dos basaltos e dos granitos, e áreas de ocorrência respectivas em território paulista, para fins de disposição de rejeitos radioativos de alta atividade .

Essa caracterização, preliminar e regional, não representa um resultado capaz de viabilizar, ou não, definitivamente essas rochas como repositórios de rejeitos radioativos. Antes de tudo, ela pretende representar subsídio para um conjunto posterior de análises mais pormenorizadas, de campo e laboratório, necessárias para a execução de um provável projeto de eleição de locais para a disposição geológica de rejeitos radioativos de alta atividade .

# "PRELIMINAR ANALYSE ON THE DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES IN GEOLOGICAL FORMATIONS OF SÃO PAULO STATE, BRAZIL"

Luis Antonio Terribile de Mattos

## ABSTRACT

Several studies show that deep geological formations are the most promising solution - technical and economical - for the safe disposal of the high-level radioactive wastes produced by the nuclear industry .

In order to obtain the necessary information to assess on the use of geological sites in Brazil - for the disposal of high-level radioactive waste generated by the brazilian nuclear industry - a careful survey on the basalt and granite rocks of São Paulo State was made .

The data obtained were evaluated according guidelines stablished by the International Atomic Energy Agency. The favourable and unfavourable characteristics of the basalts, granites and their respective occurrence areas in the "paulista" territory - as potential waste disposal sites - were analysed .

This preliminar and regional characterization isn't a conclusive study whether these two rocks types are definitively the most suitable geological formations for use as nuclear waste repository or not. It is the subsidy for a more detailed analysis. Other factors such as social, political and economical aspects, ecological effects, engineering geology, heat generation rate of the waste, type of radioation emitted and corrosive nature of the waste must also be taken in account .

ÍNDICE

PAG.

CAPÍTULO I INTRODUÇÃO ..... 1

1.1. Generalidades ..... 1

1.2. Objetivos ..... 3

CAPÍTULO II O CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR E A GERAÇÃO DE REJEITOS ..... 4

2.1. O reprocessamento do combustível nuclear ..... 8

2.2. O rejeito radioativo de alta atividade e suas características ..... 10

2.3. Tratamento dos rejeitos de alta atividade ..... 16

Evaporação ..... 16

Estocagem em tanques ..... 20

Solidificação ..... 23

Estocagem provisória ..... 26

Disposição final ..... 28

CAPÍTULO III ALTERNATIVAS DE CONFINAMENTO DO REJEITO DE ALTA ATIVIDADE ..... 30

3.1. Confinamento no meio geológico ..... 30

Soalho oceânico ..... 30

Camadas polares ..... 31

Formações geológicas continentais ..... 32

3.2. Confinamento pela eliminação ..... 33

Disposição extraterrestre ..... 33

Transmutação ..... 33

CAPÍTULO IV A DISPOSIÇÃO EM FORMAÇÕES GEOLÓGICAS DO REJEITO DE ALTA ATIVIDADE ..... 35

4.1. Disposição em cavidades subterrâneas ..... 35

4.2. Disposição em poços profundos ..... 38

4.3. As Formações geológicas de maior interesse ..... 41

4.3.1. Evaporitos ..... 41

Halita ..... 41

Outros evaporitos ..... 44

4.3.2. Outros depósitos sedimentares ..... 44

Formações argilosas ..... 44
Formações calcárias ..... 44
Sedimentos arenosos ..... 46
4.3.3. Rochas Ígneas e metamórficas ..... 48
Rochas ígneas ..... 48
Granitos ..... 48
Basaltos ..... 48
Tufos vulcânicos ..... 50
Rochas metamórficas ..... 50

CAPÍTULO V CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE LOCAIS ..... 52

5.1. Topografia ..... 52
5.2. Tectônica e sismicidade ..... 53
5.3. Estratigrafia ..... 54
5.3.1. Profundidade da zona de disposição ..... 54
5.3.2. Espessura e extensão das camadas..... 55
5.3.3. Homogeneidade ou pureza ..... 55
5.3.4. Natureza e extensão das camadas encaixantes ..... 56
5.4. Estruturas ..... 57
5.4.1. Mergulho ou inclinação das camadas ..... 57
5.4.2. Juntas e falhas ..... 58
5.4.3. Diapirismo ..... 58
5.5. Propriedades físicas e químicas ..... 59
5.5.1. Permeabilidade, porosidade e dispersividade ..... 59
5.5.2. Inclusões de gases e líquidos ..... 60
5.5.3. Comportamento mecânico das rochas ..... 61
5.5.4. Efeitos térmicos ..... 62
5.5.5. Capacidade de absorção (ou troca) ..... 63
5.5.6. Minerais formadores de água ..... 63
5.5.7. Efeitos de radiação ..... 64
5.6. Hidrologia ..... 65
5.6.1. Águas de superfície ..... 65
5.6.2. Águas subterrâneas ..... 66
Natureza e ocorrência ..... 66
Direção, velocidade e volume ..... 67
5.7. Eventos geológicos futuros ..... 68

5.8. Condições gerais de geologia e engenharia ..... 69
5.9. Considerações econômicas e sociais ..... 70

CAPÍTULO VI AS ROCHAS BASÁLTICAS E GRANÍTICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO ..... 71

6.1. Basaltos ..... 71
6.1.1. Tectônica ..... 78
6.1.2. Texturas e estruturas ..... 81
6.1.3. Sedimentos intertrapeanos ..... 84
6.1.4. Descontinuidades ..... 87
Primárias ..... 87
Secundárias ..... 87
6.1.5. Falhamentos ..... 87
6.1.6. Geomorfologia ..... 89
6.1.7. Hidrogeologia ..... 92
6.1.8. Recursos naturais ..... 94

6.2. Granitos ..... 95
6.2.1. Tectônica ..... 101
6.2.2. Grandes falhamentos ..... 103
6.2.3. Sismicidade ..... 105
6.2.4. Geomorfologia ..... 106
6.2.5. Hidrogeologia ..... 115
6.2.6. Recursos minerais ..... 116

CAPÍTULO VII RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 118

7.1. Rochas basálticas ..... 118
7.1.1. Topografia ..... 118
7.1.2. Estabilidade tectônica e sísmica ..... 118
7.1.3. Profundidade de disposição ..... 119
7.1.4. Estruturas ..... 119
7.1.5. Hidrogeologia ..... 121
7.1.6. Recursos naturais ..... 121

7.2. Rochas graníticas ..... 122
7.2.1. Topografia ..... 122
7.2.2. Estabilidade tectônica e sísmica ..... 122
7.2.3. Falhamentos ..... 123
7.2.4. Hidrogeologia ..... 123
7.2.5. Recursos naturais ..... 124

7.3. Conclusões ..... 124
7.4. Sugestões para trabalhos futuros ..... 125

CAPÍTULO VIII BIBLIOGRAFIA ..... 126

## ÍNDICE DAS FIGURAS

PAG.


FIGURA 2.1. Operações do ciclo do combustível nuclear ..... 5

FIGURA 2.2. Esquema de tratamento do rejeito de alta atividade ..... 17

FIGURA 2.3. Fatores de concentração obtidos, a 20°C, para várias concentrações ácido nítrico na solução de alta atividade ..... 19

FIGURA 2.4. Comportamento da acidez durante a concentração do rejeito líquido de alta atividade ..... 19

FIGURA 2.5. Princípio do "air-lift circulator" ..... 22

FIGURA 2.6. Princípio do "ballast-tank" central e periférico ..... 22

FIGURA 2.7. Tanque de estocagem de rejeitos líquidos de alta atividade e seus componentes principais ..... 24

FIGURA 2.8. Seqüência básica das operações de um processo de solidificação de rejeitos líquidos de alta atividade ..... 24

FIGURA 4.1. Conceito de disposição geológica em cavidades subterrâneas ..... 37

FIGURA 4.2. Conceito de disposição geológica em poços profundos ..... 40

FIGURA 6.1. Mapa de localização da Bacia do Paraná ..... 72

FIGURA 6.2. Mapa de ocorrência das rochas basálticas no Brasil ..... 73

FIGURA 6.3. A Formação Serra Geral no contexto crono-litoestratigráfico da Bacia do Paraná ..... 74

FIGURA 6.4. Isópacas da Formação Serra Geral ..... 76

FIGURA 6.5. Perfís de sondagens : posicionamento e espessuras dos basaltos da Formação Serra Geral ..... 77

FIGURA 6.6. Principais elementos geotectônicos da Bacia do Paraná ..... 80

FIGURA 6.7. Secção típica de um derrame basáltico ..... 83

FIGURA 6.8. Esquema de formação de uma brecha basáltica ..... 85

FIGURA 6.9. Outras formas de ocorrência de material intertrapeano : cunhas, lentes e bolsões ..... 86

FIGURA 6.10. Detalhe da forma de ocorrência de uma "junta-falha" ..... 88

FIGURA 6.11. Províncias geomorfológicas relativas às ocorrências basálticas no Estado de São Paulo ..... 90

FIGURA 6.12. Estruturação da Região de Dobramento Sudeste..... 95
FIGURA 6.13. Compartimentação geotectônica do Pré-Cambriano no Estado de São Paulo : Maciços Medianos e Faixas de Dobramentos ..... 96
FIGURA 6.14. Distribuição dos corpos graníticos principais dentro das Faixas de Dobramentos e Maciços Medianos ..... 98
FIGURA 6.15. Grandes falhamentos do Pré-Cambriano paulista ..... 104
FIGURA 6.16. Províncias geomorfológicas relativas às ocorrências de rochas graníticas no Estado de São Paulo ..... 111
FIGURA 6.17. Posicionamento topográfico dos corpos graníticos principais no Estado de São Paulo ..... 114
FIGURA 7.1. Curva do comportamento da Bacia do Paraná em função das transgressões e regressões marinhas ocorridas durante sua história geológica ..... 120

## ÍNDICE DAS TABELAS

PAG.


TABELA 2.1. Constituintes típicos de uma solução radiativa proveniente da extração com solvente no reprocessamento de combustíveis irradiados em reatores moderados por água leve ..... 11

TABELA 2.2. Radioatividade dos principais produtos de fissão no rejeito de alta atividade ..... 13

TABELA 2.3. Radioatividade (Urânio+Transurânicos e produtos de decaimento) no rejeito de alta atividade após vários períodos de resfriamento ..... 14

TABELA 2.4. Produção de calor no rejeito de alta atividade depois de vários períodos de resfriamento ..... 15

TABELA 6.1. Composição química das rochas basálticas do Estado de São Paulo ..... 79

TABELA 6.2. Sismos ocorridos em São Paulo entre 1560 e 1976 ..... 107

# CAPÍTULO I : INTRODUÇÃO

## 1.1. Generalidades

O crescente aumento do emprego da energia nuclear para a produção de eletricidade, aliado às mudanças no panorama energético mundial, às preocupações pela deterioração do meio ambiente e à ausência de esclarecimento adequado do público em geral, tem levantado suspeita quanto ao isolamento seguro dos rejeitos radioativos produzidos pela indústria nuclear em todo o mundo .

Com exceção daqueles produzidos por explosões nucleares, os rejeitos radioativos gerados pela atividade humana se devem principalmente ao emprego dos combustíveis nucleares em reatores de potência e em menor escala ao uso diversificado de radioisótopos. Outros elementos radioativos estão presentes em nossa biosfera como conseqüência de fenômenos naturais, constituindo-se na maior parte do balanço total de substâncias radioativas existentes em nosso planeta .

Sob o ponto de vista do isolamento desses rejeitos destacam-se aqueles que são produzidos no ciclo do combustível nuclear, desde a obtenção do seu minério até o seu reprocessamento após ter sido queimado no reator. A maior parte dos rejeitos radioativos deve ser disposta na natureza, respeitando-se alguns limites de concentrações estabelecidos internacionalmente para sua liberação, de modo que seu isolamento seguro seja alcançado e não represente perigo de contaminação para o homem e seu ambiente .

Os subprodutos da indústria nuclear podem ser gerados no estado líquido , sólido ou gasoso, contaminados com um ou mais radionuclídeos. Os maiores volumes possuem pequenos níveis de radioatividade e são representados, quando no estado sólido, por metais, vidros, materiais de construção, papéis e roupas. Os rejeitos cujos níveis de radioatividade são mais perigosos são gerados em volumes menores e incluem fontes de radiação gastas, resinas de troca iônica, componentes ativados do reator e soluções provenientes de laboratórios e da usina de reprocessamento do combustível nuclear. São essas soluções geradas no reprocessamento que podem apresentar maiores problemas de contaminação ambiental .

De maneira geral, pode ser afirmado que os rejeitos radioativos gerados

no ciclo do combustível nuclear, excetuando-se o reprocessamento, possuem quantidades pequenas de radioatividade, podendo ser tratados e armazenados com segurança por meio de técnicas já disponíveis. Por outro lado, os rejeitos gerados nas operações de reprocessamento possuem valores de radioatividade bem mais elevados, necessitando de maiores cuidados quanto ao seu armazenamento seguro a longo prazo .

O estudo de técnicas nesse sentido tem sido meta prioritária dos países que adotam a energia nuclear como opção mais viável para a solução de seus problemas energéticos .

Atualmente, os rejeitos radioativos não recicláveis produzidos durante o reprocessamento são armazenados, no seu estado líquido original, em tanques de aço especiais situados em sub-superfície . Esse método, entretanto, tem se mostrado não de todo confiável, principalmente, se argumentarmos que a meia vida de alguns radionuclídeos presentes no rejeito ultrapassa em muito a vida útil desses tanques. A validade desse argumento é demonstrada na prática pela ocorrência de vazamentos nos tanques de armazenamento, que provocam a introdução de quantidades indesejáveis de radioatividade nas camadas de solo adjacentes a essas instalações. Embora trabalhos de monitoração e manutenção tenham sido eficientes em muitos desses casos, tornam-se impraticáveis durante centenas de milhares de anos, tempo esse necessário para certos radionuclídeos presentes nos tanques decaírem a níveis não perigosos .

Se uma proteção a longo prazo é necessária, então, os rejeitos radioativos de longa vida devem ser removidos da superfície da terra, e a solução mais viável hoje, parece ser o seu confinamento em formações geológicas profundas. Tal conceito vem sendo exaustivamente discutido e experimentado em vários países com resultados promissores .

Formações geológicas, por exemplo, salgema, calcário, basaltos e granitos, tem existido durante vários milhões de anos. Em muitos casos fica patente que algumas dessas formações não sofreram alterações significantes, permanecendo impermeáveis à circulação de águas subterrâneas, através dos tempos geológicos. Por meio da extrapolação dos fenômenos do passado e de outros estudos, é possível prever-se futuras alterações de parâmetros geológicos e ambientais no que diz respeito às suas características mais gerais .

Muitos são os fatores que devem ser considerados no estudo de áreas para fins de deposição de rejeitos radioativos. Eles serão vistos em pormenores no decorrer deste trabalho. Deve-se ressaltar que esses fatores não são fixos e que conceitos adicionais precisam ser definidos para cada local analisado de acordo com suas características particulares. Isto porque nem sempre certos critérios podem ser generalizados devido à complexidade de alguns deles; devido às variações existentes entre formações geológicas de um mesmo tipo ou dentro de uma própria formação; devido às diferenças entre os tipos de rejeitos a serem estocados. Além do mais, é comum a ocorrência de variações marcantes de local para local, nas relações estruturais entre uma camada geológica e suas encaixantes .

É muito provável que nenhum local irá preencher satisfatoriamente todos os requisitos necessários em termos de disposição geológica de rejeitos radioativos.A eleição ou rejeição de um dado local estudado irá sempre depender de um balanço criterioso entre os fatores favoráveis e aqueles menos favoráveis encontrados. De qualquer maneira, os locais para o isolamento geológico devem ser selecionados sob o ponto de vista de que não haverá nenhum perigo de exposição às radiações para o público em geral, tanto pelo contato direto ou indireto através dos vários componentes de nosso ecossistema .

## 1.2. Objetivos

A finalidade deste estudo é uma avaliação preliminar e regional das rochas basálticas e graníticas do Estado de São Paulo quanto à possibilidade delas virem a se constituir repositório final do lixo radioativo gerado na indústria nuclear brasileira,principalmente na fase de reprocessamento do combustível, onde serão produzidos os rejeitos mais críticos sob o ponto de vista de contaminação ambiental.

Essa avaliação é feita por meio de um balanço entre os aspectos favoráveis e desfavoráveis estudados para cada tipo de rocha, utilizando-se para isso , critérios preestabelecidos e outros adicionais ligados às características peculiares de cada formação geológica em estudo .

Os resultados aqui obtidos estão longe de representar um caráter definitivo, já que este estudo corresponde aos estádios iniciais de um conjunto de análises, que envolve entre outras coisas, longas pesquisas de campo e em laboratórios, necessárias à eleição de locais para a instalação de repositórios finais de resíduos radioativos .

## CAPÍTULO II : O CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR E A GERAÇÃO DE REJEITOS

O ciclo do combustível nuclear para reatores de água leve é um sistema de operações e instalações onde se realizam a preparação, a utilização e a reconstituição do combustível nuclear (Figura 2.1.) .

As principais fases envolvidas são :

1. Extração do minério de urânio
2. Concentração e Purificação do minério
3. Conversão do $U_3O_8$ em $UF_6$
4. Enriquecimento
5. Conversão do $UF_6$ enriquecido em $UO_2$
6. Fabricação do combustível
7. Irradiação no Reator
8. Reprocessamento do Combustível nuclear

O transporte de materiais entre as instalações e a coleta e estocagem de rejeitos radioativos são operações que podem ser incluídas também no ciclo do combustível nuclear .

O processo de extração do urânio é o mesmo utilizado na mineração convencional, podendo ser executado por meio de aberturas subterrâneas ou a céu aberto, dependendo, principalmente, do modo de ocorrência da jazida em questão. A produção de rejeitos nessa primeira fase do ciclo do combustível nuclear é a mais volumosa, constituindo-se de materiais sólidos, líquidos e gasosos. Os resíduos gasosos e aqueles transportados pelo ar consistem em partículas de urânio em suspensão e do radônio e seus produtos de decaimento. Esses resíduos podem ser liberados na atmosfera sem riscos sérios de contaminação. Os resíduos líquidos são representados pela água de drenagem da jazida contendo urânio dissolvido e na forma de partículas. Os resíduos sólidos compõem a maior parte dos detritos produzidos na extração do urânio a partir de seus minerais, sendo representados pela rocha estéril e mais a cobertura do solo removida no processo da lavra da jazida. O principal elemento radioativo aí presente é o $Ra^{226}$, cuja concentração é bem baixa. A radioatividade dos rejeitos produzidos na mineração do urânio é muito baixa, tanto que em seu tratamento podem ser utilizados os mesmos métodos empregados para materiais não radioativos .

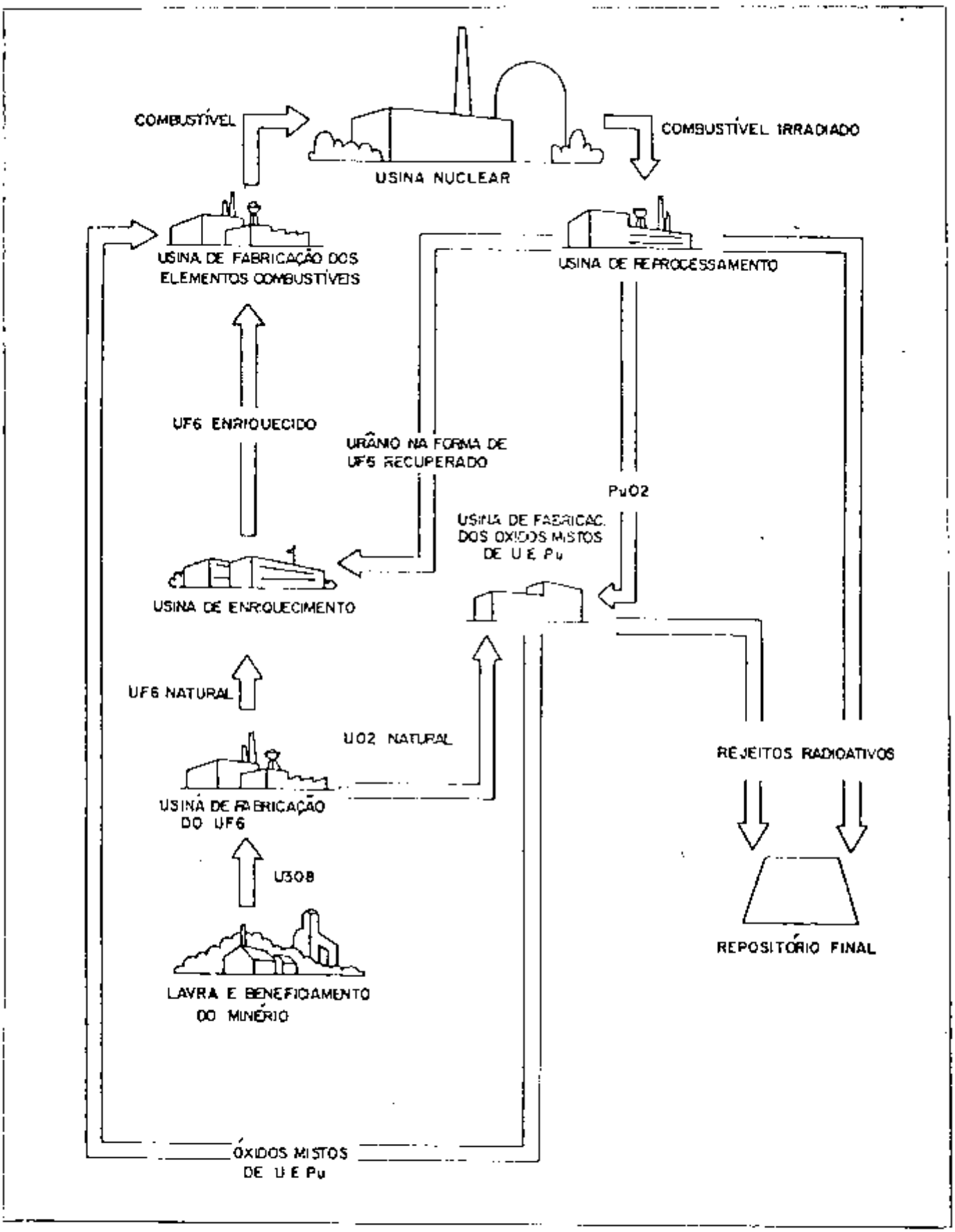



FIGURA 2.1. - Operações do ciclo do combustível nuclear /77/ .

A concentração e purificação compõem o estádio de beneficiamento do minério de urânio, onde esse é submetido a processos químicos e mecânicos de separação, que obtêm como produto final o "Yellow Cake", concentrado composto de 70-90% de $U_3O_8$. No processamento mecânico o minério passa por uma moagem seguida de lixiviação, que separa o urânio dos produtos sem interesse. Posteriormente, os óxidos de urânio são recuperados da lixívia através de processamento químico do tipo extração com solventes ou por troca iônica, sendo o produto calcinado para remoção da água, obtendo-se como resultado o "Yellow Cake". Esse novo produto pode ainda passar por um refinamento, para remoção de impurezas residuais, que utiliza novamente extração com solvente e calcinação, obtendo-se uma substância nuclearmente pura chamada "Orange Oxide". Os rejeitos gasosos são os mais importantes no beneficiamento e são produzidos durante a moagem e pulverização do minério, que introduzem no ar partículas de urânio e seus produtos de decaimento ($Th^{230}$ e $Ra^{226}$), além de gases radioativos, por exemplo, Radônio. O controle da liberação para o meio ambiente desses resíduos é feito por um sistema de coleta e retenção de impurezas. Os rejeitos líquidos do beneficiamento são representados pelas soluções provenientes dos processos de moagem, lixiviação e limpeza dos equipamentos. A liberação dessas soluções no ambiente deve ser executada em função de limites preestabelecidos de concentração de $Ra^{226}$ e $Th^{230}$ presentes. As impurezas sólidas geradas durante os processos de concentração e purificação do minério de urânio constituem-se em partículas de argila e de minerais presentes na rocha portadora. De maneira geral, a radioatividade presente nos rejeitos produzidos no beneficiamento é baixa, não representando dificuldades para seu controle .

A conversão do concentrado de $U_3O_8$ em hexafluoreto de urânio é uma operação cujo principal objetivo é produzir matéria prima para a usina de enriquecimento isotópico, que utiliza a capacidade do $UF_6$ de separar o urânio natural em seus isótopos mais importantes : $U^{238}$ e $U^{235}$. Na conversão o concentrado de $U_3O_8$ nuclearmente puro passa por um processamento químico de hidrogenação para a obtenção de $UO_2$, que posteriormente é convertido em tetrafluoreto de urânio, denominado "Green Salt", pela reação com fluoreto de hidrogênio gasoso. Finalmente esse produto reage com o "gas Fluor" para obtenção do hexafluoreto de urânio, que será utilizado nas operações de enriquecimento do urânio. Os rejeitos radioativos mais importantes gerados pelas operações de obtenção do hexafluoreto são de dois tipos: cinzas não voláteis e soluções líquidas provenientes da extração com solvente, dependendo do método escolhido; hidrofluor ou extração com solvente, respectivamente /20/. Os resíduos líquidos que possuem maiores níveis de radioatividade não são liberados diretamente no meio ambiente, permanecendo em tanques de evaporação.

O $Ra^{226}$, $Th^{230}$ e os isótopos do urânio estão presentes na forma não volátil, de modo que, ficam acumulados nos tanques onde permanecem armazenados. As cinzas são compostas de ferro, cálcio, magnésio, cobre e outros fluoretos não voláteis. Elas são continuamente removidas do processo e reagem com fluoreto para recuperação do urânio, minimizando assim sua concentração no rejeito, que deve ser embalado e transportado para o confinamento em sub-superfície de acordo com tecnologias já conhecidas .

O enriquecimento isotópico do urânio a partir de seu tetrafluoreto é uma operação obrigatória para que se possa utilizá-lo como combustível nuclear em reatores moderados por água leve. A concentração do isótopo $U^{235}$ no urânio obtido na natureza é aproximadamente 0,7%, valor esse que deve atingir de 2-4% no processo de enriquecimento. Os rejeitos radioativos são gerados no estado líquido , sólido e gasoso, contaminados com pequenas porcentagens de urânio residual. A porcentagem gasosa é liberada, estimando-se uma quantidade de urânio presente em torno de 0,7 kg/1000 MWe.ano /95/. Os rejeitos líquidos do enriquecimento incluem soluções provenientes das operações de limpeza e das instalações auxiliares. A quantidade de urânio presente nessas soluções é estimada em 10 kg/1000 MWe.ano /95/. Os rejeitos sólidos são representados por pequenas quantidades de metais precipitados e sólidos em suspensão,contidos nos efluentes líquidos originados durante as operações de limpeza dos equipamentos. Esses resíduos são coletados em tanques de decantação e posteriormente enterrados. A quantidade de sólidos produzidos no enriquecimento do urânio é estimada em torno de uma tonelada métrica / 1000 MWe.ano /95/ .

A fabricação dos elementos combustíveis inclui, numa primeira fase, a conversão do $UF_6$ gasoso enriquecido em pastilhas de $UO_2$ sinterizadas. Posteriormente, elas são inseridas em tubos de Zircalloy, cujo arranjo e fixação por meio de guias metálicas fornecem o elemento combustível pronto para utilização nos reatores. As operações para a fabricação dos elementos combustíveis representam a última fase do processamento do urânio antes de sua queima no reator. Nelas são produzidos vários subprodutos indesejáveis que constituem os seus resíduos radioativos. A fração gasosa é gerada no processo de conversão do $UF_6$ em $UO_2$. Ela é liberada na atmosfera após passar por filtros de alta eficiência (HEPA). O ar contaminado proveniente do sistema de exaustão dos locais onde o $UO_2$ pulverizado é manuseado passa também pelo mesmo processo de filtragem antes de sua liberação, assim como os gases produzidos pela incineração de resíduos combustíveis, que são também gerados durante a fabricação dos elementos combustíveis. Os resíduos líquidos mais

importantes, são as soluções residuais contendo $Th^{234}$ resultante do decaimento do isótopo $U^{238}$ . Essas soluções permanecem em tanques de decantação. O principal resíduo sólido produzido nas instalações de fabricação do combustível nuclear é o $CaF_2$ contaminado proveniente da precipitação a partir de soluções radioativas residuais. Esse precipitado deve ser acondicionado e enterrado em trincheiras rasas abertas no solo .

Os resíduos radioativos produzidos nas centrais nucleares durante a queima do combustível no reator apresentam, normalmente, baixos níveis de radioatividade, já que a maior parte dela permanece confinada nos elementos combustíveis devido ao encamisamento de Zircalloy. Os resíduos formados durante a operação do reator são, principalmente, os subprodutos sólidos da purificação da água do circuito de refrigeração, componentes ativados do reator e o próprio elemento combustível gasto, que deverá permanecer em tanques de água para resfriamento e para que haja tempo suficiente para o decaimento radioativo dos elementos de meia vida curta, permitindo assim seu manuseio mais seguro visando às operações de reprocessamento .

Após um tempo de vida útil os elementos combustíveis devem ser reprocessados para a recuperação de suas propriedades físseis. São nessas operações que são gerados os rejeitos radioativos com altos níveis de atividade, que necessitam uma atenção especial quanto ao seu confinamento no meio ambiente. Tanto o reprocessamento como seu rejeito radioativo serão abordados em pormenores em ítens posteriores .

## 2.1. O reprocessamento do combustível nuclear

Após um tempo de vida útil os elementos combustíveis devem ser retirados do reator devido a diversos fenômenos de transformação que sofrem e que interferem diretamente no rendimento de uma central nuclear. Esses fenômenos são, basicamente, danos mecânicos causados dela irradiação e altas temperaturas, aliados à formação de produtos de fissão absorvedores de nêutrons que interferem negativamente no balanço neutrônico. Muito mais importante, do ponto de vista econômico, é a necessidade de recuperação dos elementos físseis que permanecem nos elementos combustíveis após a queima no reator. Eles incluem parte do urânio não consumido e produtos gerados durante o processo de fissão nuclear, por captura neutrônica e desintegrações beta a partir do $U^{238}$ , como mostrado na reação abaixo .

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U \xrightarrow[23,5\ min]{\beta-} ^{239}_{93}Np \xrightarrow[2,3\ d]{\beta-} ^{239}_{94}Pu$$

A recuperação das propriedades físseis dos elementos combustíveis gastos é realizada por meio das operações de reprocessamento que comportam diversos tratamentos químicos que visam, basicamente, à reconstituição do combustível nuclear para uma nova utilização no reator .

Existem vários métodos capazes de promover adequadamente as transformações químicas necessárias para o reprocessamento do combustível nuclear. A escolha dependerá da taxa de queima, da radioatividade presente, da perda de físseis e férteis, da especificação dos produtos finais, além do custo global do processo /23/. Apesar disso, pode ser estabelecida uma seqüência de procedimentos comuns com vistas à recuperação dos elementos combustíveis gastos em reatores de água pressurizada. Basicamente, as operações iniciam-se pelo transporte dos elementos combustíveis do reator até a usina de reprocessamento. Antes que sejam iniciadas as operações dentro da usina, eles devem permanecer em tanques d'água por um período suficiente para que ocorra o decaimento dos produtos de fissão e a conseqüente redução de sua atividade. Esse período varia entre 3 e 4 meses e tem como objetivo tornar o manuseio dos elementos combustíveis mais seguro nas etapas posteriores do tratamento .

Na etapa seguinte se realizam a retirada do encamisamento, a dissolução do combustível e a preparação das soluções para as fases finais de separação e purificação. A retirada do encamisamento pode ser efetuada por meio de processos mecânicos que consistem, basicamente, em cortar os elementos combustíveis em pequenos pedaços de 1 a 10 cm de comprimento. Em seguida, esse material é colocado em lixiviadores onde se processa a dissolução do combustível pelo ataque com ácido nítrico concentrado. As peças que compõem as estruturas de revestimento não são afetadas quimicamente por esse tipo de tratamento e vão constituir o rejeito sólido dessa etapa do processo.

A solução contendo os óxidos dissolvidos passa, posteriormente, por uma filtração como parte de sua preparação para as fases finais de separação e purificação . A separação se realiza em dois ciclos de extração distintos. No primeiro acontece a separação do urânio e plutônio dos produtos de fissão e demais actinídeos. No ciclo seguinte, a solução livre de contaminantes, contendo Urânio e Plutônio é tratada para a separação desses dois componentes físseis. Uma vez separados, esses produtos devem passar por processos de purificação para a eliminação

de produtos de fissão remanescentes dos tratamentos anteriores. Essa purificação é subsídio básico para a refabricação do hexafluoreto de Urânio que será reintroduzido na usina de enriquecimento, fechando-se assim, o ciclo do combustível nuclear .

## 2.2. O rejeito radioativo de alta atividade e suas características

O rejeito radioativo de alta atividade é o rafinado aquoso produzido durante o primeiro ciclo de extração com solvente, ou equivalente, acrescido dos resíduos concentrados gerados nos ciclos subseqüentes, na usina de reprocessamento do combustível nuclear. Ele contém, essencialmente, todos os produtos de fissão não voláteis produzidos durante a queima no reator; 0,5% do urânio e plutônio originalmente presentes nos elementos combustíveis antes de passarem pelo reprocessamento, e todos os outros actnídeos formados pela transmutação do urânio e plutônio, principalmente Neptúnio, Amerício e Cúrio /20/ .

A Tabela 2.1. mostra os constituintes típicos de uma solução radioativa proveniente da extração com solvente no reprocessamento de combustíveis irradiados em reatores moderados por água leve .

| LWR[4] (VALORES ARREDONDADOS) | | |
|---|---|---|
| | MATERIAIS[1] | GRAMAS POR TONELAGEM MÉTRICA |
| Produtos Químicos | Hidrogênio | 400 |
| Utilizados no tratamento dos elementos combustíveis | Ferro | 1.100 |
| | Níquel | 100 |
| | Cromo | 200 |
| | Silício | - |
| | Lítio | - |
| | Boro | - |
| | Molibdênio | - |
| | Alumínio | - |
| | Cobre | - |
| | Borato | - |
| | Nitrato | 65.800 |
| | Fosfato | 900 |
| | Sulfato | - |
| | Fluoreto | - |
| Materiais combustíveis remanescentes[2,3] | Urânio | 4.800 |
| | Tório | - |
| | Plutônio | 40 |
| Elementos transurânicos[3] | Neptúnio | 480 |
| | Amerício | 140 |
| | Cúrio | 40 |
| Outros actinídeos[3] | | < 0.001 |
| Produtos de fissão[5] | | 28.800 |
| Total | | 103.000 |

TABELA 2.1. - Constituintes típicos de uma solução radioativa proveniente da extração com solvente no reprocessamento de combustíveis irradiados em reatores moderados por água leve /90/ .

(1) a maioria presente em solução, na forma iônica

(2) 0,5% de perda para o rejeito

(3) durante o reprocessamento

(4) PWR com urânio enriquecido, usando 378 litros de rejeito líquido por tonelagem métrica. Queima : 33000 Mwd/Mt .

(5) exceto produtos voláteis (trítio, gases nobres, iôdo e bromo)

Outros tipos de resíduos, cuja contaminação apresenta níveis elevados , são gerados durante as operações de reprocessamento. Eles são representados, principalmente, pelo encamisamento do combustível irradiado, que é também contaminado' pelo plutônio e por outros elementos transurânicos .

Entre os vários tipos de resíduos gerados em todo o ciclo do combustível nuclear, os de alta atividade são aqueles que apresentam valores mais altos de atividade específica, necessitando de maiores cuidados quanto à blindagem e quanto à dissipação do calor .

A Tabela 2.2. mostra a radioatividade dos principais produtos de fissão presentes no rejeito de alta atividade gerado a partir do reprocessamento de uma tonelada de combustível nuclear de alta queima (33000 Mwd/t) e de um reator LWR , para um período de refrigeração de até 1000 anos após a remoção dos elementos combustíveis desse reator .

| 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 |
| Itrio-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 |
| Nióbio-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 | | $1,7x10^6$ | $3,1x10^5$ | $3,4x10^4$ | $2,1x10^1$ |

Queima : 33000 MWd/t U

Potência : 30 MW/t (PWR)

TABELA 2.2. - Radioatividade dos principais produtos de fissão no rejeito de alta atividade /60/ .

| | | 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 | 23000000 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 | $1,6x10^{-3}$ | $1,6x10^{-3}$ | $1,6x10^{-3}$ | $1,6x10^{-3}$ | $1,6x10^{-3}$ | $1,6x10^{-3}$ | $1,6x10^{-3}$ |
| Neptúnio-237 | 2100000 a | $3,4x10^{-1}$ | $3,4x10^{-1}$ | $3,5x10^{-1}$ | $3,7x10^{-1}$ | $3,7x10^{-1}$ | $3,6x10^{-1}$ | $2,7x10^{-1}$ |
| Neptúnio-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 | $6,9x10^{-3}$ | $6,9x10^{-3}$ | $6,9x10^{-3}$ | $7,2x10^{-3}$ | $7,6x10^{-3}$ | $0,7x10^{-3}$ | $1,3x10^{-3}$ |
| Amerício-241 | 430 a | $1,5x10^{2}$ | $1,6x10^{2}$ | $1,4x10^{2}$ | $3,4x10^{1}$ | $1,3x10^{-1}$ | $1,6x10^{-4}$ | 0 |
| Amerício-242 (β) | 16 h | $4,0x10^{0}$ | $3,9x10^{0}$ | $2,6x10^{0}$ | $4,2x10^{-2}$ | 0 | 0 | 0 |
| Amerício-242 m | 150 a | $4,0x10^{0}$ | $3,9x10^{0}$ | $2,6x10^{0}$ | $4,2x10^{-2}$ | 0 | 0 | 0 |
| Amerício-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 | | $7,3x10^{3}$ | $2,4x10^{3}$ | $3,1x10^{2}$ | $7,8x10^{1}$ | $2,3x10^{1}$ | $2,7x10^{0}$ | $3,2x10^{0}$ |

Obs.: reprocessamento 150 dias após a retirada dos el. combustíveis do reator.
Queima : 33.000 MWd/t
Potência: 30 MW/t (PWR)

TABELA 2.3. - Radioatividade (Urânio+Transurânicos e produtos de decaimento) no rejeito de alta atividade após vários períodos de resfriamento /60/ .

Como já foi mencionado anteriormente, pela utilização das técnicas mais modernas de reprocessamento, pequenas quantidades de urânio e plutônio e quase que a totalidade de outros elementos transurânicos permanecem na solução de alta atividade. A Tabela 2.3. mostra o conteúdo e o comportamento, em função do tempo, desses elementos no rejeito de alta atividade, considerando-se que 0,5% do urânio e plutônio originalmente presentes nos elementos combustíveis gastos permanece nesse rejeito .

Na Tabela 2.2. fica evidenciado que a maioria dos produtos de fissão geradores de calor têm meias-vidas relativamente curtas e decaem rapidamente, enquanto que somente o $Cs^{137}$ e $Sr^{90}$, com meias-vidas de 30 e 28 anos respectivamente, predominam .

O rápido decréscimo da produção de calor, durante os primeiros anos de refrigeração, a partir do decaimento dos produtos de fissão e dos elementos transurânicos, com base numa tonelada de combustível gasto num reator LWR está mostrado na Tabela 2.4. .

| 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 |

Queima : 33000 MWd/tU
Potência : 30 MW/t (PWR)
Reprocessamento : 150 dias após retirada do reator

TABELA 2.4. - Produção de calor no rejeito de alta atividade depois de vários períodos de resfriamento /60/ .

A duração do confinamento dos rejeitos de alta atividade é uma questão' que deve ser discutida para que seja possível se ter um referencial para a implantação de um esquema de disposição. Uma solução aproximada do problema é calcular o tempo necessário para que o risco potencial de ingestão do rejeito atinja o mesmo nível em relação à quantidade de minério que foi extraído para produzir o combustível que deu origem ao rejeito. Esse cálculo dá valores em torno de alguns milhares de anos. Entretanto, como existe um risco potencial de inalação muito maior em relação ao rejeito do que em relação aos materiais radioativos naturais, deve ser prudente promover um confinamento por um período de tempo bem

maior. Investigações realizadas sobre a variação do risco potencial associado ao rejeito de alta atividade em função do tempo mostram que uma redução considerável desse risco pode ser obtida com um confinamento de centenas de milhares de anos; porém poucas alterações devem ser esperadas se esse confinamento fôr prolongado até alguns milhões de anos . /60/

## 2.3. Tratamento dos rejeitos de alta atividade

O rejeito líquido de alta atividade deve passar por um processo de concentração por evaporação e ser estocado provisoriamente em tanques de aço inoxidável, sob a forma de soluções aquosas nítricas enquanto se espera a adoção sistemática dos tratamentos para sua solidificação, que vão transformá-lo numa forma adequada para a disposição final no meio geológico (FIgura 2.2.)

Essa estocagem líquida pode ser considerada hoje como um estádio intermediário entre o reprocessamento e a solidificação, e de acordo com a legislação americana pode durar até 5 anos após ter sido o rejeito produzido. No entanto, muitos fatores podem influir e alterar esse prazo /59/. Porém, a longo prazo, com o desenvolvimento tecnológico dos processos de solidificação, a estocagem em tanques tende a ser eliminada, de maneira que o rejeito líquido passe diretamente da usina de reprocessamento para a usina de solificação.

Evaporação : As soluções de alta atividade produzidas nas operações de reprocessamento são tão diluídas que se torna antieconômico estocá-las diretamente nos tanques de aço. Em certos casos, é possível obter-se uma concentração dessas soluções da ordem de 10-50 vezes pela utilização de evaporadores convencionais .

Os evaporadores usados na concentração dos rejeitos radioativos são feitos de aço inoxidável ou titânio, e são tomados cuidados especiais durante sua construção, com vistas à prevenção de fugas e evitar ao máximo a corrosão. Eles são equipados com fontes de calor para a evaporação e com sistemas de resfriamento para remoção de calor produzido pelo decaimento dos produtos de fissão. Devem ser projetados de modo que seja possível transferir, em qualquer instante, seu conteúdo para os tanques de estocagem. Além disso, devem possuir um condensador e um sistema para tratamento de gases capaz de determinar se os níveis das descargas na atmosfera estão suficientemente baixos. O material condensado é coletado em tanques e monitorado para a verificação dos níveis

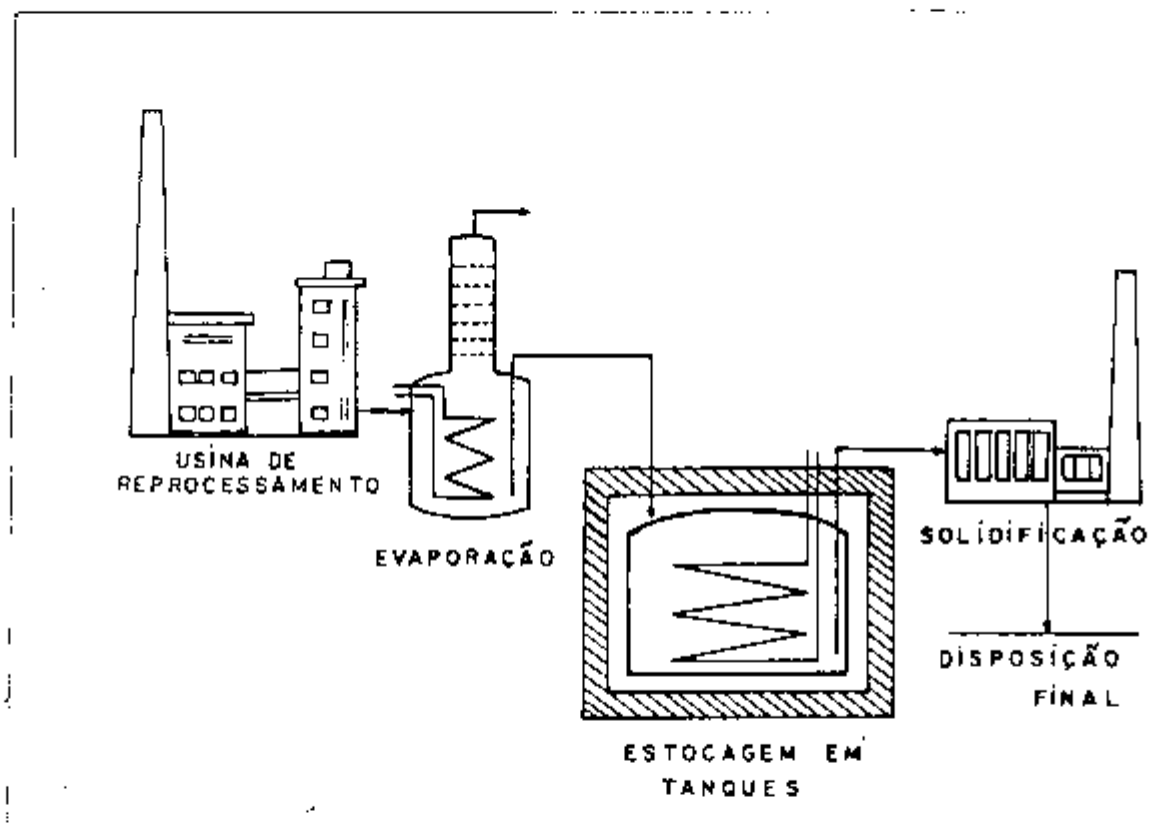



FIGURA 2.2. - Esquema de tratamento do rejeito de alta atividade /59/

de atividade presentes .

Os principais problemas operacionais na evaporação são : o controle da acidez; o controle da temperatura para minimizar a corrosão; e a concentração final da solução .

O fator de concentração alcançado num evaporador é, geralmente, limitado por questões de segurança e para facilitar a transferência das soluções para os tanques de estocagem, e finalmente, para evitar riscos de deposição de particulados sólidos no sistema de transferência .

Além do mais, tem se tornado prática comum a execução de projetos que preveêm uma nova fase de evaporação posterior dentro dos próprios tanques de estocagem .

Os sistemas de reprocessamento que utilizam como base o processo Purex são operados de modo a evitar a introdução de elementos químicos indesejáveis nas soluções que representam o rejeito de alta atividade, que já contêm os produtos de fissão e uma quantidade significante de ferro advindo da corrosão dos equipamentos da usina. Em conseqüência disso, torna-se possível alcançar um fator de concentração alto antes que a cristalização ou a precipitação do concentrado se tornem problemas .

A cristalização se dá, geralmente, pelo nitrato de ferro e a precipitação é causada pela presença de ácido fosfórico, molibdênio ou zircônio. O ponto de cristalização é afetado pela concentração de ácido nítrico, já que é possível se obter fatores de concentração elevados com valores de acidez pequenos. A presença de ácido fosfórico e produtos de fissão o afeta em menor escala, embora provoque a deposição de precipitados finos já quando a solução registra pequenos fatores de concentração. A ação da acidez sobre o fator de concentração, que pode ser alcançado antes da recristalização, é ilustrado na Figura 2.3. /59/. Por sua vez, a acidez depende do modo de operação do processo de evaporação. O controle desse parâmetro pode ser feito pela adoção de um processo de evaporação semicontínuo, onde a solução produzida no reprocessamento é continuamente introduzida durante um intervalo de tempo preestabelecido, mantendo-se o nível do evaporador constante, e sem a retirada do concentrado que vai se formando. Esse procedimento é adotado em Windscale (Inglaterra) e o comportamento da acidez está ilustrado na Figura 2.4.

Dentro do intervalo de operação estabelecido, nos primeiros estádios da

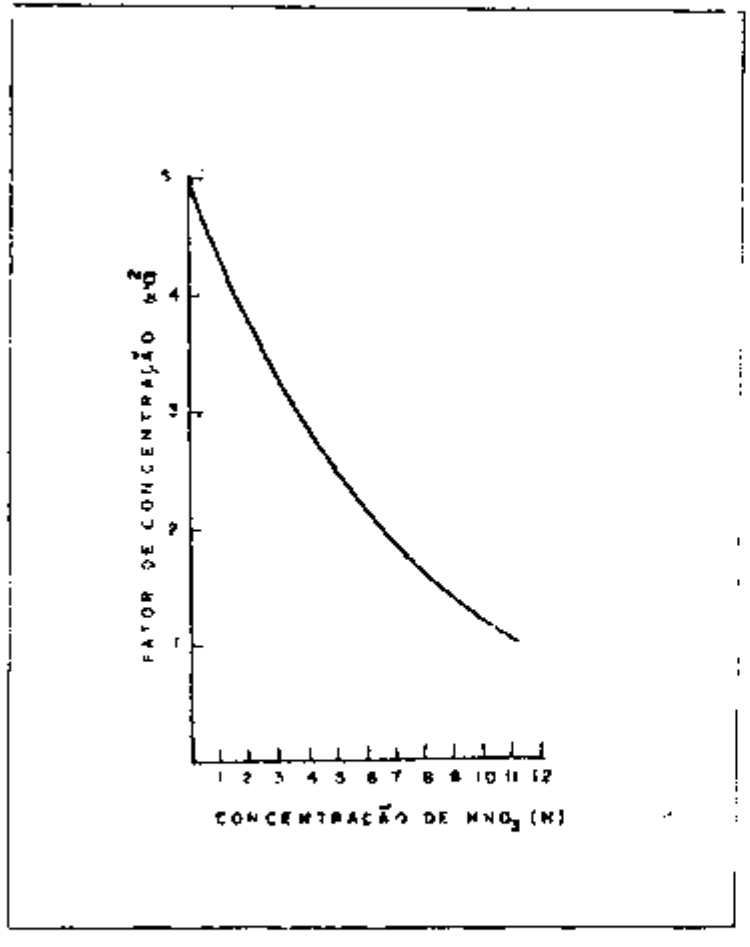



FIGURA 2.3. - Fatores de concentração obtidos a 20°C, para várias concentrações de ácido nítrico na solução de alta atividade /59/ .

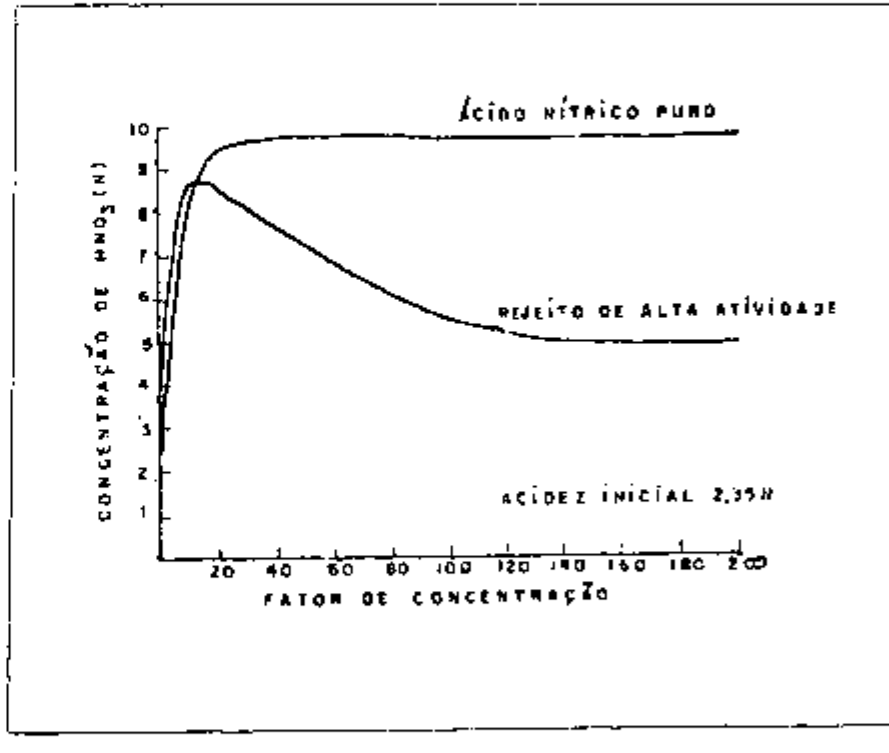



FIGURA 2.4.- Comportamento da acidez durante a concentração do rejeito líquido de alta atividade /59/ .

evaporação a acidez eleva-se até 8-9N ou mais para posteriormente nivelar-se em torno de 5N. Os valores iniciais de acidez elevados não resultam em risco de desenvolvimento de cristais devido ao comportamento ilustrado anteriormente na Figura 2.3 .

Um outro método de redução da acidez utiliza formol, ácido fórmico ou açúcar. Esse processo apresenta certos inconvenientes, a saber, a precipitação de sólidos mais densos, dificultanto o movimento da solução através da usina e a ocorrência de reações violentas do formol na temperatura de operação (60 $^{o}$C) exigida em função dos fenômenos de corrosão /59/ .

A precipitação de sólidos durante a concentração das soluções residuais do reprocessamento depende muito das condições específicas da usina. Os problemas associados à presença desses sólidos são representados, principalmente, pelo entupimento das tubulações da usina e pela corrosão, fenômenos esses que podem ser causados pelo acúmulo de sólidos nas superfícies internas dos equipamentos .

Desse modo, torna-se conveniente limitar o fator de concentração durante a evaporação (que vai permitir uma maior eficiência no manuseio e na transferência da solução para os tanques de estocagem) e obter, posteriormente , reduções de volume da ordem de 2-4 vezes, por meio da evaporação lenta nos próprios tanques de estocagem .

O máximo fator de concentração pode ser alcançado também, por processos que permitam o controle da temperatura pela remoção contínua do calor produzido pelo decaimento dos produtos de fissão presentes na solução .

Estocagem em tanques : A maior parte da radioatividade inicial no combustível irradiado, quando este é retirado do reator, decai nos primeiros cinco anos. Conseqüentemente, o problema da geração de calor pelo decaimento dos produtos de fissão no rejeito solidificado pode ser reduzido consideravelmente pela estocagem do material radioativo, por um período de vários anos, antes de sua solidificação. Isso pode ser feito pela estocagem dos elementos combustíveis e/ou do rejeito líquido de alta atividade em tanques. Desse modo, a estocagem em tanques de aço em sub-superfície é um recurso encarado, atualmente, como uma fase de preparação do rejeito para os processos de solidificação posteriores .

As dimensões desses tanques dependem da taxa de produção de rejeito no reprocessamento e do volume real a ser armazenado. Além disso, devem ser levados em conta o custo dos tanques de diferentes tamanhos, serviços auxiliares , tempo de construção etc. Atualmente a capacidade desses recipientes em uso varia entre 50 e 1200 $m^3$. /59/

Esse sistema de estocagem líquida exige um arranjo complexo de tubos de refrigeração (serpentinas) e, em alguns casos, um revestimento externo, que atua como barreira em caso de vazamentos de radionuclídeos e ajuda a manter a superfície de fundo dos tanques fria, evitando o incremento da corrosão imposta pela deposição de particulados sólidos. Outro dispositivo necessário é um sistema de agitação da solução para impedir o acúmulo de sólidos. Adotam-se, atualmente, três tipos principais de agitadores : "air spargers", "air-lift circulators" e "ballast tanks" /59/. Todos eles operam em ar e são montados dentro dos tanques, fixados nas suas partes superiores. A principal diferença entre esses três sistemas é que os dois primeiros promovem a mistura íntima entre o ar e a solução, criando condições para uma boa concentração do rejeito, enquanto que o sistema "ballast tanks" mantém uma interface entre o ar e a solução, impedindo assim uma evaporação mais efetiva.

O sistema "air spargers" consiste em tubos horizontais posicionados nas proximidades do fundo dos tanques, com uma série de furos que dão passagem ao ar que vai dispersar a solução radioativa .

O princípio básico do "air-lift circulator" pode ser visto na Figura 2.5.

O sistema "ballast tanks" pode ser de dois tipos como se vê na FIgura 2.6, embora ambos operem da mesma maneira. Eles possuem um bocal na extremidade inferior e uma conexão de ar comprimido no topo. Uma vez em operação a solução é expelida sob pressão pelo bocal inferior e esse jato se espalhará no fundo do tanque removendo os sólidos aí depositados. A operação desses sistemas não é contínua e visa a evitar a concentração de altas temperaturas e a conseqüente criação de condições favoráveis à corrosão, assim como, a possibilidade de liberações violentas de vapor ("burps") .

Para os tanques de aço inoxidável, temperaturas entre 60-65°C são consideradas como limites superiores seguros em relação à corrosão, permitindo que o sistema tenha uma longa vida útil. A temperatura de operação mais comum é 50°C ou menos. Os tanques devem ser projetados de modo que permitam a remoção

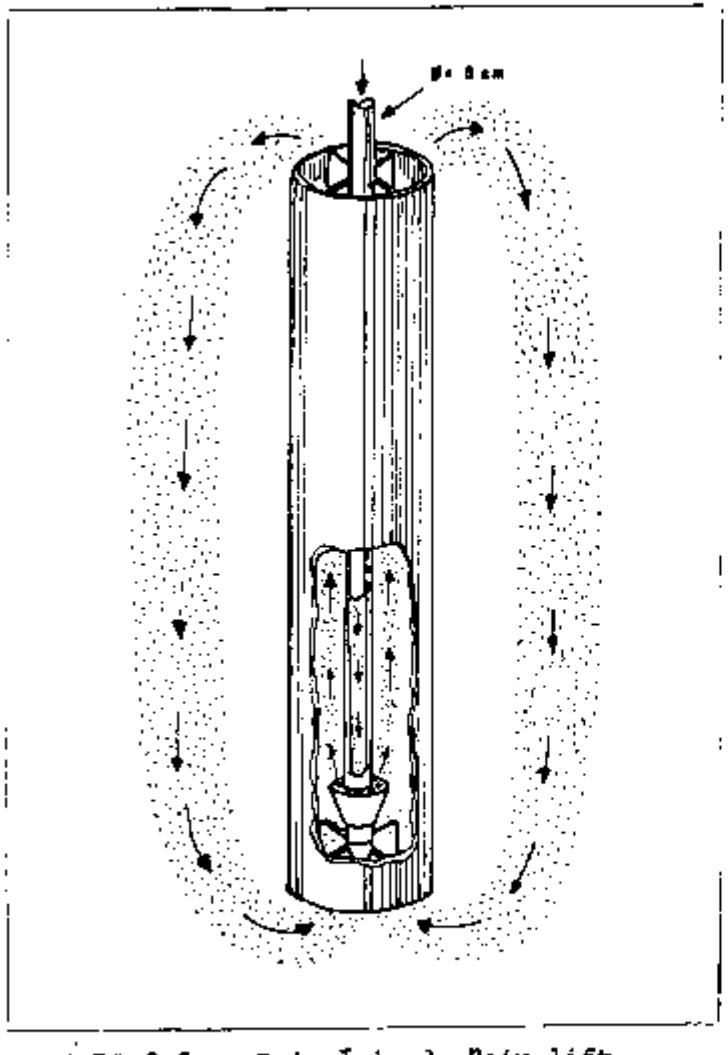


FIGURA 2.5. - Princípio do "air-lift circulator" /59/

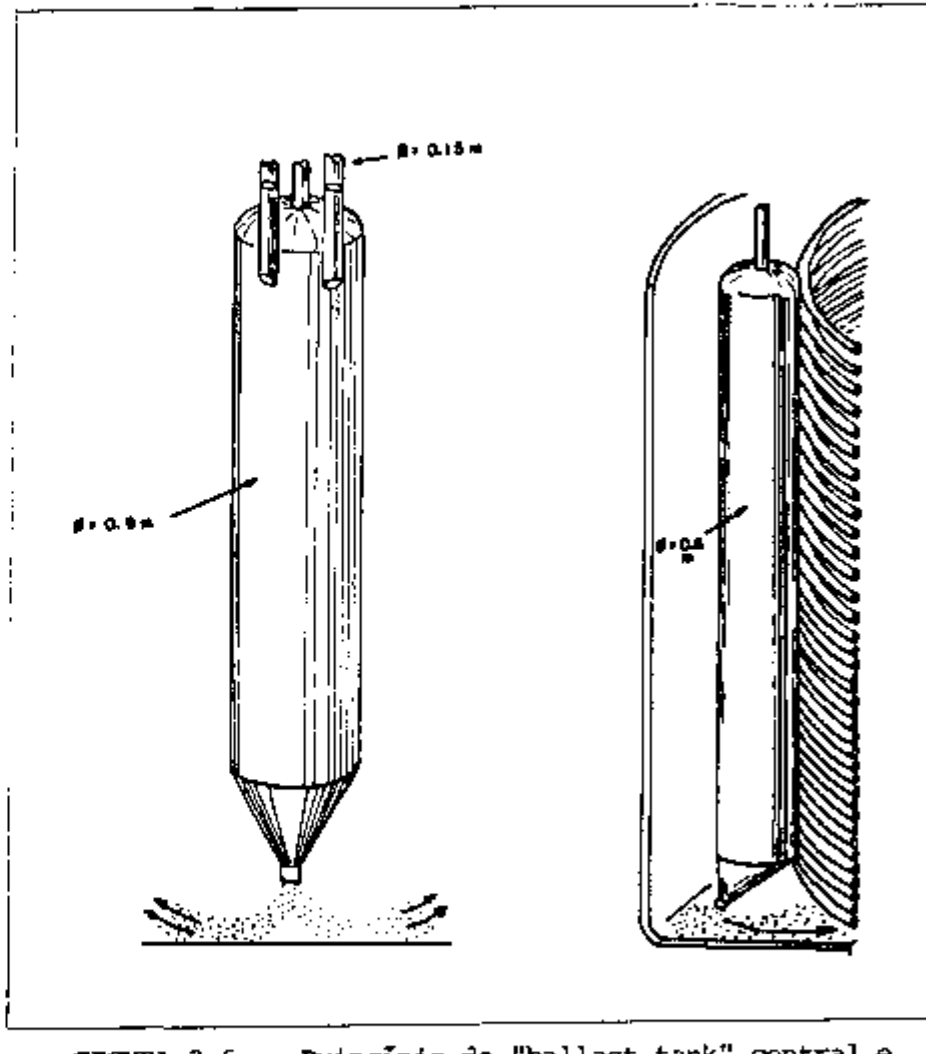


FIGURA 2.6. - Princípio do "ballast tank" central e periférico /59/ .

de agentes corrosivos e a execução de serviços de inspeção e manutenção .

Deve ser prevista a transferência das soluções dos tanques principais para outros auxiliares para os casos de deficiência no confinamento da radioatividade. Durante esse procedimento os precipitados sólidos devem ser mantidos em suspensão e a temperatura controlada. Faz-se a transferência por meio de ejetores operados por ar ou vapor, ou ainda, por circulação de ar. Para efeito de segurança, os equipamentos desse sistema considerados críticos, devem ser duplicados para serem acionados em casos de acidentes que representem qualquer risco de contaminação pela radioatividade. A amostragem da solução é um procedimento intimamente associado ao sistema de transferência. Ela deve ser realizada em todos os estádios de operação, tanto nos sólidos em suspensão como na solução propriamente dita .

A detecção de fuga deve ser eficiente e rápida para que possam ser tomadas, de imediato, medidas corretivas .

Os tanques de estocagem mais modernos são envolvidos por uma contenção externa auxiliar capaz de receber todo o volume de rejeito estocado caso se observe fuga de radionuclídeos durante os trabalhos de monitoração. Mesmo essa contenção auxiliar deve estar acoplada ao sistema de tanques auxiliares em casos de acidentes mais graves .

Do mesmo modo que os evaporadores, os tanques de estocagem devem ter um dispositivo de tratamento e liberação de gases, e embora a taxa de condensação seja pequena, eles são normalmente ventilados por um circuito de ar.

Um sistema bem projetado de estocagem de rejeitos líquidos de alta atividade, em tanques, pode ser considerado viável e seguro por algumas décadas , porém para intervalos de tempos maiores é melhor solidificá-los e imobilizá-los, estocando-os sem necessidade de supervisão intensiva, permitindo ainda um transporte mais seguro .

A Figura 2.7 ilustra um tanque de estocagem e seus componentes principais.

Solidificação : O armazenamento, por longo tempo, do rejeito líquido de alta atividade, em tanques de aço, deixa de ser seguro em vista da longa vida de nuclídeos, por exemplo, $Ca^{137}$ e $Sr^{90}$, presentes nesse rejeito .

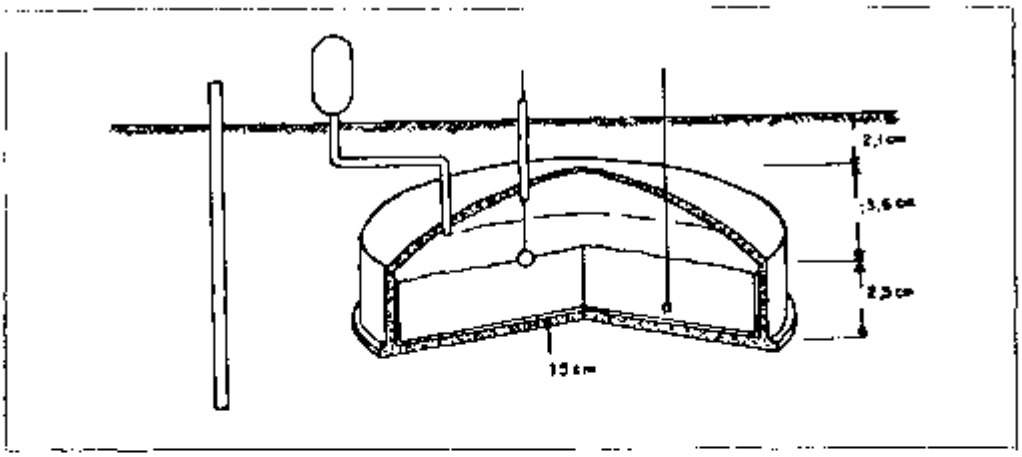



FIGURA 2.7. - Tanque de estocagem de rejeitos líquidos de alta atividade e seus componentes principais /90/ .

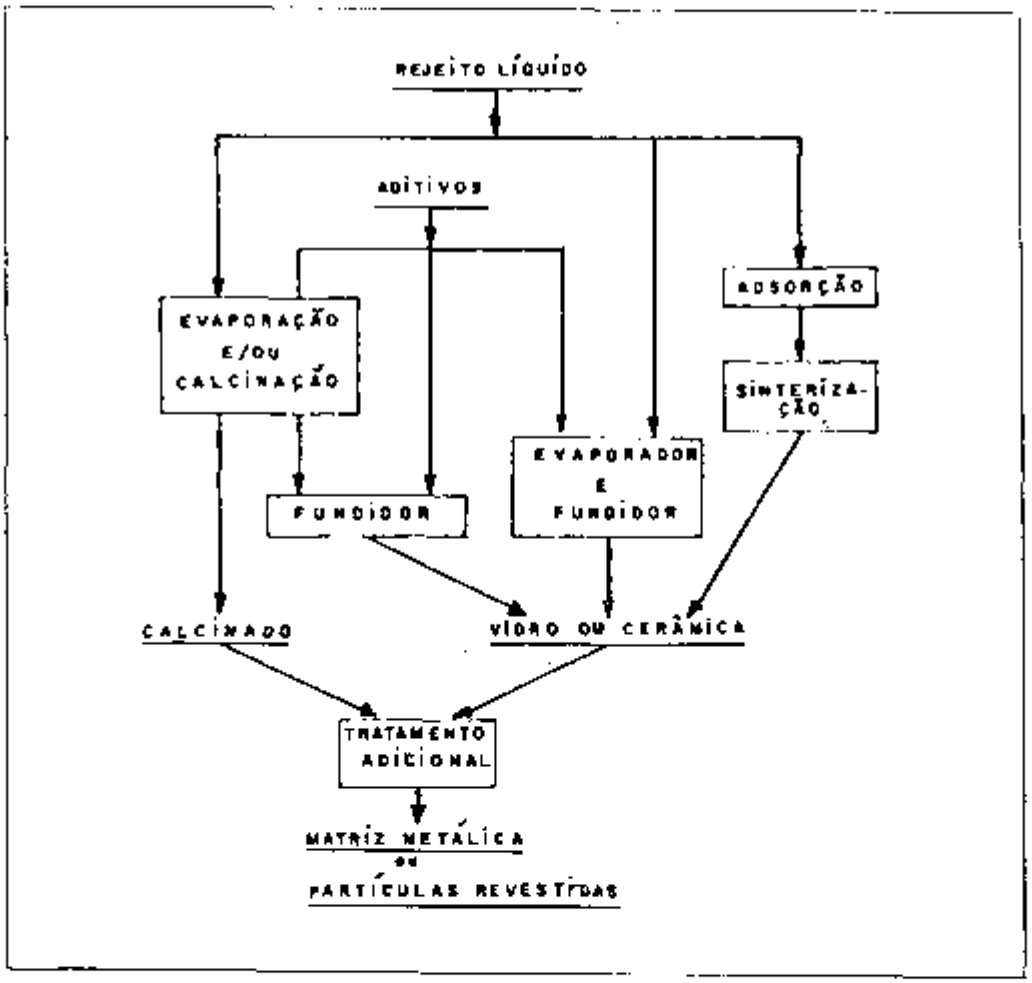



FIGURA 2.8. - Seqüência básica das operações de um processo de Solidificação de rejeitos líquidos de alta atividade /62/ .

Deve-se assegurar um isolamento adequado por alguns séculos, tempo esse , incompatível com a duração da integridade do material utilizado na fabricação dos tanques. Além disso, essas instalações envolvem uma supervisão contínua e dispendiosa de verificação da eficiência dos mecanismos de refrigeração e de tratamento dos gases liberados. Desse modo, com a crescente expansão da utilização da energia nuclear, torna-se necessário, a longo prazo, substituir-se a estocagem líquida por um sistema alternativo baseado na solidificação do rejeito e na imobilização da radioatividade, que não exija tal nível de inspeção, que seja mais seguro e que permita o transporte do rejeito diretamente do local da usina de reprocessamento para o repositório final .

A conversão do rejeito de alta atividade para o estado sólido começou a ser estudada há 30 anos atrás nos países que primeiramente adotaram o reprocessamento do combustível nuclear, com a demonstração e produção em escala piloto utilizando soluções residuais originadas em reatores de baixa queima. O desenvolvimento de processos mais elaborados estão em andamento em muitos países, com o intuito de tornar o rejeito de reatores que utilizam combustíveis de alta queima mais facilmente manuseável para a sua disposição final .

O principal objetivo da solidificação do rejeito líquido de alta atividade é imobilizá-lo por meio de sua conversão numa forma sólida, monolítica, quimicamente inerte e altamente resistente à lixiviação, reduzindo assim, o grau de supervisão necessário para sua estocagem segura. O processo se dá inicialmente pela conversão do rejeito numa mistura de óxidos que será tratada a posteriori, pela adição de materiais formadores de vidro e por reações químicas de alta temperatura, com vistas à obtenção de um produto final vítreo ou cerâmico .

Os procedimentos básicos do processo envolvem a evaporação, eliminação de nitratos, calcinação, adição de formadores de vidros e preparação do produto final. A sequência básica de operação está ilustrada na Figura 2.8.

O processo de solidificação mais simples se realiza pela evaporação e calcinação do rejeito líquido, por meio do qual se obtém um produto seco granulado ou numa forma sólida única. Em muitos casos, o produto granulado é misturado com aditivos e posteriormente fundido para formar o vidro ou o produto cerâmico .

Um método alternativo pode misturar os aditivos com a solução radioativa ou com a solução já concentrada, evaporá-la, eliminar os nitratos e fundí-la para obter o produto final vítreo ou cerâmico. Outra variação pode ser alcançada por meio de um processo de adsorção seguido de um tratamento de alta temperatura.

Muitos outros métodos são possíveis e têm sido investigados e desenvolvidos em vários países /62/.

O produto final solidificado, tanto na forma granular vítrea (fosfato ou borossilicato) como na de cerâmica, incorporada ou não em matriz metálica, como calcinado, deve possuir algumas características específicas. É necessária uma boa condutividade térmica para evitar o acúmulo de altas temperaturas internas, nos primeiros anos de sua estocagem.

Outro parâmetro desejável é a alta resistência à lixiviação. Sua definição depende da área da superfície e da taxa específica de reação com a água apresentadas pelo rejeito solidificado. Desse modo, um produto final com uma pequena taxa de reação com a água é preferível a outro com uma área superficial grande, mesmo que este último possua uma baixa taxa de lixiviação /62/. Entretanto é muito importante que esses dois fatores não se tornem elevados pelos efeitos térmicos da radiação durante o tempo de estocagem e transporte do rejeito.

A resistência mecânica é importante, particularmente durante o transporte e, desde que o recipiente do rejeito ("container") é a primeira barreira de proteção, é essencial que não haja nenhuma interação entre este e o rejeito solidificado, o que poderia diminuir a capacidade de proteção contra contaminações indesejáveis.

Sob o ponto de vista operacional, exigem-se certos parâmetros. O rejeito solidificado deve ocupar um volume menor possível, e basicamente, uma redução entre 7 e 10 vezes pode ser alcançada com um custo mínimo.

<u>Estocagem provisória</u> : a estocagem provisória é feita quando se prevê a recuperação posterior do rejeito solidificado, tanto para ser submetido a tratamentos que visem ao aproveitamento de radionuclídeos como para ser transportado ao repositório final depois que tenha decaído o tempo suficiente e sua taxa de produção de calor esteja compatível com a formação geológica es

colhida para sua disposição.

Existem vários conceitos de estocagem provisória em estudo, em vários países. Basicamente, esses conceitos envolvem a estocagem em reservatórios d'água, em valas de concreto no solo ou em tubulações blindadas enterradas verticalmente no solo.

Uma instalação nuclear fundamentada em qualquer um desses métodos acima deve estar equipada para receber o rejeito acondicionado em recipiente de alta integridade, inspecioná-los, reembalá-los e transferí-los para o sítio de estocagem. Em seu projeto, devem ser previstos esquemas, assim como, operações de substituição de recipientes caso eles apresentem vasamentos de contaminantes' devido a um manuseio incorreto. Esse tipo de instalação de estocagem é construída em superfície ou a poucos metros abaixo do terreno, e depende de considerações especiais de segurança contra a ação humana (sabotagens, distúrbios' civis, guerras) ou mesmo contra fenômenos naturais, que possam afetar a integridade da contenção dos rejeitos radioativos armazenados.

A estocagem provisória de rejeitos de alta atividade também pode ser feita em cavidades naturais ou especialmente construídas, localizadas no meio geológico em profundidade. Esse tipo de estocagem exige um trabalho intensivo de manutenção e monitoração durante todo o tempo de operação do repositório, particularmente no que refere ao lençol de água subterrânea e aos corpos de água superficiais que potencialmente podem entrar em contato com o rejeito.

Não existe nenhum exemplo de projeto de estocagem provisória de rejeitos radioativos de alta atividade no meio geológico profundo até o presente, mas não deixa de ser uma alternativa interessante para países que não possuem em seus territórios ambientes geológicos potencialmente favoráveis para a disposição final desses rejeitos, e que ao mesmo tempo, não têm acesso às outras ' opções de confinamento da radioatividade.

Um projeto desse tipo, primariamente, oferece a vantagem de fornecer uma proteção mais adequada, devido à maior profundidade de estocagem, em comparação' com aqueles onde o rejeito permanece na superfície ou a poucos metros abaixo dela.

O confinamento temporário no meio geológico profundo requer os mesmos dispositivos de recepção, inspeção e reembalagem utilizados na estocagem superficial.

O projeto para recuperação do rejeito vai depender, principalmente, das dimensões da cavidade, do tipo de acesso a ela e do arranjo escolhido para os recipientes de rejeito; e desde que esteja prevista a possibilidade de recuperação durante todo o tempo de duração da estocagem, devem ser feitos estudos cuidadosos com vistas ao projeto e ao material de construção desses recipientes. No entanto, deve ser lembrado que pode se tornar difícil garantir a recuperação segura do rejeito radioativo por períodos de tempo muito longos. Mesmo assim, considerando o tempo necessário para a contenção dos rejeitos de alta atividade, a estocagem provisória no meio geológico pode ser considerada ' uma alternativa satisfatória para a contenção segura da radioatividade presente nos subprodutos da usina de reprocessamento do combustível nuclear.

Disposição final : A disposição final do rejeito radioativo de alta atividade é muito mais criteriosa já que, uma vez confinado, o rejeito não poderá ser facilmente recuperado para qualquer tratamento ou inspeção. Desse modo, torna-se prudente, durante a fase de demonstração ou mesmo no início das operações do repositório, dispor o rejeito de maneira que seja ainda possível removê-lo sem maiores dificuldades, caso houver o desenvolvimento de condições adversas ao confinamento seguro da radioatividade presente.

O projeto de disposição deve garantir que os radionuclídeos presentes no rejeito nunca irão alcançar a biosfera em concentrações ou quantidades que excedam os valores estabelecidos internacionalmente de exposição à radiação, tanto para os operadores como para o público em geral. Para que isso seja possível, além da execução de trabalhos rotineiros de refrigeração, manutenção e monitoração, parâmetros, tais como, propriedades do rejeito solidificado, tipo de embalagem, tipo de rocha ou outros materiais onde serão colocados os rejeitos, precisam ser cuidadosamente analisados.

Na pior das hipóteses, o tempo de confinamento seguro de certos radionuclídeos presentes no rejeito de alta atividade pode atingir valores da ordem de centenas de milhares de anos. Em vista disso, certamente, não será seguro realizar sua disposição em instalações superficiais ou pouco abaixo da superfície. Dentro do quadro atual do desenvolvimento tecnológico a solução mais promissora' é a utilização de formações geológicas estáveis e que ocorram em níveis profundos da crosta terrestre.

Muitas regiões possuem ocorrências geológicas cuja integridade pode ser extrapolada razoavelmente para daqui a centenas de milhares de anos. A contenção

a longo prazo da radioatividade no meio geológico é garantida pela integrida de das barreiras geológicas; pela capacidade delas impedirem que águas sub - terrâneas entrem em contato com o rejeito; pelas propriedades absorventes e baixa permeabilidade de uma camada e suas encaixantes. Além das barreiras na turalmente existentes no meio geológico, outras devem ser construídas para a contenção da radioatividade. Porém, deve haver muito cuidado na avaliação da confiabilidade e da eficiência dessas barreiras adicionais, principalmente , quando estão previstos períodos muito longos de contenção do rejeito.

## CAPÍTULO III : ALTERNATIVAS DE CONFINAMENTO DO REJEITO DE ALTA ATIVIDADE

Existem, basicamente, duas alternativas para o confinamento dos rejeitos do reprocessamento. A primeira delas no meio geológico e a segunda pela eliminação, que se refere à utilização de técnicas semelhantes ao lançamento de naves espaciais, que transportariam os resíduos para locais distantes da órbita terrestre. Refere-se, ainda, à utilização da técnica da transmutação, onde os radionuclídeos seriam bombardeados por partículas nucleares com a finalidade de torná-los mais estáveis ou emissores de baixa atividade .

### 3.1. Confinamento no meio geológico

Três ambientes geológicos principais podem ser apontados como potencialmente favoráveis ao isolamento de rejeitos radioativos de alta atividade : o soalho oceânico, as camadas polares e as formações geológicas continentais profundas.

Soalho oceânico : A disposição do rejeito radioativo de alta atividade nas camadas do soalho oceânico apresenta alguns aspectos positivos. Os oceanos possuem grandes porções da superfície terrestre isoladas que são consideradas insignificantes sob o ponto de vista do aproveitamento de seus recursos naturais, onde a proliferação biológica é pequena e a estabilidade geológica significativa. Existem também, extensas áreas disponíveis cujas profundidades favorecem o isolamento e segurança contra distúrbios naturais, por exemplo, tempestades, assim como contra sabotagem ou acidentes diversos .

A grande capacidade de troca iônica dos sedimentos do fundo oceânico pode representar barreira contra a contaminação radioativa. Por último, o imenso volume d'água pode agir positivamente na refrigeração do rejeito, além de possuir um alto poder de diluição dos materiais radioativos que acidentalmente venham a escapar do repositório submerso .

Três áreas preferências são apontadas para a disposição geológica no fundo oceânico :

a. No embasamento oceânico estável, que representa as bacias oceânicas e planícies abissais consideradas geologicamente estáveis. O rejeito seria

colocado nas camadas abaixo da cobertura sedimentar inconsolidada .

b. Nas fossas oceânicas, onde, de acordo com a teoria da tectônica de placas, uma das bordas de uma dada placa se move contra a borda de outra' penetrando sobre esta e atingindo o manto. O rejeito seria colocado ' nessas áreas de fossas para que fôsse conduzido juntamente com a placa para as camadas do manto terrestre .

c. Em áreas de altas taxas de sedimentação, como por exemplo, onde grandes rios desembocam no mar construindo depósitos deltáicos. O rejeito seria colocado no embasamento sólido abaixo dos depósitos de sedimentos acumulados continuamente pelo rio . Em qualquer um dos casos apontados acima o rejeito solidificado deverá ser embalado de maneira tal que seja capaz de resistir às altas pressões envolvidas e à corrosão. Do mesmo modo, deverá ser confinado nas camadas mais densas do embasamento rochoso oceânico, abaixo da cobertura sedimentar não-consolidada, para que se evite seu contato direto com a água, fique protegido contra a ação de ' processos geológicos oceânicos e isolado da água por meio da ação da alta capacidade de troca iônica das rochas marinhas .

O conceito de disposição do rejeito de alta atividade nos oceanos ainda necessita de estudos exaustivos de parâmetros, a saber, propriedades físicas e químicas das rochas do soalho oceânico, correntes oceânicas , resistência à corrosão dos materiais nesses ambientes, propriedades de transferência de calor e aspectos ecológicos e econômicos, para que se possa demonstrar sua viabilidade .

Camadas polares : Está sendo pesquisado o confinamento do rejeito radioativo de alta atividade nas camadas de gelo do continente antártico e da Groenlândia. Essas camadas representam grandes massas de gelo permanente que possuem grandes espessuras, de difícil desenvolvimento de atividades humanas de porte e de poucas possibilidades de aproveitamento futuro. Outros aspectos favoráveis podem ser apontados :

a. O desenvolvimento de fraturas no gelo é muito raro, pela capacidade que possui de autovedação, principalmente, se sua temperatura permanecer ' bem abaixo do ponto de congelamento .

b. O gelo possui permeabilidade baixa .

c. Possui condutividade térmica comparável à dos tipos mais comuns de rochas .

d. A atividade biológica em seu meio é pequena .

e. A capacidade natural das camadas de gelo de dissiparem o calor produzido pelo decaimento radioativo no rejeito permite que a integridade dos recipientes seja mantida .

Três conceitos têm sido estudados. O primeiro deles prevê a introdução do rejeito em poços abertos no gelo. Pelo calor, proveniente do decaimento, induzido no gelo, este vai fundindo-se progressivamente, de modo que o recipiente de rejeito penetra toda a camada até atingir o embasamento rochoso .

Um outro conceito existente utiliza o mesmo procedimento, só que o rejeito é fixado à superfície por meio de cabos ou correntes para mantê-lo a uma certa profundidade desejada (150-450 metros) durante um certo período de tempo em torno de 100 anos .

A terceira idéia, o rejeito é colocado em câmaras blindadas suspensas por pilares fixados na superfície do gelo para permitir a remoção do calor para o ambiente. Depois de passados aproximadamente 50 anos essas câmaras estariam cobertas pela neve acumulada e poderiam eventualmente ser enterradas no gelo para a disposição final do rejeito .

A disposição dos rejeitos radioativos em camadas polares apresenta muitas incertezas quanto ao isolamento da radioatividade, principalmente, em função da discutível estabilidade do gelo a longo prazo e também pela necessidade de um consenso entre os países quanto à aplicação de tais procedimentos .

Formações geológicas continentais : As formações geológicas do continente podem ser utilizadas de duas maneiras para o confinamento de rejeitos radioativos de alta atividade. A primeira delas diz respeito à construção de cavidades subterrâneas pelos mesmos princípios da mineração convencional. A segunda envolve o confinamento em poços profundos abertos a partir da superfície .

A disposição em formações geológicas continentais é conceito adotado como base de nosso estudo, de modo que pormenores sobre seu procedimento estão expostos no transcorrer desta dissertação .

## 3.2. Confinamento pela eliminação

Disposição extraterrestre : A disposição dos rejeitos radioativos por meio de naves espaciais é outro conceito em estudo, podendo ser um método interessante, para a completa remoção dos radionuclídeos radioativos de vida longa de nosso meio ambiente, principalmente, se for possível garantir uma trajetória estável, sem possibilidade de interceptação por qualquer dispositivo acionado a partir da superfície terrestre, durante seu transporte interplanetário. Por outro lado, muitos aspectos desfavoráveis podem ser apontados. Primeiramente, impõe-se limitações de peso. Além disso, existem problemas quanto a segurança durante o lançamento da nave de transporte, quanto à dificuldade extrema de monitoração e recuperação do rejeito e quanto à possibilidades de divergências internacionais. Finalmente, desde que o conceito de disposição em formações geológicas demonstra ser suficientemente seguro, ao contrário da disposição extraterrestre, cuja viabilidade ainda está para ser demonstrada, não existe muito interesse em incluí-lo como alternativa segura para o confinamento da radioatividade produzida a partir das operações de reprocessamento do combustível nuclear .

Transmutação : Uma alternativa interessante é o uso dos próprios processos nucleares para transformar os constituintes de vida longa, presentes no rejeito radioativo de alta atividade, em elementos de vida curta ou mesmo estáveis .

A transmutação é um método ainda não viável, pois depende diretamente de um avanço maior no desenvolvimento tecnológico da separação química e da fusão nuclear .

O conceito de transmutação refere-se a um processo pelo qual um elemento químico absorve ou emite radiação e se transforma em outro. Por meio desse fenômeno é possível eliminar-se, completamente, os isótopos nocivos; e tanto reatores que utilizam fissão como fusão nuclear são capazes de realizar a transmutação de actinídeos. Particularmente, os reatores que operam por fusão podem ser usados também para transmutar certos produtos de fissão devido à disponibilidade de nêutrons de alta atividade .

Essa técnica nuclear aplicada aos actnídeos continuamente reciclados em reatores de fissão nuclear mostra-se potencialmente promissora. Os estudos feitos mostram que pela utilização de um processo de separação eficiente , tal procedimento em reatores de água leve resulta num decréscimo de uma unidade na toxicidade de actnídeos de vida curta e de cinqüenta unidades para os de vida longa .

Entretanto do ponto de vista prático, em função do nível de eficiência atual dos processos de separação química no reprocessamento, pouco avanço pode ser conseguido, pois quaisquer actnídeos que permaneçam na fração não transmutada significará que ela ainda terá que ser tratada como rejeito de alta atividade. Desse modo, a transmutação poderá apresentar algum avanço siginificativo somente após a existência de um desenvolvimento maior das técnicas de separação química usadas no tratamento dos rejeitos radioativos gerados no reprocessamento .

## CAPÍTULO IV : A DISPOSIÇÃO EM FORMAÇÕES GEOLÓGICAS DO REJEITO DE ALTA ATIVIDADE

O principal argumento a favor da utilização do meio geológico como repositório final dos rejeitos gerados na indústria nuclear, sobretudo durante o reprocessamento do combustível, baseia-se no fato de que apesar do tempo de vida de certos radionuclídeos ser bastante longo em relação à duração da vida humana, é relativamente curto se considerarmos os padrões do tempo geológico. Por outro lado, certas formações geológicas têm permanecido estáveis, não sofrendo alterações significativas durante vários milhões de anos, o que leva a crer que exista forte possibilidade de algumas delas continuarem assim por um período de tempo semelhante. Além disso, podem existir locais onde volumes consideráveis de rocha evidenciam a ausência quase total de migração de água subterrânea no seu interior, sendo esse aspecto uma condicionante de grande importância como barreira contra o carreamento da radioatividade presente no rejeito para a superfície do terreno .

Essas barreiras naturais associadas a outros cuidados, por exemplo, a forma final do rejeito, o tipo de embalagem, o modo de confinamento na formação geológica, devem proporcionar em conjunto o isolamento dos radionuclídeos presentes no rejeito, do contato com a biosfera .

De maneira geral, o conceito de disposição em formações geológicas não exige o fracionamento ("partitioning") do rejeito líquido de alta atividade, de modo que a adoção desse procedimento não está condicionada diretamente ao tipo de método empregado para o seu confinamento no meio geológico. Em nosso estudo assume-se que o rejeito de alta atividade é tratado e estocado em sua composição natural, isto é, incluindo radionuclídeos de meias-vidas longas e curtas .

Uma formação geológica pode ser utilizada de diversas maneiras como repositório final de rejeitos radioativos. Entretanto, tomando-se como base que o rejeito radioativo líquido de alta atividade, gerado durante as operações de reprocessamento, deva ser solidificado 5 anos após ter sido produzido com vistas à sua disposição, das várias alternativas existentes restam basicamente duas. A primeira compreeende a disposição em poços profundos e a segunda em cavidades subterrâneas .

### 4.1. Disposição em cavidades subterrâneas

O conceito de disposição geológica em cavidades subterrâneas utiliza os

princípios de escavação da mineração convencional, ou seja, aberturas de poços, galerias, salões e túneis feitos na formação geológica de interesse. Os poços e galerias servem como vias de acesso aos equipamentos, ao pessoal, e aos veículos de transporte do rejeito. Salões e túneis destinam-se à estocagem dos recipientes contendo o rejeito radioativo solidificado, que são distribuídos em furos feitos no piso dos salões ou nas paredes dos túneis, dependendo do que estiver previsto no projeto .

Basicamente, as rochas mais favoráveis para a disposição de rejeitos radioativos em cavidades subterrâneas são camadas e domos de sal, formações de rochas ígneas intrusivas e metamórficas argilosas /90/ .

A Figura 4.1. ilustra o conceito descrito acima .

De início, os recipientes, acondicionados em uma única embalagem, são transportados até o local do repositório em veículo especialmente projetado para esse fim . Este é introduzido em uma instalação na superfície onde se efetuam as operações de descarga .

A embalagem uma vez descarregada é levada para uma câmara blindada, onde os recipientes são removidos e introduzidos, por meio de cabos, nas instalações de sub-superfície, através de poços verticais. Esses poços possuem em suas extremidades inferiores câmaras devidamente blindadas construídas em cota correspondente à formação geológica escolhida para a estocagem do rejeito radioativo. Nesse ponto, os recipientes, um a um, são transportados em veículos blindados e introduzidos nos furos previamente construídos no piso dos salões ou nas paredes dos túneis de estocagem. Cada furo é preenchido até uma certa cota e posteriormente selado para proporcionar o confinamento da radioatividade. Tal sistema é projetado de modo que o calor gerado pelo rejeito seja absorvido pela rocha sem causar a deterioração do meio geológico .

Depois que todos os furos são preenchidos e selados, os salões ou túneis devem ser isolados do resto das instalações por meio de paredes ou pelo preenchimento com material desmontado durante os trabalhos iniciais de construção das cavidades .

A área de disposição nos salões ou túneis é calculada em função da quantidade total de recipientes, da quantidade em cada furo, da taxa de geração

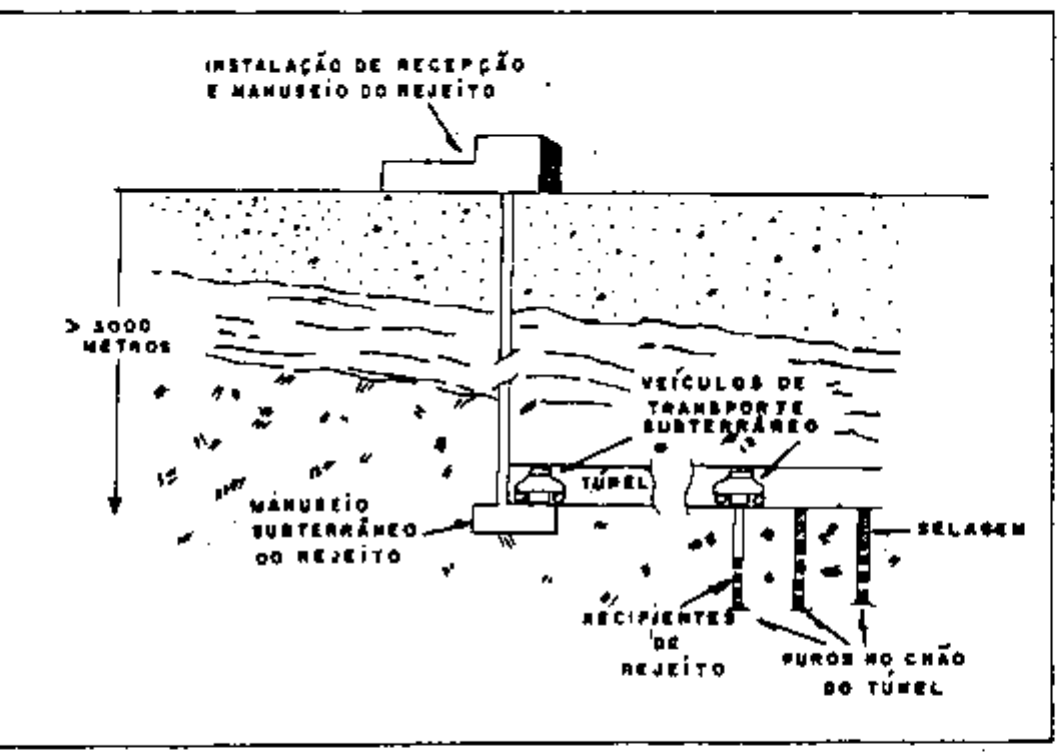



FIGURA 4.1. – Conceito de disposição geológica em cavidades subterrâneas /90/ .

de calor de cada recipiente e das características de dissipação de calor da formação. As dimensões dos salões e dos túneis são determinadas, basicamente, pelo tamanho dos veículos de transferência de rejeito e pelas características mecânicas da formação. Estima-se que para 14000 recipientes seja necessária a abertura de 90 km de túneis de aproximadamente 4,5 m de lado, além de 11 km de galerias de acesso /90/ .

Os parâmetros mecânicos do corpo rochoso determinam também a necessidade ou não de revestimento e escoramento dos túneis e galerias .

O conceito de disposição geológica em cavidades subterrâneas envolve ainda um sistema de fornecimento de ar para ventilação das instalações em subsuperfície. Esse ar, inicialmente, é fornecido para as áreas não contaminadas e por meio do controle da pressão é posteriormente bombeado para as áreas de estocagem. Sua recirculação para a superfície é feita através de chaminés, passando por dois sistemas de filtros de eficiência comprovada. As liberações são continuamente monitoradas e os túneis de ventilação são projetados de maneira que o ar contaminado esteja isolado do contato com os operadores do repositório .

São previstas algumas variações na aplicação desse conceito de disposição. Existem estudos que consideram a fusão rejeito-rocha numa única massa, utilizando para isso as taxas de geração de calor elevadas fornecidas pelo rejeito. Consideram também um sistema de refrigeração artificial pela incorporação do rejeito em reservatórios d'água, em profundidade. Essas idéias dependem ainda de um desenvolvimento tecnológico maior, principalmente, quanto à aplicação de modelos de transferência de calor em tais circunstâncias e ao estudo do comportamento da massa de fusão rejeito-rocha e seu efeito no meio geológico adjacente .

## 4.2. Disposição em poços profundos

Outro conceito de disposição geológica de rejeitos radioativos de alta atividade existente baseia-se no seu confinamento num arranjo de poços profundos perfurados na formação geológica de interesse a partir da superfície do terreno. Esse método foi originalmente idealizado para formações de sal (halita) e também como uma alternativa da disposição em cavidades subterrâneas. Estudos posteriores mostraram sua viabilidade para outros tipos de ambientes geológicos, por exemplo, domos salinos, rochas metamórficas, ígneas e formações sedimentares argilosas .

A profundidade de estocagem prevista pode variar de 300 a 6000 metros. O número de poços perfurados vai depender da quantidade de recipientes de rejeito e da espessura da formação geológica, enquanto que o espaçamento entre as perfurações dependerá da taxa de geração de calor de cada recipiente de rejeito e da capacidade de troca de calor do meio geológico adjacente. Se esse meio apresentar problemas de infiltrações de águas será necessária a fixação de revestimentos em toda a extensão do poço de estocagem para evitar o carreamento da radioatividade, através das rochas, para a superfície .

A Figura 4.2. ilustra o conceito de disposição em poços profundos .

As instalações superficiais indicadas na figura são representadas pelo sistema de manuseio (área de descarga do rejeito e câmaras blindadas), equipamentos de perfuração e veículos para transporte e introdução dos recipientes de rejeito nos poços. Estes são transportados numa embalagem de aço montada sobre o veículo, que deve estar equipado com instrumentos de controle de velocidade e da tensão e elevação dos cabos utilizados para a introdução do rejeito nos poços . Em casos em que estão previstos armazenamentos em grandes profundidades é necessária a utilização de guindastes de alta velocidade, semelhantes aos empregados no transporte de veículos de pesquisas oceanográficas .

O sistema de câmaras blindadas deve estar equipado com dispositivo para a descontaminação, inspeção e reembalagem ("recanning"), sendo que a área de descarga dos recipientes, anexa ao sistema, sujeita à contaminação, deve ser mantida sob pressões ligeiramente negativas e equipadas com exaustores que dirigem o ar para um conjunto de filtros de alta eficiência. Posteriormente, esse ar é eliminado através de uma chaminé, onde uma monitoração da radioatividade é continuamente efetuada. Além desses equipamentos, outros são necessários, a saber, dispositivos auxiliares de vedação e isolamento dos poços, laboratórios e oficinas .

A partir das operações executadas nas instalações superficiais os recipientes de rejeito são empilhados um após outro dentro de cada poço até uma cota preestabelecida, procedendo-se após, os trabalhos de vedação para o isolamento da radioatividade .

O conceito de disposição geológica em poços profundos, do mesmo modo que em cavidades subterrâneas, apresenta variações que preveêm a aplicação de dispositivos de refrigeração adicionais "in situ" e a fusão rejeito-rocha hospedeira .

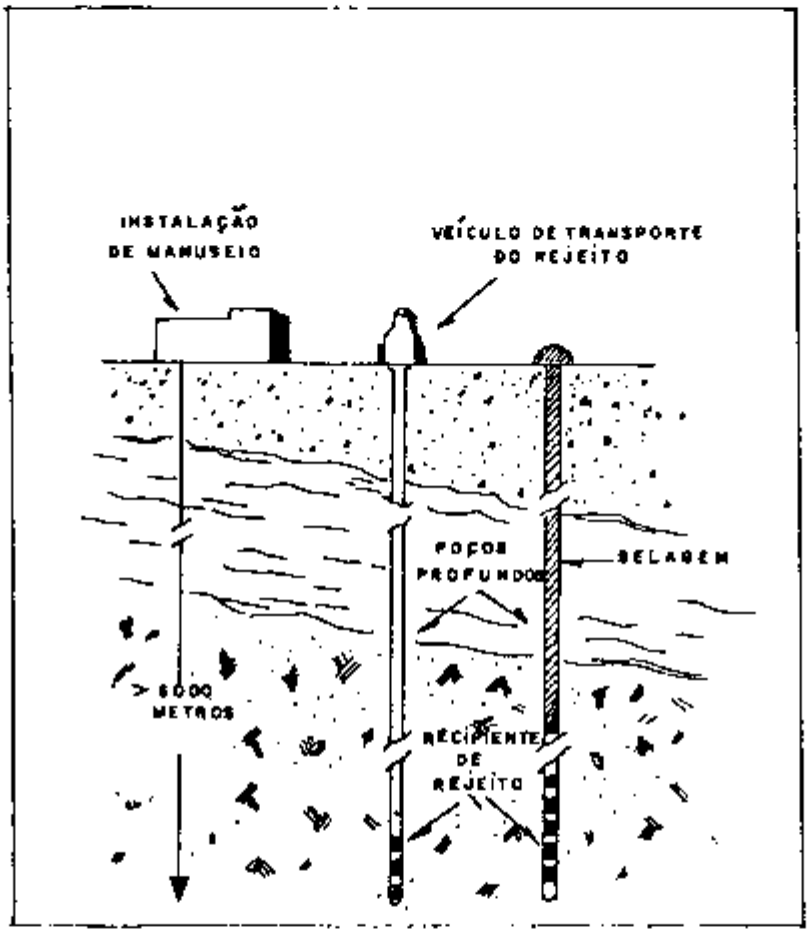



FIGURA 4.2. - Conceito de disposição geológica em poços profundos /90/ .

## 4.3. As formações geológicas de maior interesse

As formações geológicas que apresentam potencialidades para a disposição de rejeitos radioativos de alta atividade podem ser divididas em três categorias :

1. Evaporitos
2. Outros depósitos sedimentares
3. Rochas cristalinas ígneas e metamórficas

Com base nesse esquema, apresenta-se a seguir os vários tipos de formações geológicas e suas características mais importantes para sua utilização como repositórios finais de rejeitos radioativos .

### 4.3.1. Evaporitos

São rochas sedimentares químicas que se formam a partir da evaporação de grandes corpos de água salgada, que ficaram retidos em depressões isoladas junto à costa. A evaporação intensiva causada pelo sol e pelo vento determina a concentração dos sais, que vão cristalizando lentamente .

A invasão periódica do mar e a evaporação contínua podem produzir depósitos espessos de sal. Uma seqüência típica de evaporitos marinhos começa com a deposição de argilas finas seguidas por dolomitos e/ou anidrita. A porção principal consiste em halita, geralmente intercalada com veios de potássio .

Halita : a halita, cloreto de sódio, é o evaporito mais comum da crosta terrestre, ocorrendo em dois tipos de estruturas : uma em camadas e outra na forma de domos ou diápiros .

Os depósitos em camadas formam-se em ambientes de sedimentação calmo e são raras as ocorrências de perturbações nesse tipo de sedimento. As espessuras são bastante variáveis, podendo apresentar valores de poucos metros até algumas centenas, ocupando bacias de milhares de quilômetros quadrados de área. A própria existência de depósitos salinos evidencia a ausência quase total de circulação de águas subterrâneas, que poderiam impôr sérias restrições quanto

à sua viabilidade como repositório de rejeitos radioativos .

A formação de domos salinos está condicionada, principalmente, ao efeito combinado de fenômenos tectônicos e gravitacionais, isto é, diferenças entre os pesos específicos do sal e dos sedimentos superpostos a ele. Um domo salino típico caracteriza-se por um corpo intrusivo de secção circular, elíptica ou alongada, algumas vezes com prolongamentos laterais semelhantes a cogumelos. Normalmente, os domos salinos possuem, grandes massas de halita de até milhares de quilômetros cúbicos. Embora o topo dessas estruturas esteja geralmente próximo da superfície, a maior parte de sua porção principal ocorre em profundidades em torno de 2000 metros, podendo, às vezes, atingir valores maiores que 10000 metros /60/ .

Os depósitos de halita, em geral, são largamente pesquisados para a produção de sal, de modo que as escavações realizadas neles podem ser utilizadas nas pesquisas para estocagem de rejeitos. Além do mais, em alguns países, a existência de tais depósitos é tão numerosa que a utilização de parte deles para fins de disposição de rejeitos radioativos não interfere na produção de sal. Por outro lado, deve-se levar em conta sua associação com ocorrências de interesse econômico, por exemplo, sais de potássio, petróleo e gás natural .

As principais vantagens quanto à utilização da halita como repositório de rejeitos radioativos são :

a. A halita é impermeável para líquidos e gases, devido às suas propriedades plásticas e à sua baixa porosidade. A plasticidade dessa rocha impede a ocorrência de juntas e fraturas, que poderiam ser produzidas pelas altas pressões em profundidade. O comportamento do sal, mesmo para descontinuidades produzidas artificialmente, é no sentido de restituí-las após um certo período de tempo, devido àquelas mesmas propriedades plásticas .

b. Como mencionado anteriormente, tanto em camadas como em domos salinos , a possibilidade de circulação de águas subterrâneas é bem reduzida . Isso é evidenciado, principalmente, pelas ocorrências muito comuns desse tipo de formação a despeito de sua conhecida solubilidade. Por outro lado, os depósitos de sal em camadas são, em muitos casos, resistentes ao ataque de águas subterrâneas. Isso se aplica, em menor escala , aos domos salinos. Durante o desenvolvimento dessas estruturas pode

ocorrer que elas alcancem cotas onde estejam presentes acumulações de água, o que vai produzir um processo de dissolução lenta do sal, que pode persistir por longos períodos. Nesse processo os constituintes menos solúveis do sal, por exemplo, anidrita e argila, formam uma capa de rocha que funciona como uma barreira contra o desenvolvimento de dissoluções posteriores .

c. Os corpos de sal, além de plásticos, apresentam outra propriedade importante : o endurecimento de deformação ("strain hardening"). Portanto, apesar de sua plasticidade, o sal possue uma resistência à compressão elevada, semelhante à do concreto, ou até maior. Em vista disso , escavações em formações de sal,podem ser feitas com grande segurança sem necessidade de escoramentos; se bem que são necessárias medidas "in situ" para avaliação das reais condições do corpos rochoso em questão .

d. Em relação à outras rochas, a halita tem uma condutividade térmica elevada ($12 \times 10^{-13}$ cal/cm.s.$^{o}$C ou 4,8 W/m.$^{o}$C) nas condições de temperatura de uma mina, sendo um fator positivo para a dissipação das taxas de produção de calor altas provenientes do rejeito .

e. As rochas salinas são facilmente mineráveis a um custo pouco elevado.

Algumas desvantagens podem ser apontadas, quanto à utilização das formações de sal para disposição geológica de rejeitos radioativos, a saber, possíveis fenômenos de dissoluções pela ação de águas subterrâneas; ocorrência de fluxo de salmoura: diapirismo; inclusões de salmoura e ausência de propriedades absorsivas que restringem a migração de radionuclídeos. Apesar disso, deve-se considerar os seguintes aspectos :

a. Os problemas de dissoluções podem ser contornados pela locação do repositório em pontos distantes de zonas que apresentam tais fenômenos.

b. A ocorrência de fluxos de salmoura é muito rara, mas necessita de investigações ssistemáticas .

c. A possibilidade de reativação do diapirismo dos domos salinos pode ser determinada por investigações sistemáticas, que permitam a escolha de estruturas inativas ou com movimentos muito lentos .

d. As inclusões de salmoura não são problemáticas, desde que em pequenas quantidades .

e. A ausência de propriedades absorventes não é uma desvantagem muito séria, pois que só serão levadas em conta quando houver a possibilidade de ocorrer migração de radionuclídeos por meio de água subterrânea .

De modo geral, as formações de halita são adequadas para a disposição de rejeitos radioativos. Entretanto, cada ocorrência deve ser cuidadosamente investigada com base em diversos parâmetros necessários para a análise de sua viabilização .

Outros evaporitos : anidrita, gipso e sais de potássio, podem ser apontados preliminarmente como possíveis repositórios finais de rejeitos radioativos, se bem que com potencialidades menores que a halita .

4.3.2. Outros depósitos sedimentares

Formações argilosas : Algumas formações argilosas que, geralmente, possuem boa plasticidade e são livres de circulações de águas subterrâneas são as mais favoráveis para a locação de repositórios de rejeitos radioativos .

O termo formação argilosa inclui uma larga variedade de materiais rochosos , por exemplo, argilas, argilitos, siltitos, folhetos, ardósias e mesmo margas, cujo denominador comum está na grande proporção de minerais de argila em suas composições mineralógicas .

As propriedades físicas e conseqüentemente, a plasticidade dessas rochas são muito variáveis, devido, principalmente, às diferentes condições impostas a elas no decorrer de sua história geológica. No entanto, pode afirmar-se que a plasticidade é diretamente proporcional ao conteúdo de fluidos das formações argilosas. Durante sua deposição esses sedimentos são muito porosos e mostram uma porcentagem de água na faixa de 70-80%. Com o decorrer do tempo e com a compactação, as partículas de argila sofrem um novo arranjo que vai causar a expulsão de boa parte do material fluido intersticial .

Além do conteúdo de água, em menor escala, a plasticidade das formações argilosas pode ser afetada pela composição mineralógica, pela forma e tamanho das

partículas, pelos íons presentes nos fluidos e pela história geológica. Em vista desses vários fatores é quase impossível definir-se padrões de plasticidade para esses sedimentos. Esses valores devem ser analisados para cada ocorrência em particular. Se a plasticidade for acentuada, a rocha fluirá facilmente a qualquer esforço, sendo isso problemático para o confinamento seguro dos rejeitos. Se ao contrário, a plasticidade for muito pequena, as rochas argilosas tornam-se friáveis e quebradiças, permitindo o desenvolvimento de fraturas, colapsos e zonas de alta permeabilidade próximas à superfície ou a planos de falha. Deve ser lembrado, ainda, que a plasticidade natural de um sedimento argiloso pode ser alterada substancialmente pelos efeitos térmicos induzidos pelo rejeito radioativo .

As formações argilosas de boa plasticidade, portanto, mais favoráveis, vão conter quantidades significantes de água. Entretanto, deve ser enfatizado que a água contida em algumas argilas ou folhelhos pode ser considerada imóvel, já que a permeabilidade dessas rochas é tão pequena que o fluxo é potencialmente nulo .

Por outro lado, a presença de água nos sedimentos argilosos é um aspecto muito importante em relação à produção de calor pelo rejeito radioativo. O comportamento dos fluidos presentes nessas rochas só pode ser bem equacionado pelo estudo da interação entre o rejeito gerador de calor e meio geológico hospedeiro, em profundidades correspondentes àquelas previstas para a estocagem. No entanto, pode obter-se parâmetros aproximados desse comportamento por meio de simulações que reflitam da melhor maneira as condições reais de campo .

Ocorrências de formações argilosas são muito numerosas e a utilização de parte delas para a disposição de rejeitos radioativos não irá afetar outras aplicações .

As potencialidades dos sedimentos argilosos como repositórios finais de rejeitos radioativos são relativamente grandes, possuindo certas vantagens em comparação com as formações de sal :

a. Os minerais de argila são insolúveis, de modo que nesse caso, o problema de circulações de águas subterrâneas inexiste .

b. A maioria dos minerais de argila apresentam boa capacidade de absorção,

minimizando, assim, a migração de radionuclídeos para a superfície .

Algumas desvantagens podem ser apontadas :

a. A existência de líquidos intersticiais e de minerais hidratados pode produzir efeitos indesejáveis em termos de confinamento de rejeitos radioativos .

b. A condutividade térmica dos sedimentos argilosos é 3-4 vezes menor que a do sal. Os efeitos térmicos podem modificar a plasticidade da formação e a capacidade de absorção de alguns minerais de argila, nas áreas de contato rocha-rejeito .

c. Apesar da existência de técnicas de escavações em rochas moles, é bastante difícil esse trabalho em formações argilosas .

d. É bastante difícil a determinação dos volumes e taxas de circulação de fluidos através de áreas específicas de sedimentos ou rochas argilosas .

Formações calcárias : Os sedimentos calcários ou rochas carbonáticas incluem todas aquelas rochas compostas essencialmente de carbonato de cálcio; menos que 20% de minerais de argila e 40% de minerais não carbonáticos. O calcário é o mais comum e a mais importante das rochas carbonáticas, sendo composto essencialmente de $CaCO_3$. Essa rocha apresenta algumas variedades que serão discutidas aqui em conjunto,devido a grande similaridade de suas composições químicas e mineralógicas. Entre essas variedades estão os calcários orgânicos ("chalk") e dolomitos ($CaMg\ (CO_3)_2$), rocha esta originada pela substituição química de parte do cálcio por magnésio .

Normalmente, as rochas calcárias são caracterizadas por uma alternância de camadas cujas espessuras variam de poucos centímetros até muitos metros com limites bem definidos. Calcários e, principalmente, dolomitos apresentam-se geralmente fraturados perpendicularmente às faixas. Zonas de falhas, se existentes, são bem desenvolvidas e constituem caminhos de percolações de águas subterrâneas. A resistência à compressão de calcários densos e pouco porosos é da ordem de 1000 $Kgf/cm^2$. A curva tensão/deformação dessas rochas mostra um comportamento elástico muito rígido com um mínimo de plasticidade, o que resulta num material muito quebradiço .

As rochas carbonáticas, em geral, são solúveis em água, principalmente, se esta contém algum ácido em sua composição. Essa solubilidade é evidenciada pelos fenômenos cársticos e por cavernas de dissolução muito comuns em formações calcárias.

As rochas calcárias de origem orgânica são, em muitos casos, utilizadas sistematicamente para suprimento de água. Nesse caso, quando tal potencialidade é verificada, sua utilização como repositório de resíduos radioativos é inviável.

Pelo exposto, as formações carbonáticas por si só não apresentam características interessantes do ponto de vista de disposição de rejeitos radioativos de alta atividade. Somente quando a combinação com outros tipos de materiais rochosos mais apropriados existir é que podem oferecer melhores potencialidades. Existem formações calcárias completamente secas capeadas por camadas espessas de folhelhos, que possuem plasticidade, impermeabilidade e capacidade de absorção adequadas, enquanto que o calcário fornece a facilidade de escavação, boas propriedades de transferência de calor e propriedades geoquímicas favoráveis. Nesse caso, o rejeito seria estocado no que poderíamos considerar uma inclusão calcária em formações argilosas. Tal particularidade serve para demonstrar a necessidade de investigações cuidadosas no local previamente indicado para a instalação do repositório.

Sedimentos arenosos : Os arenitos constituem um outro grande grupo de rochas sedimentares. Eles ocorrem, geralmente, em sequências gradativas a partir de sedimentos argilosos seguidos por siltitos, que por sua vez concorrem para arenitos puros.

É muito comum, em arenitos, a migração de águas subterrâneas tanto através de seus poros como através de juntas, não sendo, portanto, aconselhável a utilização dessas rochas para fins de disposição final de rejeitos radioativos. Entretanto sob condições geológicas mais específicas onde, por exemplo, os arenitos possuem granulação muito fina associada a uma porcentagem significativa de argilas, e/ou cuja permeabilidade tenha sofrido grande redução por fenômenos naturais de cimentação intergranular, alguns estudos mais rigorosos podem ser efetuados para que não se estabeleça uma inviabilização prematura.

Da mesma maneira que as rochas calcárias, também os sedimentos arenosos podem ser isolados da circulação de águas subterrâneas pelo capeamento de rochas

argilosas impermeáveis, sendo esta uma situação, à primeira vista, favorável para a disposição de rejeitos radioativos .

4.3.3. Rochas Ígneas e metamórficas

As rochas Ígneas e metamórficas são materiais duros ou cristalinos, possuindo plasticidade incipiente, de modo que qualquer desenvolvimento de descontinuidades físicas, por exemplo, juntas, fraturas ou falhas, tende a constituir-se em caminho permanente de migrações de águas subterrâneas. Porém, processos de escorregamentos e desenvolvimento de minerais de preenchimento, podem agir com o passar do tempo geológico e provocar a obstrução dessas vias de circulação de água .

Outros aspectos que envolvem situações geológicas particulares podem determinar a existência de grandes massas rochosas cristalinas livres de circulações líquidas .

Rochas Ígneas : As rochas Ígneas podem ser divididas em intrusivas e extrusivas. As intrusivas são as consolidadas nas porções profundas da crosta terrestre, enquanto que as extrusivas se originam a partir de processos vulcânicos que atingem a superfície terrestre, consolidando-se, principalmente, sob a forma de extensos derrames .

Entre as rochas Ígneas intrusivas, apenas as de larga ocorrência são interessantes para os propósitos de disposição de rejeitos radioativos, enquanto que os basaltos e tufos vulcânicos são significativos entre as rochas extrusivas .

Granitos : Granito é a rocha plutônica mais comum e tem sido pesquisado largamente para fins de disposição geológica do rejeito radioativo de alta atividade.

Existe na natureza uma grande variedade de granitos, principalmente, em função de pequenas diferenças em suas composições mineralógicas. Entretanto, essas rochas apresentam sempre uma composição básica representada pelos minerais : feldspato alcalino, quartzo e mica .

O granito ocorre quase sempre em grandes corpos rochosos divididos em grandes blocos por sistemas de fraturas planas, principalmente nas proximidades da superfície da crosta .

A relação tensão/deformação mostra que o granito é uma rocha de comportamento essencialmente elástico. Sua resistência à compressão varia entre 1500-2200 $kgf/cm^2$ /60/ .

Normalmente, deve-se contar com ocorrências de águas subterrâneas em formações graníticas, embora pesquisas recentes demonstrem que em grandes profundidades' circulações são muito raras. Uma questão que deve ser então muito bem estudada é se tal condição vai permanecer inalterada durante o tempo necessário, no caso da instalação de um repositório de rejeito nessas formações graníticas .

Em muitos corpos graníticos o intemperismo ao longo de fraturas leva à formação de minerais cuja capacidade de absorção é muito boa, o que funciona como ' um fator de restrição da mobilidade de muitos radionuclídeos. Os efeitos térmicos e mecânicos induzidos pelo repositório nas condições hidrológicas do corpo granítico exige também estudos minuciosos .

Basaltos : As ocorrências de rochas basálticas perfazem cerca de 90% das rochas vulcânicas existentes na natureza. Assim como os granitos, elas são encontradas em todos os continentes. Seus constituintes mineralógicos principais são : piroxênio, olivina e feldspatos álcali-cálcicos .

As características litológicas dessas rochas variam desde corpos maciços até ' formações pobremente bandadas, passando por aspectos de natureza colunar. Geralmente aparecem sob a forma de superposições de camadas delgadas e espessas, resultantes de extrusões vulcânicas sucessivas e irregulares. Essas camadas podem, usualmente, estar intercaladas por cinzas vulcânicas, solos fósseis, zonas de alteração ou superfícies irregulares que permitem a circulação de água. É comum a existência de fraturas que permitem também infiltrações com muita facilidade. A permeabilidade dos basaltos, no entanto, é muito variável. Certas consolidações de lavas como as encontradas no Havaí, podem permitir a passagem de quantidades substanciais de águas subterrâneas devido à existência de juntas e poros ou "tubos" formados pela exalação de gases vulcânicos durante o resfriamento dessas lavas. Já, basaltos densos são bem mais impermeáveis.

A água subterrânea em contato com rochas basálticas possui uma alcalinidade alta e é saturada com alumina e sílica /60/. Do mesmo modo que os granitos, os basaltos não possuem capacidade de absorção. Os basaltos enriquecidos de minerais do grupo das zeólitas, enriquecimento generalizado nas rochas basálticas'

de derrame, podem eventualmente apresentar uma capacidade de absorção relativamente boa. Considerando, entretanto que a zeolitização dos basaltos não é um processo muito intenso e profundo e que esse fenômeno geralmente ocorre no topo dos derrames de lavas, pode considerar-se que as zeólitas exercem eficiência de certo modo reduzida na contenção de migração de radionuclídeos.

A resistência à compressão dos basaltos, pode alcançar valores elevados, em torno de 4000 $Kgf/cm^2$ /60/.

Os basaltos de granulação fina são conhecidos como as rochas de maior resistência à compressão, a cuja curva tensão/deformação assemelha-se à do aço.

Uma camada espessa de basalto denso pode constituir-se num bom repositório de rejeitos radioativos desde que seja livre de migrações de água, apesar das dificuldades em relação aos trabalhos de escavação.

Tufos vulcânicos : São rochas originadas a partir da consolidação de materiais produzidos durante erupções vulcânicas explosivas. Esses materiais podem ser tanto magmáticos (cinzas vulcânicas) como produtos de pulverização de rochas preexistentes, ou de ambos. Eles estão quase sempre associados a outras rochas da mesma origem, formando platôs ou acumulações em forma de cone. Em consequência, têm, geralmente, a mesma composição mineralógica de suas associações.

Os tufos são rochas algumas vezes densas e compactas, mas sua resistência à compressão é muito baixa (200-300 $kgf/cm^2$) em relação às outras rochas vulcânicas existentes na natureza.

A desvitrificação das partículas de vidro vulcânico presentes em abundância nos tufos, frequentemente leva ao desenvolvimento de minerais do grupo das zeólitas que pode produzir uma rocha com alta capacidade de absorção. Para que uma ocorrência de tufos vulcânicos possa ser considerada disponível para a instalação de um repositório de rejeitos radioativos, devem estar associadas a ela algumas características, por exemplo, grandes extensões e espessuras do corpo rochoso.

Rochas Metamórficas : Gnaisses e xistos são dois tipos importantes de um grupo muito grande de rochas metamórficas. São variáveis e compostos de zonas de menor resistência que podem representar vias de migração de águas subterrâneas.

Por outro lado, na natureza, existem gnaisses e xistos de consistência alta e impermeáveis, que tem despertado um interesse crescente para a utilização como repositórios de resíduos radioativos.

A resistência à compressão das rochas metamórficas é medida em relação à sua foliação e sua xistosidade. Assim, esse parâmetro é definido por dois valores; um paralelo e outro perpendicular aos planos de menor resistência. Geralmente, são consideradas como rochas resistentes, possuindo plasticidade desprezível.

As grandes diferenças existentes entre os vários tipos de rochas metamórficas' levam à necessidade de considerar cada formação em particular quanto às suas ' potencialidades para a disposição geológica.

Gnaisses e xistos são rochas muito comuns e ocorrem quase sempre em corpos rochosos de volumes consideráveis, mas apesar disso são ocorrências desprovidas' de potencialidades econômicas no que refere ao aproveitamento de seus recursos minerais.

## CAPÍTULO V : CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE LOCAIS

A escolha de locais para o isolamento dos rejeitos radioativos de alta atividade deve ser feita visando a garantir que não haverá perigo de exposição às radiações para o público em geral, tanto por meio do contato direto como através de qualquer mecanismo natural. Devido à heterogeneidade do meio geológico não parece possível que o objetivo exposto acima possa ser alcançado com base em fatores preestabelecidos e para qualquer local. Ele será alcançado de diferentes maneiras em locais diferentes de acordo com a natureza de cada formação geológica e com as condições de cada área em estudo .

A ação das águas subterrâneas é o principal mecanismo capaz de transportar os radionuclídeos estocados em profundidade para a superfície do terreno . Assim, a maioria dos fatores geológicos e hidrogeológicos considerados para cada tipo de rocha se referem à proteção do rejeito contra a circulação de águas subterrâneas. Devido à larga variedade de tipos de formações geológicas e seus diferentes modos de ocorrência, à grande complexidade de muitos dos ambientes geológicos e à natureza interdependente dos aspectos litológicos que governam a presença de circulações de água em profundidade, torna-se inviável preestabelecer critérios específicos para a seleção de um ambiente geológico para disposição de rejeitos radioativos. A potencialidade de um local deve ser avaliada de acordo com seus próprios parâmetros geológicos e hidrológicos .

De qualquer maneira, para facilitar o processo de escolha de locais , pode-se apontar alguns parâmetros genéricos, apresentados a seguir .

### 5.1. Topografia

A topografia dos locais destinados à instalação de repositórios de rejeitos radioativos deve ser caracterizada por relevos baixos e por terrenos inclinados suavemente, principalmente porque as vias de acesso ao local, por onde serão transportados os materiais radioativos, devem possuir um coeficiente de segurança relativamente alto. Portanto, são necessárias e essenciais feições topográficas amenizadas para que tal coeficiente seja alcançado .

Em certos casos, as características superficiais de uma área são um reflexo das condições de sub-superfície dessa mesma área. Assim, feições

topográficas irregulares podem ser indicativas da existência em sub-superfície de condições geológicas e hidrológicas complexas; do mesmo modo que relevos suavizados podem indicar a presença de camadas rochosas contínuas, sem perturbações estruturais desfavoráveis em subsuperfície .

Especificamente, para corpos rochosos salinos espessos, é essencial que prevaleçam relevos moderados no local e nas áreas próximas da ocorrência, pois desníveis acentuados podem criar solicitações de carga diferenciais, que provocariam fluxo de material e diapirismo .

Para repositórios localizados em regiões costeiras, as cotas do terreno precisam estar acima dos níveis mais elevados das incursões marinhas previstas durante toda a vida útil das instalações de disposição dos rejeitos radioativos.

## 5.2. Tectônia e Sismicidade

As áreas favoráveis para a disposição em formações geológicas de rejeitos radioativos de alta atividade são aquelas que possuem sismicidade baixa e estabilidade tectônica, já que qualquer ambiente geológico pode ser afetado desfavoravelmente por perturbações crustais de grande magnitude. Além disso, as instalações para manuseio na superfície e nos poços ou mesmo as aberturas de acesso às câmaras subterrâneas são susceptíveis a danos durante terremotos intensos . Em casos extremos, esses eventos podem causar a interrupção temporária das operações e até mesmo a ruptura da barreira geológica de contenção da radioatividade e a inundação do repositório em casos que haja a interceptação de aquíferos .

O risco mais sério para um repositório, a longo prazo, é a ocorrência de falhamentos geológicos. Para rochas de comportamento plástico, por exemplo , sal, argila e folhelhos, ocorre que qualquer descontinuidade sofre cicatrização, garantindo o confinamento da radioatividade. Entretanto, para rochas duras e quebradiças, como granito e calcário, essas descontinuidades vão tornar-se vias de circulações de águas subterrâneas, diminuindo sensivelmente a capacidade de confinamento do meio geológico. Genericamente, regiões cuja história geológica evidencia estabilidade tectônica vão caracterizar-se por eventos sísmicos pouco freqüentes e de intensidade baixa. Inversamente, aquelas que foram submetidas a processos orogênicos no passado geológico recente vão mostrar evidências de alta incidência de terremotos em sua história .

Assim, a avaliação do estado tectônico e da sismicidade de locais selecionados, pode ser feita por meio de uma classificação regional das ocorrências' e da distribuição histórica dos terremotos e também por meio de estudos geológicos especiais. Análises de micro terremotos podem ser aplicadas para a identificação de instabilidades localizadas .

## 5.3. Estratigrafia

### 5.3.1. Profundidade da zona de disposição

Devido aos processos de intemperismo, muitas rochas que ocorrem em subsuperfície, a profundidades em torno de uma centena de metros, possuem muitas ' fraturas abertas que são capazes de permitir a circulação de água. Esse aspecto aliado à lenta, mas persistente remoção da cobertura superficial da crosta pela erosão, torna patente o fato de que os estudos de corpos rochosos para construção de repositórios de rejeitos radioativos devem ser efetuados com base em profundidades a partir de 200 a 300 metros /60/ . Desse modo, com exceção de regiões de climas áridos, as cotas de estocagem estarão abaixo dos níveis hidrostáticos.

Para rochas de sal é aconselhável que se restrinja a profundidade de ' disposição até a cota de 1500 metros. Isto porque as operações de escavação tornam-se impraticáveis devido ao aumento progressivo das taxas de fluxo plástico ' das rochas salinas quando submetidas aos valores elevados de pressão, reinantes em grandes profundidades .

Para folhelhos, profundidades superiores a 1500 metros não são recomendáveis, já que se torna difícil conseguir aberturas estáveis e seguras acima desse limite. Por outro lado,as rochas : calcários, granitos e basaltos, podem ser trabalhadas com segurança em níveis mais profundos. Nesse caso, as restrições impostas são de caráter econômico e tecnológico. O caráter econômico se revela no alto custo das operações de ensaios e avaliações, enquanto que o tecnológico diz respeito ao estádio real de desenvolvimento do conceito de disposição em tais ' profundidades elevadas .

Do exposto, parece claro que as profundidades de disposição mais prováveis devem variar entre 300 e 1500 metros .

Um aspecto relacionado à profundidade de disposição que deve ser levado

em conta é o aumento progressivo da temperatura com a profundidade na crosta terrestre. Em áreas de gradiente geotérmico normal esse aumento é de aproximadamente 30 °C/km. Entretanto, existem regiões de gradientes geotérmicos anormais, tanto abaixo como acima dos valores normais esperados. Por exemplo, em áreas de vulcanismo recente a temperatura pode aumentar entre 80-100 °C/km. Tais áreas são totalmente inviáveis para a locação de repositórios de rejeitos radioativos .

5.3.2. Espessura e extensão das camadas

Em geral, uma formação adequada para a construção de um repositório de rejeitos radioativos deve possuir extensões laterais e verticais suficientes , de modo que qualquer fraturamento imposto em zonas diretamente próximas do repositório seja assimilado, impedindo assim uma redução da capacidade de confinamento da rocha hospedeira. Do mesmo modo, essa rocha deve possuir dimensões tais que permita uma dissipação de calor adequada .

Em circunstâncias que envolvam materiais rochosos de comportamento plástico, como sal e folhelhosum volume menor de rocha será necessário para absorver e soldar as fraturas do que para rochas quebradiças, por exemplo, calcário , granito e basalto, que se deformam elasticamente. Em ocorrências em que rochas quebradiças estão completamente envolvidas por materiais de comportamento mais plástico, os volumes de rocha hospedeira necessário pode ser bem menor .

5.3.3. Homogeneidade ou Pureza

De início, rochas que apresentam um alto grau de homogeneidade são consideradas ideais para o confinamento geológico da radioatividade. No entanto é muito difícil de estabelecer limites rígidos para a classificação dos corpos rochosos quanto à sua homogeneidade para fins de disposição de rejeito. Esses limites variam muito em função de fatores, a saber, tipo da rocha hospedeira, natureza e características dos corpos rochosos ou minerais que ditam a heterogeneidade da ocorrência, tipo de rejeito a ser estocado, além do modo de confinamento previsto em projeto .

Na natureza é comum encontrar-se rochas sedimentares do tipo calcário, anidrita e sal, em camadas bem homogêneas (30 cm ou mais de espessura) separadas

por finos estratos de folhelhos. A natureza e o posicionamento desses estratos são importantes para o traçado das diretrizes das operações de escavação subterrânea. Quando esses estratos se alternam em intervalos grandes entre si, são utilizados como referência para a execução das aberturas subterrâneas. Ao contrário, quando se alternam em pequenos intervalos podem levar à instabilização das galerias devido à tendencia do corpo rochoso principal em se separar ao longo desses estratos, causando desmoronamentos.

Do ponto de vista químico, a existência de minerais hidratados, ou outros componentes da rocha, que têm tendências a reagir com o rejeito, é problemática, especialmente quando se prevê a produção, por parte do rejeito, de grandes quantidades de calor. A dissipação desse calor pode ser afetada negativamente pela existência de impurezas, principalmente sob a forma de intercalações nas proximidades da zona de disposição.

Associações de minérios ou minerais potencialmente interessantes do ponto de vista econômico, inviabilizam a utilização de uma formação para fins de disposição geológica, assim como, ocorrências de intercalações de rochas propensas à circulação de água.

5.3.4. Natureza e extensão das camadas encaixantes

A barreira geológica primária no confinamento de rejeitos radioativos em formações geológicas é, na maior parte dos casos, a própria rocha hospedeira. Porém uma proteção adicional pode ocorrer naturalmente pela existência de materiais rochosos impermeáveis capeando a formação escolhida como repositório. Uma situação bem favorável pode ser exemplificada pelo capeamento de camadas espessas de rochas de comportamento plástico, impermeáveis à circulação de águas subterrâneas. Devido à plasticidade elas são capazes de assimilar as deformações impostas pela subsidência ou pelo encurvamento ("buckling"), fenômenos que são causados pela expansão térmica da rocha hospedeira.

Uma situação desfavorável pode ocorrer, quando o capeamento se caracteriza por camadas rochosas sobrejacentes que permitem a circulação de grandes volumes de águas subterrâneas. Nesse caso existe um risco potencial de inundação do repositório em caso de fraturamento imprevisto da rocha que contém os rejeitos radioativos.

A maioria das rochas possui algumas vias de circulação de água nas proximidades da superfície da crosta, porém a existência de intercalações de camadas impermeáveis de 300 metros ou mais de espessura reduz os riscos potenciais de ocorrência de infiltração para um valor mínimo .

## 5.4. Estruturas

### 5.4.1. Mergulho ou inclinação das camadas

Com exceção dos diápiros salinos, o mergulho ideal dos estratos em rochas sedimentares, para o confinamento seguro de rejeitos radioativos, não deve ultrapassar alguns poucos graus, facilitando assim a planificação dos trabalhos subterrâneos e das operações de transporte de rejeito. Para que se mantenha a uniformidade é recomendável também que as escavações se restrinjam a horizontes estratigráficos específicos, ou a camadas que acompanham quase sempre o mergulho dos estratos.

São desfavoráveis as inversões freqüentes e abruptas na inclinação dos estratos. Essas irregularidades indicam que as rochas em questão estiveram submetidas a esforços tectônicos intensos, que na maioria dos casos, envolvendo rochas quebradiças, impõem fraturamentos que vão se constituir em vias de circulação de águas subterrâneas. Mesmo em circunstâncias em que as aberturas subterrâneas possam ser projetadas para resistirem aos efeitos negativos de camadas com mergulhos acentuados, sua utilização para disposição geológica vai ser prejudicada pelo aumento potencial da circulação de água .

Outro fator negativo imposto pela existência de mergulhos elevados é a ausência de capeamentos impermeáveis sobrejacentes, que constituem barreiras contra a infiltração de água .

Para rochas plásticas, como o sal e sedimentos argilosos, deformações associadas a estratos inclinados tendem a ter um efeito muito pequeno nos movimentos de águas, já que os fraturamentos acabam sendo soldados naturalmente, impedindo circulações fluidas. Por outro lado, em rochas friáveis, como calcário e anidrita, as fraturas não se fecham e podem permitir a introdução indesejável de água nos repositórios.

Devido às suas origens, as rochas ígneas e metamórficas são, basicamente, mais consistentes litologicamente do que as sedimentares. Assim sendo, os mergulhos

de estruturas planares, por exemplo, falhas, juntas e outras, comuns em rochas cristalinas, afetam a viabilidade para a disposição de rejeito muito mais do que em função de variações litológicas. Mesmo assim, a orientação preferencial dessas estruturas não podem ser generalizadas, mas deve ser definida em função de parâmetros geológicos locais e regionais relativos a uma dada área em estudo.

5.4.2. Juntas e Falhas

A existência de falhas e juntas tem um efeito negativo em rochas que são candidatas para o confinamento de rejeitos radioativos, pois constituem descontinuidades físicas nos corpos rochosos. Elas podem afetar os trabalhos de escavação e causar instabilidade nas aberturas ou galerias .

De importância é o fato delas representarem as principais vias de migração de água em muitas rochas, principalmente nas cristalinas. Nos casos de falhamentos atingirem a zona de disposição, após o isolamento do repositório , as formações plásticas serão capazes de manter a integridade das instalações , enquanto que os materiais cristalinos poderão comprometer o confinamento seguro da radioatividade.

As falhas de grande porte, isto é, que podem ser traçadas por centenas de quilômetros na superfície da Terra, podem deformar as rochas numa área de pelo menos alguns quilômetros de largura e seguramente devem ser evitadas na seleção de locais para disposição de rejeitos radioativos. Por outro lado, a influência na escolha de locais de certas flexuras de menores envergaduras só pode ser avaliada em função de parâmetros, por exemplo, natureza e extensão dessas estruturas, tipos de rocha envolvidos e hidrologia. Em geral, as falhas e juntas são mais pronunciadas nas proximidades da superfície do terreno, portanto mais susceptíveis à infiltração de água que em profundidades de centenas de metros. Porém, o parâmetro profundidade por si só não é suficiente para garantir tal impermeabilidade, de modo que se faz necessária uma avaliação independente dos sistemas de falhas e juntas para cada local estudado .

5.4.3. Diapirismo

Em casos extremos em que corpos espessos de sal ou outras rochas de comportamento plástico existam em profundidade, sob condições de elevadas pressões diferenciais, a ocorrência de fluxo desses materiais rochosos pode levar

à formação de estruturas diapíricas (domos e anticlinais). Essas estruturas podem ser favoráveis para a disposição de rejeitos radioativos se forem comprovadamente estáveis, e se fôr possível garantir que não sofrerão reativações durante todo o tempo em que os radionuclídeos apresentarem níveis perigosos de radioatividade. Cabe aqui salientar que a energia calorífica liberada pelo rejeito, apesar de consideravelmente grande, afeta apenas pequenos volumes de rocha e persiste por um tempo tão curto, que é incapaz de iniciar ou reativar um processo de diapirismo /60/. No entanto, estudos pormenorizados devem ser feitos para a detecção de diapirismo incipiente no presente, e para assegurar que processos geológicos durante as próximas centenas de milhares de anos ou mais não criarão condições para tais movimentos.

## 5.5. Propriedades físicas e químicas

As propriedades físicas e químicas das rochas são muito importantes no estabelecimento da capacidade das formações geológicas para o confinamento de rejeitos radioativos. Essas propriedades determinam vários parâmetros como circulação de água subterrânea, dissipação do calor de decaimento, efeitos de radiação, estabilidade das aberturas subterrâneas, estado do rejeito e qualquer barreira artificial contra o escape de radionuclídeos.

### 5.5.1. Permeabilidade, Porosidade e Dispersividade

Rochas que possuem permeabilidade baixa são favoráveis para a disposição de rejeitos radioativos, principalmente pelo fato de ser bem mais fácil de executar trabalhos de escavações em ambientes secos. Na maioria dos casos essas rochas possuem também porosidade baixa. As formações argilosas constituem exceções. Já o sal, calcário e granito possuem porosidades baixas (5%), o mesmo acontecendo com suas permeabilidades. Essa situação, geralmente, permite que os trabalhos de escavação sejam realizados em condições secas, se bem que a incidência de fraturamentos nesses tipos de rochas seja comum, levando a um aumento significante da permeabilidade e conseqüentemente, da probabilidade de ocorrência de migrações de água.

A dispersividade do meio permeável é também um parâmetro muito importante, pois governa a dispersão de substâncias dissolvidas que migram juntamente com as águas em circulação no meio rochoso. A dispersividade é expressa pelo

coeficiente de dispersão, que depende diretamente da velocidade de deslocamento do fluido e pode ser medido por meio de traçadores .

5.5.2. Inclusões de gases e líquidos

Em muitos evaporitos podem ocorrer inclusões de pequenas quantidades de gases e líquidos. Elas, quando da disposição de rejeitos de alta atividade geradores de calor, podem afetar negativamente as operações do repositório pela decrepitação da rocha e migração de salmoura em direção às fontes de calor, ou seja, os recipientes de rejeitos estocados. Em alguns depósitos de sal, sob temperaturas abaixo do ponto de decrepitação (em torno de 250 $^{o}$C), pequenas cavidades preenchidas com salmoura, de dimensões variáveis entre poucos milímetros até microscópicas, podem "migrar" em direção às fontes de calor, sendo possível transformarem-se em cavidades maiores pela incorporação de outras menores durante a migração .

O mecanismo de migração se dá pela difusão dos íons de sódio e de cloro das partes mais quentes da cavidade para as mais frias, devido à solubilidade do NaCl que é ligeiramente maior sob temperaturas mais elevadas. Quando as cavidades de salmoura representam menos que 1% do volume de sal, a incidência de salmoura envolvendo os recipientes de rejeito é pequena e cessa depois de aproximadamente 10 anos. Os efeitos negativos no repositório, nesse caso, são insignificantes, embora vá existir algumas influências na corrosão dos recipientes e fenômenos de radiólise /60/ .

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

Inclusões isoladas de salmoura ou outros fluidos não serão afetados pela disposição de rejeitos não produtores de taxas elevadas de calor, tanto em rochas salinas como em qualquer outro tipo de formação geológica .

Freqüentemente, encontram-se pequenos bolsões de gás em trabalhos de escavações em seqüências sedimentares que causam explosões e deformações nas galerias e túneis. Em muitos desses casos, as pressões induzidas em torno das aberturas podem ser aliviadas por meio de sondagens no teto ou na base das galerias. O

gás uma vez atingido por essas sondagens, se em quantidades pequenas, pode ser descarregado através dos sistemas normais de ventilação. No entanto, em casos extremos onde camadas ricas em materiais carbonatados estão intercaladas com rochas do tipo folhelhos ou sal, a presença de infiltrações de metano e de outros gases perigosos é muito difícil de ser controlada. A localização dessas inclusões deve ser feita antes, por meio de trabalhos geofísicos .

5.5.3. Comportamento mecânico das rochas

Para todas as rochas potencialmente viáveis para a disposição de rejeitos radioativos deve ser estabelecido que pequenas deformações, reversíveis e irreversíveis, induzidas nessas rochas não produzirão condições que possam afetar a integridade do confinamento a longo prazo .

Essas deformações são produzidas pela tendência natural de fechamento das galerias, túneis e outras escavações, e pela expansão térmica das rochas quando confinam rejeitos que liberam taxas de calor elevadas .

Rochas de comportamento plástico geralmente sofrem pequenas acomodações durante longos períodos geológicos, fechando aberturas subterrâneas sem causar fraturamentos. Os rejeitos confinados nesses tipos de rochas podem eventualmente ser envolvidos por essas acomodações de camadas, e desde que não ocorram fraturas, ficar protegidos contra a circulação de águas subterrâneas .

Na maioria dos casos de escavações subterrâneas em rochas friáveis pode-se esperar que haverá resistência contra a obstrução dessas escavações durante o tempo necessário para que a maior parte dos radionuclídeos presentes no rejeito decaiam para níveis não perigosos de atividade. Porém, deformações mais localizadas das paredes e tetos dessas aberturas poderão ocorrer durante longo tempo modificando as formas e as dimensões originais das cavidades de estocagem. O preenchimento dessas cavidades por materiais lavrados durante os trabalhos de escavação pode minimizar as conseqüências de tais colapsos .

É provável que os fraturamentos resultantes podem atingir, em casos extremos, a superfície do terreno, provocando a circulação de água na zona de disposição e comprometendo o confinamento seguro da radioatividade. Em geral, profundidades de escavação maiores e cobertura de rocha mais espessa (maior pressão) resultam em deformações mais pronunciadas. Ao contrário, em pequenas profundidades,

o peso de rocha e as deformações devem ser menores, porém haverá menor cobertura de rocha para absorver possíveis fraturamentos produzidos a partir das cavidades de disposição .

5.5.4. Efeitos térmicos

O rejeito de atividade alta solidificado deve ser resfriado por um certo período de tempo em locais de estocagem provisória para reduzir a alta incidência de calor produzido pelo decaimento dos produtos de fissão. Depois disso , embora a taxa de geração de calor tenha diminuido consideravelmente, ainda haverá uma produção significante (em torno de algumas dezenas de watts/litro), que superará os valores de temperatura ambiente na profundidade de disposição .

As rochas favoráveis para a disposição de rejeitos de alta atividade produtores de calor são aquelas cujas propriedades térmicas permitem a rápida dissipação do calor produzido pelo decaimento radioativo dos radionuclídeos presentes no rejeito e cuja estabilidade não é afetada na presença de temperaturas elevadas .

Formações de sal possuem alta condutividade térmica em relação aos outros materiais da crosta terrestre, mas exibem forte tendência às deformações lentas quando submetidas a valores elevados de temperatura. Essa tendência pode ser positiva quando tratamos com certas rochas de comportamento plástico, pois podem promover naturalmente o isolamento das cavidades preenchidas com rejeito e intensificar a lacração dos salões, túneis e furos de estocagem .

Para rochas de comportamento tipicamente elástico a deformação acelerada pelas altas temperaturas reinantes no repositório tem quase sempre, efeito negativo, já que leva à formação de fraturas e conseqüentemente a uma diminuição da eficiência da contenção da radioatividade. Em rochas argilosas, a ação de temperaturas elevadas pode causar mudanças significativas nas suas propriedades físicas, muitas vezes prejudiciais ao isolamento seguro do rejeito radioativo .

Para a determinação dos efeitos impostos pelo acréscimo térmico na distribuição da temperatura e na estabilidade estrutural dos vários tipos de rochas, devem ser investigados e definidos diversos parâmetros : condutividade térmica, calor específico, coeficiente de expansão, tensão de ruptura e taxa de

deformação lenta .

5.5.5. Capacidade de troca (ou absorção)

Em princípio, ambientes completamente secos são os mais adequados para o confinamento de rejeitos radioativos. Porém, certas formações argilosas saturadas e que transmitem água apenas em taxas muito pequenas, podem ser adequadas para a disposição. Isto se essas rochas apresentarem alta capacidade de absorção ou troca iônica, que associada a uma baixa condutividade hidráulica podem promover o confinamento a longo prazo do rejeito radioativo. Para rochas competentes, como calcário, granito e basalto, que transmitem água somente por meio de suas fraturas, possuindo então, baixa capacidade efetiva de absorção, é de grande importância que o rejeito permaneça isolado completamente da circulação de água. Entretanto, a absorção pode constituir-se em uma segunda barreira geológica contra a dispersão da radioatividade se a barreira geológica primária sofrer algum colapso .

Em casos restritos, certos fenômenos de precipitação e co-precipitação mineral a partir da água subterrânea, podem contribuir para a restrição da mobilidade geoquímica de alguns radionuclídeos. Mesmo assim, é importante que o potencial de absorção e o fluxo da água subterrânea sejam cuidadosamente examinados para cada local, assim como os efeitos da temperatura sobre a capacidade de absorção da formação investigada .

5.5.6. Minerais formadores de água

Quantidades significantes de minerais hidratados podem criar condições adversas em rochas apontadas como repositório final de rejeitos radioativos de alta atividade, já que esses minerais liberam água quando submetidos a temperaturas elevadas. Um dos minerais mais problemáticos é o Gipso ($Ca\ SO_4 . 2H_2O$) , que ocorre em quantidades variáveis nas porções superiores das seqüências evaporíticas . Esse mineral sofre desidratação sob condições normais de pressão, num intervalo de temperatura entre 110 e 200 $^{o}C$, com aquecimento rápido. Sob condições de aquecimento muito lento, como ocorre num repositório de rejeito, o gipso pode desidratar-se em temperaturas mais baixas ou pelo menos, num intervalo menor que aquele citado acima .

Esse mineral contém cerca de 21% em peso de água, de modo que 1 $m^3$ de Gipso puro pode fornecer, aproximadamente, 480 litros de água /60/ .

Outros minerais salinos hidratados são encontrados em seqüências evaporíticas, por exemplo, polialita, carnallita, bloedita e epsomita. Localmente, a quantidade deles pode ser significante e a maioria sofre desidratação em temperaturas mais elevadas do que para o gipso. No entanto, se esses minerais ocorrerem junto ao horizonte de disposição deve-se determinar as suas quantidades, distribuições e características de perda d'água .

Além dos minerais hidratados, sabe-se que a água intersticial presente nos minerais de argila pode ser liberada sob condições de temperaturas acima de 200 °C, de modo que, quando esses minerais e outros hidratados ocorrem nas proximidades da zona de disposição, devem ser considerados como fontes potenciais de água. Certos fatores, por exemplo, taxa de perda, mecanismos e vias pelas quais a água pode fluir devem ser investigados .

5.5.7. Efeitos da radiação

A energia pode ser armazenada em sólidos irradiados devido à desordem molecular que é induzida pelos danos de radiação. Quando um sólido é aquecido logo após ter sido irradiado, a energia é liberada já que as moléculas passam por vários estádios de reordenação. Em alguns casos, toda energia pode ser liberada pela ação de temperaturas relativamente baixas .

A energia da radiação gama pode ser estocada em formações de sal e talvez em outros tipos de rochas. A quantidade de energia estocada vai depender não somente da dose de radiação mas também, da taxa de acumulação dessa dose, e da temperatura do solo .

O recozimento térmico é o fator mais importante na limitação da estocagem de energia em formações de sal expostas às altas doses de radiação e conseqüentemente às temperaturas elevadas. Pesquisas realizadas com rochas de sal irradiadas mostram que o recozimento impede, efetivamente, a formação de quantidades significantes de energia acumulada em temperaturas acima de 150 °C. Por outro lado, sob temperaturas bem abaixo dessa, onde o recozimento térmico é pequeno , a dose seria relativamente pequena. Então, no máximo, apenas uma quantidade moderada de energia se acumulará em rochas de sal expostas aos rejeitos de alta ati-

vidade.

Existem poucos dados a respeito do comportamento de outras rochas, que não o sal, frente à radiação. De modo que é muito importante tentar estabelecer qualitativa e quantitativamente os efeitos da radiação sobre os diferentes tipos de rochas apontadas como favoráveis para a disposição geológica de rejeitos radioativos de alta atividade .

## 5.6. Hidrologia

### 5.6.1. Águas de superfície

A existência de rios, lagos, lagoas etc, sobre quaisquer meios geológicos subterrâneos adequados para a construção de um repositório de rejeitos , não vai, necessariamente, descartar a sua utilização para disposição geológica. Entretanto, deve estar assegurado que as águas não irão interferir nas operações e nem comprometer o confinamento da radioatividade .

Planícies de inundação ou outros ambientes vulneráveis às enchentes são pouco recomendados para a disposição geológica, já que em casos extremos, pode ocorrer a inundação das instalações subterrâneas pelo acesso das águas superficiais através dos poços, furos de sondagens e túneis, a não ser que medidas extraordinárias de projeto estejam previstas .

Em áreas onde existem grandes lagos ou rios, interesses turísticos, ecológicos e industriais, podem criar controvérsias quanto à sua utilização para a construção de repositórios de rejeitos radioativos .

No decorrer do tempo geológico, as correntes de superfície podem impor mudanças radiciais em seus próprios regimes de escoamento. Sob condições extremas de erosão, desgastes profundos podem ocorrer nas rochas, do mesmo modo que processos de deposição se desenvolvem produzindo espessas camadas sedimentares. Em qualquer situação, fica claro que o comportamento futuro das acumulações e correntes d'água de superfície deve ser investigado com vistas a garantir o confinamento seguro da radioatividade durante o tempo necessário para decair para níveis não perigosos .

5.6.2. Águas subterrâneas

A circulação de água subterrânea representa o principal obstáculo ao confinamento dos rejeitos radioativos em formações geológicas. Desse modo, a natureza e as características das formações aquíferas associadas às prováveis zonas de disposição, assim como da rocha repositório, são elementos importantes para a avaliação das formações para a disposição geológica de rejeitos radioativos .

Em muitas áreas, especialmente de climas áridos, a água subterrânea é um recurso natural de grande importância, sendo a principal fonte d'água para uso residencial, industrial e agrícola. Assim sendo, qualquer iniciativa que possa acarretar a contaminação desse recurso será inviável .

Grandes lençóis de águas subterrâneas, que ocorrem tanto abaixo como acima de formações potencialmente viáveis para a disposição de rejeitos, podem afetar a viabilização efetiva dessas formações para o confinamento da radioatividade .

Natureza e ocorrência : Genericamente, uma formação geológica para constituir-se num respositório de rejeitos radioativos deve ser livre da circulação de água subterrânea, embora possa estar acentada ou mesmo encoberta por camadas aquíferas. Para rochas de comportamento plástico, as distâncias verticais e horizontais entre o lençol d'água e a zona de disposição, podem ser menores do que para rochas de comportamento predominantemente elástico. Corpos salinos espessos que ocorrem em profundidades relativamente pequenas estão, quase sempre, em contato com águas subterrâneas circulantes ao longo de seus limites superiores. Nesse caso, as cotas de disposição devem estar em torno de 100 metros abaixo do nível d'água e numa distância tal que a taxa de dissolução prevista para o sal (levando-se em consideração possíveis mudanças hidrológicas e climáticas) não seja capaz de expor o rejeito durante o tempo em que este apresentar riscos de contaminações. Zonas geradoras de água associadas às porções inferiores de camadas de sal não são comuns, mas se este for o caso, as cotas de disposição devem estar 100 metros acima e numa distância que assegure o confinamento seguro .

Para rochas de comportamento elástico, qualquer aquífero, sub ou sobrejacente, deve estar separado da rocha-repositório por camadas de folhelhos espessas impermeáveis ou por outros aquicludes .

Direção, velocidade e volume : No estudo dos regimes hidrológicos dos locais para disposição de rejeitos radioativos, precisam ser determinados diversos parâmetros, por exemplo, direções, velocidades e volumes de fluxo d'água, tanto para as rochas-repositório, como para as adjacentes. Para isso, estudos no campo devem ser executados visando à obtenção da geometria dos corpos de rocha de interesse, suas porosidades, condutividades e gradientes hidráulicos .

Os métodos convencionais de investigação para a determinação das propriedades hidráulicas podem tornar-se ineficientes quando as rochas possuem condutividades baixas. Assim, ensaios específicos para cada caso devem ser adotados . Eles incluem trabalhos de bombeamento de poços com uso de traçadores isotópicos, injeções de água abaixo das pressões críticas, bombeamento de poços com revestimentos em várias cotas, e ensaios de injeções ("slug") /60/ .

As velocidades das águas subterrâneas quase sempre não podem ser medidas diretamente, mas sim estimadas a partir da condutividade hidráulica, porosidade efetiva e do gradiente hidráulico. O valor real de velocidade num dado ponto pode ser mascarado quando obtido por método computacional, em função das variações da porosidade e da permeabilidade dentro de um mesmo corpo de rocha gerador de água. Como exemplo temos que a velocidade em rochas cristalinas possue largo intervalo de variação devido às diferentes geometrias das fraturas .

Teoricamente, a viabilização de uma formação geológica para disposição de rejeito pode ser dada por qualquer combinação de valores de condutividade e gradiente que aponte um regime hidrológico com velocidades pequenas no local do repositório e/ou capaz de impedir o escape de radionuclídeos para a biosfera. Entretanto, existem erros inerentes a essas determinações, pois eventos geológicos futuros, mudanças dinâmicas e ações do próprio homem podem alternar drasticamente os regimes hidrológicos. Acredita-se que exista maior viabilidade para esquemas de disposição cuja rocha-repositório seja virtualmente impermeável do que para corpos rochosos aquíferos, que dependem predominantemente da existência de pequenas velocidades de fluxos d'água como fator limitante da dispersão de radionuclídeos presentes no rejeito .

Para todos os efeitos, alguns sedimentos argilosos são considerados impermeáveis, mas na realidade eles se comportam como membranas semipermeáveis. A

energia necessária para fazer com que a água atravesse tal membrana é fornecida pela compactação dos sedimentos, pelos gradientes hidráulicos, ou mesmo pelos gradientes de potenciais térmicos e elétricos. Quando a água passa por difusão molecular através de uma membrana semipermeável, um mecanismo de filtração de íons se processa, criando gradientes de salinidade nos fluidos. Consequentemente, podem existir pressões ósmoticas em seqüências sedimentares argilosas. Com os trabalhos de escavações nessas seqüências pode ocorrer a invasão de água devido às pressões diferenciais impostas. Se houver inundação, depois de um certo tempo a invasão de água cessará, de modo que os movimentos de água subterrânea voltarão ao estado anterior às modificações introduzidas pelas escavações. Nesse caso haverá uma descontinuidade de fase entre a cavidade e as rochas adjacentes a ela. Embora, teoricamente, o movimento de radionuclídeos em sedimentos argilosos seja bastante pequeno, isto deve ser demonstrado em laboratórios e em ensaios "in situ".

## 5.7. Eventos geológicos futuros

Os eventos geológicos lentos responsáveis pela formação de montanhas e outras feições produzem alterações fisiográficas significantes na crosta terrestre. Por outro lado, falhamentos, terremotos, atividades vulcânicas e glaciações podem introduzir mudanças drásticas na morfologia, tanto local como regionalmente, num curto período de tempo. A possibilidade de ocorrência futura desses eventos deve ser considerada para a seleção de locais para a disposição geológica de rejeitos radioativos. Com base em estudos de geologia histórica pode-se estimar a localização e os efeitos desses eventos.

Dentro do intervalo de tempo previsto para o rejeito radioativo de alta atividade, estocado no meio geológico, tornar-se inofensivo à saúde pública, os geólogos admitem a ocorrência de pelo menos uma glaciação. Durante o último evento desse tipo, aproximadamente 20.000 anos atrás, metade da américa do Norte e todo o Norte da Europa foram cobertos por camadas de gelo. Toda essa área sofreu profundas alterações em conseqüência do desgaste e deposição, e de ajustamentos isostáticos. As porções não cobertas por gelo foram afetadas por mudanças climáticas drásticas. Formaram-se novos lagos e novos rios enquanto outros sofreram profundas modificações nos regimes de deposição e erosão, em certos casos, de maneiras catastróficas. Associadas a essas transformações sofridas pelas águas

superficiais, ocorreram mudanças correspondentes nos regimes das águas subterrâneas .

A ocorrência de geleiras em muitas regiões também causaram alterações nas propriedades mecânicas das rochas, até profundidades consideráveis. Por outro lado, grandes áreas foram inundadas pelas águas oceânicas durante períodos interglaciais, causando também alterações ambientais .

Na medida do possível, o projeto e a construção do repositório devem considerar os efeitos que podem advir em caso de mudanças climáticas bruscas, que provavelmente serão mais catastróficas do que a própria ruptura do repositório .

5.8. Condições gerais de geologia e engenharia

Além dos fatores específicos já discutidos anteriormente, existem outros adicionais que dizem respeito à localização das instalações, atividades humanas passadas e futuras, construção e operação do repositório e possíveis impactos ecológicos .

A área superficial necessária à instalação e operação de um repositório de rejeito não é grande, devendo conter espaço suficiente para as instalações de transporte de rejeito, recebimento, descarga, descontaminação e inspeção, além dos edifícios que contêm os equipamentos normais necessários para a operação de uma usina. Pode ser comparada, em tamanho, com uma indústria química de pequeno a médio porte. A área subterrânea necessária é maior que a área em superfície , mas em comparação com minas de exploração mineral é bem menor .

Já que um repositório contém rejeitos com radionuclídeos de meias-vidas bastante longas torna-se impossível promover medidas de proteção contra futuras atividades humanas comprometedoras da segurança do repositório. Entretanto, podem ser construídas zonas de proteção subterrâneas em torno dele cuja função principal seria proteger as instalações contra danos acidentais provocadas pelo homem .

Deve ser feito um levantamento cuidadoso para a localização, tanto na rocha-repositório como nas encaixantes, de escavações, perfurações , cavidades de dissolução e outras estruturas feitas pelo homem no passado. Todas essas feições podem constituir vias para a circulação de água subterrânea e mesmo para

INSTITU E NUCLEARES

infiltrações maciças de águas de superfície. Desse modo será necessário verificar se essas passagens estão devidamente seladas, para não comprometerem o isolamento da radioatividade. O mesmo procedimento de vedação deverá ser adotado para os trabalhos de escavações e sondagens realizadas durante a investigação das potencialidades de um local para a disposição de rejeito.

O transporte de rejeito radioativo é parte importante do sistema global de gerenciamento de lixo atômico. Na seleção de locais para a disposição geológica dos rejeitos radioativos deve-se investigar as condições das vias de transporte preexistentes, assim como, a necessidade de construção de novas rodovias e ferrovias.

A principal razão para a escolha de formações geológicas para a disposição de rejeitos radioativos está no fato de que certas ocorrências em profundidade, podem assegurar o confinamento da radioatividade presente nesses rejeitos até que sua atividade tenha decaído para níveis não perigosos. No entanto, os efeitos ecológicos associados com a construção, operação e com a existência dos repositórios devem ser cuidadosamente investigados e avaliados, antes que uma área seja liberada para a disposição geológica de rejeitos.

## 5.9. Considerações econômicas e sociais

Os fatores econômicos e sociais que devem ser levados em conta nos estudos de viabilidade de áreas para a disposição geológica de rejeitos radioativos' dizem respeito, principalmente, à avaliação correta das potencialidades econômicas dessas áreas quanto aos seus recursos minerais e ao uso industrial, recreativo, agrícola e urbanístico. Além desses aspectos, outros devem ser investigados, por exemplo, densidade populacional, aspectos legais sobre o uso e direitos de propriedade da área, e controle e acesso de pessoas e materiais durante a construção e operação do repositório.

# CAPÍTULO VI : AS ROCHAS BASÁLTICAS E GRANÍTICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

## 6.1- Basaltos

As rochas basálticas no Estado de São Paulo correspondem a uma faixa que se estende desde o Nordeste do Estado, atravessando-o na direção sul-sudoeste até alcançar o vale do rio Paranapanema, quando se voltam para oeste acompanhando-o até quase sua confluência com o rio Paraná. Outra área de ocorrência em território paulista se estende por toda a parte ocidental, em direção ao curso do rio Paraná. Aí, os basaltos somente afloram no fundo dos vales dos rios principais.

Essas rochas fazem parte de uma das maiores manifestações vulcânicas, que cobre uma área de aproximadamente 1200.000 $Km^2$ dentro da Bacia do Paraná (1600.000 $Km^2$), se estendendo por grande parte do sul do Brasil (600.000 $Km^2$), norte do Uruguai e Argentina e leste do Uruguai. Mais da metade da área ocupada por elas encontra-se encoberta por sedimentos de idade cretácea, principalmente. (Figura 6.1 e 6.2).

No contexto da Bacia do Paraná esses derrames basálticos representam a Formação Serra Geral, que por sua vez, faz parte de um conjunto de rochas que caracterizam o Grupo São Bento. (Figura 6.3). No Estado de São Paulo esse Grupo constitui-se de uma alternância de rochas sedimentares predominantemente arenosas e de camadas vulcânicas em sucessões que variam horizontal e verticalmente. Relacionados com os processos vulcânicos, como expressões menores, estão associados diques e sills de diabásio.

A Formação Botucatu representa o embasamento dos basaltos, que por sua vez, estão encobertos pelas Formações Caiuá e Bauru. Eles assentam-se discordantemente sobre os arenitos triássicos Botucatu, sendo que no norte do Estado ocorre um verdadeiro interdigitamento entre as duas Formações. O contato superior dos derrames é também discordante com as Formações Caiuá e Bauru.

A idade dos derrames basálticos da Formação Serra Geral varia entre 120 e 130 milhões de anos. As primeiras manifestações desse vulcanismo se deram no Jurássico superior na área do Sinclinal de Tôrres, sendo que sua fase principal ocorreu desde o Cretáceo médio até o superior. /68/.

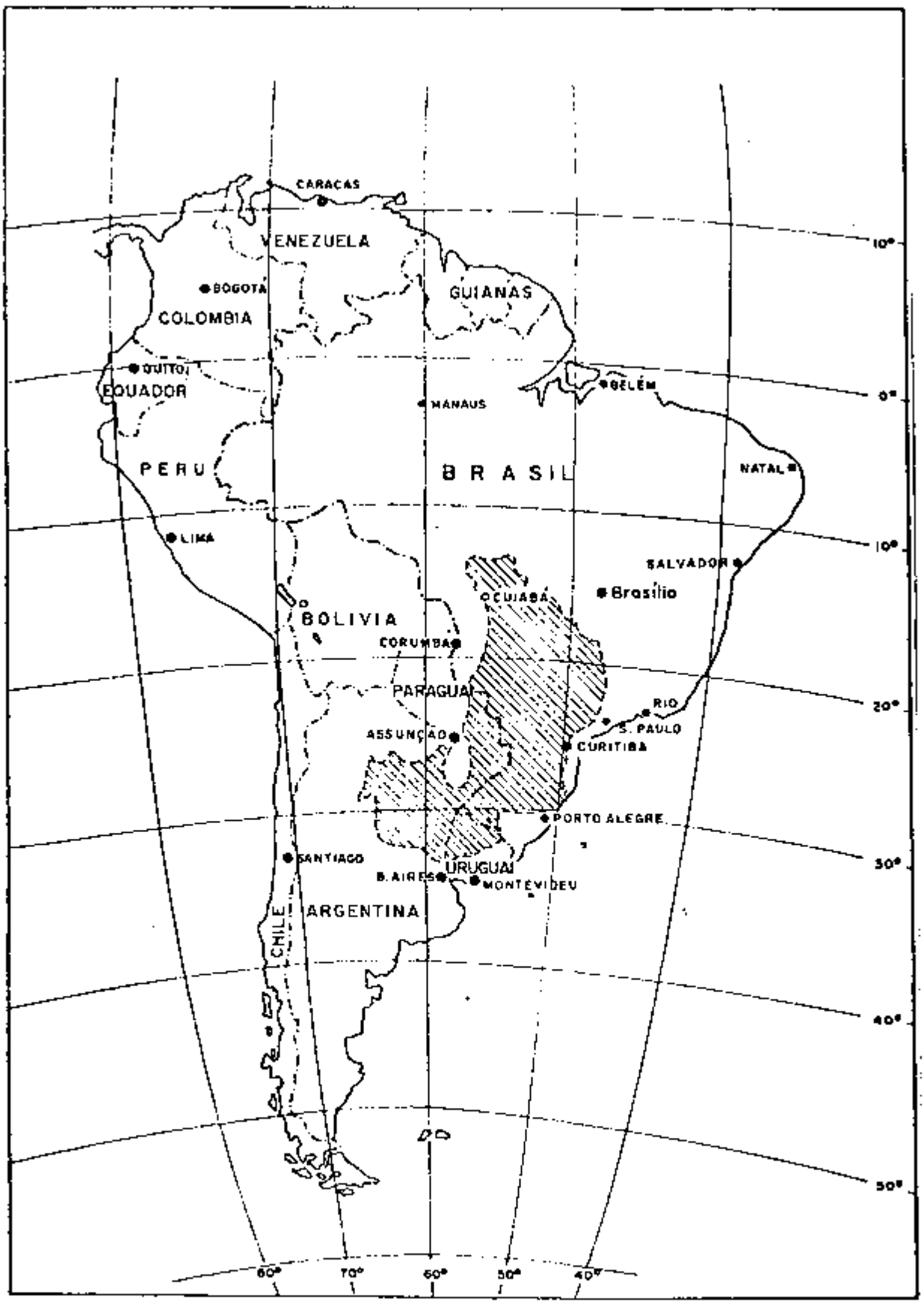



FIGURA 6.1. - Mapa de localização da Bacia do Paraná /83/ .

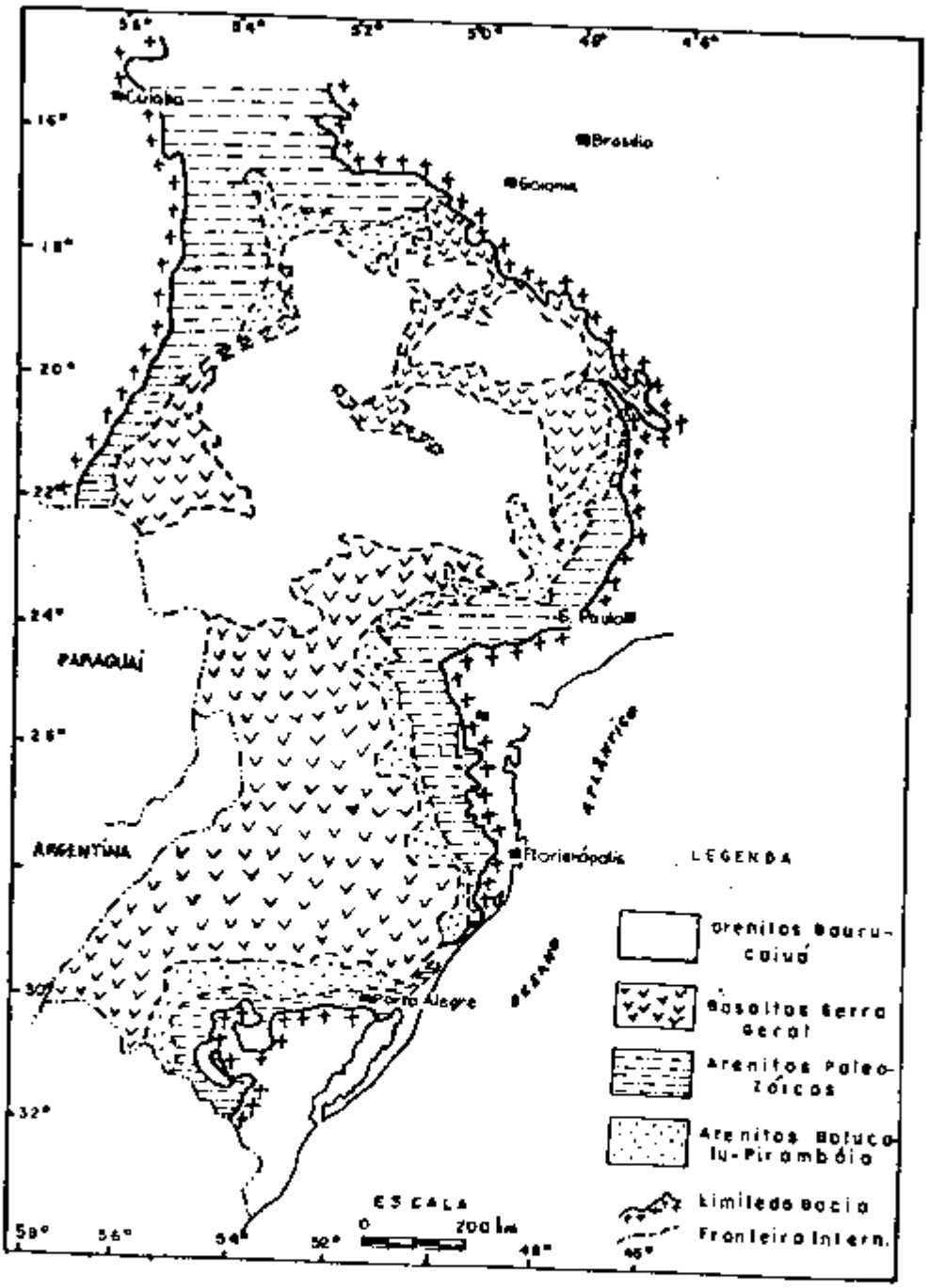



FIGURA 6.2. - Mapa de ocorrência das rochas basálticas no Brasil /82/ .

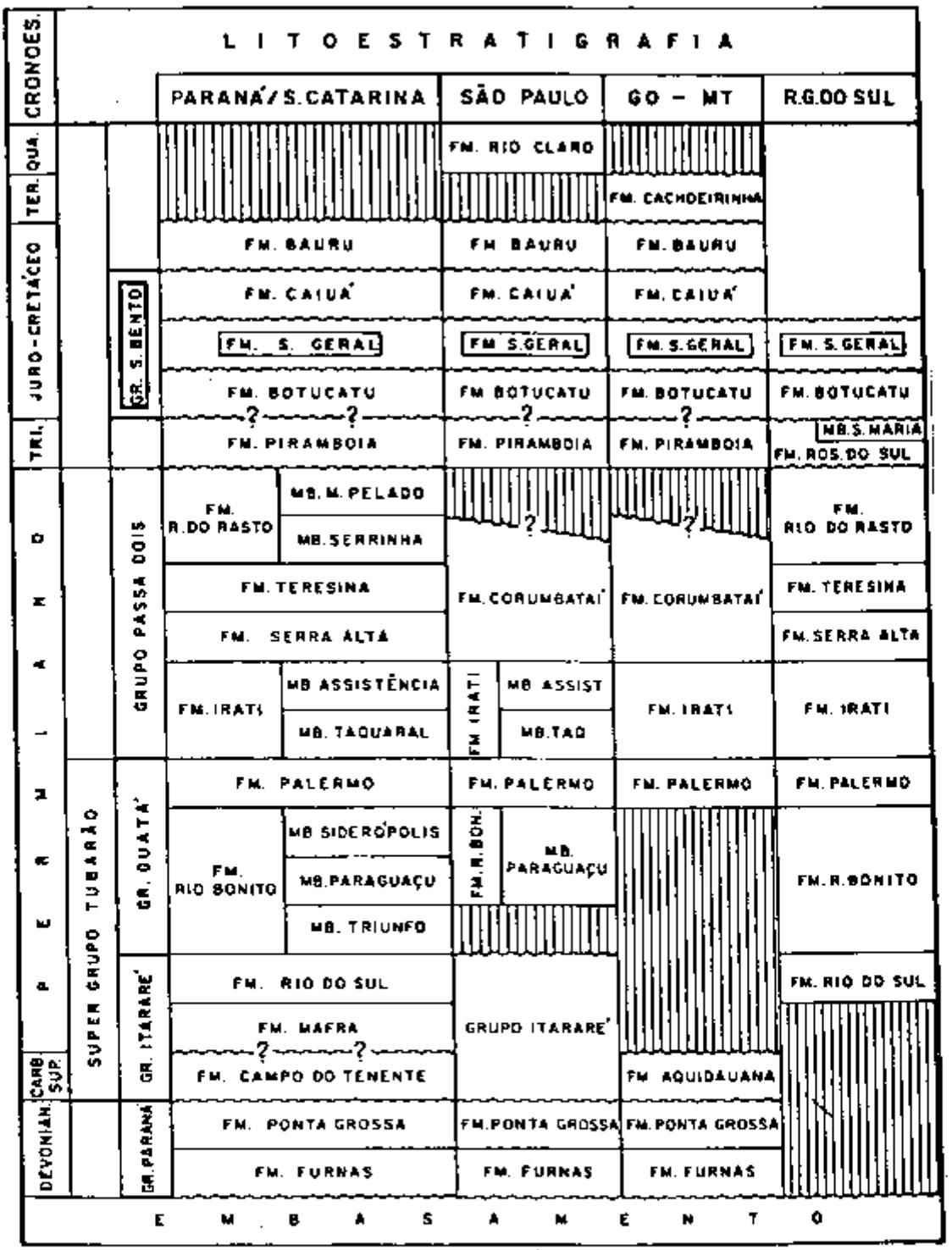



FIGURA 6.3. - A Formação Serra Geral no contexto crono-litoestratigráfico da Bacia do Paraná /89/ .

A Formação Serra Geral é constituída por derrames basálticos superpostos ou separados por espessuras variáveis de arenito eólico. Individualmente, eles possuem espessuras variáveis, mas valores entre 15 e 40 metros são muito frequentes nas serras paulistas. /2/.

A determinação de suas extensões laterais é difícil, o que denota variabilidade de espessuras e de continuidade lateral.

Diques de diabásio estão associados, representando o preenchimento de geoclases e fissuras menores. São intrusões que possuem dimensões variáveis, podendo chegar até 10 Km de extensão e algumas dezenas de metros de espessura. De caráter sub-vertical mostram-se orientados preferencialmente na direção 45° NW.

Intrusões concordantes (sills=soleiras) incluem-se também na Formação Serra Geral. Em São Paulo mostram-se com espessuras que variam de poucos decímetros a mais de uma centena de metros.

A espessura média das ocorrências basálticas para toda a Bacia, segundo Leinz et. al. (1966) /70/, está em torno de 650 metros. A espessura média na borda dos derrames é de 350 metros e nas partes centrais é de 1000 metros.

Dados obtidos em poços perfurados pela Petrobrás e A.N.C.A.P. (Uruguai) revelam grandes espessuras de rochas basálticas na região da bacia hidrográfica do rio Paraná. O maior valor atinge 1529 metros próximo à cidade de Presidente Epitácio (SP).

A distribuição das espessuras em nossa área de interesse está evidenciada claramente em mapas de isópacas e perfis de poços de sondagens apresentados nas Figuras 6.4 e 6.5.

A composição mineralógica desses basaltos é representada essencialmente por plagioclásio cálcico e clinopiroxênio. O tipo mais comum de plagioclásio é a labradorita, enquanto que os clinopiroxênios aparecem sob a forma de augita e pigeonita. Minerais de ferro, principalmente, titanomagnetita, ocorrem em quantidades menores, enquanto os acessórios, escassos, estão presentes sob a forma de apatita, olivina, quartzo, biotita e outros. Tal mineralogia é representativa de basaltos do tipo toleítico segundo a classificação de Kuno (1960)/16/.

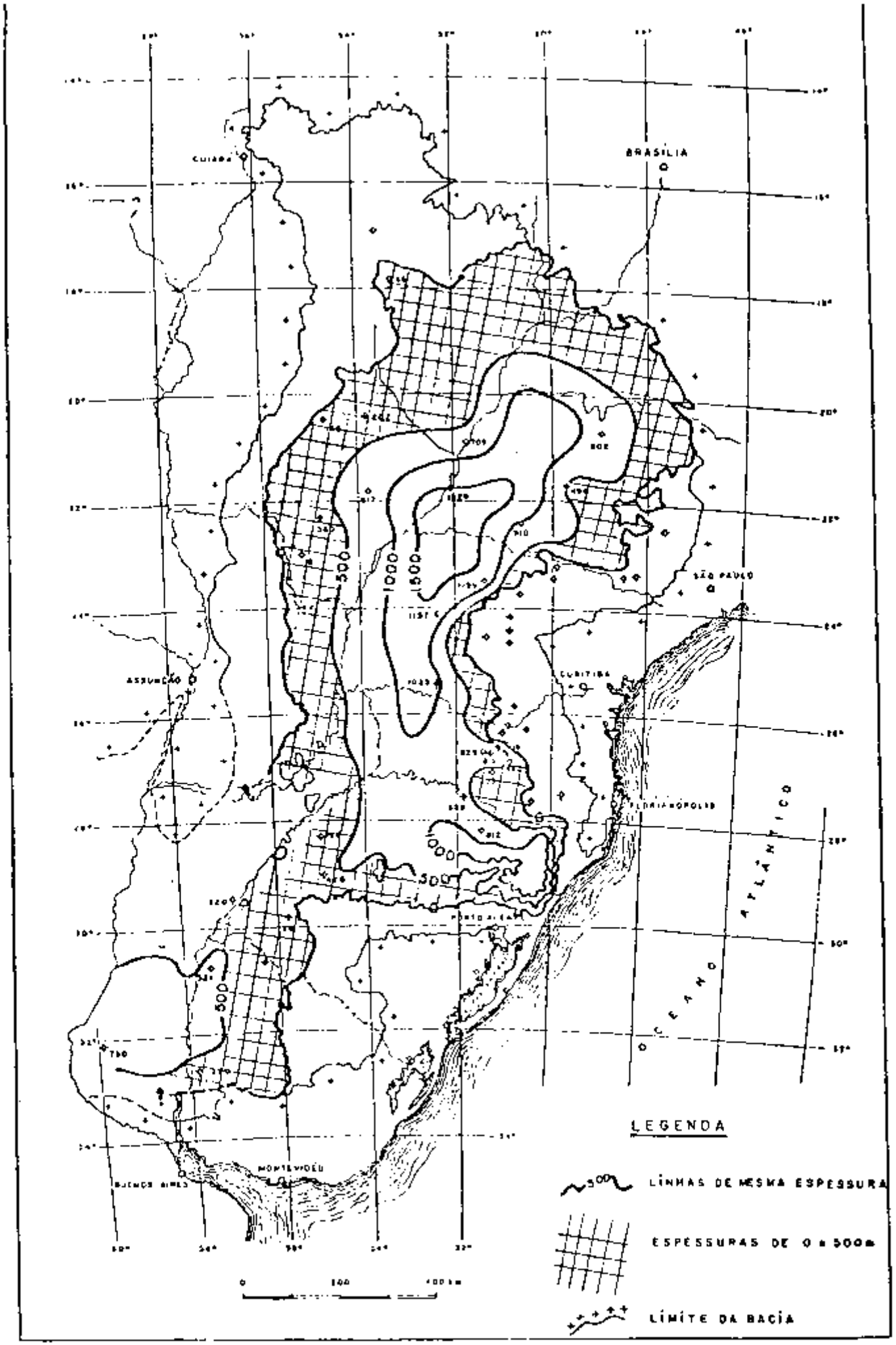



FIGURA 6.4. - Isópacas da Formação Serra Geral /76/ .

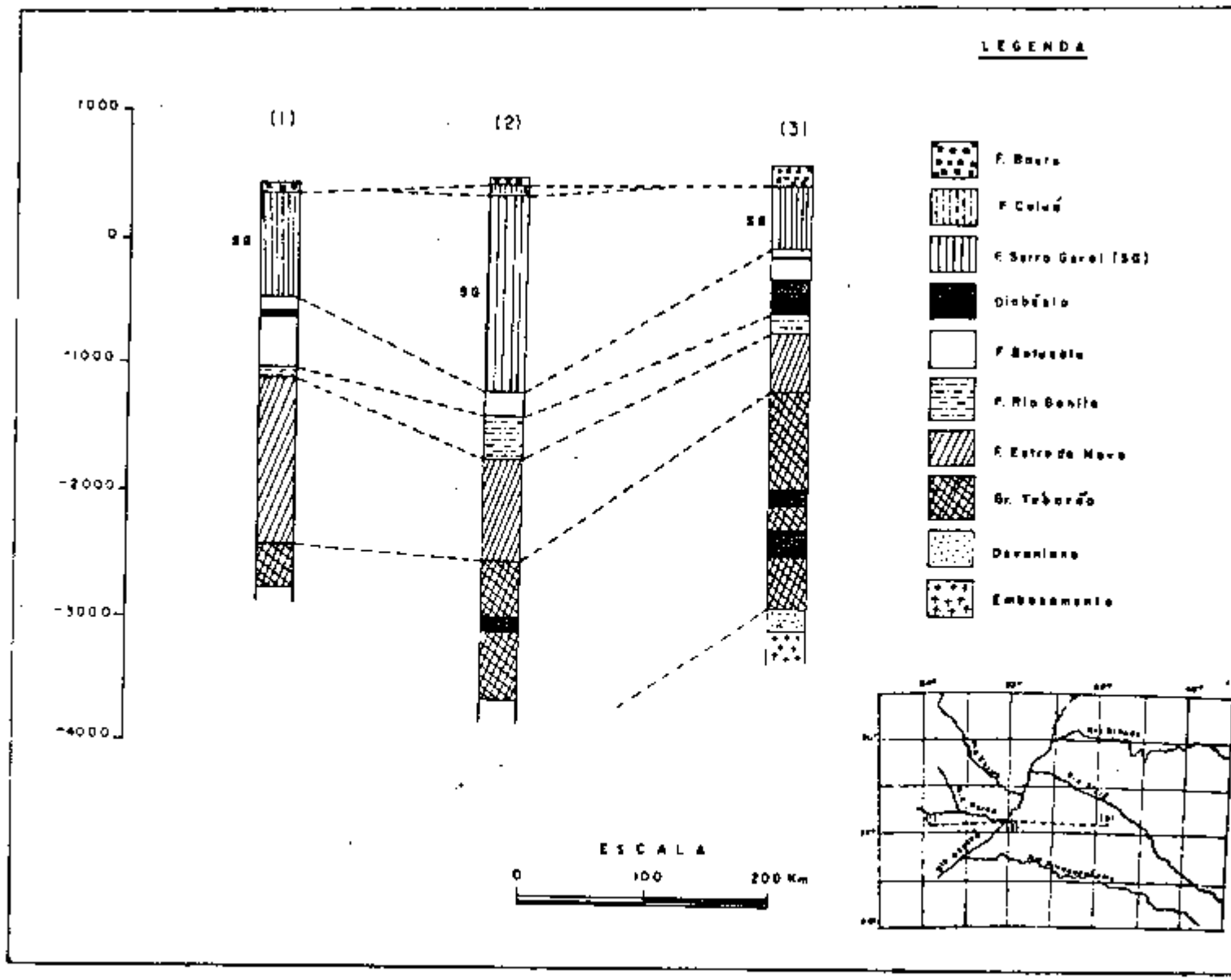



FIGURA 6.5. - Perfís de sondagens : posicionamento e espessuras dos basaltos da Formação Serra Geral /69/ .

Minerais secundários e vidro vulcânico são constituintes comumente encontrados nos derrames basálticos. Vários tipos podem ser citados :

a. minerais de preenchimento de amígdalas, que ocorrem, principalmente em alguns corpos intrusivos. São eles: calcedônia, calcita, quartzo, clorita, diferentes variedades de zeólitas /24/, cobre nativo etc.

b. minerais autometamórficos: hornblenda, feldspato alcalino, clorita, magnetita, biotita e outros.

c. produtos de intemperismo: sericita, caolinita, calcita, clorita etc.

A composição química dos basaltos apresenta em São Paulo, as mesmas características em relação aos valores obtidos para toda a ocorrência na Bacia do Paraná. Tal conclusão tem como base análises feitas por Rhegg e Dutra (1965) /85/, cujos dados são apresentados na Tabela 6.1.

6.1.1. Tectônica

A estrutura geológica da Bacia do Paraná é a de uma grande bacia intra - cratônica, cuja seqüência sedimentar não sofreu esforços de compressão capazes de produzir feições estruturais de grandes extensões, a não ser deformações locais relativas a falhamentos e intrusões básicas.

As deformações estruturais mais importantes foram produzidas por movimentos verticais diferenciais que atuaram com maior intensidade durante o passado geológico da Bacia. Esses movimentos envolveram grandes blocos ou estão relacionados aos eixos dos grandes arqueamentos regionais. (Figura 6.6.).

A sedimentação, quase toda de caráter detrítico, atinge a espessura de 5000 metros, em média, estendendo-se por áreas de centenas de milhares de quilômetros quadrados.

A grande extensão e pequena espessura das camadas denotam que, em grande parte da história geológica da Bacia, esses movimentos tectônicos diferenciais nunca atingiram consideráveis amplitudes verticais. As condições de deposição em ambiente continental cresceram no decorrer do tempo, denunciando o aumento progressivo da estabilidade de seu embasamento.

| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A. Composição Química** | | | | | | | | |
| $SiO_2$ | 49.2 | 49.7 | 49.6 | 47.0 | 47.8 | 50.2 | 49.6 | 49.8 |
| $Al_2O_3$ | 14.6 | 15.7 | 14.3 | 13.6 | 14.35 | 11.75 | 14.65 | 13.8 |
| $TiO_2$ | 2.6 | 2.7 | 2.6 | 3.7 | 4.1 | 3.9 | 3.7 | 4.2 |
| $Fe_2O_3$ | 3.2 | 3.0 | 3.2 | 6.1 | 3.9 | 6.9 | 5.7 | 3.1 |
| FeO | 10.7 | 9.8 | 11.0 | 8.7 | 10.9 | 9.0 | 8.7 | 10.0 |
| MnO | 0.20 | 0.20 | 0.30 | 0.29 | 0.19 | 0.20 | 0.19 | 0.24 |
| MgO | 4.5 | 4.2 | 4.5 | 4.5 | 3.0 | 2.75 | 3.9 | 2.85 |
| CaO | 9.2 | 9.3 | 9.0 | 8.3 | 8.25 | 8.55 | 7.8 | 7.95 |
| $Na_2O$ | 2.40 | 2.20 | 2.40 | 3.00 | 2.65 | 2.79 | 2.74 | 2.85 |
| $K_2O$ | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 1.13 | 1.44 | 1.50 | 1.38 | 2.10 |
| $P_2O_5$ | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.47 | 0.36 | 0.57 | 0.45 | 0.59 |
| $H_2O^-$ | 0.8 | 0.7 | 0.5 | 2.0 | 0.7 | 1.25 | 1.2 | 0.9 |
| $H_2O^+$ | 1.2 | 1.1 | 1.6 | 1.4 | 0.3 | 0.75 | 0.4 | 1.3 |
| Total | 99.80 | 99.80 | 100.20 | 99.19 | 99.99 | 100.11 | 100.41 | 99.68 |
| **B. Elementos Principais** | | | | | | | | |
| | $\times 10^3$ | $\times 10^4$ | $\times 10^4$ | $\times 10^3$ | $\times 10^3$ | $\times 10^4$ | $\times 10^3$ | $\times 10^4$ |
| Si | 235 | 237 | 236 | 227 | 226 | 239 | 236 | 239 |
| Al | 79 | 85 | 77 | 74 | 77 | 63 | 79 | 75 |
| Ti | 16 | 16 | 16 | 23 | 25 | 24 | 23 | 26 |
| $Fe^{3+}$ | 23 | 21 | 23 | 44 | 28 | 49 | 41 | 22 |
| Mg | 28 | 26 | 28 | 28 | 30 | 17 | 24 | 18 |
| $Fe^{2+}$ | 85 | 78 | 87 | 70 | 86 | 71 | 69 | 80 |
| Na | 19 | 17 | 19 | 23 | 20 | 21 | 21 | 22 |
| Ca | 67 | 68 | 65 | 61 | 60 | 62 | 51 | 58 |
| K | 7 | 7 | 7 | 10 | 12 | 13 | 12 | 18 |
| P | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| Mn | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| **C. Elementos Traços** | | | | | | | | |
| Be | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Ga | 20 | 18 | 26 | 40 | 18 | 32 | 18 | 50 |
| Cr | 104 | 104 | 104 | 30 | 30 | 50 | 22 | 106 |
| V | 500 | 360 | 320 | 320 | 410 | 410 | 450 | 230 |
| Mo | * | * | * | 4 | 2 | * | * | * |
| Nb | 18 | 12 | 20 | 24 | 20 | 16 | 20 | 40 |
| Ni | 70 | 68 | 76 | 38 | 38 | 40 | 36 | 70 |
| Co | 50 | 36 | 44 | 30 | 42 | 36 | 38 | 36 |
| Cu | 260 | 260 | 300 | 150 | 68 | 120 | 128 | 168 |
| Sc | 50 | 52 | 50 | 48 | 38 | 40 | 36 | 38 |
| Zr | 200 | 220 | 220 | 200 | 210 | 270 | 280 | 360 |
| Sn | * | * | * | * | * | * | * | * |
| Y | 60 | 60 | 70 | 76 | 62 | 64 | 70 | 70 |
| Sr | 460 | 540 | 520 | 580 | 360 | 660 | 400 | 660 |
| Pb | * | * | * | * | * | * | * | * |
| Zn | 520 | 600 | 540 | 550 | 640 | 2 000 | 600 | 920 |

TABELA 6.1. - Composição química das rochas basálticas do Estado de São Paulo /85/ .

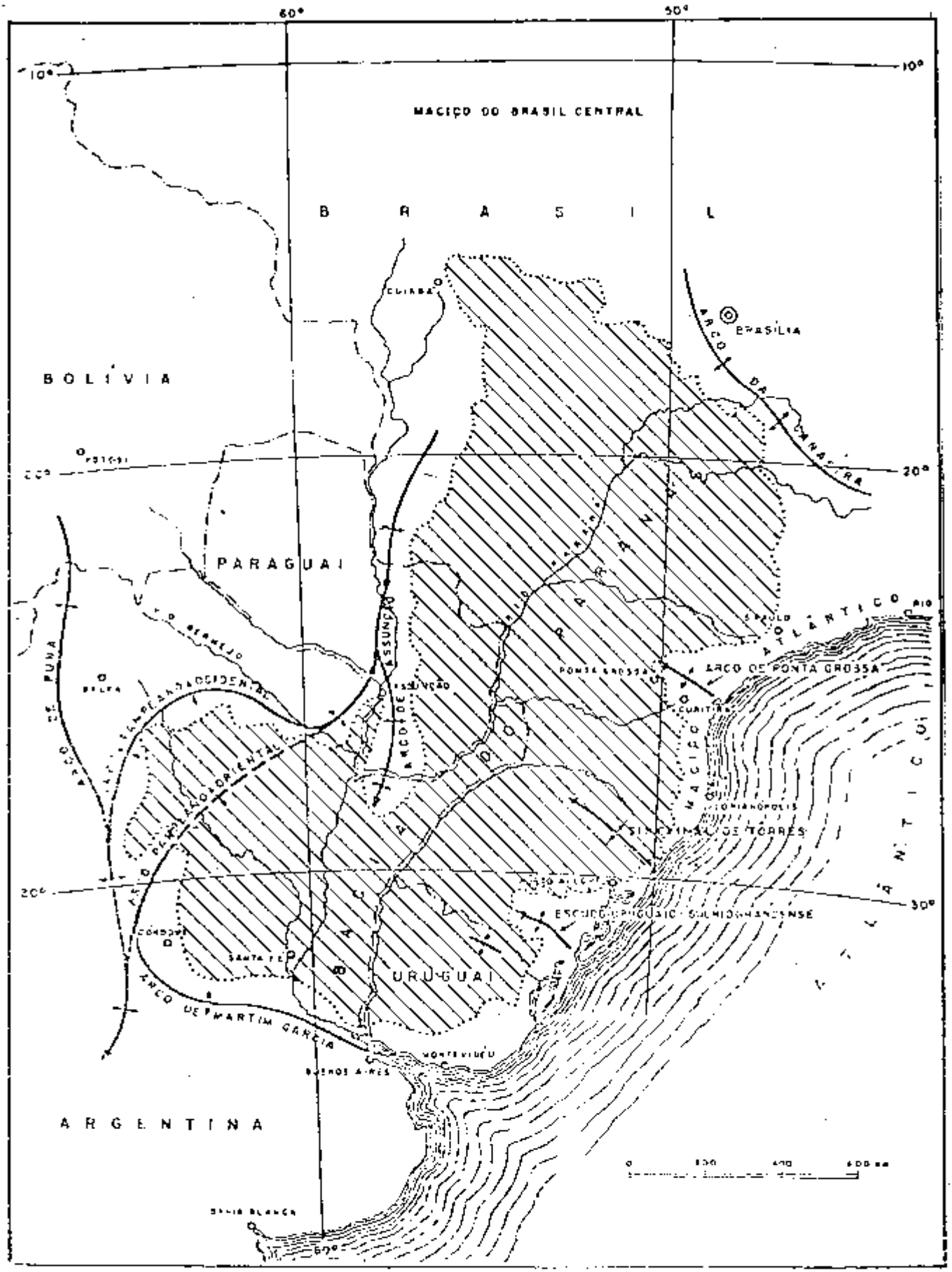



FIGURA 6.6. - Principais elementos geotectônicos da Bacia do Paraná /76/ .

Existem indícios de movimentações contemporâneas com as deposições que produziram uma seqüência sedimentar caracterizada por rápidas mudanças laterais de fácies.

Durante o Mesozóico, no final do Jurássico e começo do Cretáceo, um tectonismo representado pela reativação de linhas tectônicas antigas afetou os sedimentos até então depositados na Bacia do Paraná. Esse evento permitiu a ascensão de uma enorme quantidade de lavas basálticas que cobriu grande parte do sul do Brasil e áreas de países vizinhos. Como conseqüência do grande peso desse material a Bacia sofreu subsidência acentuada. Esse fato é confirmado em sondagens onde os derrames se encontram abaixo do nível do mar. A subsidência foi mais efetiva nas partes centrais da Bacia e foi acompanhada de falhamentos.

A inclinação das camadas basálticas é muito suave e pode ser medida na sua superfície superior representada, geralmente, por boa regularidade resultante da consolidação das lavas basálticas, se bem que perturbações posteriores modifiquem localmente tal feição. Em contrapartida o mesmo não pode ser dito a respeito da superfície basal dos derrames. Ela reflete de forma marcante a irregularidade do embasamento arenoso Botucatu, sobre o qual as lavas se assentaram, preenchendo um relevo de dunas com desníveis de até dezenas de metros. Só localmente essa superfície se encontrava aplainada pela erosão. As depressões desse relevo foram inundadas pelas lavas formando imensos lagos de rochas em fusão, que uma vez consolidadas constituiram vastas planícies vulcânicas.

A grande fluidez das lavas explica a preservação da topografia de dunas da Formação Botucatu sotoposta, assim como a escassez de estrutura fluidais nos derrames. Quando os produtos vulcânicos adquiriam maior velocidade transformavam-se em agentes erosivos, que escavavam canais e destruiam a topografia arenosa sobre a qual escoavam /2/.

As planícies assim formadas mantinham-se baixas e já que os ventos ainda continuavam sua atividade deposicional, formaram-se depósitos arenosos entre os derrames sucessivos, feição esta muito comum na porção paulista da Formação Serra Geral. /2/. Mesmo depois de cessarem as intrusões vulcânicas, a atividade eólica agiu depositando sedimentos arenosos sobre os derrames basálticos, preservados, principalmente, no nordeste do Paraná e em São Paulo na confluência dos rios Paraná e Paranapanema.

### 6.1.2. Texturas e Estruturas

Os basaltos são rochas que se caracterizam por alternâncias texturais bem definidas, representadas por um zoneamento que de cima para baixo se processa na seguinte ordem :

- Basalto vesículo-amigdaloidal de topo
- Basalto compacto
- Basalto vesículo-amigdaloidal de base

O termo compacto caracteriza a faixa central de um derrame. Em derrames de grandes espessuras, onde tal zoneamento é comum, o basalto compacto ocupa cerca de 2/3 da espessura total. Seu caráter compacto está ligado a um resfriamento mais lento em relação às porções basais e de topo. O diaclasamento de contração tem andamento predominantemente vertical, dando-lhe aspecto pseudo-colunar típico, embora de maneira nem sempre evidente, pois isso está intimamente relacionado à espessura do derrame.

Os derrames cuja espessura permite esta diferenciação de diaclasamento (> 15 metros) encontram-se subdivididos em três horizontes bem definidos: dois externos, com diaclasamento predominantemente horizontal, e o interno, vertical.

Eles acham-se delimitados por duas juntas contínuas e bem definidas, de andamento horizontal ou sub-horizontal, localizadas na parte central do derrame de material compacto /36/. Juntas desse tipo são visíveis nas fundações das barragens de Jupiá e Ilha Solteira (Rio Paraná) e nas pedreiras das barragens de Bariri, Barra Bonita, Ibitinga (Rio Tiête). /36/. A origem dessas juntas está ligada à existência de zonas de velocidades diferenciais de fluxo no corpo do lençol de lava durante sua efusão.

Em derrames de pequena espessura (< 10-15 metros) o diaclasamento vertical geralmente não apresenta características de predominância em relação a outros sistemas, não conferindo à rocha, em sua porção central, o aspecto colunar ou pseudo-colunar. Aí ocorrem, às vezes, fenômenos de desgasificação, em áreas bem restritas, de poucos metros de extensão, caracterizada por zonas vesiculares no corpo do basalto são, mas que passam rapidamente para o termo compacto e dificilmente serão confundidas com as vastas áreas de desgasificação superficial.

Os termos vesículo-amigdaloidais caracterizam o topo (e a base) de um derrame. Sua principal característica é a presença em grande número, de pequenas

cavidades ora vazias (vesículas), ora preenchidas por minerais secundários (amígdalas). Dentro da faixa vesicular de topo distinguem-se dois horizontes superpostos: um inferior com grandes amígdalas, que alcançam, às vezes, dimensões superiores a um metro, e outro superior em que as cavidades possuem dimensões centimétricas. O primeiro horizonte pode estar ausente, particularmente em derrames de pequena espessura.

As zonas vesiculares correspondem a faixas de desgasificação do derrame, interceptadas pelo rápido resfriamento da lava em contato com a atmosfera, havendo a interrupção da fuga de gases. O resfriamento sendo mais rápido resulta num aumento da viscosidade do magma e, conseqüentemente, numa diminuição da velocidade de escoamento em relação ao seu substrato, representado pela porção central do derrame. Esse decréscimo de velocidade conjugado à contração do resfriamento, provoca o aparecimento de uma tendência à subdivisão em lâminas sobrepostas, delimitadas por intenso fraturamento no plano horizontal.

Na parte basal dos derrames, também se nota, freqüentemente, a presença de uma delgada faixa de basalto vesicular ou amigdaloidal. Sua presença também se deve à rápida solidificação da lava em contato com a superfície de fluxo. As mesmas considerações apresentadas para a ocorrência de diaclasamento horizontal nas porções de topo dos derrames são válidas para as partes basais. A estas deve ser acrescentada a influência do atrito com o embasamento de fluxo no sentido de diminuir a velocidade de escoamento da lava.

A Figura 6.7. mostra uma secção típica de um derrame.

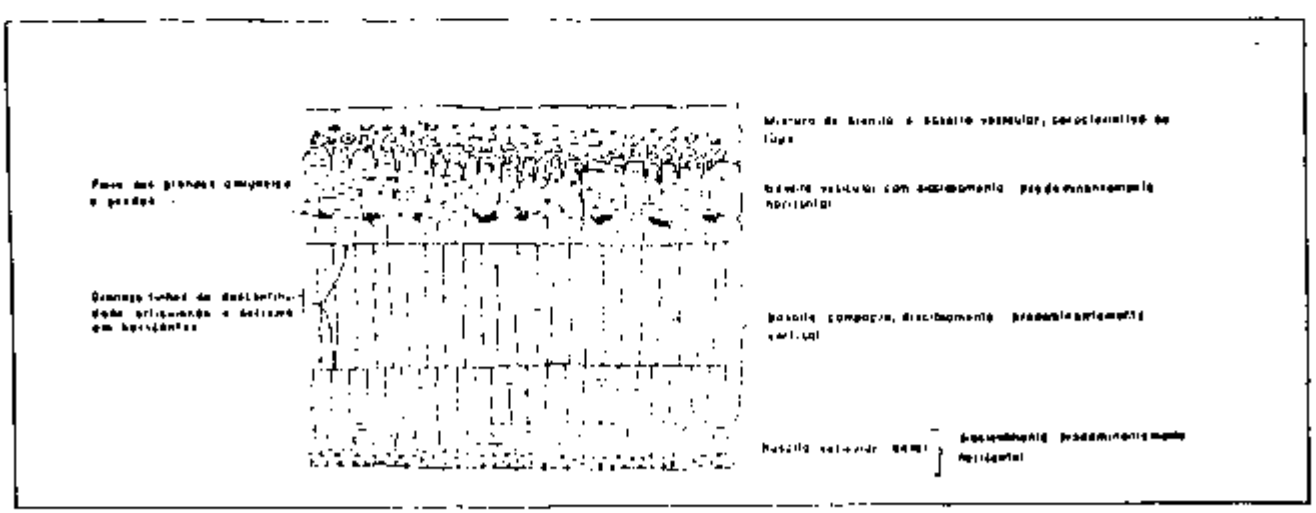


FIGURA 6.7. - Secção típica de um derrame basáltico /36/ .

### 6.1.3. Sedimentos Intertrapeanos

A atividade eólica que ocorreu simultânea e alternadamente com o extravasamento do magma na Bacia do Paraná, provocou o aparecimento de intercalações arenosas de diversos tipos entre dois derrames sucessivos. Pelo fato da zona de proveniência dos materiais eólicos situar-se na borda da área ocupada pelas efusivas, deve-se esperar uma notável diminuição da espessura do material intertrapeano, em direção ao centro da Bacia.

A granulometria e a composição dos depósitos intertrapeanos são semelhantes aos do arenito Botucatu, ou seja, areia fina, silte e argila. Esses sedimentos, não apenas ocorrem sob a forma de camadas individualizadas, mas também se misturam ao basalto de várias maneiras. Podem constituir pequenos diques ascendentes e descendentes, ou veios, no corpo do derrame, bem como podem se misturar de forma caótica ao basalto, englobando fragmentos dessa rocha e dando origem à chamada brecha basáltica.

As intrusões arenosas, manifestadas sob a forma de diques ou veios de arenito, de andamento nitidamente ascendente, aparecem introduzidas no corpo do derrame a partir de sua base. Elas distinguem-se de um outro tipo de intrusão arenosa, que ocorre no topo dos derrames e que consiste na deposição de areias eólicas nas fraturas e cavidades superficiais, sendo este último tipo muito mais comum que o primeiro.

Os diques, na base, mostram-se intensamente silicificados, com digitações horizontais. Sua espessura pode alcançar algumas dezenas de centímetros, embora em média não ultrapasse cinco centímetros, estendendo-se entretanto por vários metros /36/. Localmente, associam-se, às vezes, a uma brecha constituida por fragmentos angulosos de basalto compacto ou vesicular, envolvidos por matriz arenosa.

O aparecimento da brecha basáltica está ligado à sedimentação eólica na superfície do derrame concomitantemente à ação da desagregação mecânica à qual está submetido o topo do derrame em ambiente desértico. A Figura 6.8. mostra um esquema de formação de uma brecha basáltica

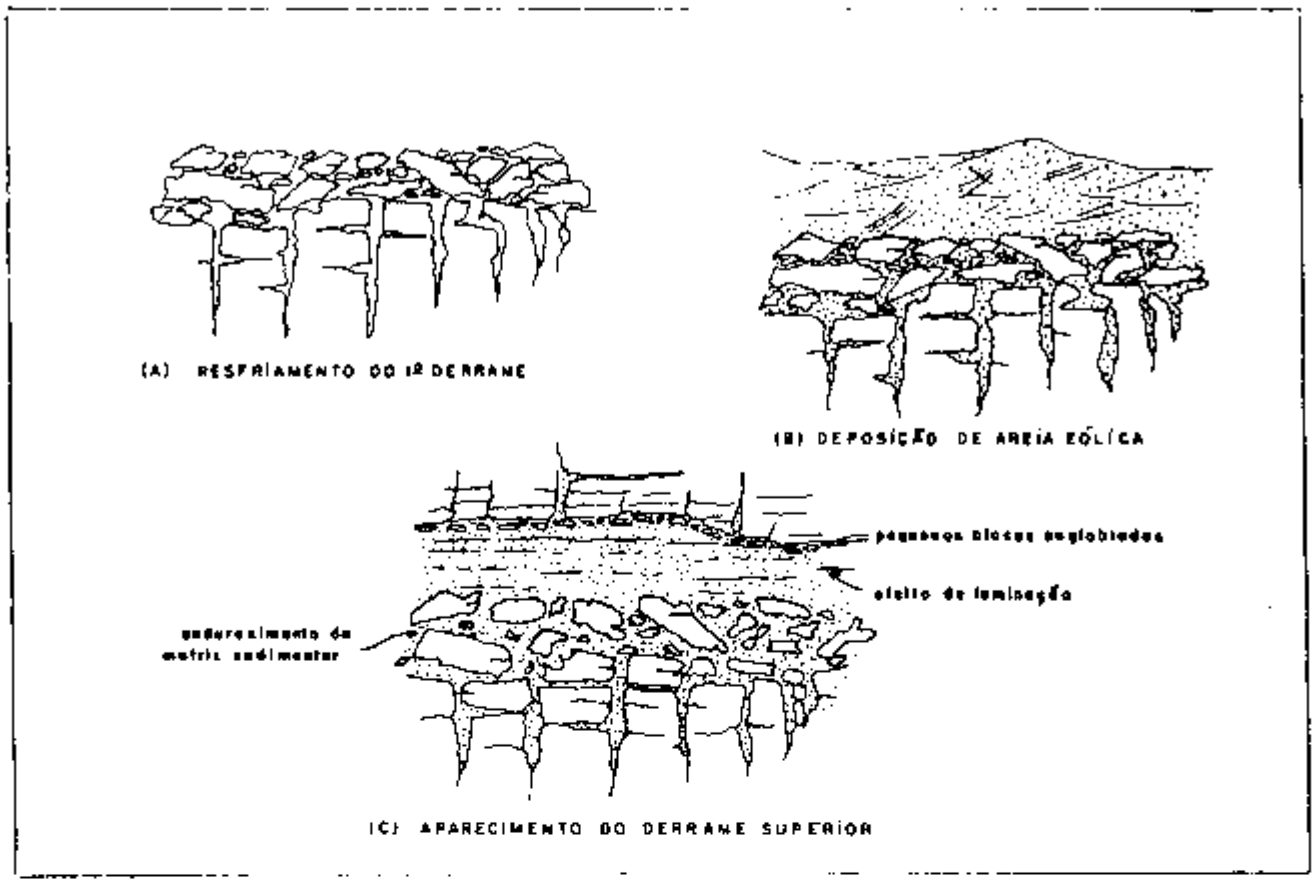



FIGURA 6.8. - Esquema de formação de uma brecha basáltica /36/ .

Numa primeira fase, quando da solidificação da lava, ocorre a formação de uma crosta de aspecto escoriáceo, muito acidentada. Em seguida, a sedimentação eólica penetra nas fendas e cavidades do topo do derrame, proporcionando também, o nivelamento generalizado da superfície. Nesse processo a areia engloba fragmentos angulosos de basalto vesicular destacados do topo do derrame, dando origem à brecha basáltica. Os materiais que a compõem podem apresentar-se muito resistentes ao intemperismo, quando o arenito se encontra bem silicificado. Entretanto, eles aparecem também como elementos acentuadamente friáveis.

O espaço limitado entre dois corpos basálticos pode conter depósitos volumosos de arenito, nas formas de cunhas, lentes ou bolsões, todas elas relacionadas a tensões de tração desenvolvidas dentro do derrame, em várias fases de sua consolidação, causadas pelo andamento dos derrames em função de fortes mergulhos notados localmente em seu traçado.

A cunha representa o desenvolvimento de fraturas do maciço rochoso, com as paredes cada vez mais afastadas entre si, à medida que se aproxima do topo do derrame. O espaço mostra-se preenchido por arenito, e a cunha pode aprofundar-se diversos metros no corpo do derrame.

Quanto às lentes, nota-se nitidamente, neste caso, o adelgamento do derrame, evidenciado pela aproximação do topo em direção à sua base; esta permanece horizontal, sem qualquer deformação. A base do derrame superior é também horizontal, graças ao preenchimento da depressão por parte de material intertrapeano. A parte superior da lente em contato direto com a lava pode sofrer endurecimento intenso, evidenciando material laminado, vermelho, com espessura da ordem de 20-40 cm, podendo alcançar até dimensões de 1 metro. Ao contrário dessa, a parte central apresenta-se com cores menos acentuadas, avermelhado ou creme, podendo inclusive exibir características de solo friável, quando exposta.

As partes basal e lateral inferior da lente apresentam-se caóticas, confundindo-se com o próprio topo do derrame. Blocos de basalto vesicular encontram-se destacados e englobados pelo material intertrapeano. Uma lente pode alcançar dimensões da ordem de 7-8 metros de espessura e algumas dezenas de metros de extensão.

Um outro tipo de ocorrência, o bolsão, mostra, da mesma forma que a lente, uma inflexão do topo do derrame, podendo alcançar profundidade maior que a lente e paredes quase verticais.

A Figura 6.9. mostra o esquema dessas feições descritas acima.

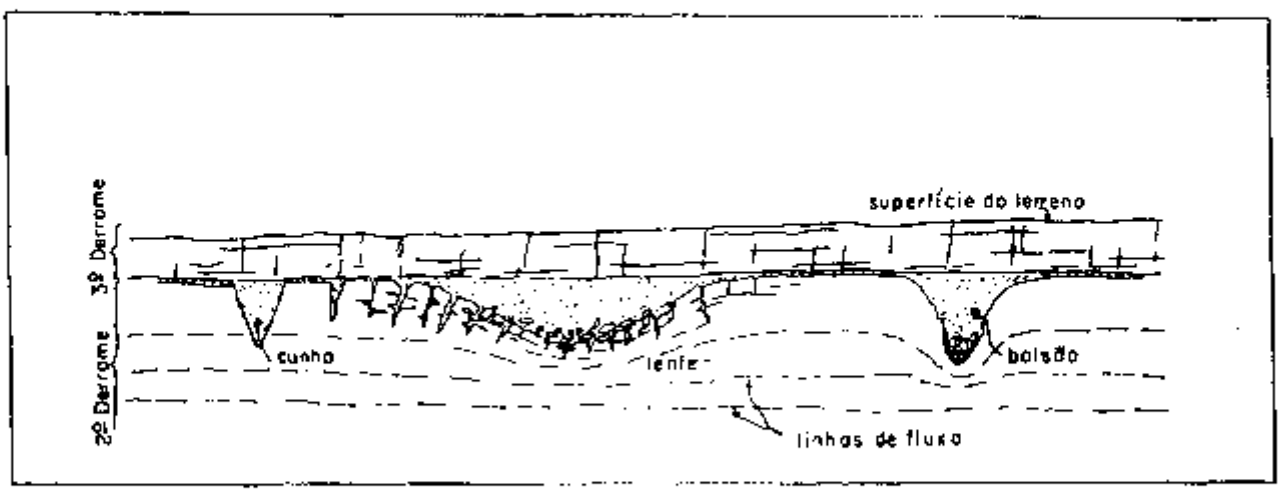



**FIGURA 6.9. - Outras formas de ocorrências de material intertrapeano : cunhas, lentes e bolsões /36/ .**

### 6.1.4. Descontinuidades

Descontinuidades primárias : Elas dizem respeito às diáclases, fissuras e juntas primárias, que são conseqüência imediata das propriedades físico-químicas inerentes ao próprio magma em resfriamento, formando-se concomitantemente à consolidação da massa do derrame. Elas manifestam-se por meio de diáclases de tensão ( ou contração), juntas laminares horizontais e juntas horizontais de grande extensão, todas já consideradas anteriormente.

Descontinuidades secundárias : As leptoclases representam as descontinuidades secundárias não tectônicas. São fraturas de pequenas dimensões em relação às diáclases e acredita-se que sua origem esteja relacionada com o fenômeno da desvitrificação, no ato de solidificação do derrame /36/. As leptoclases sempre se associam e estão subordinadas às mais extensas superfícies de diaclasamento.

Pouco se pode dizer sobre a existência de descontinuidades secundárias de caráter tectônico (diáclases). O que se observa é o efeito do tectonismo regional sobre os sistemas preexistentes de diáclases, por meio de estrias de fricção nas películas de argilo-minerais interpostas entre blocos basálticos contíguos.

### 6.1.5. Falhamentos

No conjunto dos derrames basálticos da Formação Serra Geral destacam-se, nitidamente, dois sistemas principais de falhas. Um de direção entre N50°W e E-W e outro entre N10°- 40°E /68/. Essas descontinuidades foram detectadas no Rio Grande do Sul e Santa Catarina e estão relacionadas com o tectonismo da Bacia do Paraná, superimpondo-se aos fraturamentos de menor escala descritos anteriormente. Tais falhas estão muitas vezes associadas a diques de diabásio e são em geral preenchidas por minerais secundários.

Frangipani (1962) /25/ verificou a existência dessas duas direções principais de falhamentos nos derrames basálticos em São Paulo, por meio da elaboração de perfis paralelos. Argumentou que os resultados por ele obtidos, ou seja N30°E e N30°-85°W, estavam de acordo com os obtidos por Leinz e Putzer /68/80/ no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, respectivamente.

Deve ser citada ainda a ocorrência de descontinuidades horizontais que têm sido observadas em vários locais de implantação de barragens, que Guidicini e Campos (1968) /63/ denominaram "juntas-falhas", esta devido ao fato de apresenta-

rem características dos dois tipos de descontinuidades, simultaneamente. Das juntas apresentam o andamento horizontal ou sub-horizontal, paralelo aos contatos do derrame, além de grande continuidade lateral por até centenas de metros. Das falhas apresentam típico material de preenchimento, cuja espessura pode variar entre poucos centímetros até mais de um metro.

Sua gênese estaria relacionada ao movimento relativo entre zonas mais e menos viscosas do derrame e a milonitização observada no plano das juntas poderia ocorrer com certa facilidade, em virtude de tensões cizalhantes vindas do próprio derrame, no ato de solidificação.

O material de preenchimento é muito variado, constituindo numa mistura de fragmentos de basalto, areia e argila montmorilonítica. Acham-se presentes minerais secundários típicos de brecha de falha (sílica e calcita).

Os autores acreditam que para tais fenômenos não seja necessária uma explicação em função de solicitações tangenciais provenientes de um tectonismo regional. Estas, se houveram, posteriormente à solidificação total do magma, apenas contribuiram para um maior brechamento do material interposto no plano da junta.

A Figura 6.10. mostra o detalhe de uma ocorrência de junta-falha encontrada durante as escavações da barragem de Jupiá.

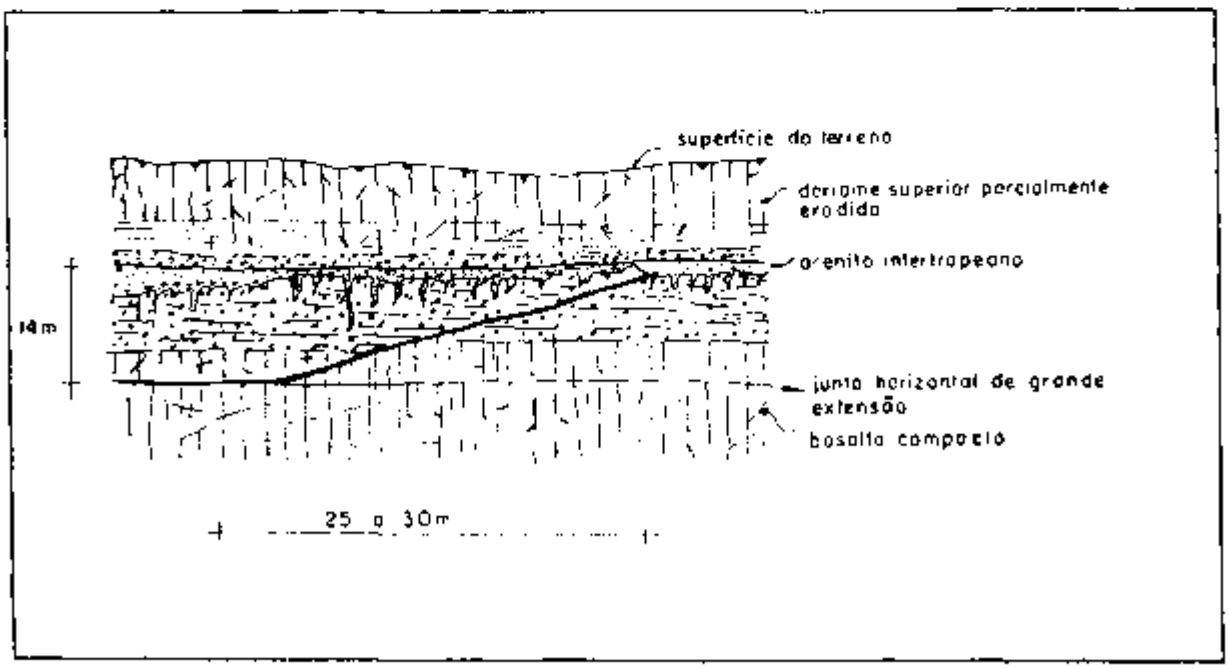



FIGURA 6.10. - Detalhe da forma de ocorrência de uma "junta-falha" /36/ .

6.1.6. Geomorfologia

A área de ocorrência das rochas basálticas no Estado de São Paulo corresponde, basicamente, a duas províncias geomorfológicas: "Cuestas" Basálticas e Planalto Ocidental . (Figura 6.11).

A província das "Cuestas" Basálticas corresponde a uma região de relevo acidentado, apresentando-se como uma faixa montanhosa que separa a província da Depressão Periférica da região, igualmente deprimida, do Planalto Ocidental.

Aí se localiza a borda oriental dos derrames basálticos em São Paulo, caracterizada por "cuestas" elevadas e muito festonadas. As maiores altitudes das cristas alcançam valores de 1000 a 1200 metros, enquanto que os principais rios que as atravessam (Tiête, Paranapanema e Grande) correm em altitudes de 420, 540 e 520 metros, respectivamente. Não são raros desníveis locais que podem exceder 400 metros. Feições menores e locais de relevo aparecem devido a diversos fatores, entre eles, a presença de intercalações areníticas, diferenças texturais e estruturais nos derrames, silicificação etc.

A presença de intercalações areníticas entre os derrames leva à formação de degraus nas vertentes das serras. Mesmo na ausência de tais intercalações, podem se formar degraus devido ao caráter textural e estrutural diferenciado dentro de um único derrame.

Nas serras mais elevadas, por exemplo, Botucatu, São Pedro, Itaqueri e Franca, aparecem paredões verticais de arenito. Em alguns locais como a leste da Serra de São Carlos, o arenito da Formação Botucatu apresenta-se silicificado no contato com o basalto, o que aumenta muito sua resistência, e leva, pela erosão, à formação de degraus salientes.

Paredões de basaltos não são raros em pontos mais elevados das serras, principalmente, nas vertentes de profundos "canyons" nelas entalhados.

Outra feição característica da província das "Cuestas" Basálticas são os planaltos arenosos e ondulados, que constituem campos elevados nos reversos das "Cuestas", constituindo serras ou solos muito ricos. Exemplos típicos podem ser apontados no Estado de São Paulo: Planalto do Patrocinio e Planalto de Franca.

É na província das "Cuestas" Basálticas que estão localizadas as grandes

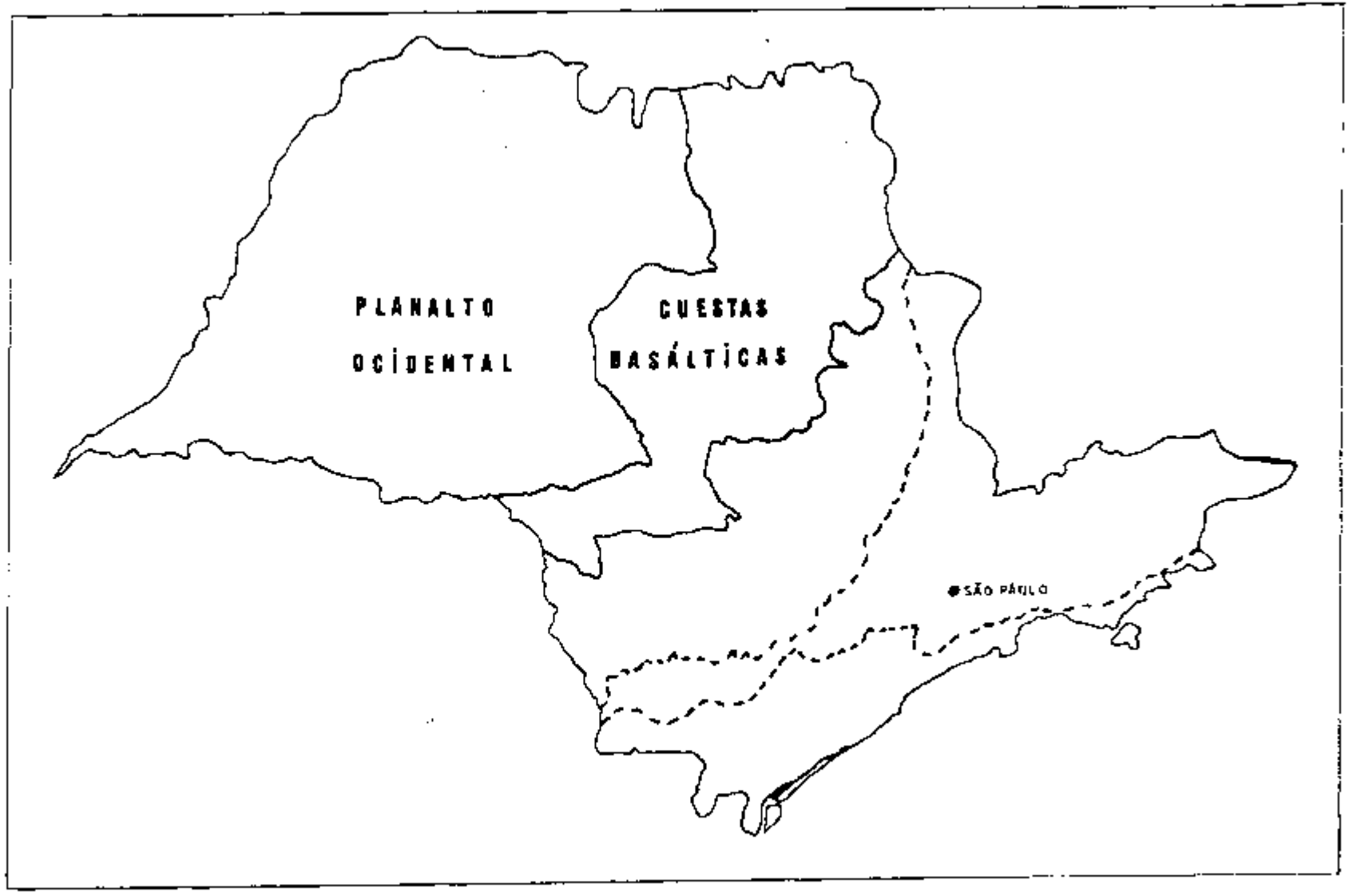



FIGURA 6.11. - Províncias geomorfológicas relativas às ocorrências basálticas no Estado de São Paulo /2/ .

áreas férteis de terra-roxa do Estado de São Paulo, utilizadas, principalmente, na cultura do café e da cana de açúcar.

A província geomorfológica do Planalto Ocidental caracteriza-se, basicamente, por uma sucessão de campos ondulados, de relevo suave, favorável à atividade agrícola e ao traçado de vias de comunicação. Suas maiores altitudes alcançam cerca de 740 metros e os desníveis locais raramente chegam a 100 metros. A geologia dessa província é relativamente simples, pois é quase inteiramente representada, em superfície, pela Formação Bauru, que por sua vez, cobre a maior parte da superfície dos derrames basálticos. Estes só afloram, graças à erosão, nos vales dos principais rios que cortam a região, sob a forma de faixas bem estreitas.

Na confluência dos rios Paraná e Paranapanema dispõe-se a Formação Caiuá, que aflora numa área de extensão apreciável. Sua expressão topográfica não difere em muito da dos arenitos Bauru.

A ocorrência de depósitos cenozóicos no Planalto Ocidental é restrita. Em grande parte representam produtos de removimentação fluvial de material da Formação Bauru /2/. Na maior parte do Planalto Ocidental a Formação Bauru apresenta relevo uniforme e monótono, com extensos espigões de perfis convexos e cimos ondulados, com terminações laterais lobadas, configurando colinas baixas, e amplas que avançam em direção aos vales dos principais afluentes do rio Paraná. A maior parte desse relevo acha-se a menos de 600 metros de altitude e seus desníveis locais raramente chegam a 100 metros.

Na borda sul-oriental da província, para onde as camadas da Formação Bauru se elevam lentamente, estão localizadas as maiores altitudes, representadas por destacados planaltos, que podem exceder 700 metros (Planalto de Garça e de Monte Alto). Eles possuem topografia tabular, feição essa dada pela maior resistência à erosão das camadas superiores da Formação Bauru. Esse relevo tabular, no Planalto de Garça, termina freqüentemente em escarpas abruptas, altas, de 50-100 metros, constituindo-as chamadas Serras de Bauru, dos Agudos, do Mirante etc.

No Planalto de Monte Alto desenvolve-se a Serra de Jaboticabal, onde se encontra a maior altitude da região e possivelmente de todo o Planalto Ocidental; cerca de 740 metros.

### 6.1.7. Hidrogeologia

Os basaltos da Formação Serra Geral constituem a camada confinante do horizonte aquífero mais importante da Bacia do Paraná, ou seja, o aquífero Botucatu. Ao mesmo tempo, correspondem ao substrato onde se acumulam as águas infiltradas nos arenitos das Formações Caiuá e Bauru.

As melhores possibilidades hidrogeológicas dos basaltos estão relacionadas a características locais e excepcionais, ou seja, as suas zonas aquíferas /82/. Essas zonas são de pequenas extensões, possuindo condições hidrogeológicas muito variáveis, e situadas num contexto quase impermeável. Ao contrário dos poços implantados num horizonte aquífero, os implantados numa zona aquífera apresentam resultados muito aleatórios, podendo, com freqüência, apresentar-se secos, quando atravessam as parcelas de rocha cuja permeabilidade é quase nula. Aí, as condições de circulação são complexas e os resultados são imprevisíveis.

Segundo Rebouças (1976)/83/ a importância hidrogeológica dos derrames basálticos decorre da relativa explorabilidade de suas zonas aquíferas pelos meios técnicos e financeiros disponíveis, aliada a uma configuração climática muito favorável e privilegiada, bem como devido à grande extensão de seu domínio de ocorrência. As restrições locais decorrem do desmantelamento causado pela ação erosiva dos rios associados a eles.

Informações obtidas em perfurações revelam que os derrames são compactos e impermeáveis, o armazenamento de água se limitando às zonas mais intensamente fraturadas, contatos e arenitos inter e intratrapeanos. Nas porções vesiculares ou amigdaloidais as condições de circulação de água são muito variáveis devido ao preenchimento por minerais e à falta de intercomunicação entre os vazios.

Em geral, as condições mais favoráveis são observadas nas zonas de decomposição, associada às fraturas horizontais ou contatos, nos primeiros 100 metros de profundidade /82/.

A zona aquífera dos basaltos nada mais é do que um prolongamento em profundidade do aquífero Bauru/Caiuá sobrejacente. Por outro lado, nas áreas de pequena espessura ou ao longo de rupturas regionais mais importantes é possível que ocorram contribuições ascendentes das águas do sistema aquífero Botucatu subjacente. Aliás, esse fenômeno é comprovado pela ocorrência de águas de temperatura elevada e de composição química semelhante em poços profundos em basaltos.

Nas porções aflorantes, a superfície topográfica entalhada pelos rios produz o seccionamento das estruturas aquíferas, determinando a impossibilidade de acumulações importantes. Observa-se esse entalhamento ao longo das faixas mais fraturadas, por se constituirem caminhos preferenciais para os escoamentos superficiais e subterrâneos. Desse modo, a circulação no sistema segue caminhos preferenciais de elevada permeabilidade e é, genericamente, dirigida em direção do centro da Bacia, coincidindo, pois, com o sentido das águas superficiais. Como conseqüência disso, a maior parte das fontes descendentes secam praticamente durante os períodos de estiagem mais prolongados e os poços acusam violentas variações de nível.

As condições gerais de ocorrência das águas subterrâneas nos basaltos são de aquífero livre. Contudo, quando um trecho correspondente a uma importante descontinuidade horizontal acha-se encerrado entre camadas de basalto denso é comum o aparecimento de artesianismo. Esses fenômenos têm vida efêmera, indicando o caráter de armazenamento limitado. Os níveis de água nos poços de observação reagem à estação chuvosa e as oscilações medidas foram da ordem de 5 metros, em média /83/.

Dados obtidos em laboratório /82/ por meio de ensaios de perda d'agua, indicam valores de permeabilidade de $10^{-3}$ a $10^{-5}$ m/s para as estruturas de contato e juntas-falhas associadas, enquanto que as descontinuidades verticais têm permeabilidades inferiores a $10^{-8}$ m/s.

Ensaios de aquíferos realizados e interpretados pelas equipes do DAEE (1974 e 1976) /38/ referentes a vinte poços, indicam valores de transmissividades variáveis: $10^{-5}$ a $4,4 \times 10^{-4}$, sendo o valor médio $3,8 \times 10^{-4}$ $m^2/s$ /82/.

O nível estático das águas subterrâneas dos basaltos é, em geral, pouco profundo. O paralelismo acentuado que esse nível apresenta em relação à superfície topográfica é um comportamento típico de aquífero de acentuada anisotropia. Dados referentes a uma centena de poços relacionados por Hausmann (1966) /55/ no Rio Grande do Sul, indicam níveis estáticos que variam de 0,32 até 130 metros de profundidade. O valor médio é de 15 metros, sendo que 65% apresentam níveis estáticos superiores à média. A profundidade dos poços varia entre 31 e 300 metros, sendo a média de 84 metros, e apenas 43% são menos profundos. No Estado de São Paulo, 200 poços analisados apresentaram uma profundidade média de 102 metros.

De modo geral, o aproveitamento das águas subterrâneas dos basaltos é viável para o abastecimento rural e de pequenas indústrias. Seu potencial é estimado em cerca de 2500 MMC/ano. /82/.

É duvidoso que se possa aproveitar um tal potencial em futuro próximo. Além disso, não existe ainda uma política para o aproveitamento integrado das águas superficiais e subterrâneas da região, e sabe-se que ambos os recursos são estritamente interdependentes. /82/.

6.1.8. Recursos Naturais

São raras concentrações de recursos minerais de interesse econômico em basaltos.

No Estado de São Paulo, a principal aplicação comercial ligada às ocorrências das rochas basálticas se refere ao aproveitamento da fertilidade do solo (terra-rôxa) resultante da decomposição dessas rochas, para o cultivo da cana-de-açúcar.e café, principalmente.

Outra aplicação dos basaltos, bastante difundida no Estado, é sua transformação em pedra britada para utilização na pavimentação de rodovias e como lastros de ferrovias.

Como já vimos anteriormente, derrames basálticos representam potencialmente uma interessante fonte de águas subterrâneas para todo o Estado de São Paulo.

## 6.2. Granitos

As ocorrências de rochas graníticas ou granitóides /45/ no Estado de São Paulo estão inseridas na unidade geotectônica denominada Região de Dobramento Sudeste. Essa unidade acha-se limitada a leste pelo oceano atlântico, a sudeste pela cráton de La Plata e a oeste pela cobertura sedimentar - vulcânica da Bacia do Paraná. Seu limite nordeste, ainda não muito bem definido, corresponde à zona cristalina norte de São Paulo, constituida pelos Grupos Amparo, Paraíba, Pinhal e Itapira /101/, onde também são conhecidas ocorrências de intrusões granitóides, se bem que com um nível de detalhamento inferior em relação àquelas outras presentes dentro dos limites da Região de Dobramento Sudeste.

A organização estrutural dessa unidade geotectônica se manifesta em duas componentes básicas : faixas de dobramentos e maciços medianos /99/, que se estendem alternadamente numa sucessão com disposição geral NE-SW /101/. (Figura 6.12).

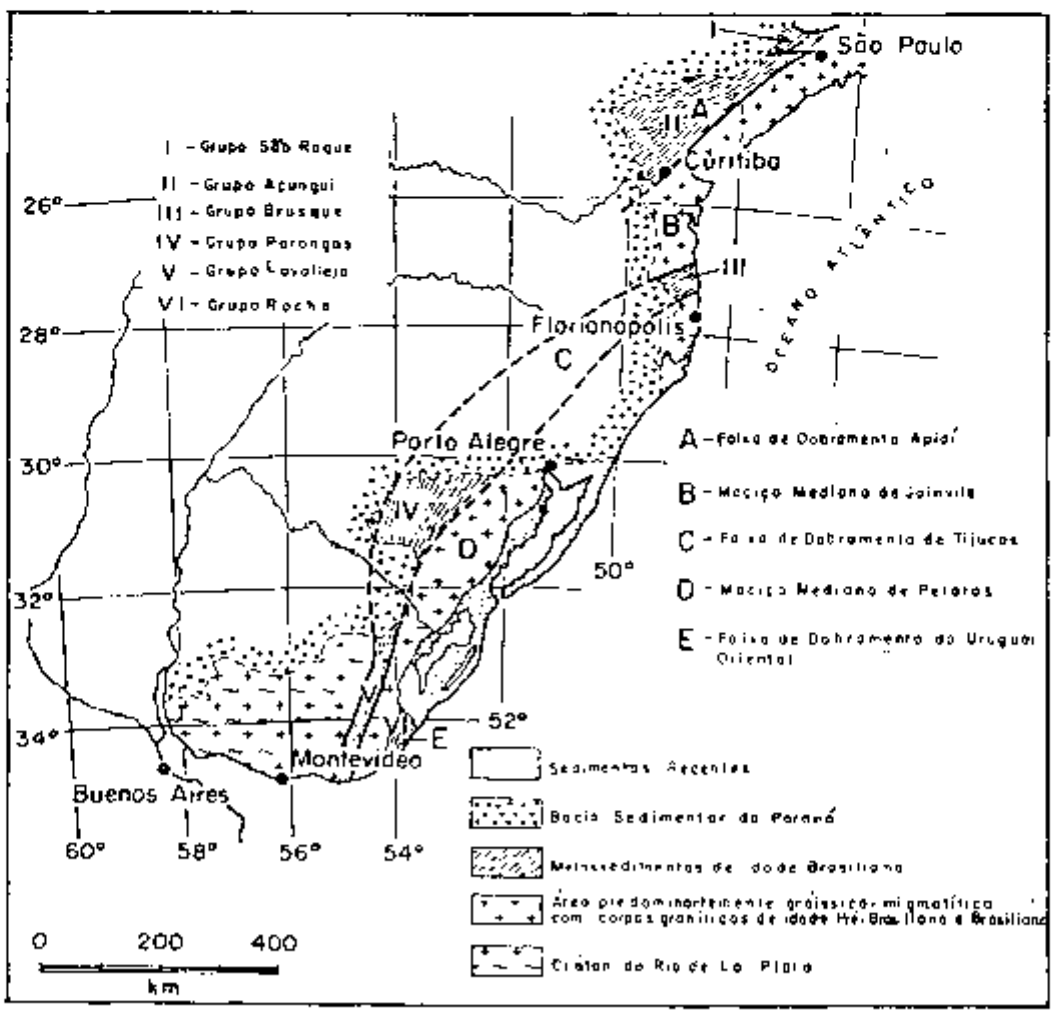



FIGURA 6.12. - Estruturação da Região de Dobramento Sudeste /44/ .

As faixas de dobramentos são constituídas por rochas epimetamórficas geradas no Ciclo Brasiliano (1,0 b.a - 570 m.a.) representadas por metassedimentos clásticos grossos e finos (conglomerados, arenitos, ritmitos, siltitos, argilitos) , clásto-químicos (arenitos calcíferos e margas) e químicos (calcário, calcários dolomíticos e dolomitos). Toda essa sequência ectinítica é atravessada por abundantes corpos graníticos /101/. Conhecem-se algumas ocorrências migmatíticas menos expressivas, como as situadas a leste da cidade de São Paulo /41/ .

Os maciços medianos correspondem a blocos do embasamento antigo (pré - brasiliano) limitados por falhas, constituidos de gnaisses, migmatitos, charnockitos, granulitos e rochas básicas, que sofreram migmatização e intrusões graníticas no ciclo Brasiliano /43/. Como expressões menores estão incluidos metassedimentos referentes aos mesmo ciclo geotectônico .

Dentro da área de estudo deste trabalho estão representadas as Faixas de Dobramentos Apiaí e São Roque e os Maciços de Joinvile e Guaxupé. (Figura 6.13) .

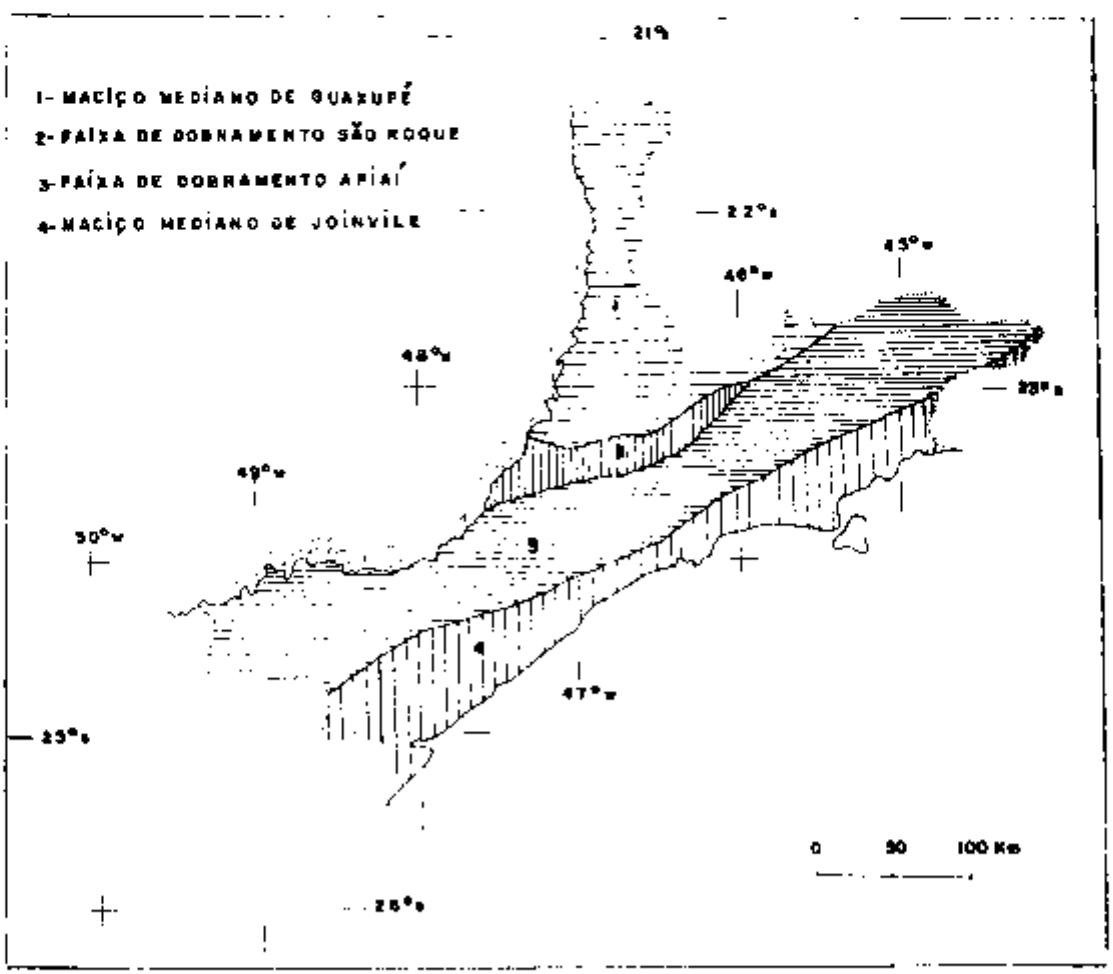



FIGURA 6.13. - Compartimentação geotectônica do Pré-Cambriano no Estado de São Paulo : Maciços Medianos e Faixas de Dobramentos /43/ .

Em todas essas unidades são reconhecidos centenas de corpos graníticos e granitóides de dimensões variadas, cuja composição vai desde tonalitos até granitos. Sob o ponto de vista textural eles incluem rochas equigranulares ou não, porfiróides ou não, grossas ou finas, hipidiomórficas ou xenomórficas e foliadas ou não /45/. Representam ainda corpos concordantes, parcialmente discordantes e discordantes sin-tardi - e pós tectônicos, alojados em níveis cata, meso e epizonais .

Dentro da Faixa de Dobramento Apiaí, as rochas graníticas correspondem a quase metade da área exposta dessa faixa, constituindo complexos batolíticos de várias centenas de quilômetros quadrados, que em território paulista estão representados, principalmente, pelos complexos graníticos Três Córregos, Agudos Grandes e Itaóca, além de outros, por exemplo, Santa Branca, Serra do Jambeiro, de dimensões menos expressivas (maciços, bossas e "stocks"). As rochas graníticas também ocorrem por toda a Faixa de Dobramento Apiaí sob a forma de expansões laterais de corpos maiores ou de intrusões independentes /101/ .

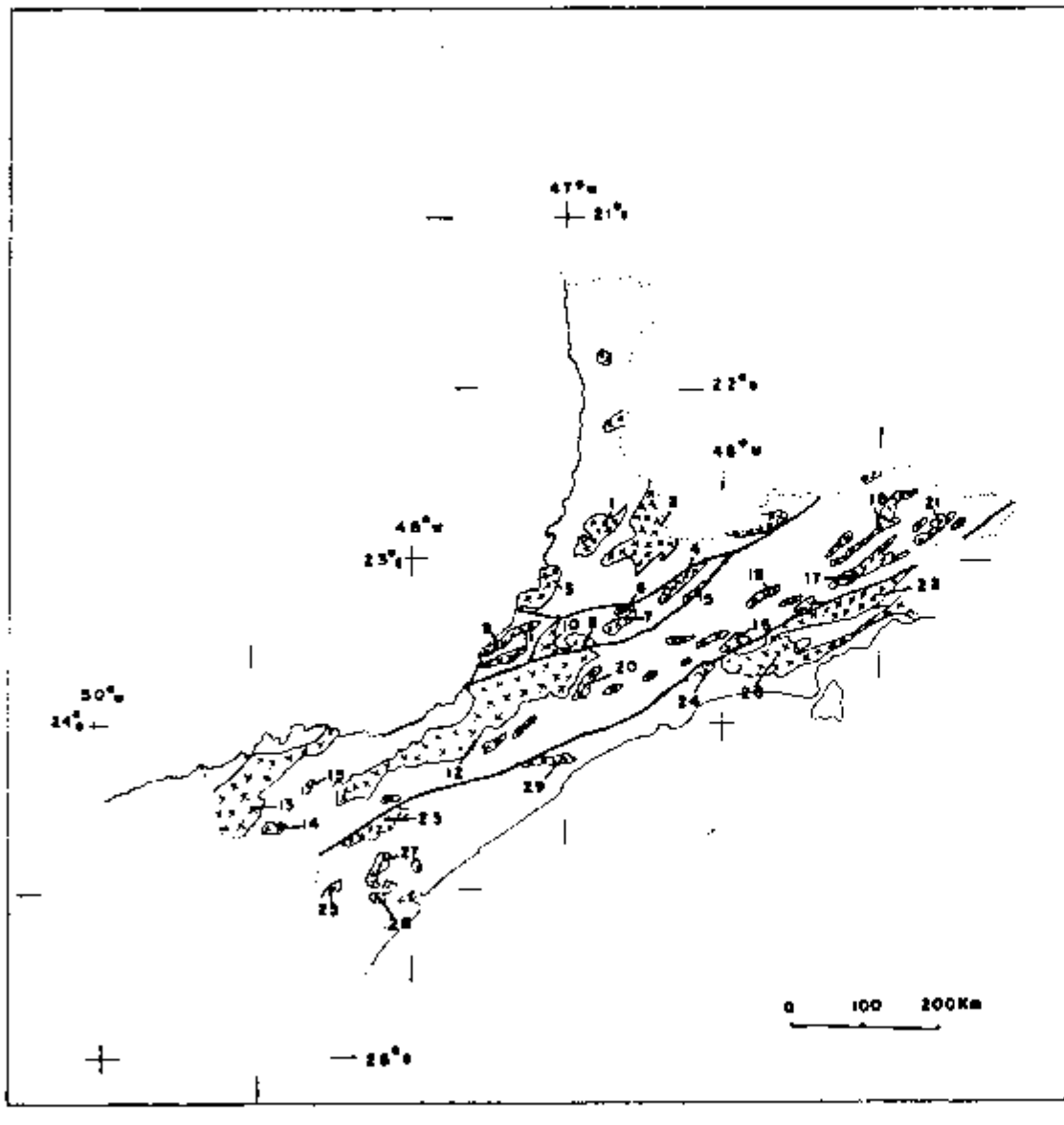
Na Faixa de Dobramento São Roque, esta restrita ao Estado de São Paulo aparecem corpos graníticos de maior envergadura que constituem intrusões alojadas em núcleos de estruturas dobradas; elementos de menor porte aparecem atravessando rochas ectníticas. Os granitóides apontados anteriormente estão representados segundo suas ocorrências mais expressivas pelos batólitos São Roque, Sorocaba , Itaqui, Cantareira e Pedra Branca .

As rochas graníticas incluídas no Maciço Mediano de Joinvile distribuem-se por todo o domínio dessa unidade, sendo representados em São Paulo, principalmente, pelos batólitos de Natividade, Taiaçupeba, Cruz Alta, Itapeuna, Alto Turvo e Serra Ipiranguinha .

No Maciço Mediano de Guaxupé, à semelhança do de Joinvile, as ocorrências granitóides são muito freqüentes. Os corpos mais importantes são os batólitos de Itu, Socorro e Morungaba, além de outros, por exemplo, Atibaia, Nazaré, Pinhal e Jaguariuna .

A distribuição dos principais corpos graníticos e granitóides dentro das Faixas de Dobramentos e Maciços Medianos no Estado de São Paulo está ilustrada na Figura 6.14. .

O magmatismo granítico na Região de Dobramento Sudeste é típico de áreas geossinclinais, com vulcanismo básico incipiente no estádio inicial de




Maciço Mediano de Guaxupé

1. Morungaba 2. Socorro 3. Itú

Faixa de Dobramento São Roque

4. Pedra Branca
5. Igaratá
6. Mairiporã
7. Cantareira
8. Itaqui
9. Sorocaba
10. São Roque
11. São Francisco

Faixa de Dobramento Apiaí

12. Agudos Grandes
13. Três Córregos
14. Itaóca
15. Espírito Santo
16. Santa Branca
17. Alto Paraitinga
18. Aparecida
19. Serra do Jambeiro
20. Itapecirica da Serra
21. Alto do Segredo

Maciço Mediano de Joinvile

22. Natividade
23. Itapeúna
24. Taiaçupeba
25. Alto Turvo
26. Serra Ipiranguinha
27. Guaraú
28. Cruz Alta
29. Rib. Braço Grande

**FIGURA 6.14.** - Distribuição dos corpos graníticos principais dentro das Faixas de Dobramentos e Maciços Medianos /43/ .

subsidência , magmatismo ácido pouco expressivo no estádio seguinte de diferenciação e considerável magmatismo granítico, intrusivo e extrusivo, durante os processos finais do desenvolvimento geossinclinal /101/ .

O magmatismo correspondente a uma primeira fase é de composição calco - alcalina, sendo contemporâneo à sedimentação pré-tectônica. De caráter discreto, manifesta-se sob a forma de pequenos corpos (diques, sills, derrames restritos , tufos e pequenos "stocks") que se metamorfosearam em anfibolitos e xistos magnesianos .

Numa fase posterior, sintectônica, tal magamatismo se manifesta por meio de corpos granitóides, freqüentemente batolíticos, autóctones e para-autóctones , heterogêneos, alojados preferencialmente nos domínios dos Maciços Medianos e geanticlíneos, mostrando variações em suas composições, texturas e estruturas. As variações de caráter composicional evidenciam-se pela presença de termos desde tonalitos, passando por granodioritos até verdadeiros granitos. As de caráter textural manifestam-se pela ocorrência de tipos equigranulares e porfiróides, enquanto que variações estruturais são mostradas em corpos gnaissificados e ricos em feições originais. Segundo Wernick, Hasui e Brito Neves (1978) /99/ tais características petrográficas, estruturais, texturais, assim como as rochas encaixantes, sugerem origem por anatexia acompanhada por intensos fenômenos metassomáticos , e se enquadram na mobilização generalizada do embasamento pré-brasiliano das regiões de dobramento .

Numa fase seguinte, tardi-tectônica, aparecem corpos graníticos intrusivos de pequena expressão (tabulares, "stocks" , bossas e "plugs" de natureza variada : granodioritos, monzonitos, sienitos, granitos normais e alcalinos) .

A fase pós-tectônica é de uma diversidade muito acentuada. São conhecidos granodioritos e granitos, por vezes alcaninos, formando corpos circunscritos, associados, principalmente, a maciços medianos e geanticlíneos. Apresentam ativa tectônica de borda, aureólas de contato, zoneamento litológico discreto /67/ , frequente condicionamento por falhas /86/ e fraturas. Outros corpos estão associados a depósitos molássicos, constituindo intrusões, diques, derrames e depósitos piroclásticos. Litologicamente são variáveis estando representados por granitos , granodioritos, andesitos, riólitos e basaltos .

Dentre essas diferentes fases do magmatismo granítico da Região de Dobramento Sudeste a que mais de destaca, sob o ponto de vista cartográfico, é aquela

relacionada aos corpos sintectônicos, principalmente em território paulista. Nessa área Hasui et alli 1978 /45/, em função das diversidades composicionais e texturais, definiram cinco fácies litológicas fundamentais para os corpos granitóides do pré-cambriano paulista : fácies Migmatítica, Cantareira, Graciosa, Itu e Granofírica .

A fácies Migmatítica é constituída de ultrametamorfitos associados a anatexitos, denotando grande heterogeneidade petrográfica, dada principalmente pela ocorrência em embrechitos, nebulitos e anatexitos. A passagem de tais litologias para as adjacentes é gradativa, o que demonstra seu desenvolvimento "in situ". A composição é variável, desde tonalítica, até granítica, sendo minerais essenciais quartzo, microclínio e oligoclásio. Da mesma maneira se apresenta a textura, com presença de foliação generalizada e concordante com o padrão regional e de microclínio, dando-lhes caráter oftalmítico .

A fácies Cantareira é representada principalmente por rochas descritas genericamente como granito - gnaisses, de granulação fina a média, foliação acentuada, sem apresentarem grandes variações composicionais ou texturais perceptíveis a olho nu. A composição pode ser também tonalítica a granítica. O feldspato presente nessas rochas pode aparecer desenvolvido (milimétrico a centimétrico) conferindo um caráter porfiróide a essas ocorrências. Varia também quanto à forma (euédrica a ovalada), quantidade e orientação, dando origem aos diferentes tipos petrográficos conhecidos /45/. As rochas representantes da fácies Cantareira apresentam-se cinzentas, claras a escuras, mas tendem a se tornar róseas com os porfiroblastos feldspáticos .

A fácies Graciosa caracteriza-se pela presença de granitos de acentuada alcalinidade. São isótropos, de cor cinza clara a rósea, granulação média a grossa e textura hipidiomórfica ou xenomórfica granular. Localmente são porfiríticos. Em sua composição incluem ortoclásio pertítico, quartzo, plagioclásio sódico (albita), anfibólio sódico (ferro-hastingsita), piroxênio sódico (agirina - augita) e biotita. Reconhece-se ainda a presença de granodioritos e biotita - granitos ácidos .

A fácies Itu é prepresentada por granitos cinzentos a vermelhos, de granulação fina a grossa, sem foliação e de textura sub-hipidiomórfica a hipidiomórfica granular. Seus componentes predominantes são microclíneo, oligoclásio, quartzo e biotita. Existem variações composicionais até granodioríticas .

A fácies Granofírica aparece em corpos pequenos, pouco representativos,

que ocorrem no sul do Estado de São Paulo .

Os termos petrográficos descritos anteriormente podem aparecer isoladamente constituindo corpos graníticos menores, mas frequentemente ocorrem associações, e nesse caso o corpo rochoso é definido de acordo com a fáceis predominante .

A distribuição espacial dos corpos graníticos na área de interesse mostra que a maioria deles é de natureza unifaciológica predominando a fáceis Cantareira, que ocorre principalmente nas Faixas de Dobramento São Roque e Apiaí, estando também presente no Maciço Mediano de Joinvile /45/ .

6.2.1. Tectônica

A evolução tectônica do Pré-€ paulista pode ser descrita em termos do desenvolvimento da Região de Dobramento Sudeste. Essa unidade corresponde a áreas que sofreram sedimentação, deformação, metamorfismo, magmatismo e orogênese no ciclo Brasiliano. Todos esses fenômenos ocorreram em três fases distintas : uma inicial (sedimentação), outra intermediária (tecto - orogênica) e uma final (transição e cratonização) .

A fase de sedimentação (1,0 - 0,7 bilhões de anos) caracterizou-se pela instabilização do embasamento pré-Brasiliano, segundo direções estruturais, falhas e zonas menores de fraqueza, que propiciou o desenvolvimento de diferenciações em sulcos de sedimentação e altos do embasamento. Os sulcos, inicialmente , receberam sedimentação clasto-química de águas rasas, em cuja seqüência faltam os termos conglomeráticos basais, fator que pode indicar áreas fontes arrasadas com espesso manto de intemperismo associado a um regime inicial lento de formação nos sulcos /42 e 99/. Ao mesmo tempo de desenvolveu um magmatismo básico pouco expressivo sob a forma de pequenos sills, derrames e diques, associado às falhas mais profundas .

Com o aprofundamento generalizado da área ocorreu a progradação dos depósitos sedimentares sobre os núcleo do cráton e maciços medianos, implantação de seqüências carbonáticas espessas em alguns sulcos, indícios de mudanças de regime tectônico, cessando o caráter tracional das falhas .

A parte final dessa fase envolveu o início da inversão lenta dos sulcos

de sedimentação, acompanhada de deposição progressiva de sedimentos flyschóides , havendo já alguns indícios de retrabalhamento de seqüências preexistentes .

A fase tecto - orogênica, desenvolvida em torno de 0,7 - 0,6 b.a, incluiu dobramento, magamatismo ácido e metamorfismo polifásicos, além de orogênese. O metamorfismo regional, de baixa a média pressão, atuou tanto sobre as seqüências sedimentares como regenerando o embasamento mais antigo. As condições térmicas aí impostas caracterizaram rochas da fácies xisto verde até anfibolito . Houve também migmatização nos níveis mais profundos do interior da Região de Dobramento . Além de metamorfismo regional, ocorreram ajustes extruturais e mineralógicos em função do arrefecimento progressivo do fluxo de calor, de intrusões ou de cataclase.

As deformações plásticas se deram em uma ou duas fases, que resultaram em dobramentos regionais e holomórficos. A primeira fase foi contemporânea ao metamorfismo regional correspondendo a dobras com xistosidade em posição plano - axial /40/. Mais tarde uma segunda fase produziu as orientações estruturais hoje observadas na área. São ainda conhecidos processos locais devido a crenulações , "kinking", intrusões e falhas. Com o arrefecimento progressivo do fluxo de calor e consequentemente das rochas, a compressão passa de deformações plásticas para deformações rígidas .

O magmatismo ácido foi expressivo, constituindo várias fases de formação de corpos granitóides sintectônicos, relativos à primeira fase de deformação, autóctones a para - autóctones, situados preferencialmente nos maciços medianos e geanticlíneos. A localização desses corpos foi controlada em função de zonas de menor resistência, que separam os maciços medianos das Faixas de Dobramento e nos geanticlíneos. Uma fase magmática intrusiva posterior caracterizou-se por corpos circunscritos controlados por lineamentos, falhas e núcleos de anticlinórios. A fase tecto - orogênica inclui ainda o início do soerguimento orogênico de toda a Região de Dobramento que continuou na fase seguinte .

A fase de Transição e Cratonização desenvolveu-se entre cerca de 600-450 milhões de anos. Nesse intervalo teve continuidade o soerguimento orogênico das faixas de dobramento; transição das deformações plásticas para deformações rígidas, que resultou na implantação de grandes zonas de transcorrência reativando falhas profundas e dando a configuração em blocos justapostos amendoados hoje observada na Região de Dobramento Sudeste; implantação de bacias molássicas, cuja sedimentação reflete a atenuação gradual das deformações plásticas, arrefecimento do fluxo de calor e soerguimento gradual /99/; magmatismo de caráter ácido e básico bastante diversificado, incluindo intrusões e derrames .

A estabilização deu-se já no início dos tempos Fanerozóicos pela cratonização, constituindo-se a Plataforma Sulamericana que recebeu depósitos que originaram a Bacia do Paraná, cuja sedimentação se configurou sob forte influência das estruturas desenvolvidas nos tempos pré - € .

A partir do Jurássico incidiram na área processos magmáticos básicos e alcalinos, morfogênicos e trafogênicos, com forte influência das falhas de caráter transcorrentes que se manifestaram no fim do Ciclo Brasiliano /43/ . Ainda hoje se detecta na área uma certa instabilidade tectônica em função da sismicidade natural aí presente .

6.2.2. Os grandes falhamentos

A área de ocorrência das rochas graníticas em São Paulo é cortada por diversas falhas de centenas de quilômetros de extensão, de atitudes subverticais, com espessas zonas cataclásticas /52/. Não se tem idéia exata da idade desses falhamentos. No máximo podem ser relacionados ao Proterozóico Médio (1,8 - 1,0 bilhões de anos) quando fragmentaram porções continentais formadas após o Ciclo Transamazônico (≃ 2,0 bilhões de anos). A partir daí foram reativadas diversas vezes : no Ciclo Brasiliano (1,0 - 0,57 bilhões de anos) estiveram ativas desde a fase inicial de sedimentação, propiciando o desenvolvimento de sulcos, até os estádios finais da formação das Regiões de Dobramentos, com caráter transcorrente , produzindo uma estruturação em blocos que caracteriza a atual configuração da área de nosso interesse. Mais tarde novos deslocamentos ocorreram durante a reativação Weldeniana, controlando intrusões magmáticas básicas e alcalinas. (Jurássico - Cretáceo). No Terciário essa reativação, de caráter normal, condicionou o aparecimento de bacias trafogênicas (bacias de São Paulo, Taubaté, Resende, Volta Redonda e Guanabara), assim como, o desenvolvimento dos padrões morfogenéticos gerais hoje observados .

As principais descontinuidades presentes no pré - € paulista são as falhas de Jundiuvira, Buquira, Taxaquara, Além - Paraíba, Alto da Fartura e Cubatão /52/ .

Possivelmente, desenvolveram-se falhamentos menores induzidos pelos falhamentos transcorrentes. Os deslocamentos normais do Terciário, que incidiram sobre planos de falhas antigos e ao longo de juntas, também geraram novas descontinuidades, que juntamente com os grandes falhamentos formam a grande rede de falhas que caracteriza o pré - € paulista (Figura 6.15) .

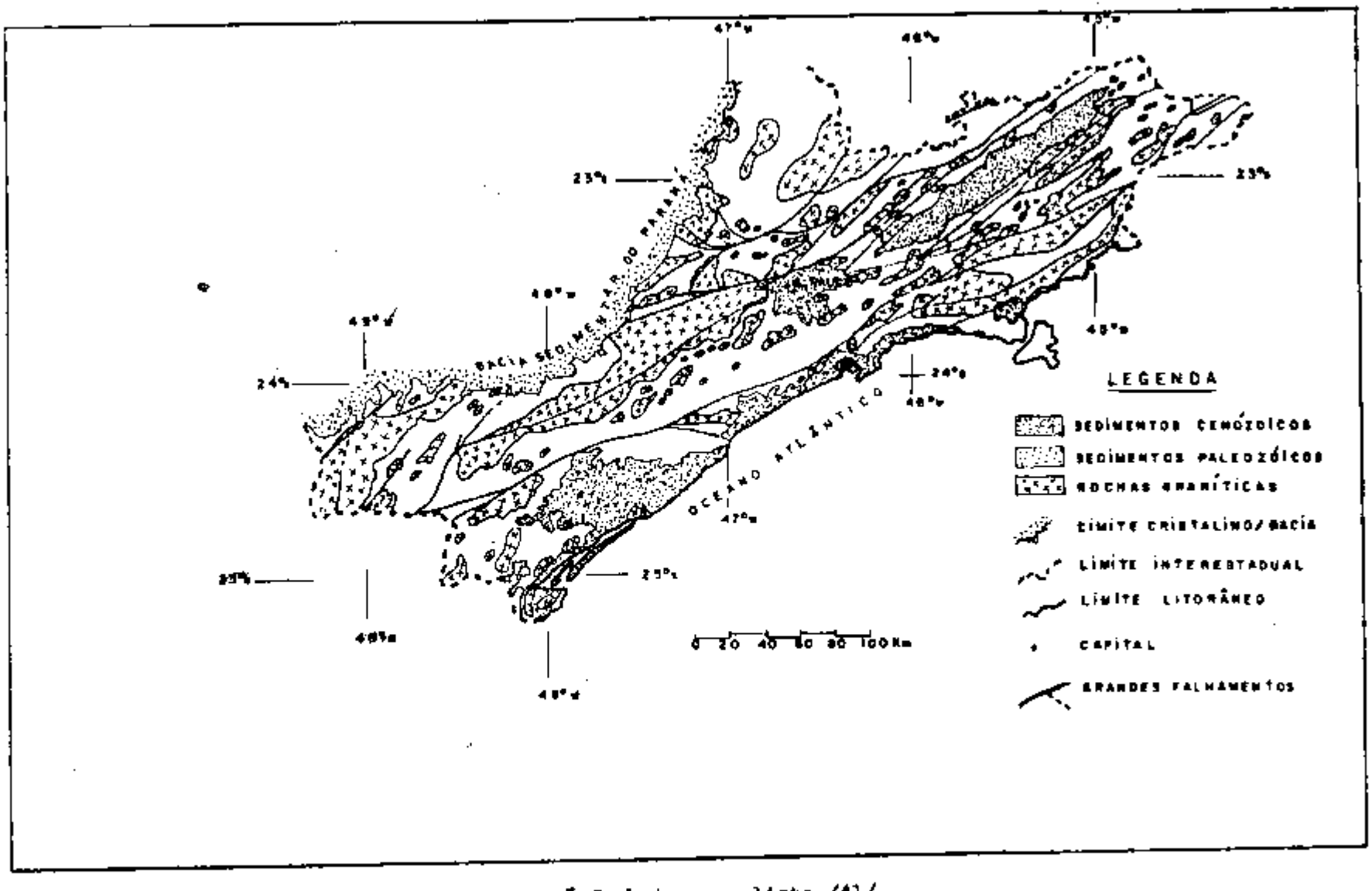



FIGURA 6.15. - Grandes falhamentos do pré-Cambriano paulista /41/ .

### 6.2.3. Sismicidade

O conhecimento de incidências de sismos naturais no Brasil remonta ao século dezesseis. Desde então, naturalmente, o número de relatos aumentou, com o incremento da ocupação humana, pelo que esse tipo de registro é incompleto. Foram feitos registros instrumentais primeiramente a partir de centros estrangeiros e apenas recentemente é que equipamentos aqui foram instalados. Mesmo assim poucos dados têm sido divulgados .

A esses sismos se atribuíram por muito tempo como sendo relacionados a reflexos de eventos longínquos ou a causas atectônicas (acomodações de camadas , colapsos em zonas calcárias e deslizamentos de terra). Hoje procura-se explicá-los, principalmente, por meio de suas relações com movimentos tectônicos, e já se reconhece feições estruturais responsáveis pela simicidade natural do Brasil . Assim, a área de ocorrência dos granitos em São Paulo está inserida em sua maior parte dentro de uma zona de concentração de atividades sísmicas denominada Zona de Transcorrência São Paulo /37/. Essa província sismotectônica corresponde a uma conexão de duas imensas geossuturas caracterizadas por um feixe de falhas que foram reativadas em tempos geológicos distintos. Essa província apresenta uma frequência de atividades sísmicas elevada, sendo menor apenas em relação à Bacia do Acre. Entretanto, tal incidência de abalos não corresponde a intensidade significativas.

Os abalos sísmicos registrados nessa área estão relacionados à reativação das geossuturas pré - $\epsilon$ durante o ciclo neotectônico, o qual Almeida (1967) /3/ denominou "Reativação Weldeniana". Essa reativação interrompeu uma longa fase de estabilidade da plataforma sul americana que foi transformada por diversos eventos /37/ .

Já em 1912, Branner reconheceu como sendo sismicamente ativa a região que corresponde à Serra da Mantiqueira e à extremidade setentrional da Serra do Mar /51/. Mesmo assim, as informações sobre sismicidade são precárias, consistindo em relatos em jornais e em alguns poucos trabalhos científicos publicados. As características dos abalos sísmicos não são conhecidas, exceto no tocante à intensidade figurada por meio da escala Mercali modificada. Além disso, pelo fato de dependerem da densidade populacional, os relatos são fragmentários e certamente não cobrem todos os eventos havidos .

Em São Paulo, na Bacia de Taubaté e na Bacia de Guanabara ocorreram muitos tremores, normalmente atribuídos a causas atectônicas ou a reflexos de abalos em regiões distantes (Cordilheira dos Andes e Cadeia Médio - Atlântica). Tais causas não podem ser totalmente contestadas, mas convém salientar que, seja como for, são áreas sensíveis não só por suas características litológicas, mas também pelo seu arcabouço tectônico. Recentemente ocorreram tremores na região em pauta (área de Barra do Turvo - 04/03/78), localizada junto à falha de Itapeuna, prolongamentos da falha de Cubatão para sul /51/ .

Admite-se 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 dessa suposta linha de menor resistência, manifestada com epicentros em São Paulo , Itapetininga, Londrina, Maringá, Primeiro de Maio, Iepe, Miranda e Corumbá, reforça a tese da existência de uma zona de fraqueza que liga diretamente as faixas andina e costeira atlântica e a interpretação dos tremores sentidos em São Paulo como reflexos de terremotos nos Andes. Isto ocorreu recentemente, em 23/11/1977, quando a cidade de Caucete perto de San Juan na Argentina, ficou totalmente destruída .

A Tabela 6.2. abaixo relaciona dezesseis sismos ocorridos em São Paulo entre 1560 e 1976 /37/ .

Apesar da precariedade das informações disponíveis sobre a sismicidade de nosso território, verifica-se que as intensidades dos sismos até hoje registrados na área pré -€ de São Paulo não impõem restrições sérias à implantação de obras civis em geral, desde que estas possuam projetos sísmicos pormenorizados que possam prever a possibilidade de ocorrência de abalos .

### 6.2.4. Geomorfologia

Movimentos tectônicos iniciados em tempos terciários estabeleceram a arquitetura gemorfológica da área cristalina do Estado de São Paulo. No Quaternário processos de alteração, movimentos de encostas, erosão e sedimentação foram responsáveis pelo entalhamento e aperfeiçoamento das formas que compõem o quadro hoje observado /41/ .

Essa área corresponde, sob o ponto de vista geomorfológico a duas províncias : Costeira e Planalto Atlântico, ambas comportando subdivisões menores

| Nº DO SISMO | ANO | MES | DIA | HORA | MINUTO | SEGUNDO | COORDENADAS GEOGRÁFICAS LAT. | COORDENADAS GEOGRÁFICAS LONG. | LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO | PROFUNDIDADE FOCAL km | MAGNITUDE M | INTENSIDADE MM | FONTE | OBSERVAÇÕES |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 01 | 1560 | | | | | | | | Não especificada | | | | 1 | |
| 02 | 1789 | | | | | | | | Cananea | | | | 2 | |
| 03 | 1861 | 07 | 31 | | | | 22,6± 0,5° S | 45,4± 0,5°W | Santos, São Sebastião, Jacarei, Pindamonhangaba, Lorena, Guaratinguetá, Areias, Bananal, Silveira | | | V-VI | 3 | Coordenadas da Weston |
| 04 | 1886 | 05 | 09 | 15 | | | 22,5 ± 0,25° S | 43,6 ± 0,25°W | Bananal | | | V-VI | 3 | Coordenadas da Weston |
| 05 | 1922 | 01 | 27 | 03 | 45 | | | | S. Paulo, Itapetininga, Campinas, S. Carlos, S. Vicente, Ribeirão Preto | | | | 5 | O Estado de São Paulo |
| 06 | 1946 | 07 | 20 | | | | | | Xiririca, Jacupiranga | | | | 2 | |
| 07 | 1962 | 01 | 16 | 23 | 27 | 45 | 22,9° ± 0,1 ° S | 44,7° ± 0,2° W | Guaratinguetá, Cunha, Taubaté, Caraguatatuba | | | IV-V | 3 | Coordenadas da Weston |

TABELA 6.2. Sismos ocorridos em São Paulo entre 1560 e 1976. /37/.

| Nº DO SISMO | ANO | MES | DIA | HORA | MINUTO | SEGUNDO | COORDENADAS GEOGRÁFICAS LAT. | COORDENADAS GEOGRÁFICAS LONG. | LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO | PROFUNDIDADE FOCAL km | MAGNITUDE M | INTENSIDADE MM | FONTE | OBSERVAÇÕES |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 08 | 1967 | 03 | 22 | | | | 22,9 ± 0,1° S | 44,7 ± 0,2° W | Ubatuba, Caraguatatuba, S. Sebastião Paraibuna, S. José dos Campos, Cunha, Taubaté, Lorena | | | V-VI | 3<br>5 | Coordenadas da Weston<br>Jornal do Brasil |
| 09 | 1968 | 04 | 12 | | | | 22,5° S | 47,0°W | | | 4,3 | | 4 | Coord. Rothe-Unesco |
| 10 | 1970 | 07 | 31 | 14 | 45 | | | | São Paulo | | | | 5 | O Estado de São Paulo |
| 11 | 1971 | 07 | 08 | 24 | | | | | São Paulo | | | | 5 | O Estado de São Paulo |
| 12 | 1973 | 10 | 25 | | | | | | São Paulo | | | | 5 | O Estado de São Paulo |
| 13 | 1973 | 11 | 20 | | | | | | São Paulo | | | | 5 | Coincide com tremores em Salta (Argentina) e Copiado (Chile) que não constan na relação fornecida pelo D.C. Boulder |

TABELA 6.2. Sismos ocorridos em São Paulo entre 1560 e 1976./37/.

| Nº DO SISMO | ANO | MES | DIA | HORA | MINUTO | SEGUNDO | COORDENADAS GEOGRÁFICAS LAT. | LONG. | LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO | PROFUNDIDADE FOCAL km | MAGNITUDE M | INTENSIDADE MM | FONTE | OBSERVAÇÕES |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14 | 1974 | 04 | 24 | | | | | | Porto Colombia, Volta Grande | <100 | 5,1 | VI-VII | 4 | Ocorrência de vários tremores. Foram relacionados com o enchimento das represas . |
| 15 | 1976 | 04 | 01 | | | | | | Iepê | | | | 5 | "O Globo". Relacionado com a represa de H.E. Capivara, vários tremores |
| 16 | 1976 | 10 | 05 | de 11:00 até 14:00 h | | | | | Diadema | | | | 5 | "O Globo" |

TABELA 6.2. Sismos ocorridos em São Paulo entre 1560 e 1976. /37/.

FONTES : 1. John. K. Branner, Bulletin of the Seismological Society of America Vol. II, 1912 e Vol. X, 1920

2. Marcus Gorini, Instituto de Geociências, UFRJ, Rio de Janeiro, 1969 (Relatório não publicado)

3. Weston Geophysical Research Inc. Seismicity Analysis and Response Spectra Proposed for Angra Nuclear Power Plant (Relatório não publicado) .

4. Sergio Brito, Seismic Activity Around the Cajuru Reservoir, Proc. 29 Congr. IAEC, 1974 .

5. Referências publicadas em jornais brasileiros

traduzidas por zonas e subzonas /41/. A divisão geomorfológica do Estado de São Paulo está ilustrada na Figura 6.16 destacando-se as duas províncias de nosso interesse .

A Província Costeira compreende, principalmente, uma região serrana , que a leste é representada pela Serra do Mar, e pela Serra de Paranapiacaba a sul, além de planícies costeiras de origens diversas .

A área ocupada pela Serra do Mar é representada por uma escarpa erosiva bastante elevada, cujo destaque topográfico advém de sua constituição granito - gnáissica. São escarpas jovens de perfis retilíneos e declividade acentuada, mostrando-se intensamente ravinadas e evidenciando espigões que avançam nos terrenos das baixadas à medida que perdem altura e se suavizam. Tal quadro aparece notadamente entre São Sebastião e Parati, onde os limites da Província Costeira são estreitos (20 - 40 km), com as escarpas próximas do mar. Daí para o sul, até Bertioga, elas se apresentam mais recuadas em relação à costa atlântica, dando lugar para o desenvolvimento de uma baixada mais extensa e suavizada. Na altura de Santos esse recuo é ainda maior em função do ataque mais efetivo sobre litologias menos resistentes ao intemperismo que aí existem .

A Serra de Paranapiacaba, que representa o outro setor da região serrana da Província Costeira, possui um relevo muito mais complexo que a Serra do Mar devido à sua maior diversidade estrutural e litológica. Suas escarpas caracterizam um fronte erosivo de aspecto montanhoso, limitando a Província estando recuadas em relação à área litorânea (≃ 170 km). Isto graças à erosão remontante do rio Ribeira de Iguape e seus afluentes, alojados em litologias pouco resistentes (xistos e filitos, essencialmente), que possibilitaram o desenvolvimento areal de sua bacia de drenagem. Os divisores entre afluentes são sustentados por rochas granitóides, quartzitos e rochas calcárias, que aparecem mais evidenciadas no relevo junto às bordas da bacia de drenagem, exceto no extremo sudoeste onde se ergue a escarpa devoniana /41/. Essas evidências topográficas são representadas pelo Batólito de Agudos Grandes, pelas associações rochosas calcários - quartzitos - granitóides da região de Apiaí - Espírito Santo, pela faixa calcária ocidental do Paraná e pelos Batólitos Três Córregos e Cunhaporanga. Essas ocorrências representam um dos aspectos topográficos mais acentuados no País, cujas altitudes alcançam valores de até 1300 metros, com amplitudes locais de até várias centenas de metros .

Nos extremos leste do Paraná e sul de São Paulo aparece também uma

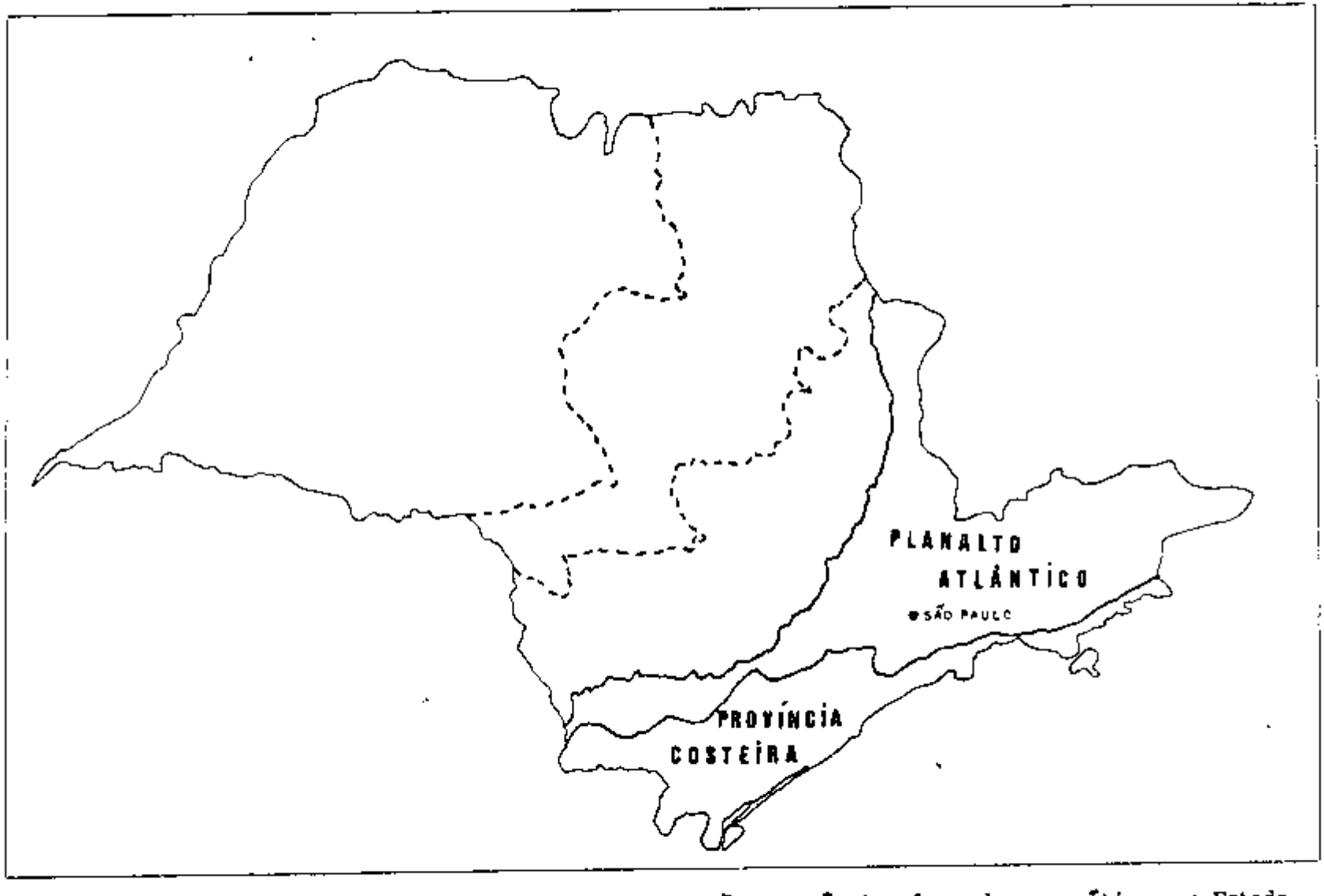



FIGURA 6.16. - Províncias geomorfológicas relativas às ocorrências de rochas graníticas no Estado de São Paulo /2/ .

região acidentada, com elevações acentuadas composta essencialmente de migmatitos. As elevações são sustentadas por rochas granitóides, que em São Paulo estão representadas pelos maciços graníticos de Guaraú, Mandira e Alto Turvo, e no Paraná pelos maciços Morro Redondo, Agudos do Sul, Marumbi, Graciosa e Serra da Igreja. Essa serrania, no lado atlântico, se desfaz escarpadamente nas planícies costeiras de Iguape, Paranaguá e Guaratuba .

As planícies costeiras compreendem cerca de 1/5 da área total da Província Costeira, estando representada por terrenos pouco elevados e descontínuos junto ao mar e cuja área é cada vez menor para leste. Seus aspectos são os mais diversificados e maiores suas extensões entre Santos e os limites ocidentais da Província, onde se desenvolvem as baixadas Santista, de Itanhaem e da Ribeira de Iguape. Esta é a mais ampla, compreendendo pouco mais de 3000 $km^2$ onde se desenvolvem diferentes aspectos em função da diversificação da sedimentação presente: marinha, eólica e fluvial. A sedimentação marinha está representada por extensas praias e planícies de restingas mais elevadas, estas cortadas por numerosas canais que as dividem em ilhas, das quais as maiores são a Comprida e a de Cananéia /2/. A porção sedimentar eólica caracteriza-se por pequenas dunas que recobrem a planície de restingas e parte da praias atuais. A sedimentação fluvial dispõem-se em planícies aluviais que localmente penetram para o interior até as bordas das serras costeiras, onde se destacam morros graníticos de aproximadamente 300-400 metros de altura .

As baixadas de Itanhaem e Santista possuem aspectos semelhantes ao da Ribeira de Iguape, pelo desenvolvimento de planícies de restingas elevadas, dunas, além de grandes extensões de áreas de mangue. Para leste dessas planícies costeiras outras são numerosas, porém bem menores, avançando para o interior acompanhando pequenos vales fluviais, sendo a maior delas localizada entre os canais de Bertioga e São Sebastião .

A Província do Planalto Atlântico compreende uma região estrutural e litologicamente muito complexa. Esse quadro reflete uma grande variedade de aspectos topográficos, a cuja expressão regional se relacionam diversos fatores, a saber , climáticos, litológicos, estruturais, e principalmente, erosivos; estes manifestados por meio das superfícies de aplainamento, nivelando os topos dos acidentes topográficos mais expressivos da província gemorfológica .

Nela observa-se pequena largura desde a região de Piedade até Apiaí, esta no extremo sul junto à fronteira com o Estado do Paraná. Essa área corresponde,

basicamente, à zona do Planalto Cristalino Ocidental definida por Almeida /2/ , sendo muito acidentada, graças aos ectinitos aí presentes, que facilitam o enta - lhamento do relevo. De Apiaí até Carambeí (Paraná) predominam rochas granitóides dos Batólitos Três Córregos e Cunhaporanga, pelo que ainda se pode evidenciar a Superfície de Itapeva, que se perde sob as camadas sedimentares do Grupo Paraná . Ainda considerando a borda da Bacia do Paraná, na região de Itu, mais precisamente do Batólito pós - tectônito alí exposto, reconhece-se a Superfície de Itaguá , que se perde sob os sedimentos do Grupo Tubarão. Os outros corpos granitóides (Sorocaba, São Fransisco e Piedade), de caráter sintectônico, não mostram essa peculiaridade, por serem menos resistentes à erosão .

Dirigindo-se para leste da região de Piedade - Itu, o Planalto Atlântico mostra uma diversidade geomorfológica que justifica a compartimentação feita por Almeida /2/ e Hasui et al (1977 b) /50/. Na atual configuração geomorfológica regional reconhecem-se restos da antiga superfície do Japi em planaltos muito dissecados em diversas altitudes, suportados por altos quartzíticos e granitóides. No extremo leste paulista, os traços geomorfológicos gerais mostram notável relação com a distribuição, principalmente, dos corpos granitóides e migmatíticos, que por sua vez refletem o desnivelamento de grandes blocos de falhas. Planaltos, escarpas de serra e setores rebaixados, associados à Bacia de Taubaté, são compartimentos limitados, basicamente, por linhas que correspondem às mais importantes falhas antigas e linhas de falhas modernas.

Dentro desse quadro é de nosso maior interesse destacarmos o posicionamento topográfico dos principais corpos granitóides da área cristalina do Estado' de São Paulo. Com base nos perfis apresentados na Figura 6.17. , destacam-se os aspectos fundamentais seguintes :

- Os granitóides, juntamente com alguns metassedimentos (quartzitos e calcários), destacam-se no relevo, sustentando as grandes serras do cristalino paulista. Assim é que nos perfis 1 e 2 se projeta o Batólito de Cunhaporanga (Pr) ; nos perfis 3 e 4 o de Três Córregos e nos perfis 5 e 7 o de Agudos Grandes, todos eles compondo a Serra de Paranapiacaba .

- Partes dos granitos Agudos Grandes e Três Córregos foram arrasados pela erosão remontante da rede hidrográfica do Ribeira de Iguape. Isto pode ser visto nos perfis de 4 a 6 e 1 e 2, respectivamente .

- "Stocks" graníticos de grandes dimensões sustentam a Serra do Mar, no

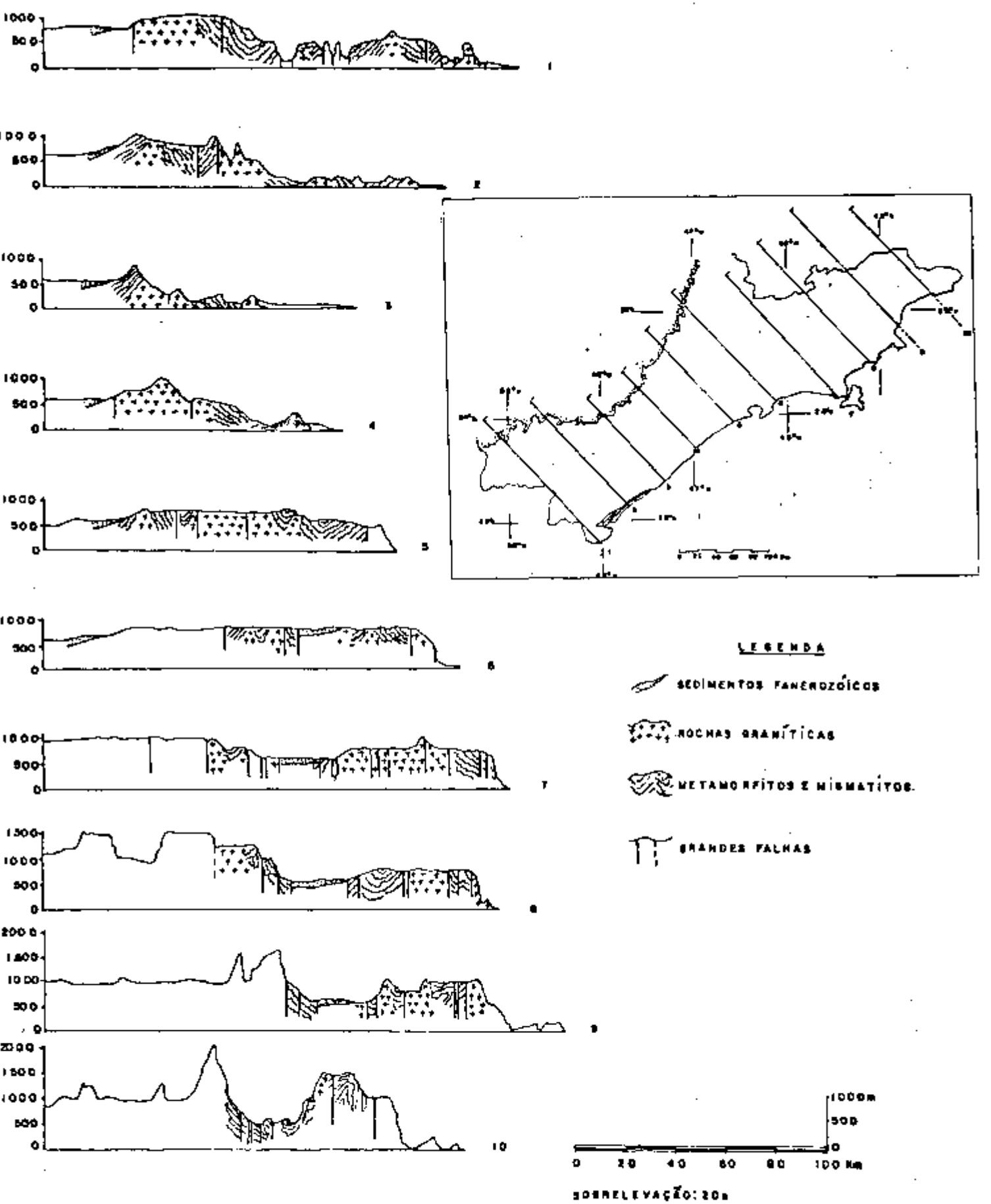



FIGURA 6.17. - Posicionamento topográfico dos corpos graníticos principais no Estado de São Paulo /41/ .

Paraná (perfis 1 a 3) e a maior parte das elevações no leste paulista, com as Serras do Quebra Cangalha, Bocaina, do Mar e parte da Serra da Mantiqueira e Planalto de Campos do Jordão (perfis 9 a 12) .

6.2.5. Hidrogeologia

Normalmente, rochas cristalinas, como os granitos, não constituem um meio poroso para a circulação de água subterrânea. As melhores condições para a acumulação e circulação de água nessas rochas se restringem às zonas de falhamentos e de juntas, além de zonas meteorizadas. Desse modo, a existência de aquíferos nas rochas cristalinas possui um caráter essencialmente local .

O Planalto Atlântico é constituído por rochas magmáticas (granitos) e metamórficas (xistos, filitos, gnaisses, quartzitos etc). Geralmente essas rochas compactas são impermeáveis, mas os eventos tectônicos que as afetaram formaram sistemas de falhas e fraturas normalmente permeáveis .

A água subterrânea percola estes sistemas abertos de falhas, fraturas , juntas, diaclases etc. A largura de zonas fraturadas varia entre poucos metros até mais de 1500 metros. A profundidade dos espaços abertos nas linhas tectônicas está por volta de 150 metros, profundidade onde eles diminuem por compressão ou preenchimento /34/ .

Parece que as brechas de falhas ou material fragmentário que ocorrem nas falhas ajudam a manter a condutibilidade hidráulica elevada. Por outro lado a cobertura alterada do cristalino paulista apresenta elevado conteúdo argiloso.

A produção dos poços é caracterizada por valores extremos, de nula até mais de 50 $m^3/h$. Isto em função da escassez de dados sobre a distribuição e extensão de falhamentos ou de eventual estudo estrutural pormenorizado antes da perfuração. Os poços que apresentam vazão nula são os que perfuram rochas compactas, sem seccionar falhas .

Em vista da maior concentração da população e da indústria se situar sobre o planalto cristalino, os poços nele perfurados tem importância relevante .

A profundidade dos poços varia entre 100 e 300 metros. Segundo DAEE /34/, na cidade de São Paulo, no embasamento cristalino, poços de 200 - 300 metros de profundidade produzem até 25 $m^3/h$, sendo vazões maiores mais raras .

No município de Santo André, um poço de 130 metros de profundidade, perfurado pela Corner S/A, localizado sobre uma falha, produz 100 $m^3/h$ com somente 40 metros de rebaixamento. Em Sorocaba, poços situados sobre falhas no embasamento produzem até 50 $m^3/h$. Entretanto não se tem encontrado zonas produtivas nas bordas cristalinas do Vale do Paraíba, onde poços de 250 metros não produzem mais que 10 $m^3/h$.

Poços rasos, de 20 - 60 metros de profundidade e que atravessam somente a cobertura alterada podem apresentar vazões de até 10 $m^3/h$ em alguns lugares .

As zonas fraturadas são, praticamente, canais subterrâneos de drenagem para as águas infiltrantes, provenientes das chuvas. Elas formam um conjunto de reservatórios naturais, que regulam a descarga nas cabeceiras dos rios. Além de seu papel regulador, as falhas alimentam os aquíferos sedimentares das bacias de São Paulo e de Taubaté. Outra parte da água se escoa diretamente para o mar.

6.2.6. Recursos Minerais

As mineralizações direta ou indiretamente associadas às diversas unidades estruturais da Faixa de Dobramento Sudeste são variáveis. Na Faixa de Dobramento Apiaí / São Roque /101 e 43/ ocorrem Pb e Zn como metais de importância econômica. No maciço Mediano de Joinvile e na Zona Cristalina Norte/ Maciço Guaxupe /101 e 43/ não são conhecidas mineralizações metálicas de importância. Alguns granitos associados à fase molássica apresentam ocorrência de Au .

O Maciço Mediano de Joinvile caracteriza-se, de modo geral, pela ausência, pelo menos até a presente data - 1978 - de ocorrências metálicas de valor econômico, quer nos granitos quer nos depósitos molássicos. Dois aspectos chamam a atenção : a ausência de mineralizações de W e Sn junto aos contatos entre os Maciços e as Faixas de Dobramentos e a falta de registros de concentrações minerais notáveis ligadas aos granitos alcalinos, o que contrasta com os dados disponíveis para esse tipo de rocha na literatura mundial, principalmente para cinturões orogênicos modernos /101/ .

As principais mineralizações metálicas da Faixa de Dobramento Apiaí / São Roque são representadas por mais de uma centena de ocorrências de Pb, Zn, Cu, Ag, Au, F e Ba, e alguns depósitos de importância econômica, situados quase sempre em calcários. As ocorrências da região do Vale do Ribeira localizam-se

dentro de uma faixa lenticular com extensão de 80 Km e largura máxima de 20 Km , situada a SE do granito Três Córregos. Não são conhecidas ocorrências afastadas mais de uma dezena de quilômetros de corpos graníticos .

A Zona Cristalina Norte de São Paulo (Maciço Mediano de Guaxupé) mostra-se pobre em recursos metálicos, restritos principalmente a pequenas ocorrências de metais raros (W, Li e U) associadas a granitos das proximidades do contato tectônico dessa zona com a Faixa de Dobramento Apiaí. Wolfrâmio ocorre em veieiros, associado a topázio e fluorita, no granito Itu e na região de Sorocaba. Essas mineralizações são insignificantes quando comparadas, por exemplo, com as do Maciço Mediano de Pelotas, apesar da freqüência de fenômenos metassomáticos e pneumatolíticos observados em granitos da Zona Cristalina Norte de São Paulo e na Faixa de Dobramento Apiaí/São Roque (granitos Perus, Nazaré, Tico - Tico, São Roque etc) Esses granitos, geralmente, são portadores de turmalina, associada ou não com fluorita .

# CAPÍTULO VII : RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nas informações levantadas sobre as rochas basálticas e graníticas, assim como, sobre suas áreas de ocorrência no Estado de São Paulo, foi feita uma avaliação dessas rochas para fins de disposição de rejeitos radioativos de alta atividade. Algumas de suas características são discutidas, de acordo com as informações disponíveis, em função de serem ou não favoráveis para o propósito acima mencionado .

## 7.1. Rochas basálticas

### 7.1.1. Topografia

A área de ocorrência das rochas basálticas cujo relevo é mais favorável à instalação de repositórios de rejeitos radioativos corresponde à Província Geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, onde a maior parte da superfície dos derrames basálticos está **encoberta** pelos sedimentos da Formação Bauru .

Isto porque essa área apresenta feições topográficas suavizadas, inclusive favorável ao traçado de vias de comunicação, e onde as maiores altitudes alcançam 740 metros, com desníveis locais raramente ultrapassando uma centena de metros /2/ .

Na porção onde os basaltos afloram na superfície, correspondente à Província Geomorfológica das "Cuestas" Basálticas, as condições do relevo são relativamente mais acentuadas, apresentando contornos acidentados, portanto menos favoráveis para a construção de instalações nucleares de disposição de rejeitos radioativos .

### 7.1.2. Estabilidade Tectônica e Sísmica

Parece não haver restrições muito sérias quanto a esses aspectos. A Bacia do Paraná, como um todo, nunca sofreu esforços tectônicos capazes de produzir feições estruturais de grandes extensões, a não ser deformações locais relativas a pequenos falhamentos e intrusões básicas. As deformações estruturais mais importantes foram produzidas por movimentos verticais diferenciais que atuaram com maior intensidade no passado geológico da Bacia. Esses movimentos envolveram

grandes blocos ou estão relacionados aos eixos dos grandes arqueamentos regionais. Além disso, a sedimentação da Bacia do Paraná, a partir do final do Permiano, até hoje, deu-se em ambiente estritamente continental denunciando um aumento progressivo da estabilidade de seu embasamento (Figura 7.1) .

Poucas informações existem sobre o comportamento sísmico da área de interesse, mas de maneira geral, essa região não sofreu perturbações sísmicas recentes, significativas .

7.1.3. Profundidade de disposição

Os valores de profundidade mais comumente propostos para a disposição de rejeitos radioativos de alta atividade em formações geológicas variam entre 300 e 1500 metros, dependendo de certos parâmetros geológicos e econômicos /60/ .

Sob o ponto de vista geológico regional, profundidades nessa faixa de grandeza ocorrem em boa parte da área ocupada pelas rochas basálticas em São Paulo.

Outro ponto favorável é o grau geotérmico da região, que pode ser considerada dentro dos padrões normais esperados, ou seja, em torno de 30 $^{o}$C/km .

7.1.4. Estruturas

A existência de descontinuidades físicas de qualquer espécie em corpos rochosos é crítica para a construção de repositórios subterrâneos para fins de disposição de resíduos radioativos. Elas afetam sobremaneira os trabalhos de escavação, principalmente no que diz respeito à estabilidade das aberturas (poços, galerias , etc). O mais crítico porém, é o fato dessas descontinuidades virem a se constituir em vias de circulação de águas subterrâneas .

Nos basaltos da Formação Serra Geral a presença de tais estruturas, tanto sob a forma de descontinuidades de contato, como de juntas e falhas é marcante e restringem o uso dessas rochas como repositório final de rejeitos radioativos .

Somente nas porções internas dos derrames, que são usualmente, compactas, pode-se esperar melhores condições para o armazenamento de rejeitos radioativos. Mesmo assim, o estudo dessas porções menos atingidas por fraturamentos exige pesquisas geológicas mais sistemáticas .

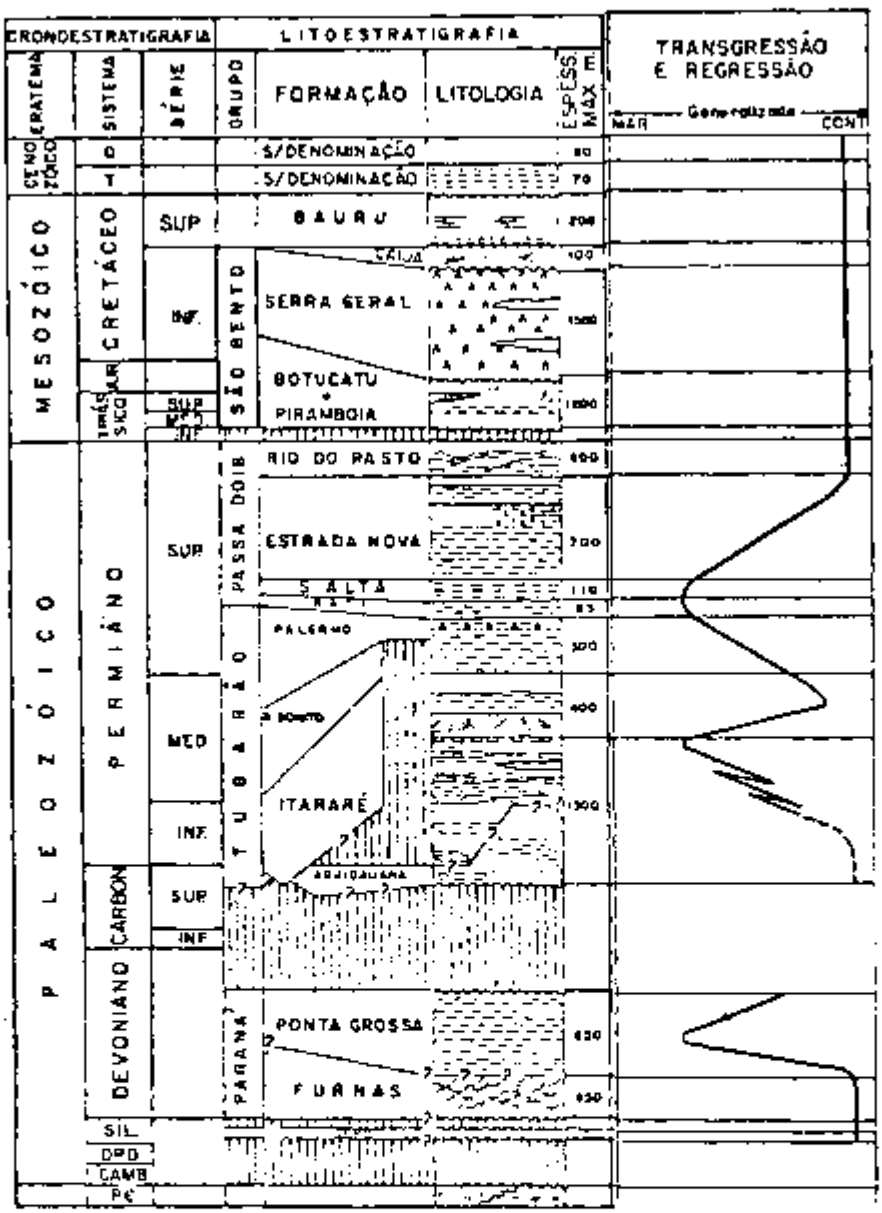



FIGURA 7.1. - Curva do comportamento da Bacia do Paraná em função das transgressões e regressões marinhas ocorridas durante sua história geológica /76/.

7.1.5. Hidrogeologia

As condições hidrogeológicas das rochas basálticas no Estado de São Paulo são desfavoráveis para fins de disposição de rejeitos radioativos de alta atividade devido aos seguintes aspectos :

a. Os níveis hidrostáticos são pouco profundos, variando entre 0,32 - 130 metros, com um valor médio estimado em 15 metros, sendo que 65% dos poços apresentam níveis superiores à média .

b. Presença de acumulações importantes de água acima e embaixo das camadas basálticas, representadas pelas Formações Bauru e Botucatu, respectivamente .

c. Permeabilidade grande devido à presença de descontinuidades horizontais (juntas, falhas, estruturas de contato etc). Se bem que descontinuidades verticais , presentes em porções internas dos derrames, sejam bem menos permeáveis, são conhecidas contribuições ascendentes das águas do sistema aquífera Botucatu subjacente aos basaltos .

d. A presença de acumulações locais de água (zonas aquíferas) nos derrames basálticos, mormente, em zonas mais intensamente fraturadas, contatos e arenitos inter e intratrapeanos .

e. Deve-se esperar valores elevados de velocidade das águas subterrâneas nos basaltos, devido à alta permeabilidade de zonas de descontinuidades estruturais e texturais .

7.1.6. Recursos Naturais

A utilização dos basaltos como repositório de rejeitos radioativos pode ser restringida pela potencialidade que essas rochas apresentam quanto ao aproveitamento de suas acumulações de águas subterrâneas para o abastecimento industrial e doméstico. Além disso, é bem conhecida a fertilidade dos solos provenientes da decomposição dos basaltos e sua importância na cultura de cana de açúcar e café no Estado de São Paulo. Outra importância econômica dos basaltos refere-se aos condicionamentos favoráveis (topográficos e geotécnicos) à implantação de usinas hidrelétricas .

Por outro lado, concentrações de recursos minerais de interesse econômico em basaltos são raras, fato que favorece a utilização dessas rochas para a construção de repositórios de rejeitos radioativos .

## 7.2. Rochas Graníticas

### 7.2.1. Topografia

Os corpos graníticos no Estado de São Paulo representam destaques topográficos dentro de um contexto morfológico diversificado e acidentado. Assim a possibilidade de aproveitamento dessas rochas como repositório final de rejeitos radioativos é restrita sob esse aspecto .

Como já exposto anteriormente os granitos ou granitóides se destacam no relevo, sustentando as grandes serras do cristalino paulista. Os Batólitos Cunhaporanga, Três Córregos e Agudos Grandes destacam-se integrando o conjunto litológico da Serra de Paranapiacaba .

"Stocks" graníticos de dimensões apreciáveis sustentam a Serra do Mar (Paraná) e a maior parte das elevações do leste paulista, como as Serras da Quebra Cangalha, Bocaina, do Mar e partes da Serra da Mantiqueira e Planalto de Campos do Jordão .

### 7.2.2. Estabilidade Tectônica e Sísmica

A evolução tectônica do Pré - paulista, onde estão inseridos os granitos de nosso interesse, se deu segundo tres fases distintas : uma de sedimentação, outra tecto - orogênica e uma última de Transição e Cratonização .

Durante o desenvolvimento dessas três fases a área foi palco de grandes instabilidades tectônicas (falhamentos, dobramentos e reativações) que ainda hoje se manifestam, como se pode comprovar pela sismicidade natural da região. Isso leva a crer que a viabilidade das rochas graníticas ou granitóides aí presentes fica restringida para serem utilizadas como repositórios de rejeitos radioativos de alta atividade, principalmente pela possibilidade de ocorrência de novas reativações durante o longo período de tempo exigido para o decaimento dos produtos radioativos até níveis que não apresentem riscos de contaminação do homem e seu meio ambiente .

Por outro lado, sob o ponto de vista sísmico, a área, até hoje, nunca sofreu abalos de grande intensidade capazes de inviabilizá-la. (vide Tabela 6.2.)

7.2.3. Falhamentos

Sob esse aspecto a área de ocorrência dos granitos em São Paulo é desfavorável quanto à possibilidade de disposição de rejeitos radioativos. Isto porque ela é cortada por diversas falhas de centenas de quilômetros de extensão, que interceptam a maioria dos corpos granitóides de nosso interesse . As principais são as falhas de Jundiuvira, Buguira, Taxaquara, Além - Paraíba, Alto da Fartura e Cubatão. Falhamentos menores possivelmente se desenvolveram induzidos pelos falhamentos transcorrentes do Ciclo Brasiliano. Deslocamentos normais do Terciário, que incidiram sobre planos de falhas antigas e ao longo de juntas, também geraram novas descontinuidades que juntamente com as de maior porte formam a grande rede de falhas que caracteriza o pré - € paulista .

7.2.4. Hidrogeologia

A natureza e ocorrência das águas subterrâneas na área cristalina do Estado de São Paulo, que inclui os granitos de nosso interesse, permite apontar alguns aspectos desfavoráveis quanto à utilização dessas rochas para a disposição final de rejeitos radioativos de atividade elevada .

a. As aculumações de água estão situadas em profundidades relativamente pequenas ( ≃ 150 metros), restritas a zonas de falhamentos, fraturas, juntas ou zonas meteorizadas, sendo portanto aquíferos locais .

b. Genericamente, essas acumulações locais, naturalmente, ocorrem de maneira irregular, fato esse que pode dificultar uma compreensão clara do comportamento hidrodinâmico das águas subterrâneas .

c. Deve-se esperar velocidades de fluxo d'água subterrânea muito elevadas já que ocorrem em zonas fraturadas abertas ou preenchidas por material fragmentário, que por sua vez ajudam a manter a condutibilidade hidráulica elevada .

Por outro lado, existem pontos que favorecem o uso dos granitos para a disposição de rejeitos radioativos .

a. Os aquíferos estão inseridos num contexto basicamente pouco poroso e impermeável .

b. Como já vimos, as acumulações de água estão situadas em profundidades em torno de 150 metros e restritas a zonas de descontinuidades físicas. Estas diminuem em frequência e dimensões, podendo mesmo inexistirem, em profundidades superiores a 150 metros, tornando remota a possibilidade de haver circulações d'água relevantes abaixo desses níveis .

7.2.5. Recursos Naturais

As potencialidades econômicas dos recursos minerais da área de ocorrência dos granitos no Estado de São Paulo pouco restringem a utilização dessas rochas para a disposição de rejeitos radioativos. Isto porque, basicamente, as ocorrências importantes estão localizadas ao longo de zonas de contato, em veios e falhas, enquanto que nas porções mais interiores das intrusões graníticas a existência de recursos minerais aproveitáveis é muito pouco freqüente, senão nula .

Por outro lado, as ocorrências de águas subterrâneas, apesar de caráter basicamente local, representam importante fonte de abastecimento numa área de maior concentração populacional e industrial dentro do Estado de São Paulo .

7.3. Conclusões

As características favoráveis das rochas basálticas no Estado de São Paulo são representadas pelo relevo pouco acidentado, principalmente, aquele correspondente ao Planalto Ocidental; por suas dimensões; pela estabilidade tectônica e sísmica da área de sua ocorrência e pela ausência de recursos minerais de interesse econômico. As principais desvantagens estão relacionadas às suas estruturas (falhas, juntas, contatos etc) e à sua hidrologia .

Quanto às rochas graníticas os aspectos favoráveis que podem ser apontados são : a relativa estabilidade tectônica e sísmica de sua área de ocorrência e a ausência de recursos minerais de interesse, pelo menos nas partes internas dos corpos graníticos de importância para este estudo .

A existência de grandes falhamentos, as características hidrogeológicas e as condições de relevo relacionadas aos granitos em São Paulo não são pontos positivos para a viabilização dessas rochas para a disposição de rejeitos radioativos de alta atividade .

## 7.4. Sugestões para Trabalhos Futuros

1. Estudo da viabilidade das rochas graníticas e basálticas do Estado de São Paulo para a disposição de rejeitos radioativos em função de parâmetros geo - técnicos e geoquímicos .

2. Implantação de códigos de computação no IPEN relativos à disposição de rejeitos radioativos no meio geológico .

3. Seleção de áreas por meio de estudos em escalas menores .

4. Levantamento de minas abandonadas existentes no Brasil tendo em vista a análise de parâmetros "in situ" .

5. Estudo do comportamento de amostras selecionadas de basaltos e de granitos frente à radiação e a condições de temperaturas elevadas .

CAPÍTULO VIII : BIBLIOGRAFIA


1. ABREU, S.F. Recursos minerais do Brasil São Paulo, Edgard Blücker, 1973 2v.

2. ALMEIDA, F.F.M. de Fundamentos geológicos do relevo paulista. In : INSTITUTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO. Geologia do Estado de São Paulo. São Paulo, 1964 Boletim 41. p. 169-263 .

3. ALMEIDA, F.F.M. de Origem e evolução da plataforma brasileira. Rio de Janeiro, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1967. (Boletim da Divisão de Geologia - Mineralogia 241) .

4. ALMEIDA, F.F.M. de; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B. The upper precambrian of South América. Boletim Inst. de Geociências; (7) : 45-80, 1976.

5. ANGINO, E.E. High - level and long - lived radioative waste disposal. Science 198 : 885-90, 1977 .

6. BIGARELLA, J.J. & SALAMUNI, R. Some paleogeografic and palaeotectonic features of the Paraná Basin. In : BIGARELLA, J.J.; BECKER, G.D.; PINTO, I.D. Problems in brazilian gondwana geology . Curitiba, 1967. p. 235-97 .

7. BJORNBERG, A.J.S. Sismogênese e neotectônica do sul do Brasil. In : 8º Seminário Nacional de grandes barragens. São Paulo, 1972 .

8. BJORNBERG, A.J.S.; LANDIM, P.M.B.; BÓSIO, N.J. Observações sobre a disposição do sedimento Bauru na região centro-ocidental do Estado de São Paulo . Bol. Soc. Bras. Geol.; 19(1) : 79-90, 1970 .

9. BLANCO, R.E. & LAGUNA, W. Radioactive waste management. v.II São Paulo, Instituto de Energia Atômica, Mar. 1977. (IEA-inf.-53-II) .

10. BLANCO, R.E.; UNGER, W.E.; IRVINE, A.R.; CROUSE, D.J.; WATSON, C.D. Radioactive waste management. v.I. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, Nov. 1976. (IEA-inf.-53-I) .

11. BLANCO, R.E.; COWSER, K.E.; LASHER, L.C.; GEMMEL, L.; PEARSALL, S.G. Radioactive waste management. v.III. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, Mai. 1977. (IEA-inf.-53-III) .

12. BLANCO, R.E.; BLOMEKE,J.O.; ROBERTS, J.T. Solving the waste - disposal problems. Nucleonics, 25 (2) : 58-68, Feb. 1967 .

13. CARNEIRO, C.D.R.; FRAZÃO, E.B.; RUBERTI, E.; OBATA, O.R. Considerações sobre as rochas graníticas do sul do Brasil, São Paulo, 1974. (Seminário ' apresentado ao curso de Petrologia Avançada de Rochas Metamórficas sob a responsabilidade do professor Vicente Antonio V. Girardi) .

14. CLAIBORNE, N.C. The United States program for the safety assessment of geologic disposal of commercial radioactive wastes. In : ORGANIZATION ECONOMICS COOPERATION AND DEVELOPMENT, Nuclear Energy Agency. Risk analysis and geologic modelling in relation to the disposal of radioactive wastes into geological formations. Proceedings Ispra, Italy, 23-27 May , 1977. Ispra, 1977. p. 199-215 .

15. CLASSEN, H.G. Geological disposal of nuclear waste. GEOS, Spring 1976 .

16. CORDANI, U.G. & VANDOROS, P. Basaltic rocks of the Paraná Basin. In : BIGARELLI, J.J.; BECKER, G.D.; PINTO, I.D. Problems in brazilian gondwana geology. Curitiba, 1967. p. 207-31 .

17. COSTA, J.R. da Curso de introdução ao estudo dos ciclos de combustível. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, Mar. 1972. (IEA-inf.-nº 21) .

18. COUTINHO, J.M.V. Estado atual de conhecimentos do pré-cambriano superior sul brasileiro; uma síntese. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA 25º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ...., v.1 São Paulo, 1971 p. 83-91 .

19. DALLAIRE, G. Nuclear waste disposal : is there a safe solution? Civil Engineering - ASCE, May 1979. p. 72-9 .

20. ENERGY RESEARCH AND DEVELOPMENT ADMINISTRATION. Alternatives for managing wastes from reactors and post - fission operations in the LWR fuel cycle. Washington, D.C., ERDA, May 1976. (ERDA 76-43) :

21. FEATES, F. & LEWIS, J. UK looks at geological and ocean disposal. Nuclear Engineering International, 23(265) : 53-5, Jan. 1978 .

22. FIORI, A.P.; WERNICK, E.; BETTENCOURT, J.S. Evolução policíclica na região nordeste do Estado de São Paulo e áreas vizinhas do Estado de Minas Gerais In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 30º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ..., v.1. Recife, 1978 p.309-20 .

23. FLOH, B. Estudo de complexação dos nitratos de nitrosil - rutênio com tiouréia. Aplicação à descontaminação de rutênio na extração com TBP - varsol nos esquemas de tratamento químico do combustível irradiado. São Paulo, 1977 (Tese de doutoramento Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo) .

24. FRANCO, R.R. Zeólitas dos basaltos do Brasil Meridional (Gênese e paragênese). São Paulo, Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo, 1952. (Boletim 150, Série Mineralogia 10) .

25. FRANGIPANI, A. Mapa da superfície superior do basalto subjacente aos arenitos cretáceos no Estado de São Paulo. Rev. do Inst. Geogr. e Geol. (São Paulo), 15 (nº único), 1961/2 .

26. FÚLFARO, V.J. & PONÇANO, W.L. Distribuição de sismos no Brasil e sua relação com o arcabouço tectônico : uma proposta de regionalização. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 29º Congresso Brasileiro de Geologia: Anais do ... (Resumo dos trabalhos) Belo Horizonte, 1976 .

27. FÚLFARO, V.J. & SUGUIO, K. Campos de diques de diabásio da Bacia do Paraná. Bol. Soc. Bras. Geol. 16(2) : 23-7, 1967 .

28. FÚLFARO, V.J. A evolução tectônica e paleogeográfica da bacia sedimentar do Paraná pelo "Trend Surface Analysis". São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1971. (GEOLOGIA nº 14) .

29. GERA, F. The classification of radioactive wastes. Health Physics, 27:113-21, 1974 .

30. GERA, F. & OLIVER, J.P. OECD Countries pursue geological disposal. Nuclear Engineering International, 23(266) : 35-7, Jan. 1978 .

31. GILMORE, W.R. Radioactive waste disposal : low and high level. Park Ridge, N.J., Mayes Data, 1977 .

32. GLUECKAUF, E. editor Atomic energy waste. Its nature, use and disposal, New York, Interscience, 1961 .

33. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DE OBRAS E DO MEIO AMBIENTE. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Estudo de águas subterrâneas : regiões administrativas 6, 7, 8 e 9 apud REBOUÇAS, A.C. Potencialidades hidrogeológicas dos basaltos da Bacia sedimentar do Paraná, No Brasil. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 30º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ...,v.2 Recife, 1978 p. 2963-74 .

34. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DE OBRAS E DO MEIO AMBIENTE. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Estudo de águas subterrâneas : avaliação preliminar .

35. GRIMWOOD, P.; HILL, M.; WEBB, G. Modelling studies used to evaluate waste disposal options. Nuclear Engineering International, 23(266) : 55-7, Jan. 1978 .

36. GUIDICINI, G & CAMPOS, J.O. Notas sobre a morfogênese dos derrames basálticos. Bol. Soc. Bras. Geol., 17(1) : 15-28, 1968 .

37. HABERLEHNER, H. Análise sismotectônica do Brasil - Notas explicativas sobre o mapa sismotectônico do Brasil e regiões correlacionadas. In : ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. 2º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia : Anais do ....,v.1 São Paulo, Nov. 1978. p. 297 329 .

38. HABERLEHNER, H. Evolução do conhecimento sismológico no Brasil. In : ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. Sismicidade Natural e induzida : Simpósio sobre .... realizado em São Paulo, 24-25 setembro, 1979. São Paulo, set. 1979. p. 1-7 .

39. HASUI, Y. Quadro geotectônico e estrutural da sismicidade natural. In : ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. Sismicidade natural e induzida : Simpósio sobre .... realizado em São Paulo, 24-25 de setembro, 1979. São Paulo, set. 1979. p. 9-13 .

40. HASUI, Y. Tectônica da área de São Roque e Pilar do Sul. São Paulo, 1973. (Tese - Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo) apud WERNICK, E.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B. As regiões de dobramentos nordeste e sudeste. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 30º Congresso Brasileio de Geologia, Anais do ...,v.6 Recife, 1978. p. 2594-608 .

41. HASUI, Y. & ALMEIDA, M.A. Aspectos estruturais na geomorfologia da área cristalina de São Paulo e Paraná. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 30º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ..., v.1 Recife, 1978 . p. 360-7 .

42. HASUI, Y.; ALMEIDA, F.F.M. de; BRITO NEVES, B.B. As estruturas brasilianas In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 30º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ....,v.6 Recife, 1978. p. 2423-437 .

43. HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A. Estruturas e tectônica do pré-cambriano de São Paulo e Paraná. An. Acad. Bras. Ciênc., 52(1) : 61-76 , 1980 .

44. HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; COIMBRA, A.M. The ribeira fold belt. Rev. Bras. Geociências, 5 : 257-66, 1975 .

45. HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A. Os granitos e granitóides da Região de dobramentos Sudeste no Estado de São Paulo e Paraná. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 30º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do...,v.6. Recife, 1978, p. 2594-608 .

46. HASUI, Y.; GUIMENEZ, A.F.; MELO, M.S. Sobre as bacias trafogênicas continentais do sudeste brasileiro. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 30º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ...v.1 Recife, 1978 p. 382-92 .

47. HASUI, Y.; PENALVA, F.; HENNIES, W.T. Geologia do Grupo São Roque. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 23º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ... Salvador, 1969. p. 101-34 .

48. HASUI, Y. & PONÇANO, W.L. Organização estrutural e evolução da bacia de Taubaté. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 30º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do....v.1 Recife, 1978. p. 368-81 .

49. HASUI, Y. & PONÇANO, W.L. Geossuturas e sismicidade no Brasil. In : ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. 2º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia : Anais do ...,v.1. São Paulo, Nov. 1978. p. 331-38 .

50. HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; ALMEIDA, M.A.; SANTOS, M.C.S.R. Compartimentação geomorfológica do Planalto Atlântico do leste paulista. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 1º Simpósio de Geologia Regional : Atas do ... São Paulo, set. 1977. p. 153-69 .

51. HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; BISTRICHI, C.A.; STEIN, D.P. Os falhamentos e a sismicidade natural da região das Serras da Mantiqueira e do Mar. In : ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. 2º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia : Anais do ...,v.1 São Paulo, Nov. 1978. p 353-57 .

52. HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; BISTRICHI, C.A.; STEIN, D.P.; GALVÃO, C.A.C.F.; GUIMENEZ, A.F.; ALMEIDA, M.A.; MELO, M.S.; PIRES NETO, A.G. As grandes falhas do leste paulista. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 1º Simpósio de Geologia Regional : Atas do ... São Paulo, set. 1977. p. 363-80 .

53. HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; STEIN, D.P.; MELO, M.S. Investigação estrutural na região de Primeiro de Maio, SP e PR. IN : ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. 2º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia : Anais do ..., v.1. São Paulo, Nov. 1978. p. 339-52 .

54. HASUI, Y. & SADOWSKI, G.R. Evolução geológica do pré - Є na região sudeste do Estado de São Paulo. Rev. Bras. de Geociências, 5(3) : 182-200, 1976 .

55. HAUSMANN, A. Comportamento do freático nas áreas basálticas do Rio Grande do Sul. Bol. Paranaense de Geografia (Curitiba) (Nº 18-20), 1966 apud REBOUÇAS, A.C. Potencialidades hidrogeológicas dos basaltos da Bacia Sedimentar do Paraná, no Brasil. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 30º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ...,v.2 Recife, 1978 p. 2963-74 .

56. HILL, J. Nuclear waste disposal. Eletronics and Power, 24(5) : 347-54, May 1978 .

57. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Development of regulatory procedures for the disposal of solid radioative waste in deep, continental formations. Vienna, 1980. (Safety Series nº 51) .

58. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Disposal of radioactive waste into the ground : proceedings of a symposium on ... held in Vienna, 29 May - 2 June 1967. Vienna, 1967 (Proceedings Series) .

59. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Handling and storage of high-level radioative liquid wastes requiring cooling . Vienna, 1979. (Technical Reports Series nº 191) .

60. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Site selection factors for repositories of solid high-level and alpha-bearing wastes in geological formations. Vienna, 1977. (Technical Reports Series nº 177) .

61. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Standardization of radioactive waste categories. Vienna, 1971. (Technical Reports Series nº 101) .

62. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Techniques for the solidification of high-level wastes. Vienna, 1977 (Technical Reports Series nº 176) .

63. JODRA, L.G. Los residuos radioactivos. Energia Nuclear, 18(91) : 343-8, Sep.-Out., 1974 .

64. KRAUSE, H. Methods of storage and disposal of radioactive waste on the surface or under-ground. In : Disposal of radioactive waste. Paris, Apr. 1972. p. 157-64 .

65. KUBO, A.S. & ROSE, D.J. Disposal of nuclear waste. Science, 182 : 1205-11, Dec. 1973 .

66. KUHN, K.; ROTHEMEYER, H.; SALANDER, C. West Germany gears up for licensing process. Nuclear Engineering International, 23(266) : 48-53, Jan. 1978 .

67. LANDIN, P.M.B.; GOMES, C.B.; ARRUDA, J.R.; FÚLFARO, V.J. Análise de Agrupamento (cluster analysis) aplicada ao estudo geoquímico do granito de Itaóca, região da Ribeira. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 28º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ..., v.3 Porto Alegre, 1974 p. 160-8 apud WERNICK, E.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B. As Regiões de Dobramentos Nordeste e Sudeste. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA 30º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ..., v.6 Recife , 1978 p. 2594-608.

68. LEINZ, V. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. São Paulo, Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo, 1949. (Boletim 103, Série Geologia 5) .

69. LEINZ, V.; BARTORELLI, A.; ISOTTA, L.A.C. Contribuição ao estudo do magmatismo basáltico mesózoico da Bacia do Paraná. An. da Acad. Bras. de Cienc., 40 (Suplemento), 1968 .

70. LEINZ, V.; BARTORELLI, A.; SADOWSKI, G.R.; ISOTTA, C.A.L. Sobre o comportamento espacial do trapp basáltico da Bacia do Paraná. Bol. Soc. Bras. de Geol., 15(4) : 73-91, 1966 .

71. MALARO, J.C. High - Level nuclear waste management in the United States : a time for decisions. Nuclear Safety, 19(3) : 356-64, May - Jun 1978 .

72. MARSILY, G. de; LEDOUX, E.; BARBREAU, A.; MARGAT, J. Nuclear waste disposal: can the geologist guarantee isolation? Science, 197 : 519-27, Aug. 1977 .

73. MARTINS, L.G.M. & BASTOS, J.P.C. Disposição geológica de rejeitos radioativos de alta atividade em formações geológicas. In : ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. 2º Congresso Brasileito de Geologia de Engenharia : Anais do ...,v.2 São Paulo, Nov. 1978. p. 263-72 .

74. MAWSON, C.A. Management of radioactive wastes. Princeton, N.J., D. Van Nostrand, 1965. (Van Nostrand Nuclear Science Series) .

75. MEZZALIRA, S. Descrição geológica e geográfica das folhas de Piracicaba e São Carlos, SP São Paulo, Instituto Geográfico e Geológico, 1965. (Boletim do Instituto Geográfico e Geológico, 43) .

76. NORTHFEET, A.A.; MEDEIROS, R.A.; MHULMANN, A. Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná. Bol. Tec. Petrobras 3(12) : 291-346, 1969 .

77. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Enviromental survey of the reprocessing and waste management portions of LWR fuel cycle. Washington, D.C. NUREG, Oct. 1976. (NUREG - 0116) .

78. PONÇANO, W.L.; BISTRICHI, C.A.; CARNEIRO, C.D.R.; ALMEIDA, M.A.; PIRES NETO, A.G.; ALMEIDA, F.F.M. de O conceito de sistemas de relevo aplicado ao mapeamento geomorfológico do Estado de São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1979 .

79. PONÇANO, W.L.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A.; PIRES NETO, A.G.; RODRIGUES DOS SANTOS, M.C.S.; ALMEIDA, M.A.; ALMEIDA, F.F.M. de Carta Geomorfológica do Estado de São Paulo, na escala 1:2500000, com base no conceito de sistemas de relevo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo .

80. PUTZER, H. Diastrofismo "germanotipo" e sua relação com o vulcanismo basáltico na parte meridional de Santa Catarina. Bol. Soc. Bras. de Geol. 2(1), 1959 apud FRANGIPANI, A. Mapa da superfície superior do basalto subjacente aos arenitos cretáceos no Estado de São Paulo. Rev. do Inst. Geog. e Geolog. (São Paulo) 15 (nº único), 1961/2 .

81. RAMDOHR, H. Final disposal of radioactive wastes. Kerntechnik, 12 (5/6) : 242-48, 1970 .

82. REBOUÇAS, A.C. Potencialidades hidrogeológicas dos basaltos da Bacia Sedimentar do Paraná, no Brasil. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 30º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ...,v.6 Recife, 1978 p. 2963-74 .

83. REBOUÇAS, A.C. Recuros hídricos subterrâneos da Bacia do Paraná. Análise de pré-viabilidade. São Paulo, 1976. (Tese de livre docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo) .

84. RÜEGG, N.R. Modelos de variação química na província basáltica do Brasil meridional - características de teor, distribuição geográfica e diferenciação SÃO Paulo, 1975. 2v. (tese de livre docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo) .

85. RÜEGG, N.R. & DUTRA, C.V. Short note on the trace elementos content of undifferentiated basaltic rocks of state of São Paulo, Brazil. Anais Acad. Bras. de Ciências, 37(3/4) : 491-6, 1975 .

86. SADOWSKI, G.R. Tectônica da serra de Cubatão, SP. São Paulo, 1974 (Tese - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo) apud WERNICK, E.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B. As regiões de Dobramentos Nordeste e Sudeste. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 30º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ...,v.6 Recife, 1978 p. 2594-608 .

87. SANTFORD, R.M. & LANGE, F.W. Basin study approach to oil evaluation of Paraná miogeosyncline of south Brazil. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., 44(8) : 1316 - 70, 1960 .

88. 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) .

89. SCHNEIDER, R.L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F. NOGUEIRA, A.A. REvisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA 28º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ... v.1. Porto Alegre, out. 1974 p. 41-65 .

90. SCHNEIDER, K.J. & PLATT, A.M., editores. High - level radioactive waste management alternatives. Richland, WA, May 1974 (BNWL-1900) .

91.- SCOPING study of salt domes basalts and crystalline roch as related to long term risk modeling for deep geological disposal nuclear waste. Kirkland, WA., Golder Associates, Nov. 1978 (UCRL - 13945) .

92. SUGUIO, K. & FULFARO, V.J. Diques clásticos e outras feições de contato entre arenitos e basaltos da Formação Serra Geral. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 28º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ...v.2 Porto Alegre, 1974. p. 107-12 .

93. TALBOT, C. Radioactive sinkers. New Scientist, 79(111) : 126-7, Jul 1978.

94. TOMLINSON, M. Canada keeps its disposal options open. Nuclear Engineering International, 23(266) : 43-5, Jan. 1978 .

95. UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION. Environmental survey of the uranium fuel cycle. Washington, D.C.; USAEC, apr. 1974 (WASH - 1248) apud ENERGY RESEARCH AND DEVELOPMENT ADMINISTRATION. ALternatives for managing wastes from reactors and post - fission operations in the LWR fuel cycle .

96. WERNICK, E. Contribuição à estratigrafia do pré - cambriano do leste do Estado de São Paulo e áreas vizinhas. Rev. Bras. de Geociências 8(2) : 122-39, Jun. 1978 .

97. WERNICK, E. Contribuição à geologia do maciço de Guaxupé, SP e MG. An. da Acad. Bras. de Ciênc., 50(3), 1978 .

98. WERNICK, E. O magmatismo granitóide das Regiões de Dobramentos Nordeste e Sudeste do Brasil. Rev. Bras. de Geociências, 8(2) : 113-33, Jun. 1978.

99. WERNICK, E.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B. As regiões de Dobramentos Nordeste e Sudeste. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 30º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ..., v.6 Recife, 1978 p. 2493-507 .

100. WERNICK, E. & GOMES, C.B. Granitos e metamorfismo no vale do Ribeira de Iguape, SP e PR. In : SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. 28º Congresso Brasileiro de Geologia : Anais do ...,v.5 Porto Alegre, 1974 p.145-54.

101. WERNICK, E. & PENALVA, F. Contribuição aos conhecimentos das rochas granitóides do sul do Brasil. Rev. Bras. de Geociências, 8(2) : 113-33, Jun, 1978 ..

102 WINSTAD, I. Swedish utilities design "completely safe" disposal route. Nuclear Engineering International, 23(266) : 45-8, Jan. 1978 .