

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

**ASPECTOS SISMOLÓGICOS NO PROJETO DE USINAS NUCLEARES
TIPO PWR**

Alexandre Alberto dos Anjos

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

Orientador: Dr. Roberto Yoshiyuti Hukai

**São Paulo
1980**

Í N D I C E

	Pag.
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Histórico.....	2
1.2. Sismologia no Brasil.....	3
1.3. Objetivos da Dissertação.....	4
2. CONCEITOS BÁSICOS DE SISMOLOGIA.....	6
2.1. Introdução.....	6
2.2. Características de um Sismo.....	6
2.2.1. Epicentro e Foco de um Sismo.....	6
2.2.2. Magnitude.....	7
2.2.3. Intensidade.....	9
2.2.4. Parâmetros de Movimentos.....	12
2.2.4.1. Aceleração, Velocidade ou Deslocamentos Máximos...	12
2.2.4.2. Espectros de Resposta e Intensidade Espectral.....	13
2.2.4.3. Raiz Quadrada Média de Aceleração (rms).....	16
2.2.4.4. Duração dos Abalos.....	17
2.3. Fatores Tectônicos e Geológicos que Afetam o Movimento Sísmico do Terreno.....	18
2.3.1. Mecanismo Focal.....	20
2.3.2. Trajetória desde o Foco até o Local de Observação...	26
2.3.3. Condições do Sítio.....	27
2.4. Os Dados Básicos sobre Movimentos Sísmicos.....	29
2.4.1. Registros Sísmicos Conhecidos.....	29
2.4.2. Registros de Sismos Simulados.....	30

2.4.3. Curvas Empíricas derivadas de Registros Sísmicos Reais	33
2.4.3.1. Movimentos Máximos de Superfície.....	34
2.4.3.1.1. Correlações entre Resposta do Terreno e Intensidade	34
2.4.3.1.2. Correlações entre Resposta de Terreno, Magnitude e Distância.....	36
2.4.3.2. Duração dos Abalos.....	43
3. ANÁLISE ESTRUTURAL DINÂMICA.....	48
3.1. Resposta de um Sistema de um Grau de Liberdade.....	48
3.2. Resposta de um Sistema de vários Graus de Liberdade.....	52
3.3. Interação Solo-Estrutura.....	62
3.4. Geração do Espectro de Resposta da Estrutura.....	69
4. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO ESTRUTURAL.....	79
4.1. Características Estruturais que contribuem para resistên- cia sísmica.....	79
4.1.1. Sistema de Suporte.....	79
4.1.2. Massa Pequena.....	79
4.1.3. Ductilidade.....	80
4.1.4. Métodos Adequados de Construção.....	80
4.1.5. Fundações Adequadas.....	80
4.1.6. Amortecimento.....	80
4.1.7. Simetria Estrutural.....	81
4.1.8. Separação de Estruturas Adjacentes.....	81
4.1.9. Detalhes que permitem Movimento Estrutural sem causar danos a elementos não-estruturais.....	82

4.2. Características Estruturais que contribuem para Danos Sísmicos.....	82
4.3. Método Estático de Projeto.....	82
4.3.1. Forças Laterais na Estrutura Principal.....	82
4.3.2. Forças Laterais em Partes da Estrutura.....	83
4.3.3. Tensões Admissíveis.....	84
4.3.4. Métodos Gerais de Projeto de Elementos Estruturais.....	84
4.4. Projeto de Fundações.....	85
4.4.1. Sobre pressão do Solo.....	85
4.4.2. Assentamento e Arranjo Diferencial.....	85
4.5. Movimento Relativo entre Estruturas e Partes de Estruturas.....	85
4.5.1. Juntas de Separação.....	86
4.5.2. Juntas Flexíveis.....	87
4.6. Efeitos das Propriedades dos Materiais.....	87
4.6.1. Ductilidade.....	87
4.6.2. Amortecimento.....	88
4.6.3. Rigidez Relativa.....	88
4.7. Detalhes Específicos de Projeto.....	89
4.7.1. Detalhes de Estruturas de Aço.....	89
4.7.2. Detalhes do Concreto.....	92
4.7.3. Fundações.....	94
4.7.4. Separação Estrutural.....	94
5. CARACTERÍSTICAS SISMO-RESISTENTES DAS USINAS PWR.....	96
5.1. Considerações Gerais sobre Segurança Nuclear.....	96

	Pag.
5.2. Acidentes Potenciais.....	98
5.2.1. Fenômenos Sísmicos como causa de falhas em reatores.....	98
5.2.2. Fontes de Energia e Mecanismos de Liberação.....	103
5.3. Danos Potenciais em um PWR.....	109
5.3.1. Áreas gerais dos sistemas do reator.....	109
5.3.2. Danos mecânicos diretos.....	110
5.3.3. Danos nucleares.....	111
5.3.4. Danos indiretos.....	111
5.3.5. Interação entre as componentes maiores.....	112
5.4. Sistemas de Proteção.....	115
5.4.1. Introdução.....	115
5.4.2. Controle do reator.....	115
5.4.2.1. Mecanismos inerentes.....	115
5.4.2.2. Mecanismos criados.....	117
5.4.3. Sensibilidade sísmica dos tipos de barras de controle.....	118
5.4.3.1. Barras de queda livre.....	118
5.4.3.2. Barras com amortecimento por fricção.....	119
5.4.3.3. Barras dirigidas mecanicamente.....	120
5.4.3.4. Chicoteamento de barras de controle durante um sis mo.....	121
5.4.4. Instrumentação de Controle do Reator.....	123
5.4.4.1. Partida.....	123
5.4.4.2. Faixa intermediária de potência.....	123
5.4.4.3. Potência plena.....	124
5.4.4.4. Sensibilidade sísmica.....	124
5.4.5. Sismômetros.....	125
5.4.6. Instrumentação sísmica recomendável.....	128

6. CONSIDERAÇÕES SISMO-GEOLÓGICAS SOBRE A REGIÃO DE ANGRA DOS REIS.....	130
6.1 Sismicidade do Brasil.....	130
6.1.1. Introdução.....	130
6.1.2. Evolução Geológica do Brasil.....	131
6.1.3. Mapa Sismotectônico e Regiões Sismotectônicas.....	134
6.2. Geologia Regional.....	145
6.2.1. Organização Estrutural.....	145
6.2.2. Província Tocantins.....	148
6.2.3. Sub-Província Rio Doce.....	150
6.2.4. Sub-Província Serra do Mar.....	152
6.2.5. Falhamentos Regionais.....	153
6.2.6. Geologia da Praia de Itaorna.....	159
6.3. Sismicidade Histórica.....	161
7. ANÁLISE DOS CRITÉRIOS SÍSMICOS ADOTADOS NO PROJETO DA CENTRAL NUCLEAR ALMIRANTE ÁLVARO ALBERTO.....	170
7.1. Geologia e Tectônica.....	170
7.2. Sismicidade.....	171
7.3. Estruturas.....	174
7.4. Problemas com Análise Sísmica e Estaqueamento de An - gra II.....	175
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	177
APÊNDICE - A.....	181
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	200

Í N D I C E D A S F I G U R A S

	Pag.
FIG.2.1 - Mapa de Isossistas do terremoto de Parkfield, 27 de junho de 1966	11
FIG.2.2 - Construção do espectro de resposta	14
FIG.2.3 - Resposta espectral para o acelerograma de El Centro (1940), para a componente norte-sul	15
FIG.2.4 - Características dos abalos sísmicos de Parkfield (1966) e El Centro (1940)	19
FIG.2.5 - Relação entre a geologia local e a intensidade dos abalos sísmicos durante o terremoto de 1906 em São Francisco	21
FIG.2.6 - Relação entre o mecanismo focal e acelerogramas de El Centro, no terremoto de Imperial Valley (1940)	22
FIG.2.7 - Geração e transmissão de ondas sísmicas	24
FIG.2.8 - Tipos de falhas	24
FIG.2.9 - Registros de sismos simulados	32
FIG.2.10 - Correlações entre aceleração horizontal e intensidade MM	35
FIG.2.11 - Correlações Médias entre resposta do terreno e intensidade MM	35
FIG.2.12 - Correlação entre a aceleração horizontal máxima, a magnitude e a distância	38
FIG.2.13 - Comparação de distintas correlações entre a aceleração horizontal máxima e a distância, para sismos com magnitude 6,5-6,6	40
FIG.2.14 - Correlação entre acelerações horizontais máximas, magnitude e distância	40

	Pag.
FIG.2.15 - Dependência da aceleração com a frequência, para a região central dos E.U.A.	42
FIG.2.16 - Correlação entre a velocidade máxima horizontal, magnitude e distância	42
FIG.2.17 - Duração da aceleração horizontal em função da magnitude e distância	46
FIG.2.18 - Correlações médias entre duração e intensidades locais	46
FIG.3.1 - Sistema de um grau de liberdade	49
FIG.3.2 - Acelerogramas dos terremotos de Koyua (11/12/67) e El Centro (18/05/40)	51
FIG.3.3 - Espectros de deslocamento dos terremotos de Koyua (componente longitudinal) e El Centro (componente norte-sul)	53
FIG.3.4 - Espectros de resposta do terremoto de El Centro (1940)	53
FIG.3.5 - Estrutura de um reator nuclear, o modelo estrutural para análise dinâmica, e os casos de solicitação dinâmica normalmente considerados	54
FIG.3.6 - Modelo estrutural de um reator nuclear	60
FIG.3.7 - Diagramas de deslocamentos, acelerações, momentos fletores e esforços cortantes obtidos pelo método da superposição espectral	61
FIG.3.8 - Modelo estrutural para análise de um reator em que a interação solo-estrutura é representada por parâmetros constantes	62

FIG. 3.9 - Representação do solo por meio de um modelo de elementos finitos	66
FIG. 3.10 - Prédio de concreto armado com fundações sobre estacas	68
FIG. 3.11 - Modelo estrutural (análise sísmica de um prédio de controle com fundações sobre estacas)	68
FIG. 3.12 - Gráficos das acelerações máximas nos diversos andares do prédio obtidas pelo método da superposição espectral e pelo histórico da resposta	70
FIG. 3.13 - Gráficos do histórico da resposta	71
FIG. 3.14 - Método de Biggs (esquema)	73
FIG. 3.15 - Método Histórico da Resposta (esquema)	75
FIG. 3.16 - Corte de um edifício de reator PWR e o respectivo modelo estrutural adotado	76
FIG. 3.17 - Espectro de resposta da estrutura relativo à aceleração horizontal do ponto 3 do modelo adotado	77
FIG. 3.18 - Métodos Probabilísticos (esquema)	78
FIG. 4.1 - Vigas de aço não-rígidas	91
FIG. 4.2 - Sistema de suporte para um vaso cilíndrico	91
FIG. 4.3 - Sistema de suporte de um vaso cilíndrico vertical	91
FIG. 5.1 - Barra de Controle (esquema)	127
FIG. 5.2 - Sismoscópio	127
FIG. 6.1 - Unidades geotectônicas do ciclo brasileiro	133
FIG. 6.2a - Mapa Sismotectônico do Brasil e regiões correlacionadas	135
FIG. 6.2b - Sismos no Brasil, registrados entre 1560 e 1977	136

	Pag.
FIG.6.3 - Distribuição regional e cronológica dos tremores sísmicos registrados no Brasil entre 1800 e 1977	137
FIG.6.4 - A zona marginal sul do Craton São Francisco	147
FIG.6.5 - Mapa Geológico-Compilado da Borda Sul do Craton São Francisco	149
FIG.6.6 - Principais feições estruturais do leste paulista e oeste fluminense	155
FIG.6.7 - Grandes falhas e compartimentação tectônica do leste paulista	156
FIG.6.8 - Falha da Bacia e Falha de São Tomé	158
FIG.6.9 - Sismos registrados num raio de 322 km da C.N.A.A.A.	163
FIG.6.10 - Área afetada pelo sismo de 31 de julho de 1861	164
FIG.6.11 - Área afetada pelo Sismo de 9 de maio de 1886	165
FIG.6.12 - Área afetada pelo sismo de 16 de janeiro de 1962	167
FIG.6.13 - Área afetada pelo sismo de 22 de março de 1967	168
FIG.7.1 - Grandes Falhamentos x Sismos	173

R E S U M O

Foi feita uma síntese da literatura científica seguida de uma análise crítica dos aspectos sismológicos relacionados com o projeto de usinas nucleares tipo PWR.

Procurou-se reunir nesta dissertação os aspectos sismológicos de um lado, e de engenharia estrutural, civil e mecânica, de usinas nucleares de outro, enfatizando-se as características sismo-resistentes das usinas PWR.

Foram tecidas considerações sobre a sismicidade do terreno brasileiro, particularizando a região costeira sudeste, onde se encontra localizada a primeira central nuclear brasileira em Angra dos Reis.

Finalizou-se o trabalho com conclusões e recomendações no trato dos problemas de projeto sísmico de usinas nucleares.

SEISMOLOGICAL ASPECTS OF DESIGNING PWR TYPE
NUCLEAR POWER PLANTS

A B S T R A C T

A synthesis of the scientific literature concerning the seismological aspects of designing PWR type nuclear power plants was done followed by its analysis.

Seismological aspects and its related civil-structural and mechanical engineering factors were considered giving emphasis on the seismo-resistant characteristics of PWR plants.

Considerations were given to the seismicity of the Brazilian terrain, particularly to its Southeast coastal region where the first nuclear power plants are located.

Conclusions and recommendations are made for treating seismic design problems in nuclear projects.

1 . INTRODUÇÃO

As usinas nucleares apresentam problemas especiais de segurança irrelevantes para a maioria das outras estruturas de engenharia civil e mecânica. Numa usina nuclear, os danos causados por um sismo podem, potencialmente, ocasionar o vazamento de radioatividade para a atmosfera externa. Este efeito potencial requer que o projeto de uma usina nuclear seja cuidadosamente elaborado e avaliado, e que critérios de projeto mais rígidos que os das usinas convencionais sejam adotados.

Os efeitos potenciais de sismos na integridade e operação segura de uma usina, são numerosos. Primeiramente, os movimentos vibratórios induzidos por sismos aplicam cargas dinâmicas à estrutura da usina, ao equipamento e à tubulação, que são as maiores que podem ser aplicadas por causas naturais. Além do mais, a vibração do terreno pode causar queda de encostas, subsidência, ou liquefação da massa de solo no local onde está instalada a usina. Outros fatores relacionados com sismos que precisam ser considerados no projeto de uma usina nuclear são os efeitos de falhamentos superficiais e a ocorrência potencial de ondas de água e inundações induzidas por sismos.

A maioria dos sismos é de origem tectônica, decorrente de movimentos de falhas. Seus pontos de origem estão localizados abaixo da superfície terrestre, em profundidades que vão até cerca de 700 km. Um dos pontos que se deve ter em mente é que cerca de 5% de todos os sismos observados ocorrem em regiões com pequena ou mesmo nenhuma atividade sísmica anterior registrada / 1 / . Pode-se citar à guisa de exemplo, o caso dos E.U.A., em que nos últimos 250 anos pelo menos três grandes terremotos tiveram esta característica: Boston, Massachussets, em 1755; New Madrid, Missouri, em 1812; e Charleston, South Carolina, em 1876. Estes

dois últimos terremotos foram de grande magnitude, tendo sido notados numa área de vários milhões de quilômetros quadrados. A existência destes terremotos inesperados faz com que se insista na necessidade de incorporação de regulamentos sísmicos no projeto de qualquer usina nuclear.

1.1 - Histórico

Antes do começo deste século não havia critérios de projeto sísmico. Prédios em áreas sísmicamente ativas eram construídos com espaço suficiente ou com materiais leves de maneira que a falha de uma estrutura não causasse falha das estruturas vizinhas e fossem mínimos os danos causados aos ocupantes do prédio. Estas disposições construtivas são geralmente consideradas como a base da tradicional arquitetura leve, com prédios de um andar, no Japão. Com o surgimento das áreas urbanas densamente povoadas nas sociedades industriais modernas, projetos sísmo-resistentes tornaram-se necessários. O terremoto de Santa Bárbara, Califórnia, em 1925, conduziu à adoção de uma norma de projeto sísmo-resistente japonês foi desenvolvido em consequência do grande terremoto de Kanto, em 1923, que devastou Tóquio e Iocoma.

Desde o início, as normas americanas e japonesas foram baseadas em níveis de carregamento estático associados a porcentagens de g (aceleração da gravidade). Até 1964, o projeto sísmico de usinas nucleares teve um tratamento semelhante ao das usinas convencionais. Em regiões de baixa sismicidade e em regiões de nenhuma atividade sísmica, mas onde um projeto sísmico era requerido, os níveis de carregamento estático eram de ordem de $0,02$ a $0,05g$ na estrutura e nos equipamentos. Estes baixos níveis de carregamento estático não tinham nenhuma consequência prática no projeto estrutural. Em regiões de alta sismicidade os equipamentos eram projetados para uma aceleração de $0,2g / 1 /$.

O desenvolvimento das atuais normas de projeto sísmico foi acelerado a partir de 1965 com o crescimento da indústria de energia nuclear. Este desenvolvimento foi muito estimulado pela ativa participação da então U.S. Atomic Energy Commission (USAEC), hoje Nuclear Regulatory Commission (NRC), nos procedimentos para o licenciamento de usinas nucleares nos Estados Unidos.

O dado básico de entrada para o projeto sísmico de uma usina nuclear é a maior aceleração previsível do terreno. Para a obtenção desse dado são necessários estudos básicos, geológicos e sismológicos, para a determinação do risco sísmico e dos movimentos máximos no local onde será instalada uma usina nuclear.

1.2 - Sismologia no Brasil

No que se refere ao Brasil, até recentemente, havia poucos instrumentos sísmicos em nosso país. No entanto, a história dos sismos no Brasil data do ano de 1560. Notícias de sismos aparecem em muitas publicações históricas, porém não haviam sido compiladas até 1910, quando o Cel. Alípio Gama, engenheiro militar, preparou uma lista relativamente completa. Em 1912, John C. Branner, um geólogo norte-americano da Universidade de Stanford, compilou dados adicionais e publicou uma lista mais completa. Branner, atualizou sua lista em 1920, mas nenhuma relação completa tinha sido realizada até o trabalho de Marcus Gorini com o título de "Earthquakes in Brazil", em 1969 (não publicado).

Vários tipos de sismógrafos têm operado no Observatório Nacional do Rio de Janeiro, desde 1906. Entretanto, estes instrumentos são de período longo e estão instalados para detectar as ondas superficiais de terremotos distantes em vez de ondas de eventos locais com altas frequências. Em 1956, o Observatório Lamont-Doherty da Universidade de Columbia, instalou um conjunto de sismógrafos de período de 15 segundos no Observatório Nacional.

Estes instrumentos detectaram precariamente os sismos locais de 1962 e 1967, sendo que os primeiros sinais não foram registrados nitidamente e, conseqüentemente, não foi possível determinar os epicentros.

A sismologia no Brasil avançou consideravelmente durante os últimos anos da década de 1960 com a instalação de uma das estações sismográficas mais bem equipadas do mundo, nas proximidades de Brasília. Esta estação sismográfica está constituída principalmente pelo Sistema Sul-Americano tipo Arranjo que tem sido operado pela Universidade de Brasília desde sua instalação em 1966, com a participação de um certo número de outras organizações, como o Instituto de Ciências Geológicas da Grã-Bretanha. Este sistema consiste de 21 detectores verticais de período curto instalados em duas linhas, cada uma com um comprimento aproximado de 50 km e formando um T^{assimétrico}. A localização geológica e geográfica favorável no Planalto Central Brasileiro (baixo nível de ruído sísmico e cultural) permite a este sistema a possibilidade de operar com altas amplificações da ordem de milhões de vezes, o que certamente permite a detecção da maioria dos eventos sísmicos da América do Sul cuja magnitude esteja acima de 3,5 na escala de Richter. Além disso, o "United States Coast and Geodetic Survey" (agora "United States Geological Survey") instalou, em 1972, em Brasília uma estação do tipo WWSSN (Worldwide Standardized Seismograph Network) a qual consiste de dois conjuntos de sismógrafos, um de período curto e outro de período longo, cada conjunto tendo um sismógrafo vertical e dois horizontais. Uma estação tipo WWSSN opera em Natal (RN), desde 1965.

1.3 - Objetivos da Dissertação

O presente trabalho consistiu na primeira dissertação de Mestrado a discorrer sobre os aspectos sísmicos no projeto de usinas nucleares no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

Pretendeu-se, portanto, ter como objetivo principal, a compilação de dados e informações e o conhecimento precípua da função da sismicidade no processo de projeto de usinas nucleares. Assim, procurou-se reunir nesta dissertação o conhecimento dos aspectos sísmológicos de um lado e da estrutura de engenharia civil e mecânica das usinas nucleares, de outro. A soma desses dois conjuntos de conhecimento resultou na terceira componente da dissertação que é a resposta potencial e real das partes da usina às vibrações sísmicas. Naturalmente, objetivou-se fixar as atenções nos potenciais acidentes que os movimentos sísmicos poderiam causar. As considerações sobre respostas sísmo-resistentes foram restritas ao caso de reatores tipo PWR (Pressurized Water Reactor), obviamente, dado o fato que esse é o tipo de reator adotado no Programa Nuclear Brasileiro.

Foram tecidas considerações sobre a sismicidade do terreno brasileiro, em termos genéricos, e particularmente sobre a sismicidade na região costeira próxima ao eixo Rio-São Paulo, onde se encontra localizada a primeira central nuclear brasileira em Angra dos Reis. Finalizou-se a dissertação pelas conclusões e recomendações no trato dos problemas de projeto sísmico que, apesar de ser menos penoso no caso brasileiro em comparação com os países que possuem movimentos sísmicos intensos como o Japão, E.U.A e Itália, não deixa de apresentar-se como importante para a segura operação das centrais nucleares brasileiras. Pois, apesar de menor, o importante é assinalar que a sismicidade no território brasileiro existe em escala apreciável e intensidade não desprezível.

2. CONCEITOS BÁSICOS DE SISMOLOGIA

2.1- Introdução

Antecedendo as discussões sobre a interação entre movimentos sísmicos e a dinâmica estrutural das usinas nucleares, torna-se necessário o conhecimento de elementos de sismologia para o desenvolvimento da nossa exposição. Neste Capítulo apresentamos os conceitos básicos de sismologia.

Etimologicamente, sismologia é a ciência dos terremotos ou sismos (do grego seismos+logos). À ciência sismológica moderna interessa, além do estudo dos sismos, o estudo da constituição interna do nosso planeta, dos efeitos dos sismos e da prevenção e predição sísmica.

Para o estudo dos sismos, localizando-os no tempo e no espaço, são necessários vários parâmetros que são descritos a seguir.

2.2- Características de um Sismo

2.2.1- Epicentro e Foco de um Sismo

Entende-se por sismo a liberação instantânea de energia elástica acumulada no interior da Terra, quando os esforços armazenados lentamente, devido a processos tectônicos principalmente, sobrepassam a resistência dos materiais comprometidos. Estes fenômenos são acompanhados de fraturas ou falhas cujas consequências dependem da quantidade de energia liberada, e sua manifestação na superfície, além da profundidade onde se inicia o fenômeno sísmico.

O foco ou hipocentro de um sismo, é o ponto no interior da Terra onde ocorre a ruptura inicial da rocha e onde se inicia a liberação de ondas elásticas. Uma parte dos sismos registrados se origina em pequena profundidade (entre 0 e 15 km) em regiões com grandes sinais de falhamento. Em outras regiões os focos são mais profundos, não se observando rupturas superficiais. As maiores profundidades de focos de sismos estão na faixa de 500 a 700 km abaixo da superfície terrestre /2,3/.

O epicentro de um sismo é a projeção vertical do foco na superfície. Na ausência de dados instrumentais, tem-se estabelecido o epicentro na base de efeitos observados na superfície. A localização de epicentros é efetuada usando-se tempos relativos de chegada das ondas sísmicas a vários aparelhos numa rede sismográfica. Nem o processo de localização do foco nem o do epicentro são muito precisos, devido às limitações de número de estações de registro, na interpretação tectônica e geológica de estruturas da crosta e do manto superior e no conhecimento de velocidades locais de propagação em muitas áreas.

É importante notar que o foco ou hipocentro não indicam, necessariamente, o centro de liberação da energia total de um sismo, mas indica o ponto onde a ruptura começa. Para sismos pequenos, o centro de liberação de energia e o ponto onde o rejeito começa não são distantes um do outro; para grandes sismos, estes pontos podem estar a centenas de quilômetros um do outro /4/.

2.2.2- Magnitude

A magnitude de um sismo é entendida como uma medida de sua grandeza, independentemente do local de observação. É calculada através de medidas efetuadas nos sismogramas e expressa em números ordinários e decimais. Fisicamente, a magnitude correlaciona-se com a energia liberada por um sismo, assim como com o comprimento da ruptura da falha e com o seu deslocamento máximo /3/.

A escala de magnitude de Richter /5/ foi introduzida em 1935 e é um índice da quantidade de energia vibracional de um sismo, M_L , magnitude que foi originalmente introduzida por Richter, e foi definida para ser usada em abalos locais na Califórnia. M_L foi definida como o logarítmo da máxima amplitude do movimento do terreno, em microns, registrada num sismógrafo Wood-Anderson com constantes especificadas (período livre = 0,8 seg., magnificação máxima = 2.800, fator de amortecimento = 0,8) quando o sismógrafo estiver a uma distância de 100 km do epicentro. Observações em outras distâncias são corrigidas para a distância dada por meio de curvas empíricas.

Em 1956, Richter ampliou seu trabalho com a definição da magnitude de ondas de superfície, dada por M_S /6/. A escala foi baseada em ondas superficiais com períodos ao redor de 20 seg. Esta magnitude é utilizável para qualquer distância epicentral e para qualquer tipo de sismógrafo, sendo hoje largamente empregada.

Uma escala baseada nas ondas de volume, M_B , também foi desenvolvida. Esta escala usa ondas de volume com períodos ao redor de 1 seg., sendo também amplamente utilizada.

As relações /7/ entre magnitude local, M_L , magnitude de ondas de superfície, M_S , e magnitude de ondas de volume, M_B , são dadas por:

$$M_B = 1,7 + 0,8 M_L - 0,01 M_L^2 \quad , \quad M_B = 0,5(M_S + 2,9)$$

A relação entre M_S e M_B expressa um resultado interessante, ou seja, para sismos que ocorrem a uma profundidade normal as ondas sísmicas de superfície tornam-se cada vez mais importantes em relação às de volume com o aumento da grandeza do sismo. A explicação física para este fato é que o mecanismo focal é mais extenso em espaço e tempo para grandes sismos e tem uma maior influência na geração de ondas superficiais de período longo.

2.2.3- Intensidade

Na ausência de instrumentos que registrem a movimentação sísmica, os abalos são medidos através de valores segundo várias escalas subjetivas de intensidade. Até o início deste século, a escala de Rossi-Forel, que contém dez graus de intensidade, era a mais utilizada. No entanto, com os posteriores avanços de tecnologia, a escala de Rossi-Forel tornou-se ultrapassada, primeiramente porque uma enorme faixa de intensidades estava colocada no nível máximo X e também por certas limitações em suas descrições. Por estas razões, uma nova escala foi desenvolvida por Mercalli, em 1907. Originalmente, esta escala possuía 10 divisões que passaram a 12, seguindo uma sugestão de Cancani. Atualmente, é mais utilizada a escala modificada de Mercalli (MM) tal como foi apresentada por Wood e Neumann, em 1931.

Outras escalas de intensidade são utilizadas em diferentes partes do mundo. Por exemplo, a escala IKS, desenvolvida por Medvedev et al., em 1964 / 9 /, é atualmente utilizada na U.R.S.S. e em outros países da Europa Oriental. A versão de Cancani-Sieberg / 10 / da escala original de Mercalli é largamente utilizada na Europa Ocidental e a escala da Japan Meteorological Agency (JMA), desenvolvida em 1961, tornou-se a escala de sismicidade padrão no Japão / 11 /. Todas essas escalas são subjetivas e exceto para a escala da JMA, que possui sete divisões, todas apresentam estrutura similar à escala MM.

Após um sismo, a determinação do valor da sua intensidade em um dado local, baseia-se em relatos dos habitantes desse local e na observação dos danos causados. Para determinar a intensidade de sismos do passado utiliza-se notícias e relatos de jornais, livros, crônicas históricas e outros materiais que descrevam esses eventos. As intensidades definidas para os diferentes locais são projetadas em um mapa formando curvas isossistas que separam regiões de sucessivas taxas de intensidade. Estes mapas, chamados de isossistas ou de inten-

sidade, refletem a atenuação com a distância da fonte, dos danos, e a área de influência em que se sentiu o sismo. A forma e extensão das isossistas podem ser influenciadas por feições tectônicas da área, indicando direções preferenciais para a transmissão de ondas sísmicas e o mecanismo pelo qual se origina o sismo (Fig. 2.1 /64/).

As escalas de intensidade são importantes nas áreas em que não há registros de fortes movimentos, particularmente onde são o único meio para a interpretação de dados históricos. Assim, interrelações entre intensidade MM e medidas quantitativas da severidade de movimentos de terrenos, como acelerações máximas, são frequentemente utilizadas para fins de projeto. No entanto, essa maneira de representar o movimento do terreno utilizando intensidades, resulta em um número indesejável de deficiências. Primeiramente, a reação humana a um sismo depende de fatores como a experiência anterior com abalos sísmicos, e o equilíbrio emocional dos observadores, estes fatores, assim como condições próprias do subsolo que afetam os próprios movimentos, contribuem para a atribuição errônea aos valores da intensidade. Em segundo lugar, danos estruturais não representam uma base uniforme para a determinação de intensidades devido às diferenças nas práticas de projeto e construção para várias regiões; por exemplo, é especialmente difícil avaliar intensidades para sismos em áreas economicamente subdesenvolvidas, quando comparadas com as de sismos em áreas desenvolvidas. Para sismos ocorridos em áreas esparsamente habitadas tem sido atribuídas intensidades baseadas principalmente em deslocamentos permanentes de terreno, ou queda de encostas que, por si mesmas são medidas incertas dos efeitos das ondas sísmicas. Finalmente, deve-se ter sempre em mente que a intensidade máxima observada não é, necessariamente, igual à intensidade máxima que o sismo pode ter tido no epicentro, principalmente, em casos de sismos pouco profundos que apresentam uma atenuação maior. Por estas razões, cuidados especiais são requeridos quando se utiliza intensidades para estimar o movimento de terreno em um local.

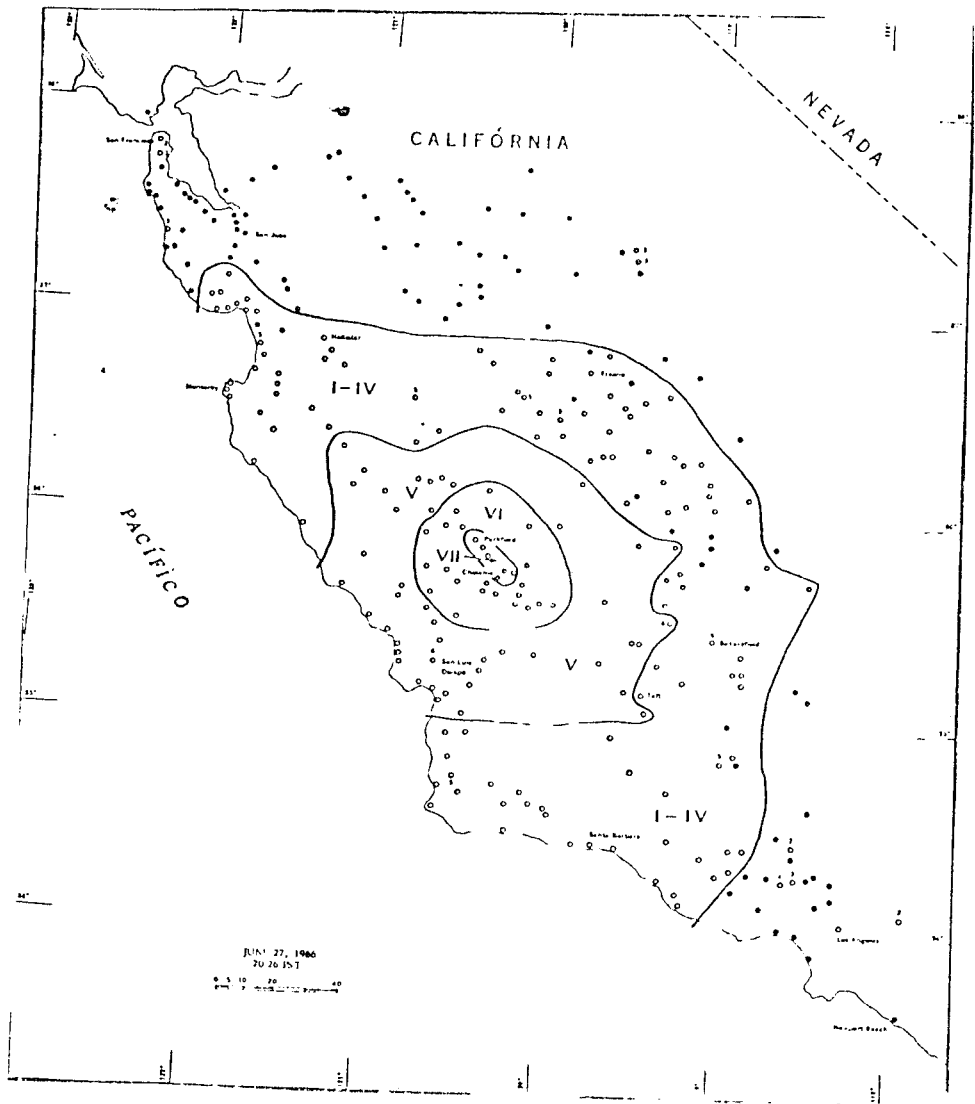


FIG. 2.1 - Mapa de Isossistas do terremoto de Parkfield, 27 de junho de 1966.

2.2.4- Parâmetros de Movimentos

A melhor representação de movimentos sísmicos em um dado local, fornecendo um registro completo, é o registro da aceleração. No entanto, para comparações de diferentes registros e para relacionar movimentos de terreno a danos estruturais potenciais, freqüentemente se utilizam parâmetros simples que definem um dado registro. Os parâmetros mais utilizados são: aceleração, velocidade ou deslocamento máximos, espectros de resposta e intensidade de espectro, raiz quadrada da aceleração e duração dos movimentos.

2.2.4.1- Aceleração, Velocidade ou Deslocamentos Máximos

A aceleração máxima é, atualmente, a representação do movimento de terreno mais largamente empregada; e a maioria dos dados de níveis de força dos poucos sismos registrados em acelerógrafos é proporcionada em termos de acelerações máximas. No entanto, o uso desse parâmetro para representar movimentos sísmicos tem um certo número de limitações. Primeiramente, a aceleração máxima relaciona-se estreitamente com as forças máximas aplicadas a sistemas de alta freqüência, mas, não com sistemas representados pelas estruturas mais típicas, de freqüência baixa ou intermediária. Além disso, a aceleração máxima, sozinha, não fornece boas correlações entre forças relativas de registros diversos de sismos e, também, não fornece dados sobre a duração e a faixa de freqüência do movimento / 13 /.

O movimento sísmico de um terreno pode ser representado pela velocidade ou deslocamento máximos, como se mencionou antes ambos parecem ter porém um contorno superior (upper bound) bem mais definido que as acelerações. Além do mais, o

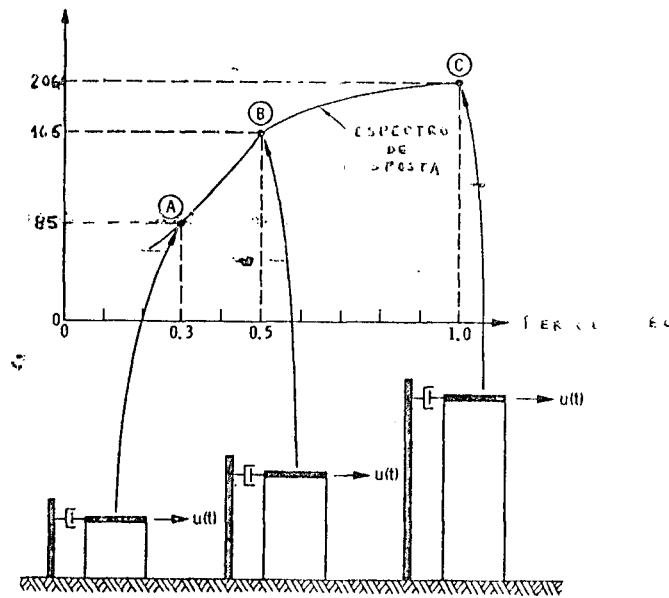
deslocamento e a velocidade máximos fornecem uma boa estimativa das forças laterais efetivas exercidas por um sismo para estruturas de frequências baixas e intermediárias. Dos dois, a velocidade máxima é geralmente preferida, como pode ser observado em estudos sobre registros de abalos sísmicos e de origem nuclear / 8,14 /. No entanto, ambos os parâmetros estão sujeitos a erros advindos da integração numérica dos registros de aceleração e, como a aceleração máxima, eles não fornecem dados sobre duração ou faixa de frequência dos movimentos.

2.2.4.2- Espectros de Resposta e Intensidade Espectral

O espectro de resposta é largamente empregado na caracterização de movimentos sísmicos. Um espectro de resposta é a projeção da resposta máxima de uma estrutura amortecida em função de seu período natural, ou frequência. Geralmente se estabelece uma família de espectros de resposta, cada espectro correspondendo a uma dada taxa de amortecimento. A construção de um espectro de resposta para um certo registro sísmico é ilustrado na Fig. 2.2 . Na Fig. 2.3 , aparecem representações tripartite e aritmética dos resultados espectrais. Além das representações da pseudovelocidade versus período, os espectros de resposta podem ser representados em termos de deslocamentos espectrais, acelerações espectrais e frequências.

Os espectros de resposta são usados em projetos sismo-resistentes porque revelam os efeitos dos movimentos do terreno na resposta de uma estrutura. Além do mais, eles podem ser usados para estimar picos de resposta de estruturas complexas, apesar de que essa aplicação particular requer o uso de métodos de aproximação para combinar respostas modais. Uma vantagem adicional é que os espectros de resposta fornecem os meios para representar a faixa de frequências de movimentos do terreno.

PSEUDOVELOCIDADE (CM/seg.)



Pontos no Espectro	A	B	C
Período Natural	0,3 seg.	0,5 seg.	1,0 seg.
Taxa de Amortecimento	0,05	0,05	0,05
Pseudovelocidade, \dot{u}	85 cm/seg.	165 cm/seg.	200 cm/seg.

Nota:

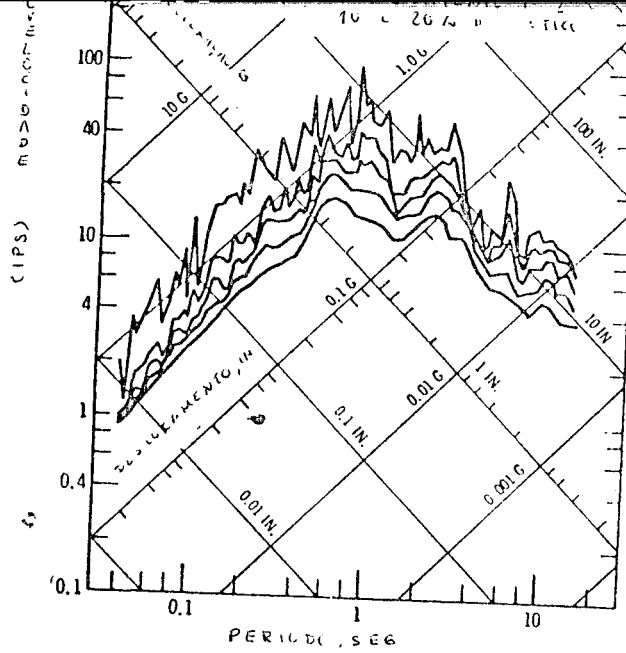
pseudovelocidade

$$\dot{u} = u_m \frac{2\pi}{T}$$

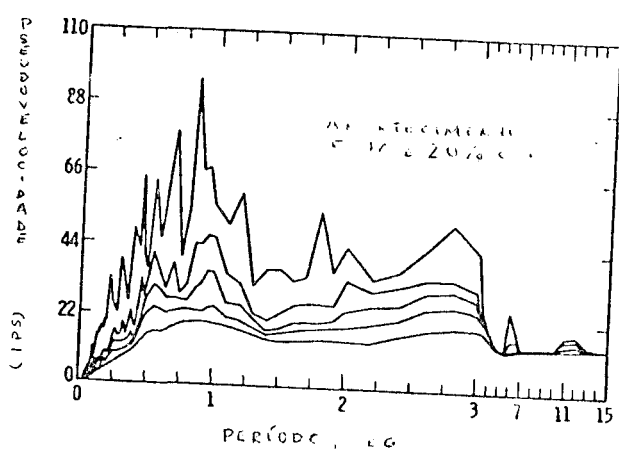
$u_m =$ deslocamento máximo da estrutura com relação à base
 $= u(t)_{\max}$

$T =$ período natural

FIG. 2.2 - Construção do espectro de resposta.



(a) Projeção Tripartite



(b) Projeção Aritmética

FIG. 2.3 - Resposta espectral para o acelerograma de El Centro (1940), para a componente norte-sul.

Uma desvantagem dos espectros de resposta é que eles, em si, não fornecem uma medida numérica simples das forças relativas de registros de diferentes movimentos sísmicos. Para contornar este problema, a intensidade espectral do registro sísmico pode ser usada como foi originalmente concebida por Housner / 15 /, onde este parâmetro é definido como a área sob o espectro da pseudovelocidade, num registro, entre os períodos de 0,1 a 2,5 segundos. As intensidades espectrais de espectros com 20% de amortecimento foram estreitamente correlacionadas com as acelerações de raiz quadrada média (rms) de um certo número de registros, se bem que esse nível de amortecimento não seja representativo de estruturas típicas. A principal vantagem da intensidade espectral é que ela correlaciona a força do movimento de terreno com o pico da resposta de um oscilador numa faixa de período comum a muitas estruturas. No entanto, ela não fornece informações sobre a duração dos abalos.

2.2.4.3- Raiz Quadrada Média de Aceleração (rms)

A aceleração rms de um registro sísmico é definida como sendo:

$$\text{rms} = \left[\frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} \dot{y}^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

onde $\dot{y}(t)$ é a aceleração no instante t de um registro sísmico com duração total t_d . A principal vantagem da aceleração rms como uma medida da força do abalo sísmico deve-se ao fato de que ela é facilmente calculável e aplicável em ambas as análises de resposta sísmica: determinística e não-determinística / 13 /.

O uso da aceleração rms como medida da força de abalos está sendo cada vez mais reconhecido. Por exemplo, Arias / 16 / e Housner / 17 / propuseram o uso de parâmetros que se correlacionam estreitamente com a aceleração rms definida na Eq. 2.1.

A abordagem de Arias considera um fator de intensidade I definido como :

$$I = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} \dot{y}(t)^2 dt, \quad (2.2)$$

onde, g é a aceleração da gravidade. Arias demonstrou que a Eq. 2.2 corresponde à energia total acumulada no fim de um sismo num conjunto de osciladores de frequência variável linearmente não amortecidos ou moderadamente amortecidos. Ela é quase independente de amortecimento estrutural sob uma larga faixa de níveis de amortecimento. Housner recomendou uma medida bi-paramétrica da força do abalo sísmico, onde um parâmetro é a taxa média da entrada energética e o outro é o intervalo de tempo t durante o qual a taxa média é mantida. Matematicamente, isto se expressa por:

$$P = \frac{E(T)}{T} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \dot{y}^2(t) dt. \quad (2.3)$$

Housner interpreta P como a "potência" do movimento sísmico e uma medida da taxa pela qual a energia é experimentada nas estruturas, ou seja, uma medida da severidade do abalo. Ele também interpreta $E(T)$ como uma medida da energia total experimentada nas estruturas por P ; assim, $E(T)$, representa a energia disponível para danos. Em lugar de P , Housner indica que a quantidade $P' = [E(T)]^{1/2}/T$ (2.4), também pode ser usada desde que é representativa da amplitude alcançada por um oscilador amortecido e também coincide com as medidas costumeiras da força de abalos sísmicos. Note-se que P' , definida na Eq. 2.4, é bastante similar à aceleração rms definida na Eq. 1.

2.2.4.4- Duração dos Abalos

A duração dos abalos tem sido reconhecida como um parâmetro importante que pode ter um efeito significativo nos danos estruturais causados por abalos sísmicos. Este parâmetro se relaciona estreitamente com a energia liberada pelo sismo, a qual, por outro lado, depende do comprimento e deslocamento da região

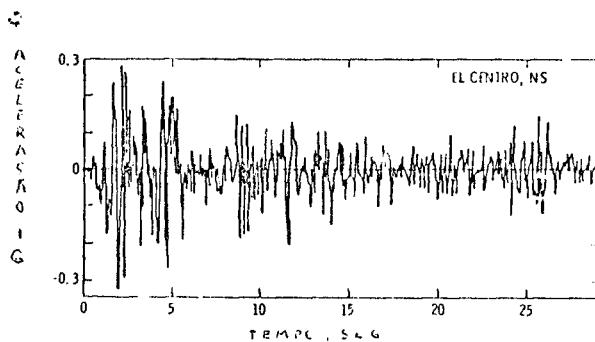
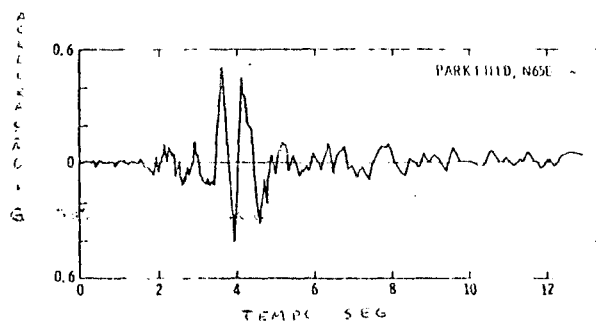
deslizada por falhamento e da magnitude da tensão de colapso (stress drop) que ocorreu. Uma medida parcial desses últimos parâmetros é fornecida pela magnitude de Richter. Bolt /18/ sugeriu que a duração também depende da frequência das ondas e da distância entre o local de observação e o epicentro. Outros parâmetros que mostraram influenciar a duração de abalos sísmicos são: as condições locais do sítio e se são considerados os registros de aceleração vertical e horizontal, velocidade ou deslocamento /19/.

Uma indicação da importância da duração de abalos, foi fornecida por Housner /20/ em acelerogramas registrados em Parkfield (1966) e El Centro (1940). Como é mostrado na Fig.

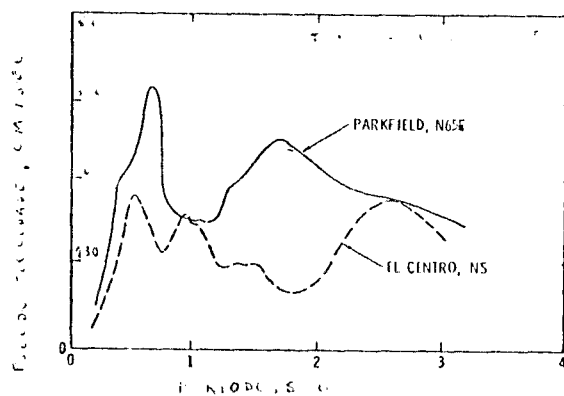
2.4, o registro de Parkfield obviamente possui aceleração máxima e intensidade espectral mais altas; no entanto, apesar disso, o terremoto de El Centro causou, consideravelmente, mais danos nas estruturas da área. Este paradoxo aparente é resolvido se se consideram as diferenças na duração dos abalos nos dois registros. Para o registro de Parkfield essa duração é de aproximadamente 1 seg., enquanto que para El Centro o registro aponta 15 segs. A partir deste e de outros casos similares, Housner concluiu que excitações sísmicas com forte movimentação, porém de pequenas durações, não são tão destrutivas quanto se infere de suas acelerações máximas e intensidades espectrais.

2.3- Fatores Tectônicos e Geológicos que Afetam o Movimento Sísmico do Terreno

Os vários fatores tectônicos e geológicos que afetam o movimento sísmico do terreno podem ser relacionados com o mecanismo focal do sismo, a trajetória de transmissão fonte-local das ondas sísmicas e as condições locais do terreno. Estudos de sismogramas e observações de danos causados por sismos do passado indicam os efeitos potenciais de cada conjunto de parâmetros. Por exemplo, os danos causados em San Francisco durante o terremoto de 1906 foram correlacionados com a geolo-



(a) Acelerogramas



(b) Espectros de Resposta

FIG. 2.4 - Características dos abalos sísmicos de Parkfield (1966) e El Centro (1940).

gia local e condições do solo / 24 /. Poucos deles estavam associados com afloramentos rochosos, enquanto movimentos intensos foram observados em depósitos adjacentes de areia e material aluvial bem como em aterros ao longo da Baía de San Francisco, Fig.

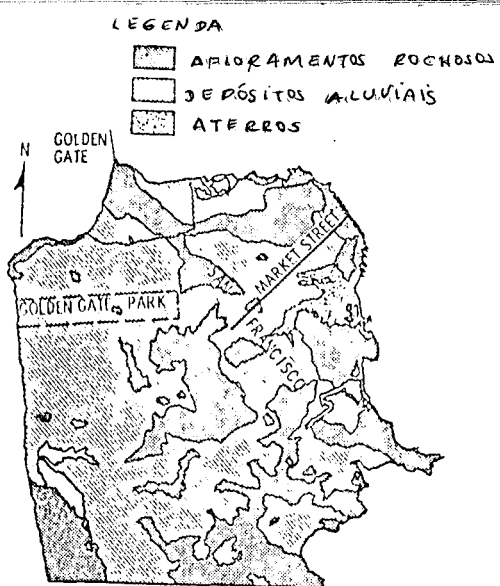
2.5 . Os efeitos potenciais do mecanismo focal e da trajetória no movimento do terreno, foram documentados em um estudo do terremoto de Imperial Valley (1940) por Trifunac e Brune / 22 /. Neste estudo, as complexas ondas sísmicas geradas por rupturas múltiplas de falhas, que ocorreram durante este evento, foram julgadas como tendo uma influência significativa no caráter geral dos movimentos de terreno resultantes, registrados em El Centro, a cerca de 13 km da falha causadora dos abalos, Fig. 2.6 .

Desse e de outros exemplos torna-se claro que vários fatores associados com o mecanismo focal, trajetória das ondas sísmicas, e condições locais podem se combinar de diferentes maneiras para diferentes sismos; portanto, estes fatores requerem uma consideração cuidadosa quando se estimam critérios de movimentos sísmicos do terreno para a instalação de uma central nuclear , (ver Fig. 2.7 e Tabela I).

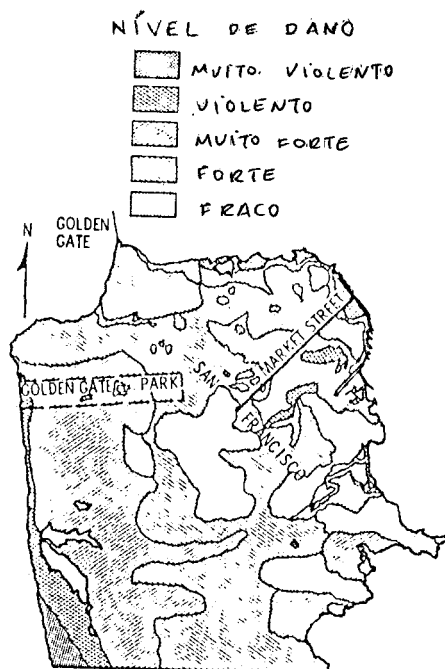
2.3.1- Mecanismo Focal

Os sismos tectônicos se iniciam quando ocorre um deslizamento ao longo de uma falha ativa, com a consequente liberação de energia elástica. Recentes avanços no conhecimento indicam que este processo de deslizamento pode ter um efeito importante nos movimentos do terreno nas vizinhanças do epicentro / 23 /.

Quando ocorre um sismo, seu efeito depende do tipo de falhamento que gera as ondas sísmicas. Três tipos gerais de falhas: de rejeito direcional, reversa e normal aparecem na Fig. 2.8 . Exemplos puros destes tipos de falhas raramente ocorrem; mais propriamente, o deslocamento da falha possui componentes paralela e normal ao traço de falha. Além do mais, o deslizamento da falha ocorre, tipicamente, ao longo de uma superfície irregular ao invés de plana, podendo existir falhamentos secundários / 24 /.

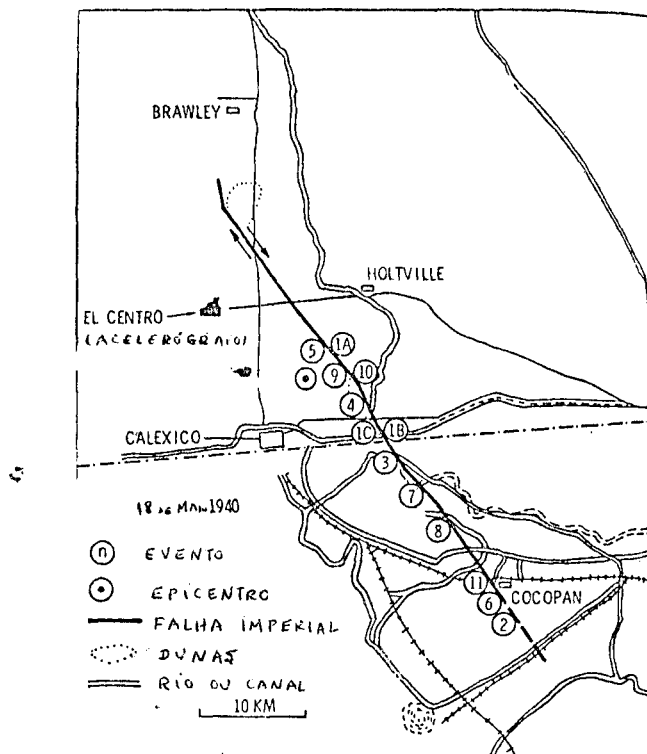


(a) Mapa Geológico

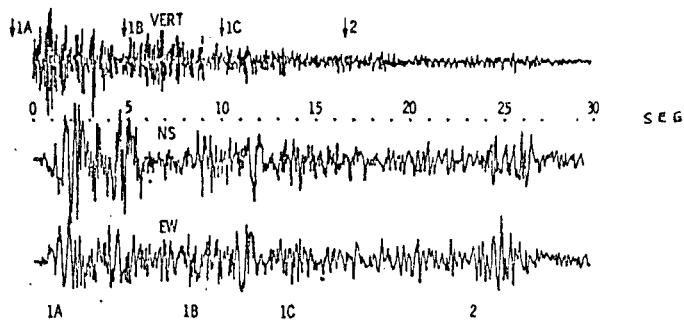


(b) Mapa de Intensidade

FIG. 2.5 - Relação entre a geologia local e a intensidade dos abalos sísmicos durante o terremoto de 1906 em São Francisco.



(a) Proximidade do falhamento com o acelerógrafo



(b) Acelerogramas de El Centro

FIG. 2.6 - Relação entre o mecanismo focal e acelerogramas de El Centro, no terremoto de Imperial Valley (1940).

TABELA - I

Fatores que afetam o movimento sísmico do terreno

CATEGORIA	FATOR
Mecanismo Focal	Natureza do falhamento rupturas simples ou múltiplas Parâmetros focais - diminuição na tensão deslocamento total ao longo da falha comprimento da ruptura ângulo de falha proximidade do plano de falha
Trajetória desde o foco até o local de observação	Reflexão e refração ao longo de interfaces superficiais sub-superficiais ondas de superfície atenuação volumosa atenuação topografia orientamento Difração e atenuação amplificação geométrica Equações não-lineares
Condições locais	Propriedades físicas do solo Efeitos superficiais Características dos estratos Efeitos de amplificação

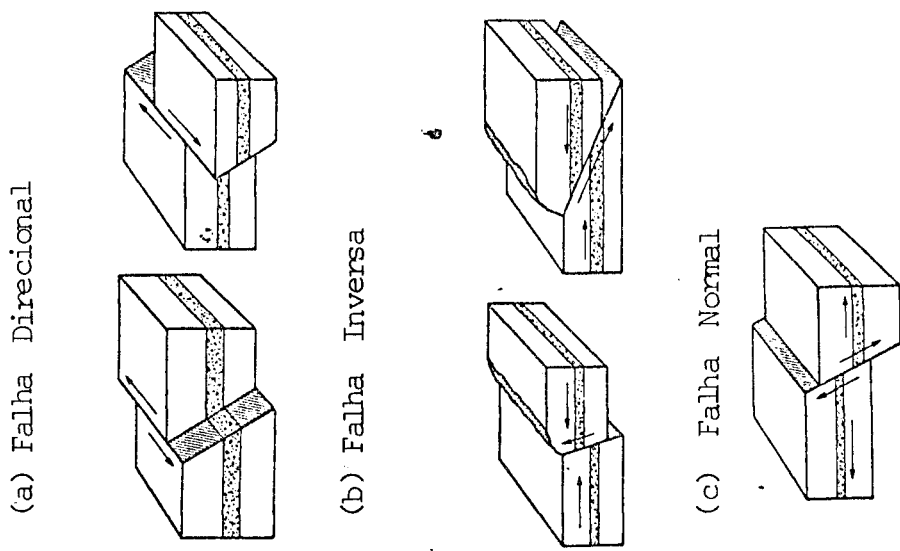


FIG. 2.8 - Tipos de falhas.

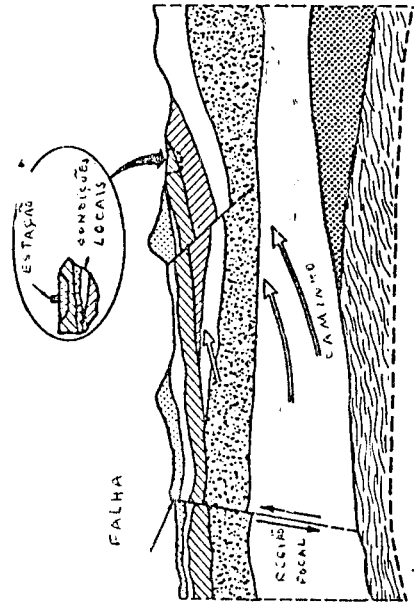


FIG. 2.7 - Geração e transmissão de ondas sísmicas.

Alguns dos outros parâmetros focais que afetam a natureza das ondas sísmicas geradas por falhamento aparecem na Tabela I. Aqueles que são de particular interesse para obras de engenharia foram descritos por Housner /25/ e são sumarizados a seguir:

Diminuição na tensão - quando ocorre o deslizamento, a tensão na rocha cortada pela falha muda de um valor inicial σ_1 para uma tensão menor σ_2 . A magnitude dessa diminuição de tensão ($\sigma_1 - \sigma_2$) tem um efeito na amplitude das ondas sísmicas geradas.

Deslocamento total ao longo da falha - a magnitude e a energia liberada por um sismo, provavelmente, estão relacionadas com o deslocamento total ao longo de uma falha, grandes deslocamentos correspondendo a grandes magnitudes e a grande quantidade de energia liberada. Um grande deslocamento também resulta em uma longa duração de movimentos e em grandes amplitudes para ondas de período longo.

Comprimento da ruptura de falha - um sismo de grande magnitude é gerado por ruptura de falha de grande comprimento. O comprimento da ruptura também pode ter um efeito significativo na duração de abalos fortes que podem ser correlacionados com os danos potenciais dos movimentos de terreno.

Rupturas múltiplas - estudos recentes sobre os terremotos do Alaska (1964) e Imperial Valley (1940), indicaram que esses eventos se originaram por séries de rupturas múltiplas ao invés de ruptura simples. É evidente que a natureza de um abalo será diferente se as ondas sísmicas são geradas por rupturas múltiplas e propagação errática da linha de desabamento, ao invés de uma propagação uniforme com um deslizamento relativo suave de todos os pontos ao longo do plano de falha.

Forma da falha - um sismo de grande magnitude geralmente ocorre em uma área de falha alongada cujo comprimento exceda grandemente sua largura. Sismos menores, com magnitude abaixo de 6, geralmente afetam uma área cujas dimensões são aproximadamente as mesmas em todas as direções /26/, contudo, alguns sismos pequenos têm áreas de falha estreitas e alongadas. As dimensões da área afetada tem grande influência na natureza do abalo, particularmente com relação à faixa de frequência, duração e área em que o abalo se faz sentir.

Proximidade do plano de falha - na região próxima ao epicentro, a proximidade do plano de ruptura da falha com a superfície do terreno tem uma grande influência na intensidade de movimento causada pelo abalo sísmico. As amplitudes de aceleração dependem mais da proximidade do plano de falha que da própria magnitude, especialmente na região próxima ao mesmo.

2.3.2- Trajetória Desde O Foco Até O Local de Observação

Quando ocorre um sismo, a energia acumulada é liberada na forma de ondas sísmicas bem como de calor, trabalho mecânico, etc. As ondas de volume (P, SH, SV) e as superficiais (Love e Rayleigh) são tipos de ondas sísmicas e são geradas por complexos processos físicos que ocorrem durante e após uma ruptura. As ondas de volume, são de alta frequência (1-10Hz) e são as principais transmissoras de energia numa faixa de 80 a 128 km do foco. As proporções relativas entre as diversas ondas de volume depende do mecanismo de falhamento. Em geral, uma falha de mergulho gera proporcionalmente mais energia na forma de ondas P e SV enquanto uma falha direcional tende a gerar mais energia na forma de ondas SH /27/. A distâncias maiores que 100 km do foco, geralmente as ondas Rayleigh e Love tornam-se as principais transmissoras de energia. Ao longo dessa trajetória, as ondas P e S são refletidas e refratadas quando encontram diferentes interfaces de camadas, resultando em atenuação da amplitude das ondas. Irregularidades na propagação, tais como variações na topografia superficial e descontinuidades na geometria e propriedades elásticas das camadas subsuperficiais complicam muito os processos de refração e reflexão que afetam estas ondas.

Além das modificações sofridas devido aos vários materiais encontrados ao longo da trajetória, também as amplitudes das ondas sísmicas se modificam como resultado de efeitos de difusão geométrica. Atenuações adicionais ocorrem por causa das proprie-

dades dissipativas do solo e material rochoso na superfície da Terra. Dado este último efeito e às características não lineares desses materiais subsuperficiais, a energia da onda sísmica que chega até a superfície depende também da amplitude e faixa de frequência das ondas geradas na fonte.

2.3.3- Condições do Sítio

As ondas P e S no caso de sismos próximos ou locais são responsáveis pela maior parte da energia de ondas sísmicas que chega a um dado sítio, transmitida através do material rochoso subsuperficial. Para que essas ondas cheguem à superfície elas precisam ser transmitidas através da cobertura de solo. Este pode ser constituído de complexas sequências de areia, cascalho, argila e silte, todos os quais são materiais altamente não lineares e inelásticos. Assim, as condições locais de solo podem exercer uma importante influência nas ondas sísmicas transmitidas do substrato rochoso para o terreno superficial. Esta influência potencial do material local do solo foi descrita em um grande número de estudos, como os de Whitman /28/, Seed /29/ e outros.

Para um local com camadas horizontais de solo bem definidas e com ondas sísmicas que chegam do embasamento rochoso com comprimentos de onda comparáveis com a extensão horizontal do local, o principal mecanismo para a transmissão à superfície, de vibrações horizontais de terreno, é a incidência vertical de ondas cisalhantes /29/. Posteriormente, estas ondas cisalhantes não são muito influenciadas pelos efeitos de heterogeneidades no subsolo ou por pequenas irregularidades nas bordas das camadas. Para este caso, técnicas analíticas unidimensionais podem ser usadas para estimar movimentos sísmicos horizontais em todo o perfil do solo. Se as condições são diferentes, os efeitos da cobertura de solo nos movimentos do terreno são consideravelmente mais complexos e a análise deve ser bidimensional. Uma boa discussão do problema é apresentada por Werner /26/.

Algumas das variáveis, dadas as condições locais de solo, que influenciam a movimentação em um determinado sítio são listadas na Tabela I. Entre as mais importantes estão as seguintes: Profundidade do Substrato rochoso - correlações entre danos estruturais e a profundidade do substrato rochoso em locais com características semelhantes de solo, indicaram que edifícios altos com frequências naturais de oscilação baixas sofreram os maiores danos quando localizados sobre solos profundos. Por outro lado, edifícios baixos e rijos com frequências naturais de oscilação altas, mostraram-se mais vulneráveis quando localizados sobre solos rasos. Isto sugere que a profundidade do embasamento define a faixa de frequência das ondas sísmicas transmitidas para a superfície que carrega maior energia / 28 /.

Propriedades não lineares de esforço (tensão dos materiais do solo) - estudos passados demonstram que o módulo efetivo do solo de cresce e o amortecimento do material aumenta com níveis crescentes de esforços / 29 /. Por causa desta dependência, as faixas de amplitude e frequência dos movimentos superficiais foram correlacionadas com a força dos movimentos subsuperficiais, ou seja, um aumento nas amplitudes desses movimentos causa uma redução de frequência à superfície e uma redução na amplificação (ou até atenuação) dos movimentos iniciais tais como são transmitidos através das camadas de cobertura do solo / 13 /.

Geometria de camadas e topografia do terreno - como já foi mencionado, o grau de inclinação das camadas ou a presença de feições topográficas importantes pode influenciar grandemente os processos de reflexão e refração e a complexidade das ondas transmitidas para a superfície. Por exemplo, se as camadas de solo são fortemente inclinadas, os movimentos horizontais não podem ser atribuídos somente às ondas S originais mas a interações complexas de ondas P, S e secundárias.

2.4- Os Dados Básicos Sobre Movimentos Sísmicos

Os dados disponíveis para servir de base na estimativa do risco sísmico e das vibrações sísmicas no local de construção de uma central nuclear, consistem de registros observacionais e instrumentais, de sismos naturais e artificiais, relações empíricas baseadas em registros e várias investigações pedológicas e geológicas. A seguir, descreve-se cada uma dessas fontes para subsidiar as discussões subseqüentes dos fatores envolvidos nos critérios de estimativa dos parâmetros sismorresistentes.

2.4.1- Registros Sísmicos Conhecidos

Os mais antigos registros sísmicos consistiam somente de efeitos documentados de danos e relatos dos efeitos sentidos, os quais, podem ser convertidos em intensidades e acelerações máximas. Como já foi discutido, são numerosas as incertezas relacionadas com este tipo de conversão.

O primeiro sismógrafo foi construído em 1897 e, em 1900, instalou-se a Rede Internacional de Sismógrafos. Desde essa data, o número de estações sismográficas no mundo tem crescido a ponto de incluir hoje cerca de 3000 estações. A localização dessas estações cobre uma variada gama de condições geológicas e de terreno. Em regiões sísmicas importantes foram instaladas redes de acelerógrafos para estudos dos efeitos locais. Os acelerógrafos do tipo geral correntemente em uso foram projetados e instalados pela primeira vez em 1933 em Long Beach, Califórnia; o terremoto daquele ano forneceu os primeiros acelerogramas / 30 /.

No Brasil, vários tipos de sismógrafos têm operado no Observatório Nacional do Rio de Janeiro desde 1906.

Em 1956 instalou-se, em escala mundial, estações tipo WSSN (World Wide Standard Seismograph Network). Uma estação desse tipo começou a operar em Natal (RN), a partir de 1965. Em 1966 começou a operar experimentalmente, em Brasília, uma estação do Sistema Sul-Americano Tipo Arranjo. Esta, entrou em operação permanente a partir de setembro de 1970. Ainda em Brasília, instalou-se, em 1972, uma estação tipo WSSN. Em 1975, outra estação começou a operar em Valinhos (SP) em caráter experimental, entrando em operação permanente a partir de 1978.

Dado a ocorrência de tremores após o enchimento de reservatórios de água como Cajuru, Capivari, Porto Colombia, Volta Grande, Capivara, Paraibuna-Paraitinga e Salto Santiago foram instalados junto aos mesmos e em outros reservatórios em construção, sismógrafos para que se possa estudar melhor esses casos.

2.4.2- Registros de Sismos Simulados

Existe uma falta de medidas de sismos nas proximidades das áreas epicentrais para terremotos de magnitude moderada a grande. Outrossim, notou-se variações nas características de registros de movimentos de terreno para sismos comparáveis ao redor do mundo. Assim, é necessário um número maior de registros para definir adequadamente as propriedades de fortes abalos de terreno.

Para tentar preencher parcialmente esse lapso nos registros disponíveis, pesquisas têm utilizado a teoria de processos estocásticos para gerar conjuntos de sismos simulados. Estes registros de sismos simulados encorpam as propriedades básicas dos registros de movimentos sísmicos. Para gerar estes registros artificiais são utilizados processos aleatórios estacionários e não estacionários, posto que processos não estacionários são requeridos particularmente para o modelo de pequenos sismos / 31-33 /.

Talvez, os registros mais completos de sismos simulados sejam aqueles desenvolvidos por Jennings et al. no California Institute of Technology / 31 /. A formulação destes registros está baseada na observação de que nas distâncias suficientemente grandes da falha, tal que os detalhes do seu deslocamento não aparecem nas medidas dos movimentos, uma componente da aceleração registrada parece ser uma função aleatória tendo as seguintes características:

- a- A variação dependente do tempo de movimentos sísmicos consiste de um segmento inicial de rápido aumento para altas amplitudes, um segmento de abalo uniformemente forte nessas altas amplitudes para um certo período e uma atenuada porção final do movimento.
- b- A faixa de frequência do movimento descrito por um espectro de Fourier suavizado indica as faixas de frequência onde concentra-se a maior parte da energia.
- c- Como é ilustrado por computação digital, as respostas de modos de estruturas excitadas pelas acelerações de terreno consistem de um período de tempo durante o qual a amplitude de vibração inicialmente ascende, seguido por um período de vibração gradualmente atenuada.

O procedimento seguido por Jennings et al. para obter registros de sismos simulados consiste, primeiramente, em gerar um processo de ruído independente da frequência ao acaso (random white noise) cuja duração é julgada consistentemente com a magnitude e distância da falha para o tipo de sismo que se simula. Este processo é filtrado para produzir o conteúdo de frequência desejado, como especificado por comparações com registros reais. A função filtrada é então modulada pela multiplicação de uma função modeladora de amplitude que produz uma ascensão inicial no acelerograma, uma linha de atenuação e uma forte porção central. Registros de sismos simulados aparecem na Fig. 2.9.

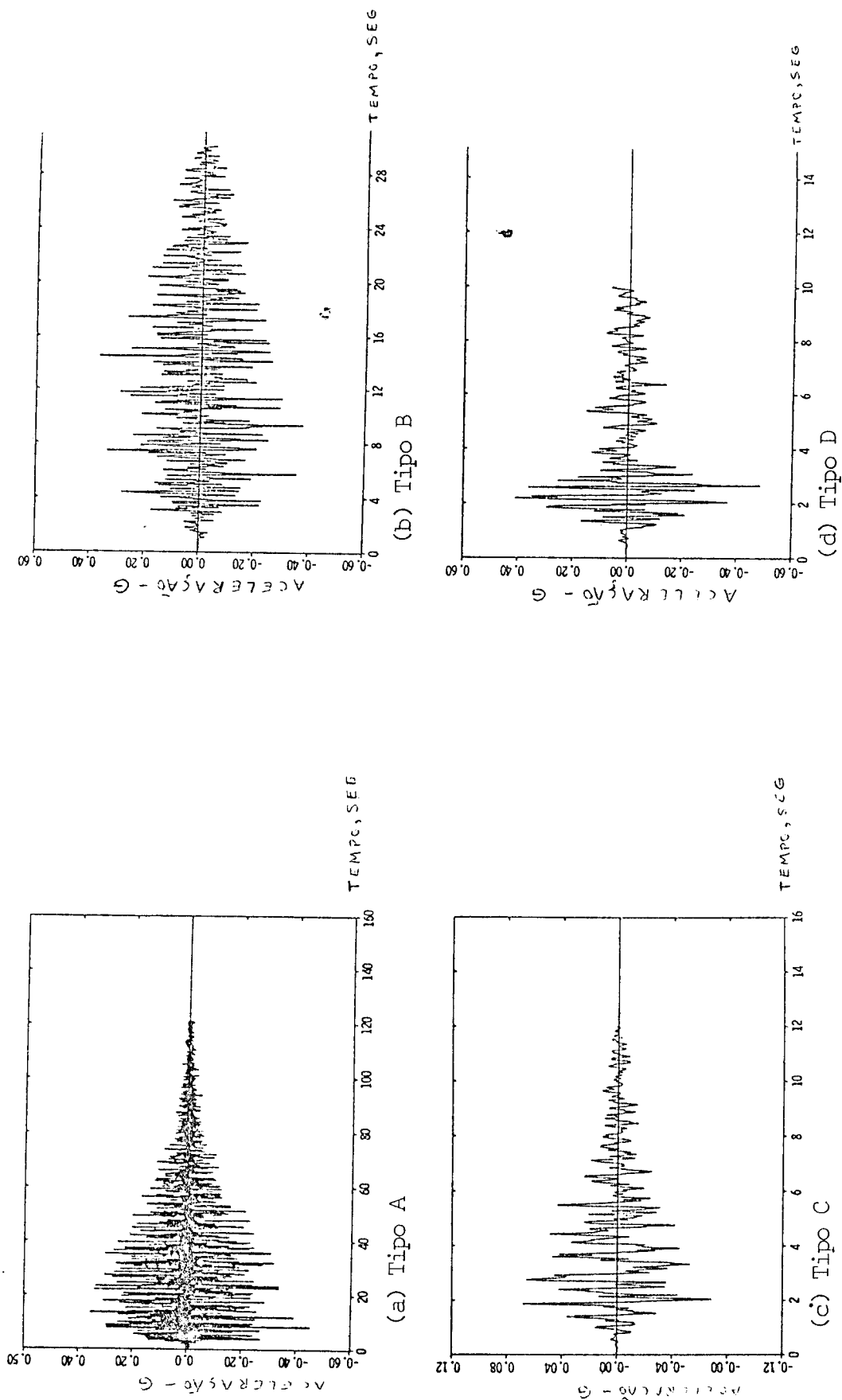


FIG. 2.9 - Registros de sismos simulados.

Este método de gerar movimentos sísmicos habilita o engenheiro a construir registros artificiais que representam sismos com magnitudes e distâncias de falha específicas. Além disso, ele pode gerar muitos movimentos que correspondem a critérios específicos de entrada e pode assim realizar cálculos de resposta que levam em conta variações estatísticas. No entanto, a maioria dos registros artificiais gerados não considera as condições locais, baseando-se geralmente em registros de sismos verdadeiros do oeste norte-americano, especialmente da Califórnia.

2.4.3- Curvas Empíricas Derivadas de Registros Sísmicos Reais

A determinação de critérios de movimento vibratório para uma central nuclear envolve, entre muitos estágios, o uso de curvas empíricas desenvolvidas a partir de registros sísmicos reais. Tais curvas podem servir como auxílio na estimativa de picos de acelerações e durações de abalos potenciais de uma central. Além do mais, elas podem indicar a especificação das características do movimento subsuperficial da rocha a ser utilizada como entrada para análises de resposta local.

Deve-se notar que estas curvas empíricas estão baseadas em um número limitado de registros de sismos que correspondem, principalmente, a eventos ocorridos na Califórnia e em outros estados do oeste norte-americano. As curvas geralmente envolvem correlações, ou com a intensidade ou com a magnitude e distância da falha, embora interrelações entre estes parâmetros e características de movimentação de terreno ainda não possam ser definidas com certeza. Portanto, curvas empíricas para a estimativa de características de movimento de terreno precisam ser usadas com cuidado e bem interpretadas.

2.4.3.1- Movimentos Máximos de Superfície

Tem sido desenvolvido um certo número de correlações entre movimentos máximos de superfície e intensidade, magnitude e distância. Geralmente, quase todas essas correlações consideram aceleração horizontal máxima, existindo poucos estudos de velocidades e de deslocamentos máximos. Também, até recentemente, havia poucos dados sobre movimentos verticais e assim a prática corrente de projeto baseia-se num valor da aceleração vertical máxima que é uma fração, geralmente de $2/3$ da aceleração horizontal máxima.

2.4.3.1.1- Correlações Entre Resposta do Terreno e Intensidade

Costuma-se utilizar interrelações entre intensidades MM e medidas quantitativas da severidade de sismos, mais comumente de aceleração horizontal. Algumas destas correlações aparecem na Fig. 2.10 /34-38/. A dispersão destas várias correlações indica claramente as incertezas associadas com o uso de intensidades para propósitos de projeto.

Entre os vários estudos sobre essas correlações, talvez o de Trifunac e Brady / 38 / seja o mais compreensivo. Este estudo baseado em 187 conjuntos de registros do oeste norte-americano, considera acelerações verticais e horizontais, velocidades e deslocamentos. Além disso, os vários registros considerados por esses autores foram classificados de acordo com as condições dos locais das estações e foram, então, utilizados para correlações entre resposta máxima de terreno e intensidade MM para cada condição. Correlações médias aparecem na Fig. 2.11 .Além disso, faixas de dados dispersos foram desenvolvidas por Trifunac e Brady para cada correlação e devem ser consideradas em projetos. As seguintes tendências são indicadas pelos dados de Trifunac e Brady: (1) para uma dada intensidade MM o pico de resposta horizontal excede o pico de resposta vertical;

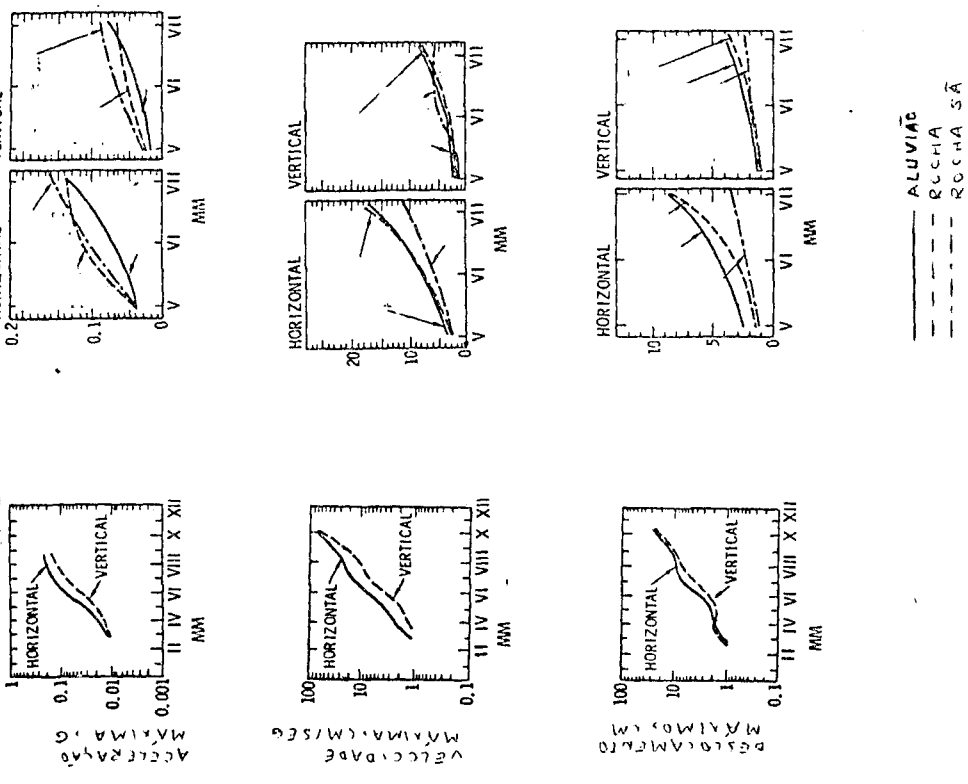


FIG. 2.11 - Correlações médias entre resposta do terreno e intensidade MM.

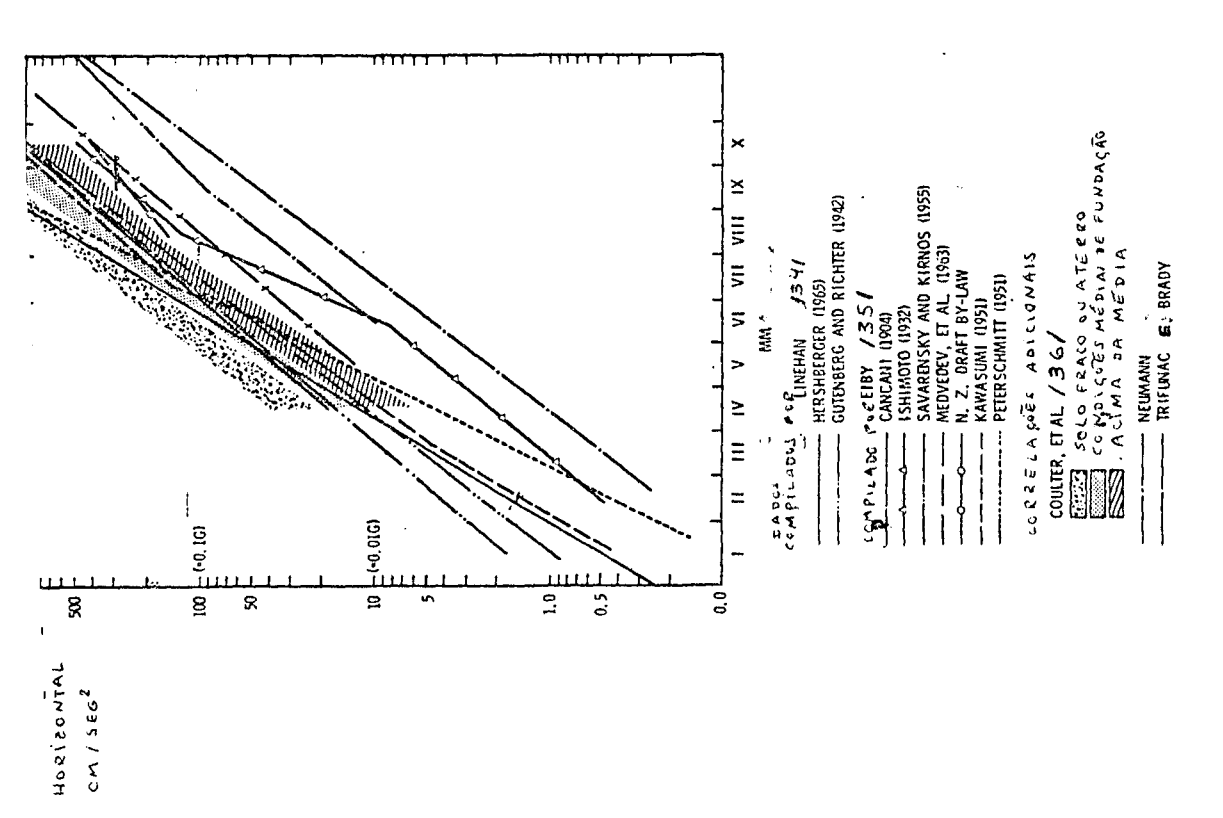


FIG. 2.10 - Correlações entre aceleração horizontal e intensidade MM.

(2) as acelerações registradas em rocha fresca são maiores que as registradas em aluvião; (3) as velocidades são pouco maiores para aluviões, particularmente quando considerada a dispersão de dados; e (4) os deslocamentos registrados em áreas aluviais eram maiores de que em outros locais.

•

2.4.3.1.2- Correlações entre Resposta de Terreno, Magnitude e Distância

Estas correlações têm sido largamente utilizadas e são resumidas a seguir:

a- aceleração horizontal máxima e condições gerais locais

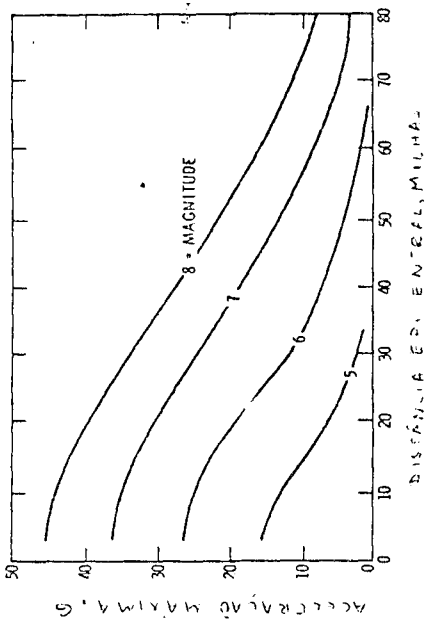
Gutenberg e Richter, em 1956 / 6 /, foram os primeiros a abordar, sistematicamente, este tipo de correlação. Esta, utiliza uma curva empírica para atenuação com a distância para reduzir todas as acelerações registradas para acelerações equivalentes no embasamento (epicentro). Em 1965, Housner / 39 /, desenvolveu correlações entre estimativas do limite superior de aceleração máxima com relação à magnitude e distância da falha (Ver Fig. 2.12 a). As correlações de Housner têm sido, talvez, as mais largamente empregadas em projetos; no entanto, sua estimativa de aceleração máxima para um terremoto de magnitude 8 (0,5g) é agora considerada baixa dado os altos níveis de aceleração registrados durante o terremoto de Sañ Fernando, em 1971. De significação particular, foi a afirmação de Housner de que os valores de aceleração máxima para sismos com magnitude entre 6,5 e 7,0 não devem ser significativamente mais baixos que aqueles de um evento de magnitude 8; este conceito é ainda aceito.

Numerosas outras correlações têm sido desenvolvidas. Por exemplo, em 1965, Blume / 40 / estendeu o trabalho original de Gutenberg e Richter para incluir os efeitos que as condições locais, distância epicentral, profundidade focal e magnitude podem ter na aceleração. Na mesma época, Kanai / 41 / desenvolveu correlações similares incluindo efeitos locais em

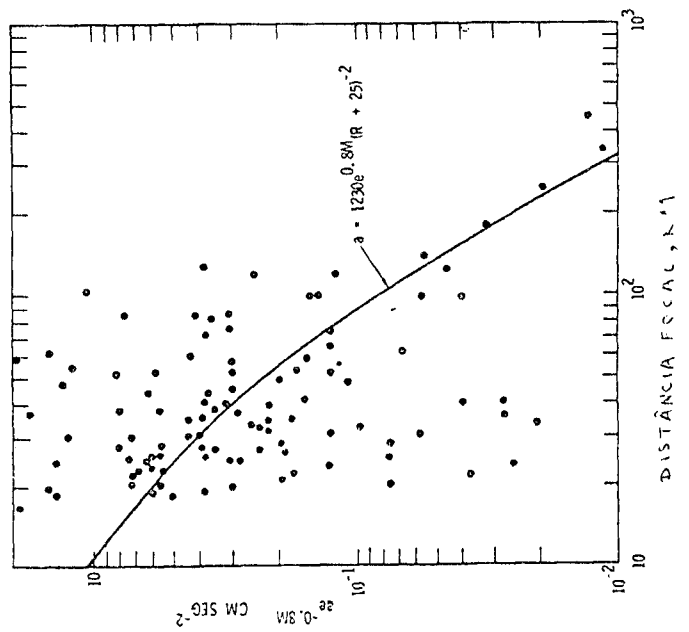
termos de um período fundamental local quando sujeito a ondas cisalhantes propagando-se verticalmente. Algumas correlações posteriores foram feitas por Milne e Davenport / 42 /, em 1969, e por Esteva / 43 /, em 1970. O trabalho de Milne-Davenport indica que as relações entre aceleração, magnitude e distância baseadas em registros do oeste norte-americano não se aplicam ao leste canadense, onde as áreas atingidas por um sismo são muito maiores. O estudo de Esteva considera distâncias hipocentrais ao invés de epicentrais em suas correlações com aceleração e magnitude (Ver Fig. 2.12 b); suas correlações basearam-se principalmente em dados utilizados em trabalhos de Housner e Gutenberg-Richter.

O terremoto de San Fernando, de 1971, teve um grande impacto neste tipo de correlações devido à grande quantidade de dados que foi obtida e os altos níveis de aceleração máxima que foram registrados. Entre os trabalhos desenvolvidos estão os de Cloud / 44 / e Page et al. / 45 / (Fig. 2.12 c, d). Estas correlações indicam que os valores de aceleração máxima registrados durante sismos de magnitude entre 6,0-6,9 não diferem significativamente daqueles registrados entre 7,0 e 7,9. Tendências semelhantes são notadas nas correlações locais de Trifunac e Brady / 46 / para resposta de terreno, magnitude e distância. Jennings e Housner / 47 / indicam que os valores de aceleração máxima registrados próximo à região epicentral do terremoto de San Fernando (magnitude 6,5) não seriam significativamente mais altos se a magnitude fosse 8 ou mais.

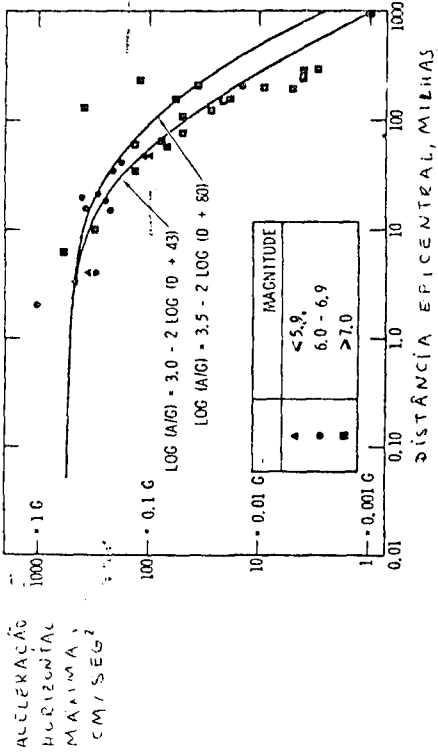
Em recente estudo, Trifunac e Brady / 46 / comparam várias correlações baseando-se num sismo de magnitude 6,5. Estas comparações, mostradas na Fig. 2.13, indicam espalhamento dos valores de acelerações máximas que são duas vezes maiores que os valores observados (em escala log). A maioria das correlações comparadas por Trifunac e Brady parecem consistentes com conjuntos médios de dados para distâncias entre 20 e 25 Km. Para distâncias menores, os dados são limitados e muito divergentes.



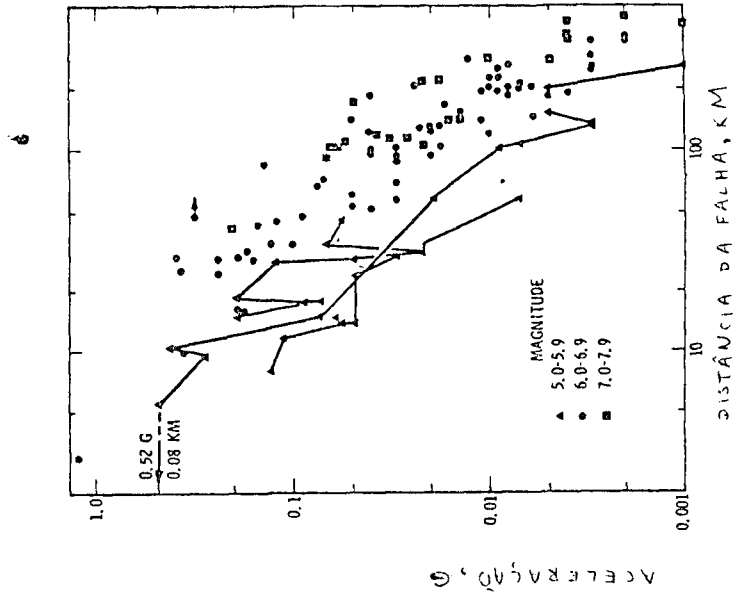
(a) Housner



(b) Esteva



(c) Cloud



(d) Page et al.

NOTA:
 a = aceleração máxima horizontal, cm/seg²
 M = magnitude
 R = distância - crabi, km

FIG. 2.12 - Correlação entre a aceleração horizontal máxima e magnitude e a distância

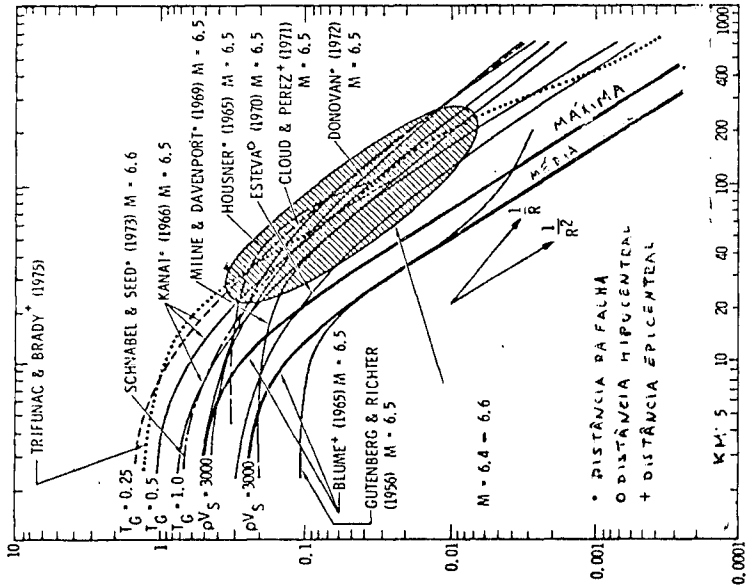
b - Aceleração Horizontal Máxima Em Afloramentos Rochosos

Desde que os movimentos Subsuperficiais do embasamento servem como dados de entrada para as análises de resposta do local, eles devem ser estimados através de estudos de geologia e sismologia da região. Na ausência de medidas de movimento no embasamento, registros em afloramentos rochosos são frequentemente usados como guias de definição da aceleração máxima e das características gerais destes movimentos de entrada. Dados empíricos baseados em características de aceleração e atenuação observados nos movimentos em afloramentos rochosos são tipicamente aplicados para este propósito.

O trabalho de Schnabel e Seed / 48 /, provavelmente, representa dados mais largamente empregados empregados para definir o nível de aceleração de movimentos de rocha num local. Seu trabalho baseia-se em características observadas e movimentos em rocha registrados no oeste dos E.U.A. e no México, e está sumarizado em curvas que relacionam valores de aceleração máxima com a magnitude e a distância da falha. Curvas desse tipo foram primeiramente desenvolvidas por Seed e seus associados em 1968 / 49 /; estas curvas foram atualizadas por Schnabel e Seed para incluir dados do terremoto de San Fernando (1971) e de outros eventos recentes, bem como melhores cálculos sobre movimentos em afloramentos rochosos. Os resultados do estudo de Schnabel-Seed são fornecidos na forma de valores médios de taxas de atenuação de valores de aceleração máxima, Fig. 2.14 a. Além disso, apresentam-se curvas que mostram a dispersão dessas taxas de atenuação; a dispersão reflete a influência de diferentes mecanismos focais, ambientes geológicos e trajetórias, Fig. 2.14 b.

Dados de atenuação de movimentos em rocha para a região central dos E.U.A. foram estimados por Nuttli / 50, 51 /. Na ausência de medidas instrumentais de aceleração do movimento do terreno nessa região, os dados foram baseados em correlações aproximadas entre velocidade de partícula e intensidade para material rochoso fresco. A Fig. 2.15 mostra os resultados para diferentes componentes de frequência das ondas sísmicas. Infelizmente, estes dados não em condições de serem prontamente usados em um sistema convencional de análise de resposta de um

ACELERAÇÃO
MÁXIMA
HORIZONTAL, G



NOTA: T_g = PERÍODO FUNDAMENTAL DO TERRENO, SEG

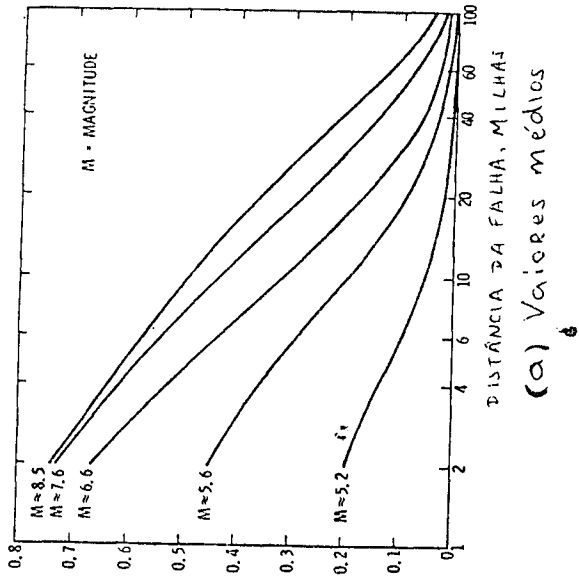
p, V_s = DENSIDADE ESPECÍFICA MÉDIA E VELOCIDADE DE CUMPLAMENTO (FT/SEG), RESPECTIVAMENTE, PARA DEPOSITOS LOCAIS DE SOLO

$M =$ magnitude

$R =$ distância epicentral

FIG. 2.13 - Comparação de distintas correlações entre a aceleração horizontal máxima

ACELERAÇÃO
MÁXIMA, G



ACELERAÇÃO
MÁXIMA, G

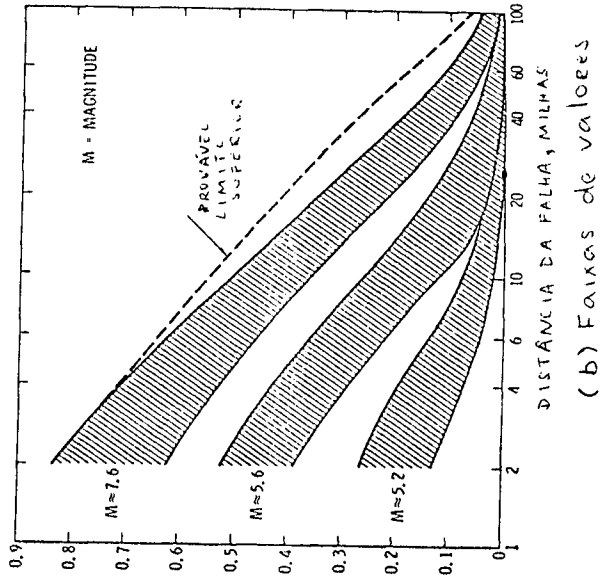


FIG. 2.14 - Correlação entre acelerações horizontais máximas, magnitude

local.

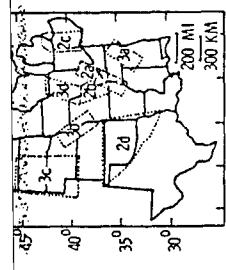
c- Correlações Entre Velocidade Horizontal e Deslocamento

Os valores de velocidade horizontal e deslocamentos fornecem a melhor medida de forças laterais induzidas sísmicamente em estruturas de frequência baixa a intermediária que a pressão pelos valores de aceleração. Apesar disso, tem havido poucos estudos para correlacionar velocidades horizontais e deslocamentos com magnitude e distância. Talvez isto seja dado às incertezas associadas à integração dos registros de aceleração; apenas recentemente foram desenvolvidos procedimentos de correção que servem de base para a obtenção de registros integrados de velocidade e de deslocamento mais confiáveis /52/.

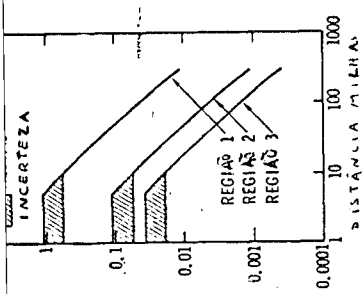
Entre as poucas correlações entre velocidade e deslocamentos com magnitude e distância estão as de Ambraseys /53/ e Esteva /43/. Ambraseys fornece correlações baseadas em estimativas do limite superior de velocidades horizontais (Fig.2.16a) mas indicou a distância correspondente a uma ou duas profundidades focais a partir da falha, existem fracas correlações entre velocidade, magnitude e distância. Esteva fornece as correlações da Fig.2.16 b, e sugeriu que o deslocamento máximo d pode ser obtido da velocidade máxima v , da aceleração máxima a , e distância hipocentral em quilômetros r , utilizando-se da seguinte expressão:

$$ad/v^2 = 1 + (400/R^{0.6})$$

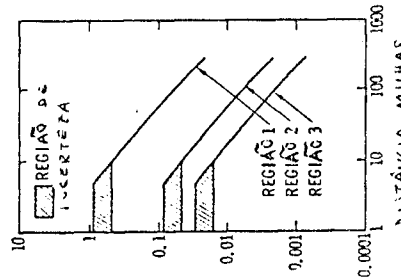
De acordo com Newmark e Rosenblueth /2/ para a maioria dos sismos, ad/v^2 tem valores entre 5 e 15.



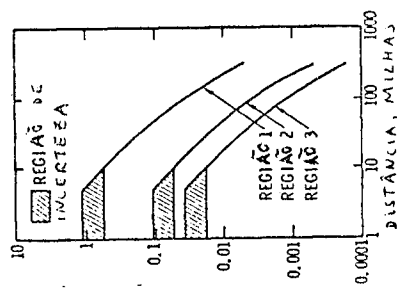
(a) limites das regiões



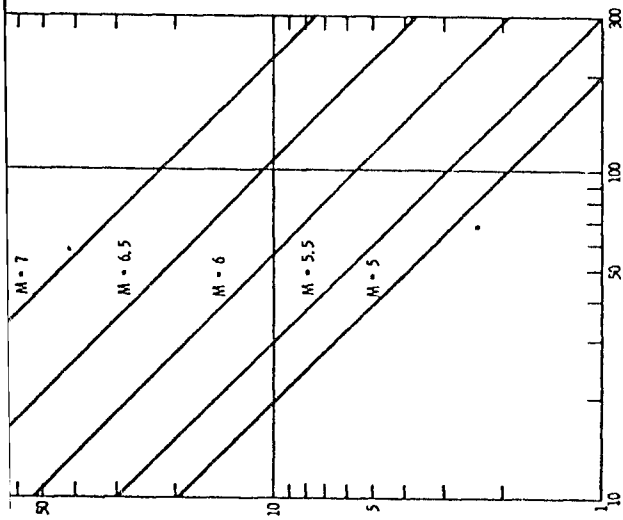
(b) sinais de 0,3 Hz



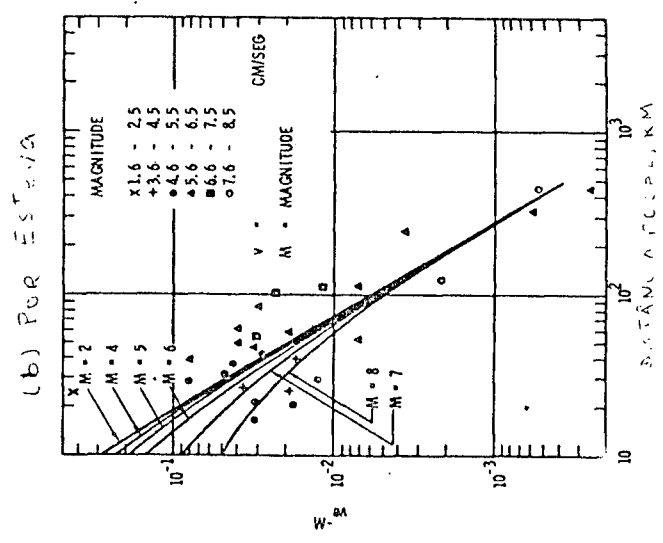
(c) sinais de 1 Hz



(d) sinais de 3 Hz



(a) POR AMBROSINIUS



(b) POR ESTEVA

FIG. 2.15 - Dependência da aceleração com a frequência, para a região central dos E.U.A. .

FIG. 2.16 - Correlação entre a velocidade máxima horizontal, magnitude e distância.

2.4.3.2- Duração dos Abalos Sísmicos

A duração dos abalos é uma medida importante dos possíveis danos que seriam causados pelos sismos a uma estrutura. Estudos realizados mostram que a duração dos abalos sísmicos está relacionada com a magnitude, a distância hipocentral, condições locais, intensidades MM e as frequências das ondas sísmicas.

Quando se comparam e avaliam várias determinações de durações de abalos sísmicos, deve-se ter em mente possíveis diferenças nas definições desse parâmetro. Por exemplo, Esteva e Rosenblueth / 54 / realizaram um estudo em 1964 no qual definiram a duração de um "equivalente" de intensidade por unidade de tempo. Housner / 39 /, notou que a variação com o tempo dos níveis de vibração e energia consiste de (1) um segmento inicial no qual os níveis de energia e vibração alcançam rapidamente grandes valores; (2) um segmento uniforme de abalos sísmicos nos altos níveis; e (3) um período de vibração gradualmente em atenuação. Ele definiu a duração de abalos sísmicos como correspondendo ao item (2) acima. Bolt / 18 / definiu duração chaveada ("bracketed duration") como aquela que corresponde ao lapso de tempo entre a primeira e a última oscilação nos níveis maiores que uma amplitude determinada de aceleração. Page et al. / 45 / adotaram definição similar e usaram 0,05g como o nível de aceleração inicial de referência. Finalmente, Trifunac e Brady / 19 / definiram duração em termos da quantidade $S(t) = \int_0^t f(t) dt$, onde $f(t)$ corresponde a registros de aceleração, ou de velocidade, ou do deslocamento do abalo e t' como finito. Eles cancelaram os primeiros e últimos 5% de amplitudes de $S(t)$, e definiram a duração como correspondendo ao intervalo de tempo entre o início e o final dos restantes 90%.

Além das diferenças em definições básicas da duração de abalos sísmicos, outras existem. Por exemplo, os estudos mais recentes como os de Bolt, Trifunac e Brady, tiveram muito mais dados disponíveis que os autores dos primeiros estudos. Além disso, as variáveis utilizadas para o estudo da duração de abalos sísmicos difere para os vários estudos. Housner considerou o registro da aceleração horizontal apenas como função da magnitude, enquanto Bolt considerou também o efeito do começo da amplitude da aceleração e as frequências das ondas sísmicas. O estudo de Trifunac-Brady relacionou a duração com os valores máximos de aceleração horizontal e vertical, velocidade e deslocamento e considerava efeitos de magnitude, distância epicentral, condições locais e intensidade MM.

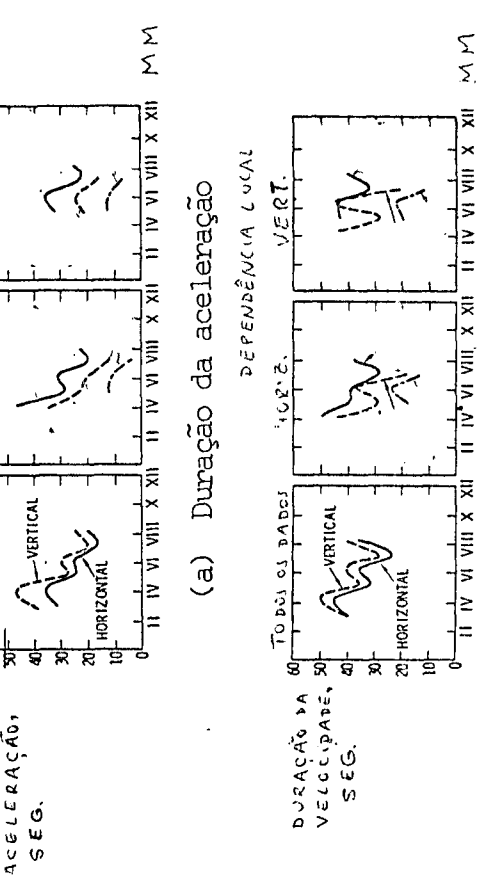
Tendo em mente essas diferenças, as correlações entre duração e magnitude desenvolvidas por esses três estudos, baseadas apenas em registros de aceleração horizontal, são comparadas na Fig. 2.17. Estas comparações indicam que os resultados de Housner são similares aos de Bolt para uma aceleração fechada maior que $0,05g$, mas ultrapassa em muito as curvas de Bolt para aceleração fechada maior que $0,10g$. Os resultados de Trifunac e Brady são apresentados para locais de aluvião e rocha fresca em distâncias epicentrais de 10 a 50 km. Suas durações, para aluviões, tendem a exceder as de Housner e Bolt para magnitudes inferiores a 6. Para magnitudes maiores elas são inferiores às curvas de Bolt e Housner para duração correspondente a aceleração maior ou igual a $0,05g$. As curvas de Trifunac-Brady para rocha fresca são comparáveis aos resultados de Bolt para uma duração de aceleração maior ou igual a $0,10g$. Cada grupo de medidas indica um aumento de duração com o aumento da magnitude.

A influência da distância da fonte de um sismo na duração do abalo foi estudada por um certo número de pesquisadores.

Geralmente, as tendências obtidas nesses estudos dependem da maneira pela qual a duração é definida. Por exemplo, Trifunac e Brady indicaram que, para as condições locais e magnitude sísmica típicas do oeste dos E.U.A., a duração aumenta com o aumento da distância da falha (Fig. 2.17). Eles atribuem esta tendência a efeitos de dispersão, como sinais que, com diferentes frequências viajam com diferentes velocidades de onda quando há uma expansão do segmento de forte movimentação no registro de movimento. Assim, nota-se que a definição de Trifunac e Brady de duração não é sensível para todas as amplitudes do abalo sísmico, sendo mais relacionada com a distribuição temporal do abalo na extensão do registro. Ao contrário, a definição de duração de Bolt baseia-se no intervalo de tempo entre a primeira e última excursões mais que num princípio de acelerações prescritas; ou seja, sua definição é sensível à amplitude absoluta do abalo sísmico. Bolt notou, então, que amplitudes de ondas sísmicas de alta frequência se atenuam mais fortemente com a distância do que ondas de baixa frequência; em consequência disso, ele raciocinou que a duração média de um abalo, de acordo com sua definição, se atenuaria do mesmo modo. Este padrão é o oposto daquele obtido por Trifunac e Brady; contudo, ambos parecem plausíveis dadas as diferentes definições utilizadas nos dois estudos.

Trifunac e Brady também correlacionaram a duração com a intensidade MM e condições locais. Correlações médias de seus resultados aparecem na Fig. 2.18, e, juntamente com os efeitos de dispersão de dados indicados no seu estudo, indicam as seguintes tendências:

(a) a duração do abalo tende a decrescer com o aumento da intensidade MM, independentemente de acelerações, velocidades ou deslocamentos. Os autores atribuem essa tendência a efeitos de dispersão e a espalhamento mais pronunciado para caminhos longos.



Valores médios para acelerações horizontais segundo Trifunac-Brady

segundo Bolt, distância epicentral < 25 Km e frequências de sinal > 1 Hz

— aceleração > 0,05 G
- - - - - aceleração > 0,10 G

FIG. 2.17 - Duração da aceleração horizontal em função da magnitude e distância.

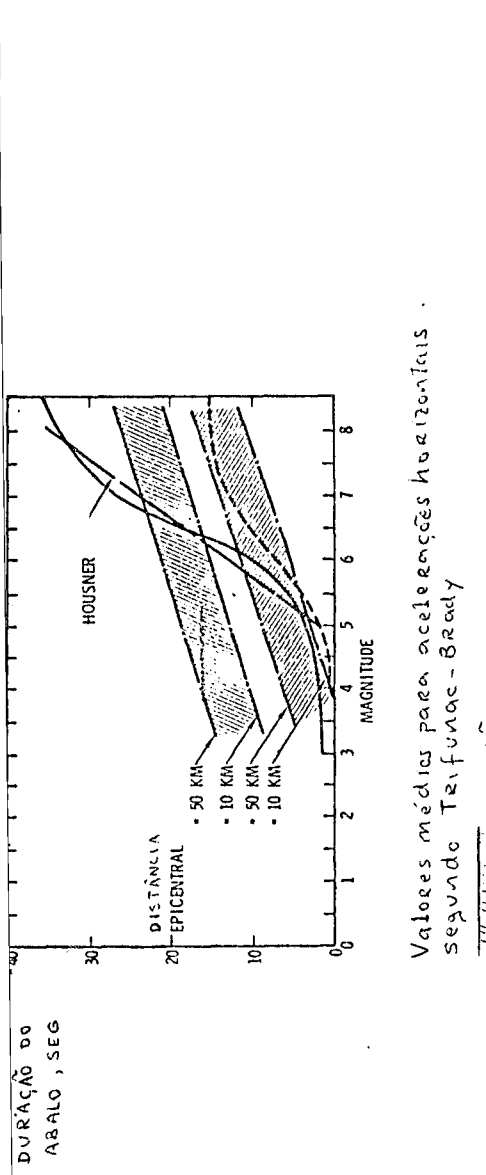


FIG. 2.18 - Correlações médias entre duração e intensidades locais.

(b) para uma dada intensidade MM, a duração média de movimento para um aluvião é cerca do dobro do que seria para rocha fresca.

(c) quando se consideram todos os dados, sendo indiferentes às condições locais, a duração média de um abalo é marginalmente maior para movimentos verticais que para os horizontais.

3. ANÁLISE ESTRUTURAL DINÂMICA

Nesta exposição, basicamente, seguimos a orientação delineada na apostila "Análise Dinâmica e Sísmica e Critérios de Segurança no Projeto de Estruturas de Centrais Nucleares" de autoria do Prof. Fernando Venâncio Filho utilizada no III Curso Sobre Centrais PWR, realizada em novembro de 1977 no IPEN. As figuras apresentadas foram transpostas dessa apostila.

Os conceitos básicos da análise estrutural dinâmica, tendo em vista a análise sísmica de estruturas, são introduzidos com o estudo da resposta de um sistema mecânico de um grau de liberdade a um movimento da base. Em seguida, expõe-se os métodos de análise dinâmica para estruturas modeladas por sistemas de elementos finitos com vários graus de liberdade. Estes métodos hoje convencionais, podem ser encontrados, em detalhe, em qualquer livro sobre a matéria aqui tratada.

3.1- Resposta de um Sistema de Um Grau de Liberdade

Seja o sistema de um grau de liberdade da Fig. 3.1 submetido a um movimento da base. A massa do sistema é m , a rigidez é proporcionada pela mola de constante k e o coeficiente de amortecimento viscoso é c . A base está submetida a um movimento definido pelo deslocamento v_b ao qual corresponde uma aceleração a . O movimento decorrente da massa m é dado por $v_t = v_b + v$, sendo v_t o deslocamento absoluto e v o relativo. A condição de equilíbrio dinâmico das forças que atuam na massa m fornece a equação diferencial

$$\ddot{v} + 2\zeta \omega \dot{v} + \omega^2 v = -a \quad (3.1)$$

onde

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.2)$$

é a frequência natural do sistema e

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} = \frac{c}{2m\omega} \quad (3.3)$$

é a porcentagem de amortecimento relativa ao amortecimento crítico.

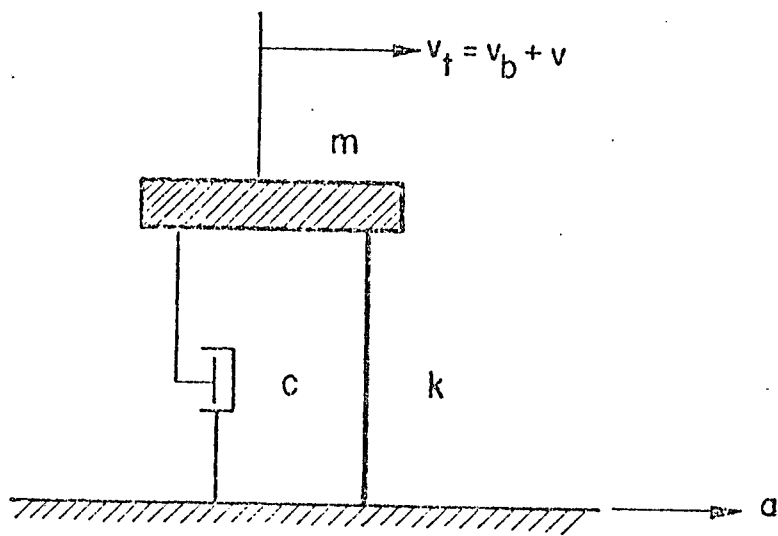


FIG. 3.1 - Sistema de um grau de liberdade.

A solução da Eq. 3.1 é dada pela integral de Duhamel que, para pequenos valores de ζ , apresenta-se como

$$v = \frac{1}{\omega} \int_0^t a(\tau) e^{-\zeta \omega (t-\tau)} \text{sen} [\omega (t-\tau)] d\tau \quad (3.4)$$

A solução da Eq. 3.4 é obtida por integração numérica a partir da aceleração da base até t que é conhecida por meio de um acelerograma. Para um par de valores de ζ e ω , o valor máximo de v é dado por

$$v_{\text{máx.}} = S_d = \frac{S_v}{\omega} \quad (3.5)$$

sendo

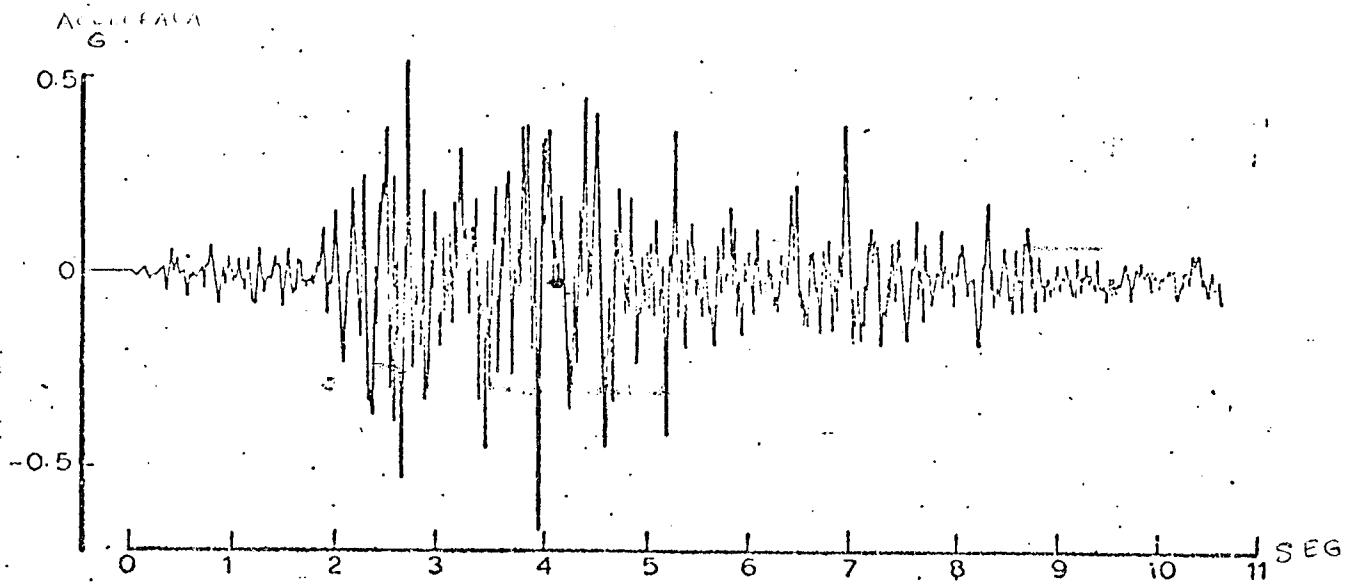
$$S_v = \left[\int_0^t a(\tau) e^{-\zeta \omega (t-\tau)} \text{sen} [\omega (t-\tau)] d\tau \right]_{\text{máx.}} \quad (3.6)$$

onde $v_{\text{máx.}}$ da Eq. 3.5 é o deslocamento espectral S_d correspondente ao amortecimento ζ e à frequência ω . O gráfico de S_d em função de ω ou $T = \frac{2\pi}{\omega}$ sendo T o período natural de vibração para os diversos valores de ζ constitui o espectro de resposta (de deslocamento) do sismo considerado.

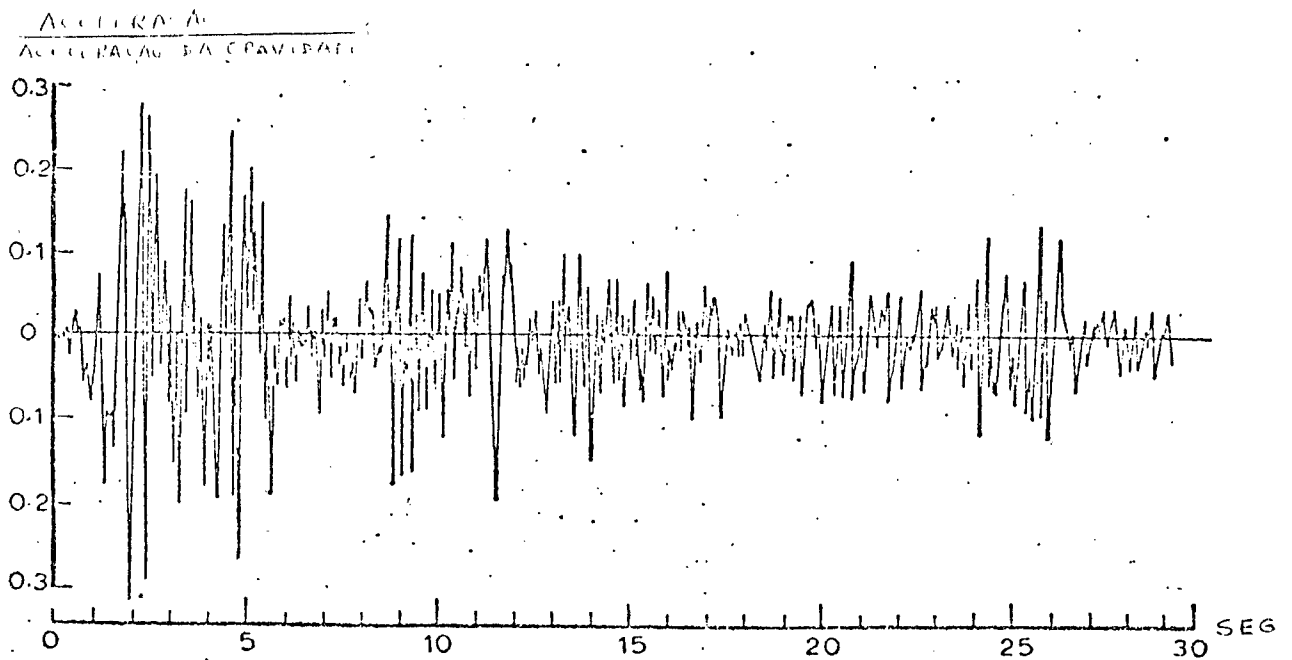
Como exemplos, na Fig. 3.2 mostram-se as acelerações dos terremotos de Koyna (Índia) e El Centro (E.U.A.), e na Fig. 3.3 os respectivos espectros de deslocamento para um amortecimento de 5%. O valor de S_v , da Eq. 3.6, é a pseudo-velocidade espectral visto que é apenas aproximadamente igual à velocidade máxima; no entanto fornece diretamente o valor do deslocamento relativo máximo exato (Eq. 3.5).

A força resistente máxima de mola, que é utilizada para calcular a tensão máxima, é

$$f_{R \text{ máx.}} = K v_{\text{máx.}} \quad (3.7)$$



Acclerograma do terremoto de Koyuna, 11 de dezembro de 1967, (compo-
nente horizontal ao longo do eixo do reservatório de Koyuna).



Acclerograma do terremoto de 18 de maio de 1940, El Centro, compo-
nente norte-sul.

FIG. 3.2

considerando que, da Eq. 3.2, $k = m\omega^2$ e levando em conta a Eq. 3.5, obtém-se da Eq. 3.7:

$$f_{R_{\max.}} = k v_{\max.} = m\omega^2 v_{\max.} = m\omega S_v = m S_a \quad (3.8)$$

sendo $S_a = \omega S_v$, que é aceleração espectral. Com esta grandeza calcula-se a tensão máxima desenvolvida na mola. O gráfico de S_a para os diversos valores de ζ é o espectro de resposta da aceleração.

As relações simples que existem entre S_v , S_d , S_a (Eqs. 3.5 e 3.8) tornam apropriada a representação gráfica dos três espectros em papel logarítmico tripartite, com mostrado na Fig. 3.4 para o terremoto de El Centro. Neste gráfico, a abcissa é o logaritmo da pseudo-velocidade espectral, e os logarítmos de S_d e S_a são representados em eixos inclinados de 45° relativamente ao eixo das abcissas.

Os espectros de resposta de um sismo isolado apresentam um número muito grande de picos e depressões. Na prática, usam-se espectros de resposta obtidos da média de espectros individuais de vários sismos com uma suavização dos picos e depressões.

3.2- Resposta de um Sistema com vários Graus de Liberdade

O ponto de partida para a análise estrutural dinâmica, segundo preceitos de cálculo estrutural moderno, é a transformação da estrutura real em um modelo estrutural de elementos finitos. A análise dinâmica efetua-se então sobre este modelo. A transformação da estrutura real em modelo é uma etapa de importância fundamental para a análise pois o modelo considerado deve reproduzir com um alto grau de precisão o comportamento da estrutura real. Uma experiência prévia e um alto grau de intuição de engenharia são necessários para a consecussão deste objetivo. A Fig. 3.5 mostra, esquematicamente, a estrutura de um reator nuclear, o modelo estrutural para análise dinâmica, e os casos de solicitação dinâmica que são normalmente considerados (explosão externa, impacto de aeronave e terremoto).

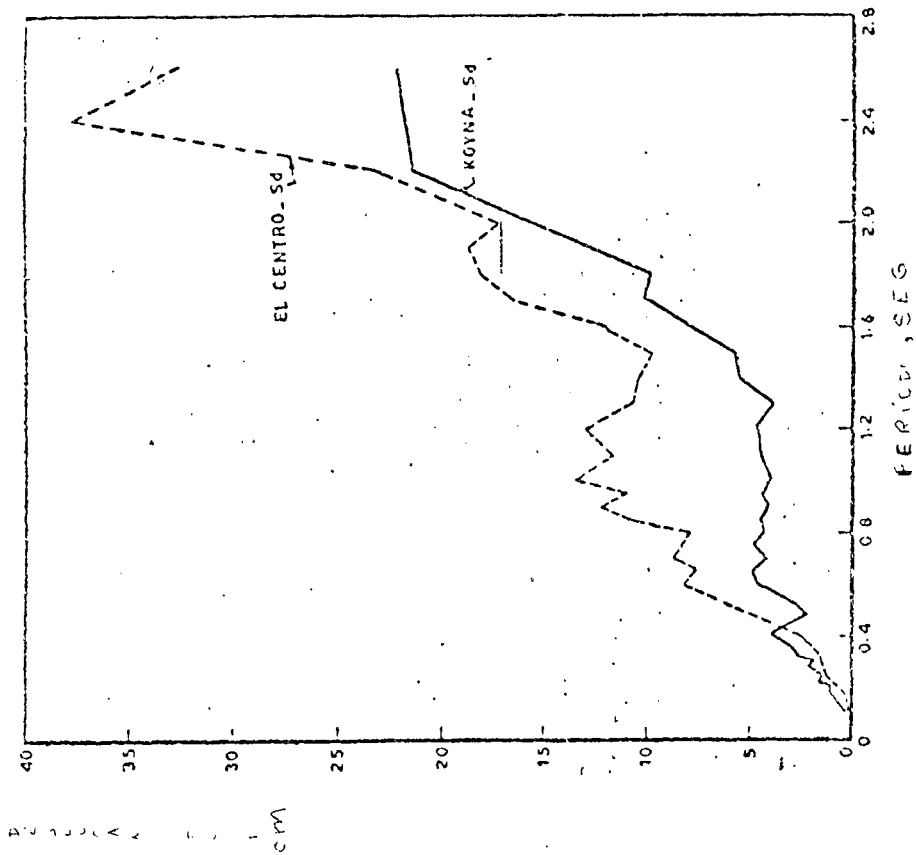


FIG. 3.3 - Espectros de deslocamento dos terremotos de Koyrna (componente longitudinal) e El Centro (componente norte-sul).

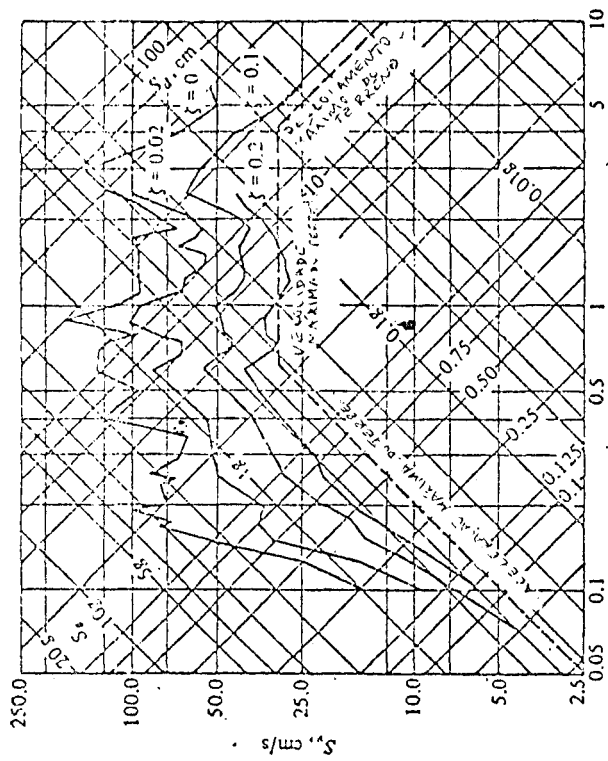


FIG. 3.4 - Espectros de resposta do terremoto de El Centro (1940).

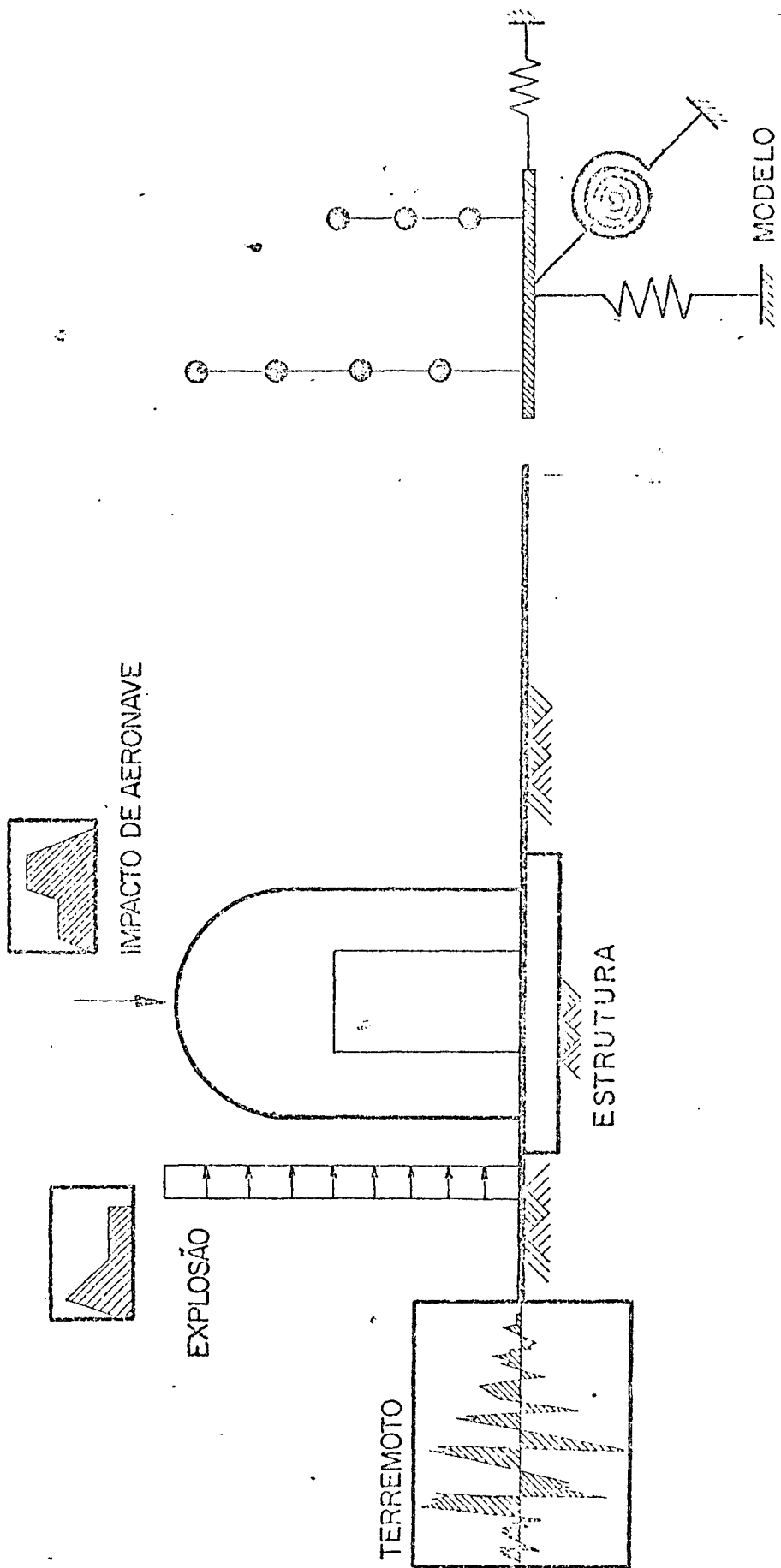


FIG. 3.5

A equação básica da dinâmica estrutural formula-se como

$$m \ddot{d} + c \dot{d} + k d = p \quad (3.9)$$

onde m = matriz de massa do sistema estrutural; c = matriz de amortecimento; k = matriz de rigidez; d , \dot{d} , \ddot{d} , são os vetores de deslocamentos, velocidades e acelerações nodais, respectivamente; P = vetor de carregamento externo. No caso de terremoto, o vetor de carregamento externo é

$$p = -m T_x \ddot{x} \quad (3.10)$$

supondo-se uma aceleração de terremoto no sentido x , \ddot{x} .

Na Eq. 3.10, T_x é um vetor que contém elementos unitários nas linhas correspondentes aos deslocamentos nodais na direção x e elementos nulos nas outras. Para acelerações nos sentidos y e z acrescenta-se ao lado direito da Eq. 3.10 os termos relativos a estas acelerações. A solução da Eq. 3.9 fornece a variação dos deslocamentos com o tempo. A partir desta variação calculam-se as variações das outras grandezas de interesse (tensões, esforços solicitantes). A variação com o tempo de uma determinada grandeza chama-se histórico de resposta (time history). O conhecimento do histórico da resposta fornece os valores máximos das grandezas de interesse.

Existem dois métodos gerais para a interpretação da Eq. 3.9 : o método da superposição modal e o método de integração direta que são resumidamente descritos em seguida:

Método de superposição modal: a base deste método é o conhecimento das frequências naturais e modos normais de vibração do sistema estrutural. Para isto, parte-se da equação das vibrações livres não amortecidas do sistema estrutural, obtida da

Eq. 3.9, na ausência dos termos de amortecimento e do carregamento externo:

$$m\ddot{d} + k_d = 0 \quad (3.11)$$

supondo-se a estrutura com movimento num modo normal de vibração, dado por $d = x \sin \omega t$, a Eq. 3.11 fica $(k - \omega^2 m)x = 0$ (3.12) que é a equação de um problema de autovalor e autovetor. Resolvida esta equação, dispõe-se dos autovalores reunidos na matriz diagonal

$$\Omega^2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & \omega_2^2 & \dots & \omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

e dos autovetores que se reúnem na matriz quadrada dada por,

$$x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Os autovalores $\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2$ são as frequências naturais ao quadrado e os autovetores, os modos normais de vibração. Um sistema com n deslocamentos nodais tem n modos normais de vibração.

Os autovalores ou vetores dos modos normais têm a importante propriedade de ortogonalidade relativamente aos modos normais de vibração:

$$x^t m x = M ; x^t k x = K = M \Omega^2 \quad (3.15 a, b)$$

onde M e K são, respectivamente, as matrizes diagonais de massa e rigidez generalizadas relativas aos modos normais.

No método de superposição modal exprime-se o deslocamento nodal de cada ponto do sistema como uma superposição de produtos da amplitude modal pelo deslocamento generalizado em cada modo. Desta maneira define-se a transformação $d = x D$ (3.16) em que D é o vetor dos deslocamentos generalizados relativos aos modos normais. Substituindo-se d da Eq. 3.16 na Eq. 3.9 e pré-multiplicando por x^t obtém-se:

$$(x^t m x) \ddot{D} + (x^t c x) \dot{D} + (x^t k x) D = x^t p \quad (3.17)$$

Introduz-se neste ponto a hipótese apriorística de que os modos normais são também ortogonais relativamente à matriz de amortecimento c , definindo-se a matriz diagonal

$$C = \chi^T c \chi = 2 \zeta M \Omega, \quad (3.18)$$

onde ζ é a matriz diagonal que contém as porcentagens de amortecimento especificadas em cada modo normal e, Ω , a matriz diagonal que contém as frequências naturais. O amortecimento é, portanto, considerado pela introdução, em cada modo, de porcentagens de amortecimento relativos ao amortecimento crítico, dadas na matriz ζ .

Uma maneira alternativa de considerar o amortecimento é definir a matriz de amortecimento de Rayleigh:

$$c = \alpha m + \beta k. \quad (3.19)$$

Neste caso, tendo em vista as Eqs. 3.15 a e b, esta matriz de amortecimento é também ortogonal relativamente aos modos normais.

Notando-se agora as Eqs. 3.15 a e b e 3.18, a Eq. 3.17 fica

$$M \ddot{D} + 2 \zeta M \Omega \dot{D} + M \Omega^2 D = P \quad (3.20)$$

com

$$P = \chi^T p \quad (3.21)$$

definindo-se o vetor em que cada componente é o carregamento generalizado relativo a um modo normal.

A Eq. 3.20 constitui um conjunto de equações desacopladas ou independentes. No caso sísmico, considerando P da Eq. 3.10, a equação da Eq. 3.20 relativa ao modo i é dada por:

$$\ddot{D}_i + 2 \zeta_i \omega_i \dot{D}_i + \omega_i^2 D_i = -\Gamma_{i,x} a_x \quad (3.22)$$

em que $\Gamma_{i,x} = \frac{\chi_i^T m T_x}{M_i}$ (3.23)

é o fator de participação relativo ao modo i .

A Eq. 3.22 é exatamente análoga à Eq. 3.1 do sistema de um grau de liberdade. A solução da Eq. 3.22 é, portanto, achada como na Eq. 3.4. Obtidas, então, as soluções das Eqs. 3.22 relativas aos modos que participam significativamente da resposta, volta-se à Eq. 3.16 e obtém-se os deslocamentos nodais do sistema em função do tempo ou o histórico da resposta. Com este histórico acham-se os deslocamentos máximos e o tempo em que ocorrem.

Normalmente, não se calcula o histórico da resposta mas utiliza-se o método da superposição espectral. Neste método acha-se para cada modo o máximo de D_i (Eq. 3.22) utilizando-se o espectro de resposta de deslocamento do terremoto considerado. Deste espectro, com a porcentagem de amortecimento ζ_i e a frequência ω_i do modo i , acha-se o valor $S_{d_{i,x}}(\zeta_i, \omega_i)$ exatamente como para o sistema de um grau de liberdade, e multiplica-se $S_{d_{i,x}}$ por $\Gamma_{i,x}$, tendo em vista o lado direito da Eq. 3.22. Desta maneira, o máximo de D_i é $\Gamma_{i,x} S_{d_{i,x}}$. O deslocamento nodal máximo é obtido, então, como uma superposição dos máximos modais, de acordo com um determinado critério. O critério mais corrente é o da raiz quadrada da soma dos quadrados (RQSQ). Desta maneira, o deslocamento modal máximo do nó j é calculado como

$$d_j = \left[\sum_{i=1}^p (\chi_{ji} \Gamma_{i,x} S_{d_{i,x}})^2 \right]^{1/2} \quad (3.24)$$

sendo p o número de modos que contribuem apreciavelmente na superposição espectral.

Quando atuam simultaneamente acelerações a_x , a_y , a_z , considera-se a Eq. 3.22, sucessivamente, com cada um dos termos correspondentes a estas acelerações. Dos espectros respectivos acham-se sucessivamente $S_{d_{i,x}}$; $S_{d_{i,y}}$; $S_{d_{i,z}}$, e combinam-se, em cada modo, as respostas máximas por um determinado critério, como anteriormente. No caso do critério RQSQ:

$$D_i = \left[(\Gamma_{i,x} S_{d_{i,x}})^2 + (\Gamma_{i,y} S_{d_{i,y}})^2 + (\Gamma_{i,z} S_{d_{i,z}})^2 \right]^{1/2}$$

(3.25)

O deslocamento nodal máximo é calculado como na Eq. 3.24:

$$d_j = \left[\sum_{i=1}^p (\alpha_{ji} D_i)^2 \right]^{1/2} \quad (3.26)$$

O método da superposição espectral dispensa o cálculo laborioso do histórico da resposta e fornece uma estimativa, a favor da segurança, da resposta sísmica.

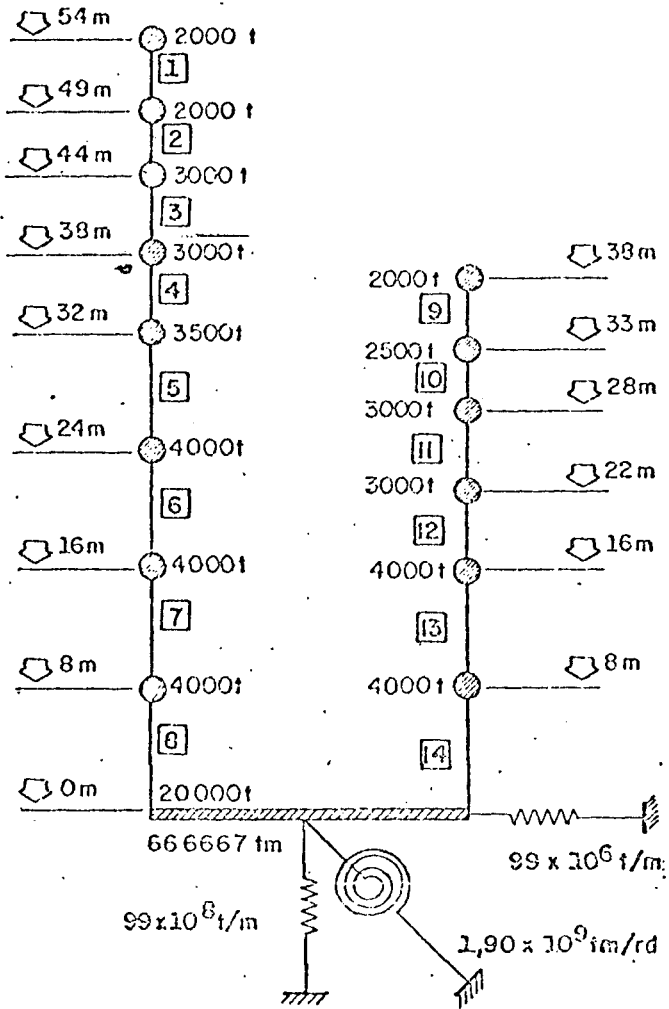
A Fig. 3.6 mostra o modelo estrutural de um reator nuclear e na Fig. 3.7 os diagramas de deslocamentos, acelerações, momentos fletores e esforços cortantes obtidos pelo método da superposição espectral. O espectro considerado foi o espectro de projeto da USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission) com uma aceleração máxima de 0.1g. O cálculo apresentado foi efetuado com os programas STARDYNE e EASE2 referenciados nas respectivas figuras.

Métodos de Integração Direta: Nestes métodos integra-se o sistema de equações da Eq. 3.9, diretamente, por algoritmos de integração numérica aproximada. O tempo total, durante o qual se deseja obter o histórico da resposta, é dividido em pequenos intervalos de tempo Δt . A partir das condições iniciais, conhecidas no tempo inicial, progride-se sucessivamente sobre os intervalos de tempo até obter-se o histórico da resposta desejado.

Sendo Y_i o vetor que contém os deslocamentos d_i , as velocidades \dot{d}_i e as acelerações \ddot{d}_i no tempo t_i e Y_{i+1} o vetor que contém estas grandezas no tempo t_{i+1} , os algoritmos de integração direta apresentam-se como:

$$Y_{i+1} = A Y_i + B p_{i+1} \quad (3.27)$$

Na Eq. 3.27, A é o operador matricial de integração numérica, B é o operador matricial do carregamento, e p_{i+1} é o vetor do carregamento no tempo t_{i+1} .



	A (m ²)	J (m ⁴)
1, 2, 9, 10	100	30 000
3, 4, 11, 12	150	33 000
5, 6, 7, 8, 13, 14	200	35 000

FIG. 3.6 - Modelo estrutural de um reator nuclear.

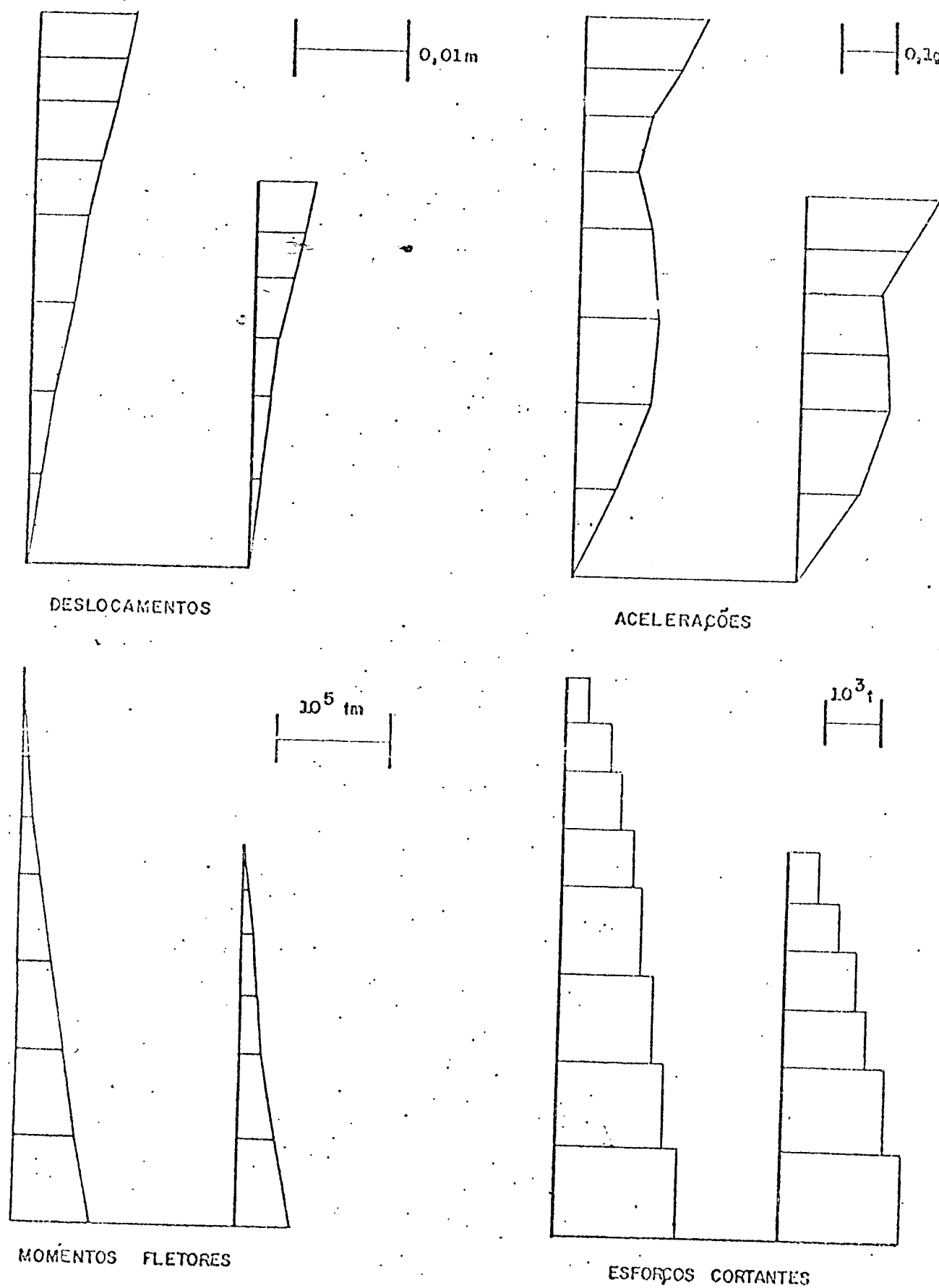


FIG. 3.7 - Diagramas de deslocamentos, acelerações, momentos fletores e esforços cortantes obtidos pelo método da superposição espectral.

Na formação dos elementos de A e B entram as matrizes M ; C ; K e o intervalo de tempo $\Delta\tau$. Existem vários algoritmos de integração direta que são utilizados em dinâmica estrutural sendo os mais difundidos os de Newmark e Wilson. Para cada um dos algoritmos, tem-se a forma específica dos operadores A e B .

No método de integração direta, o amortecimento é introduzido diretamente por meio da matriz C que não precisa ser ortogonal relativamente aos modos normais como no método da superposição modal.

O método da superposição espectral decorre naturalmente do método da superposição modal. O histórico da resposta pode ser achado pelo método da superposição modal ou pelo método de integração direta. O método da superposição modal é "exato" se todos os modos que contribuem apreciavelmente para a resposta são levados em conta na superposição.

3.3- Interação Solo-Estrutura

A resposta de estruturas com relativa flexibilidade, como as de edifícios altos, a movimentos sísmicos, tem sido estudada extensivamente, desde 1930, quando tornaram-se disponíveis os primeiros acelerogramas. O modelo estrutural utilizado considerava estas estruturas como engastadas numa base rígida e as respostas calculadas apresentavam boa concordância com os movimentos registrados por instrumentos montados nos edifícios. Como as estruturas nucleares são muito mais rígidas que as de edifícios altos, a influência da flexibilidade do solo na resposta estrutural, ou seja o efeito da interação solo-estrutura, pode ser significativo. A importância da interação solo-estrutura na análise dinâmica depende da relação entre as propriedades de massa, amortecimento, e rigidez do solo e da estrutura.

O problema da interação solo-estrutura tem suscitado um grande interesse, tendo surgido, recentemente, um grande número de trabalhos sobre o assunto.

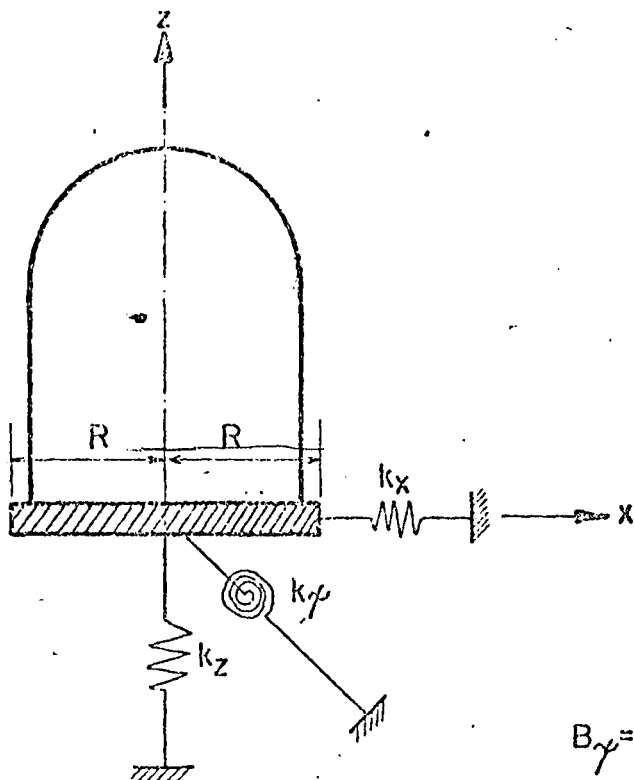
Basicamente, existem dois métodos principais para a abordagem do problema: (a) O método dos parâmetros discretos, e (b) o método dos elementos finitos. Ambos os métodos têm as suas limitações e ainda não se chegou, no presente momento, a um consenso geral sobre qual o método mais recomendável. Um grande número de comparações entre os dois métodos tem sido apresentado, muitas vezes mostrando resultados discordantes. Se as limitações de cada método são cuidadosamente ponderadas e se os parâmetros utilizados são adequadamente escolhidos, tanto um método quanto o outro devem fornecer bons resultados.

Método dos parâmetros discretos (MPD)

Este método é baseado em resultados da análise dinâmica de uma placa circular rígida assente num semi-espaço infinito. Os parâmetros da fundação relativos às características de rigidez e amortecimento são dependentes da frequência do movimento. No entanto, uma aproximação muito boa pode ser conseguida com a utilização de parâmetros constantes ou independentes da frequência.

A Fig. 3.8 mostra um modelo estrutural para análise de um reator em que a interação solo-estrutura é representada por parâmetros constantes. As constantes de rigidez e de amortecimento relativas ao movimento horizontal, vertical e de tombamento estão indicadas na figura.

O amortecimento considerado no método dos parâmetros discretos é o amortecimento radiante que decorre da parcela de energia dissipada pelas ondas elásticas que se propagam da fundação até o infinito. O amortecimento do material, semelhante ao amortecimento estrutural, deve ser adicionalmente considerado.



$$B_{\gamma} = \frac{3-(1-\nu)}{8R^5} I_f$$

$$k_x = \frac{32(1-\nu)}{7-8\nu} GR$$

$$c_x = 18,4 \frac{1-\nu}{7-8\nu} R^2 \sqrt{\rho G}$$

$$k_z = \frac{4}{1-\nu} GR$$

$$c_z = \frac{3,4}{1-\nu} R^2 \sqrt{\rho G}$$

$$k_{\psi} = \frac{8}{3(1-\nu)} GR^3$$

$$c_{\psi} = \frac{0,8}{(1-\nu)(1+B_{\gamma})} R^4 \sqrt{\rho G}$$

G - MÓDULO DE ELASTICIDADE TRANSVERSAL

ν - COEFICIENTE DE POISSON

ρ - MASSA ESPECÍFICA

I_f - MOMENTO DE INÉRCIA DA MASSA DA FUNDAÇÃO RELATIVAMENTE AO EIXO DE TOMBAMENTO

FIG. 3.8

Método dos Elementos Finitos (MEF):

Neste método, incorpora-se ao modelo estrutural de elementos finitos da estrutura a representação do solo por meio de um modelo de elementos finitos, como na Fig. 3.9.

A principal dificuldade no método dos elementos finitos é a correta avaliação do tamanho da malha com a qual o solo é modelado e do tamanho dos elementos. Recomenda-se um tamanho de malha com largura no mínimo quatro vezes a largura da fundação e altura no mínimo igual a largura da fundação, (Fig.3.9). O tamanho dos elementos deve ser fixado pelas frequências que devem ser reproduzidas na resposta do sistema. Tem sido verificado que, para reproduzir adequadamente uma certa frequência, a altura dos elementos finitos deve ser igual a um oitavo do comprimento de onda associado a esta frequência podendo-se, no entanto, considerar 1/5 como valor prático.

O MPD considera o problema da interação solo estrutura como tridimensional enquanto que no MEF são abordáveis, de uma maneira econômica, apenas problemas bidimensionais e axissimétricos. No MPD, como o solo é modelado por poucos parâmetros discretos, uma representação refinada da estrutura é viável. No MEF, este refinamento é impraticável. O MEF permite uma variação arbitrária das propriedades do solo assim como a variação destas propriedades com o nível de tensão. O MPD considera apenas o amortecimento radiante (Os coeficientes de amortecimento relacionados na Fig. 3.8 referem-se a este tipo de amortecimento) ao qual deve ser adicionado o amortecimento do material. O MEF considera o amortecimento do material; a introdução artificial de elementos de amortecimento ao longo do contorno da malha de elementos finitos que modela o solo, a majoração do amortecimento do material, e a escolha adequada do tamanho da malha fazem com que o amortecimento radiante seja levado em conta no MEF.

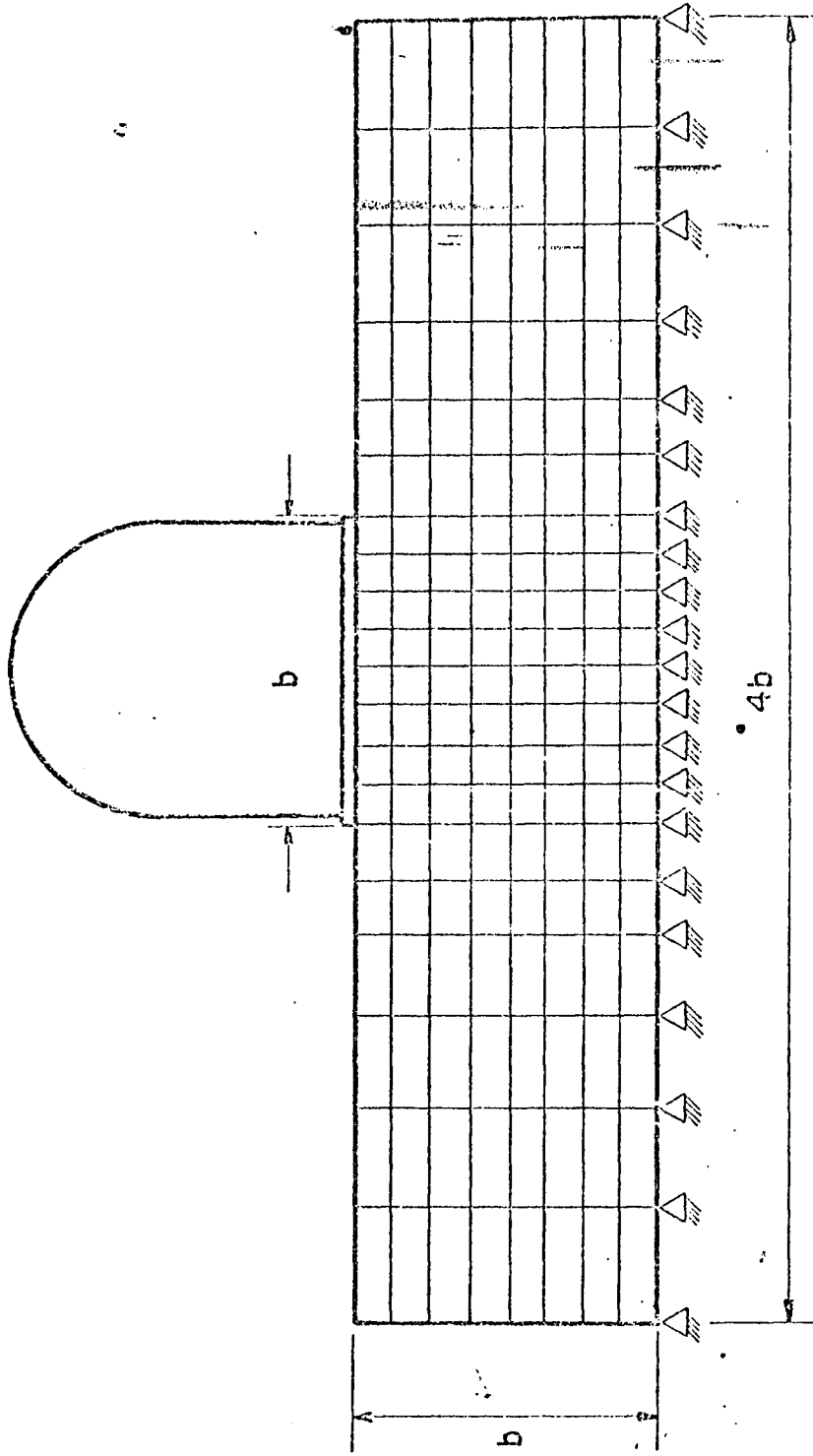


FIG. 3.9

A grande maioria dos trabalhos no campo da interação solo-estrutura aborda o caso das fundações diretas, tendo sido as fundações sobre estacas raramente abordadas. As usinas nucleares de Angra II e III tem fundações sobre estacas o que motivou o tratamento deste problema no Brasil.

4

Para efeito ilustrativo, apresentam-se os resultados principais de um estudo de análise sísmica de um prédio de controle com fundação sobre estacas. O prédio de concreto armado é constituído por lajes e paredes com um arranjo perfeitamente retangular (Fig. 3.10). A superestrutura é dividida por uma junta de expansão transversal a meia seção mas a laje de fundação, com 1,8 m de espessura, é contínua. As estacas de ponta tem um diâmetro de 1,1 m e se apoiam firmemente na rocha; tem um comprimento variável de 20 a 43 m; penetram em três camadas de solo, sendo a primeira areia, a segunda, argila e a terceira, rocha decomposta imediatamente acima da rocha firme.

O modelo estrutural está mostrado na figura 3.11. A superestrutura é modelada por duas vigas com massas discretizadas ao nível dos andares. Os deslocamentos nodais da superestrutura são reduzidos por condensação estática, aos deslocamentos nodais dinâmicos das vigas com massas discretizadas; 4 deslocamentos nodais dinâmicos são atribuídos a cada massa, a saber, 3 deslocamentos lineares e um deslocamento angular associado à torção. Elementos finitos quadrilaterais com rigidez membranal e de flexão foram usados para modelar as lajes e paredes das superestruturas antes da condensação.

Como a rigidez da laje de fundação na direção transversal (x_2) é muito maior que na direção longitudinal (x_1) um movimento de corpo rígido de translação e rotação pode ser considerado na direção transversal.

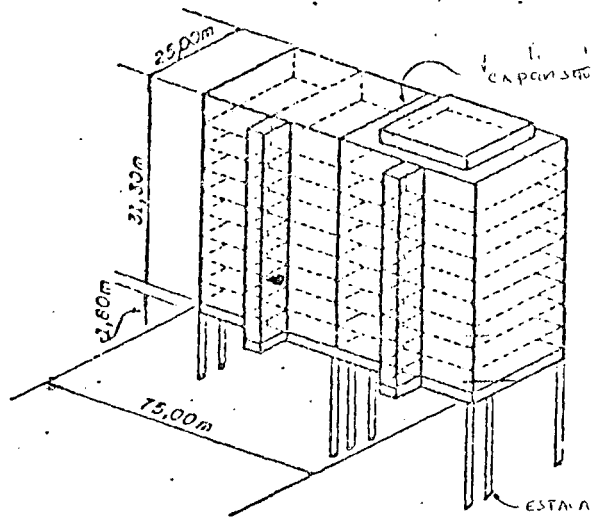


FIG. 3.10

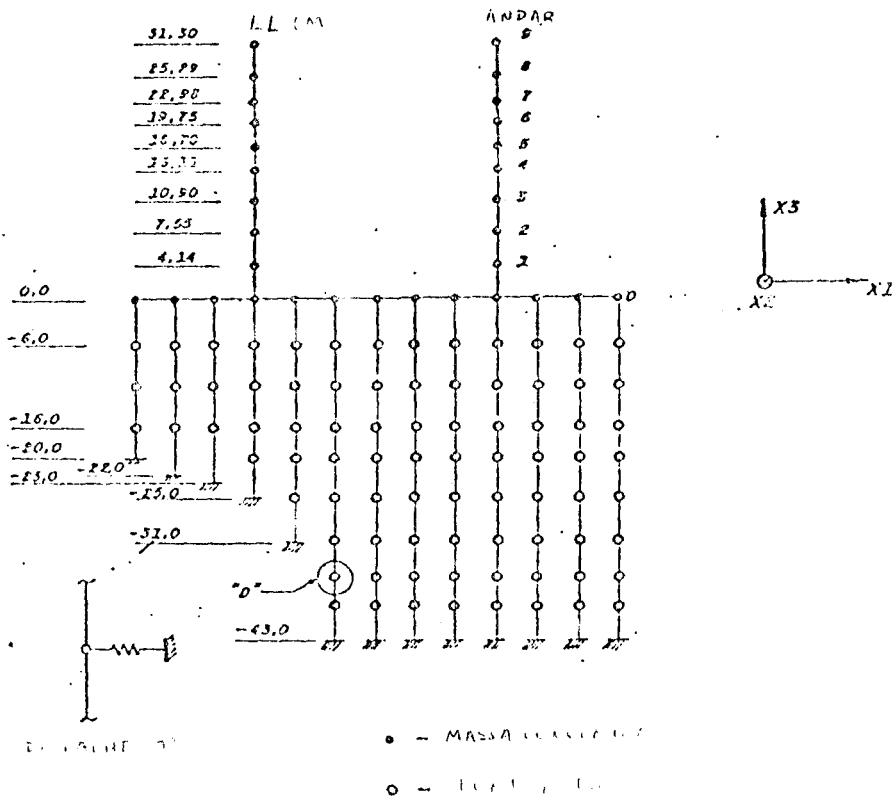


FIG. 3.11

Desta maneira, as estacas de cada carreira na direção transversal são agrupadas numa única estaca; o modelo da fundação consiste, portanto, de uma única carreira de estacas no sentido longitudinal. Para considerar a rigidez das estacas relativamente a rotação em torno de (x_1) uma barra com eixo na direção (x_1) e apenas com rigidez a torção foi introduzido. As estacas são lateralmente suportadas por uma série de molas que representam a resistência do solo. A massa das estacas e uma massa adicional de solo vibrando com as estacas são concentradas ao nível da laje de fundação juntamente com a massa desta. O problema da quantidade de massa do solo a ser considerada é complexo mas indicações de trabalhos anteriores situam esta quantidade como sendo $1/3$ do volume de solo correspondente ao volume das estacas.

A análise dinâmica foi efetuada pelo método da superposição espectral e pelo histórico da resposta por meio do programa STARDYNE. O espectro de resposta utilizado foi o da NRC com uma aceleração máxima do solo de 0,1 g. Para o histórico da resposta foi considerado um terremoto sintético compatível com o espectro de resposta da NRC. Foi feita previamente a deconvolução deste terreno para o nível da rocha obtendo-se o terremoto de entrada para o histórico da resposta com uma aceleração máxima de 0,035 g. Fig. 3.12 mostram-se os gráficos das acelerações máximas nos diversos andares obtidas pelo método da superposição espectral e pelo histórico da resposta. As aparentes discrepâncias entre os dois tipos de resultados são atribuídas não só ao conservadorismo do método de superposição espectral, como também à diferença das acelerações máximas consideradas em cada caso. Na Fig. 3.13 mostram-se gráficos do histórico da resposta.

3.4 - Geração do Espectro de Resposta da Estrutura

O espectro de resposta da estrutura é o espectro que fornece a aceleração máxima de um sistema com um grau de liberdade, com a base engastada num determinado ponto da estrutura, em função do período natural e da porcentagem de amortecimento do equipamento.

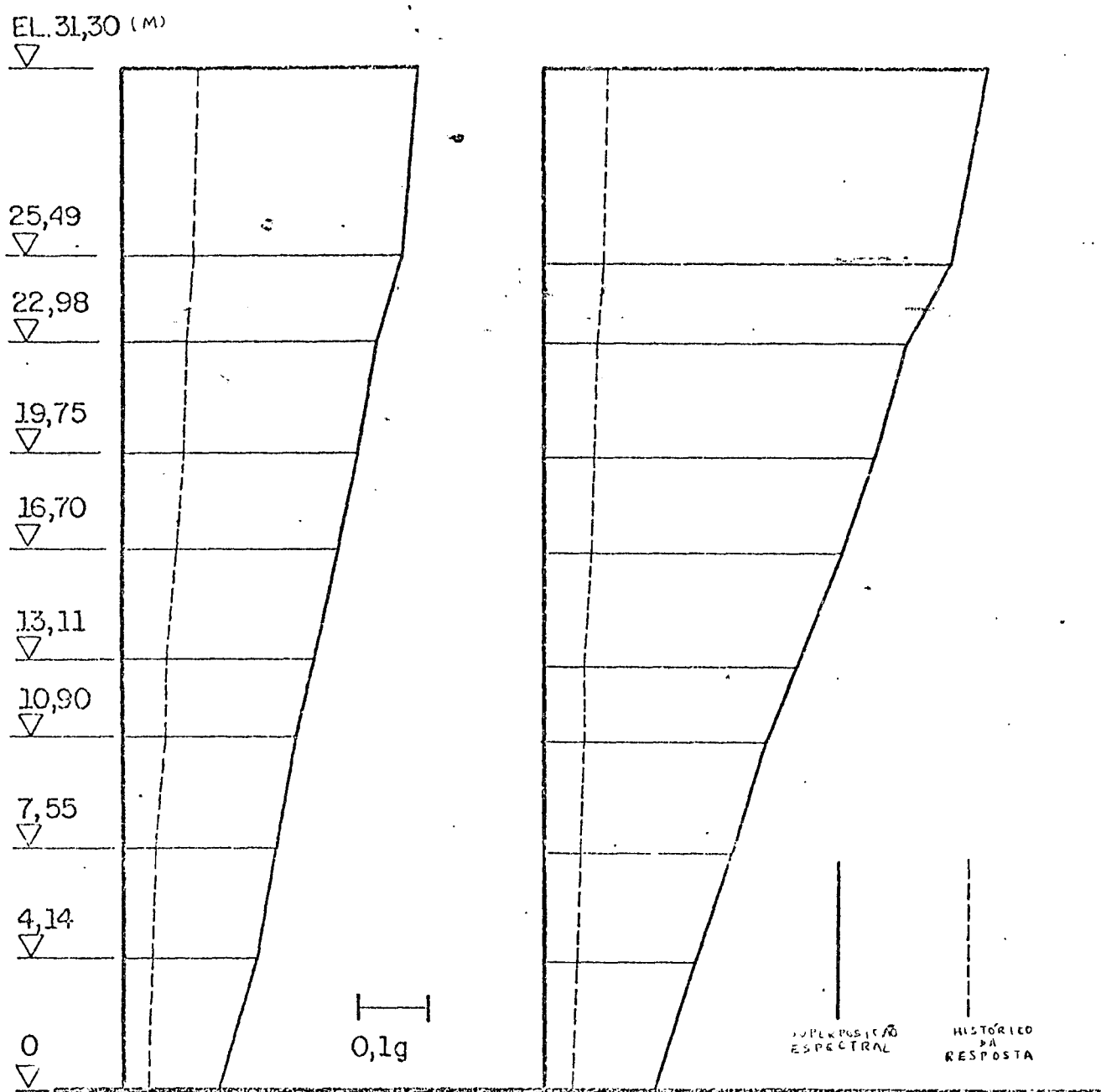


FIG. 3.12

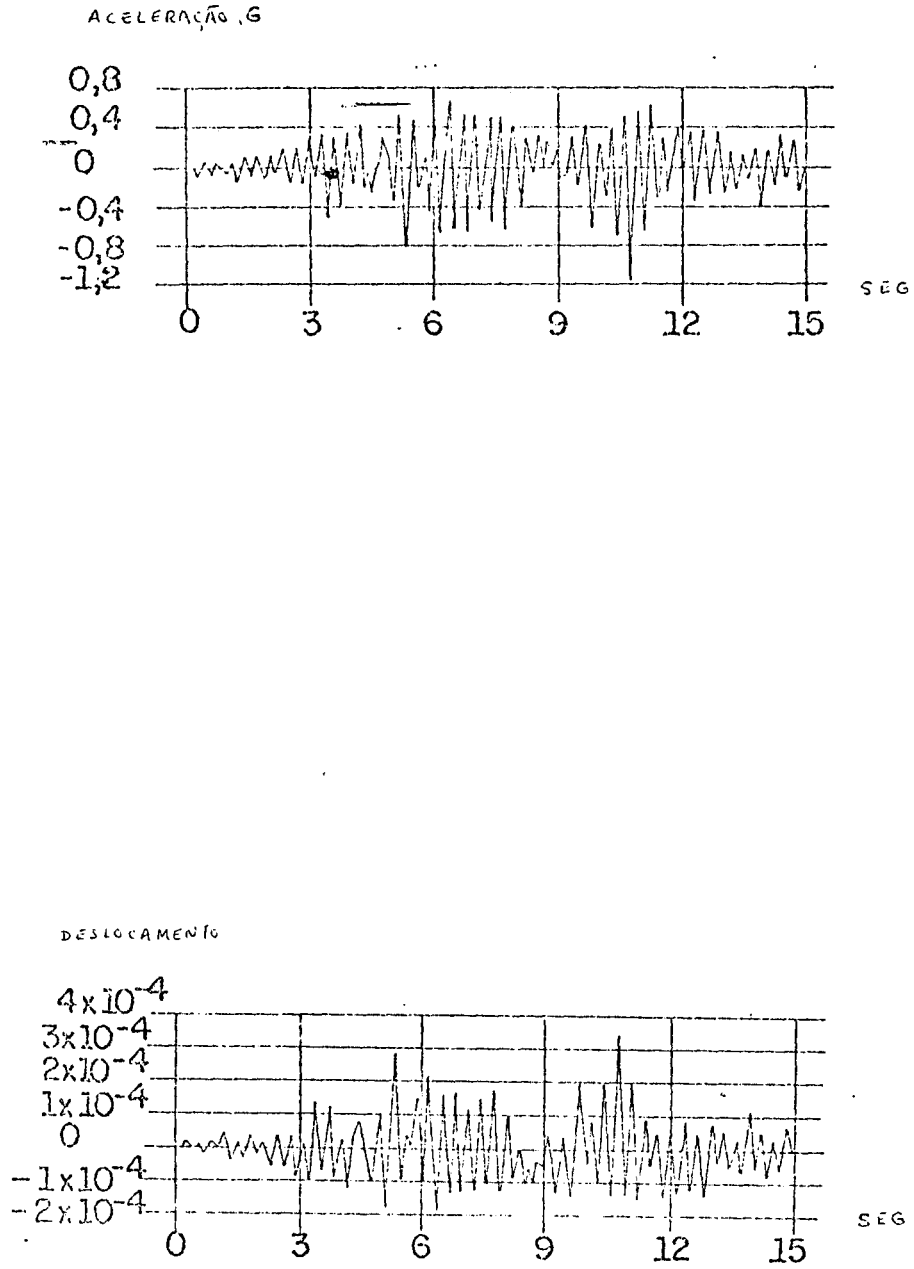


FIG. 3.13 - Gráficos do histórico da resposta.

O espectro de resposta da estrutura é utilizado na verificação dos níveis máximos de aceleração a que podem estar submetidos os equipamentos e no projeto sísmico de estruturas secundárias e tubulações. Normalmente, os espectros de resposta da estrutura são calculados com a hipótese de que a massa do sistema de 1 grau de liberdade que simula o equipamento é muito pequena com relação à massa da estrutura; portanto, as propriedades dinâmicas (frequências naturais de modos normais de vibração) e a resposta da estrutura não são afetadas pela presença do equipamento. Quando esta situação não se verifica, a rigidez e a massa do equipamento devem ser levadas em conta conjuntamente com as da estrutura.

Os métodos de geração do espectro de resposta da estrutura enquadram-se em três categorias: empíricos, baseados no histórico da resposta, e probabilísticos.

- Método de Biggs: É um método empírico muito utilizado. Biggs considerou um sistema simplificado de dois graus de liberdade em que o primeiro grau é relativo ao modo da estrutura e o segundo, ao equipamento, Fig. 3.14. Com base na resposta deste sistema simplificado, a aceleração de quatro terremotos foram obtidas curvas de amplificação que fornecem as acelerações do equipamento em função da relação T_e/T_{s_i} onde T_e é o período natural do equipamento e T_{s_i} o período natural do modo da estrutura.

Para aplicar o método de Biggs analisa-se inicialmente o modelo estrutural obtendo-se: as frequências naturais, as formas modais e os fatores de participação relativos aos modos de interesse; as acelerações máximas nos pontos de interesse, para um dado espectro de projeto. Para cada período do equipamento T_e , e para cada modo de interesse da estrutura, de período natural T_{s_i} , calcula-se com as curvas de amplificação e com as fórmulas empíricas do método, a aceleração modal máxima do equipamento; em seguida, efetua-se a superposição pelo critério RRSQ. Desta maneira variando o período do equipamento obtém-se o espectro desejado.

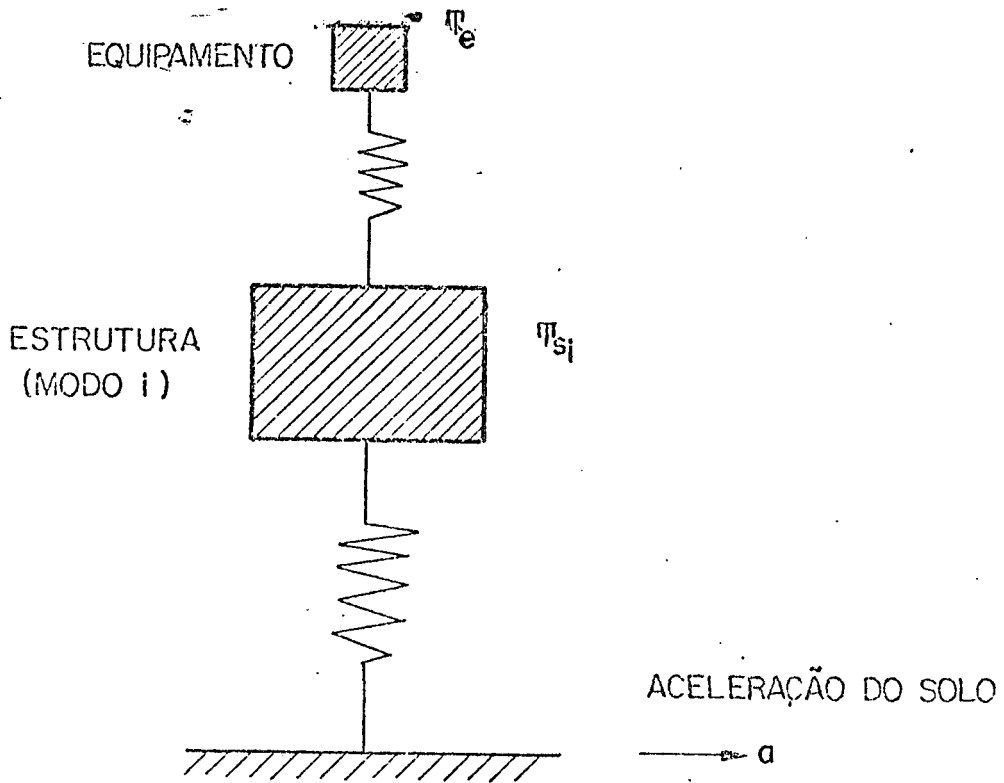


FIG. 3.14

- Método Histórico da Resposta: Neste método calcula-se o histórico da resposta da aceleração nos pontos de interesse da estrutura. Este histórico é então considerado como o movimento de entrada para o cálculo do espectro do sistema de um grau de liberdade que simula o equipamento. Na Fig. 3.15 ilustra-se esquematicamente o método. Com o terremoto de entrada obtém-se o histórico da resposta da aceleração no ponto de interesse; em seguida, pelo método da Secção 3.1, o espectro da resposta da estrutura. Atualmente, procura-se usar como terremoto de entrada para o cálculo da resposta da estrutura um terremoto artificial compatível com o espectro de projeto adotado.

Na Fig. 3.16 mostra-se o corte de um edifício de reator PWR e o respectivo modelo estrutural adotado. O espectro de resposta de estrutura relativo à aceleração horizontal do ponto 3 será mostrado na Fig. 3.17. A análise foi efetuada pelo programa STARDYNE e o sismo de entrada foi um sismo sintético compatível com o espectro de projeto da NRC.

- Métodos Probabilísticos: Estes métodos baseiam-se em conceitos de vibrações aleatórias como distribuição da densidade espectral e desvio padrão. O sismo agora é considerado como uma excitação estocástica representada pela densidade espectral da aceleração. Com esta densidade espectral e com a sua função de transferência do modelo estrutural acha-se a distribuição da densidade espectral da aceleração no ponto de interesse. A partir desta densidade espectral, com a função de transferência do sistema de um grau de liberdade que representa o equipamento, acha-se o desvio padrão da aceleração do equipamento. De acordo com uma probabilidade estabelecida calcula-se o valor do espectro de resposta da estrutura como um múltiplo do desvio padrão. A ideia geral dos métodos probabilísticos está indicada esquematicamente na Fig. 3.18. Os métodos probabilísticos não são ainda plenamente aceitos, na prática, no projeto de estruturas nucleares.

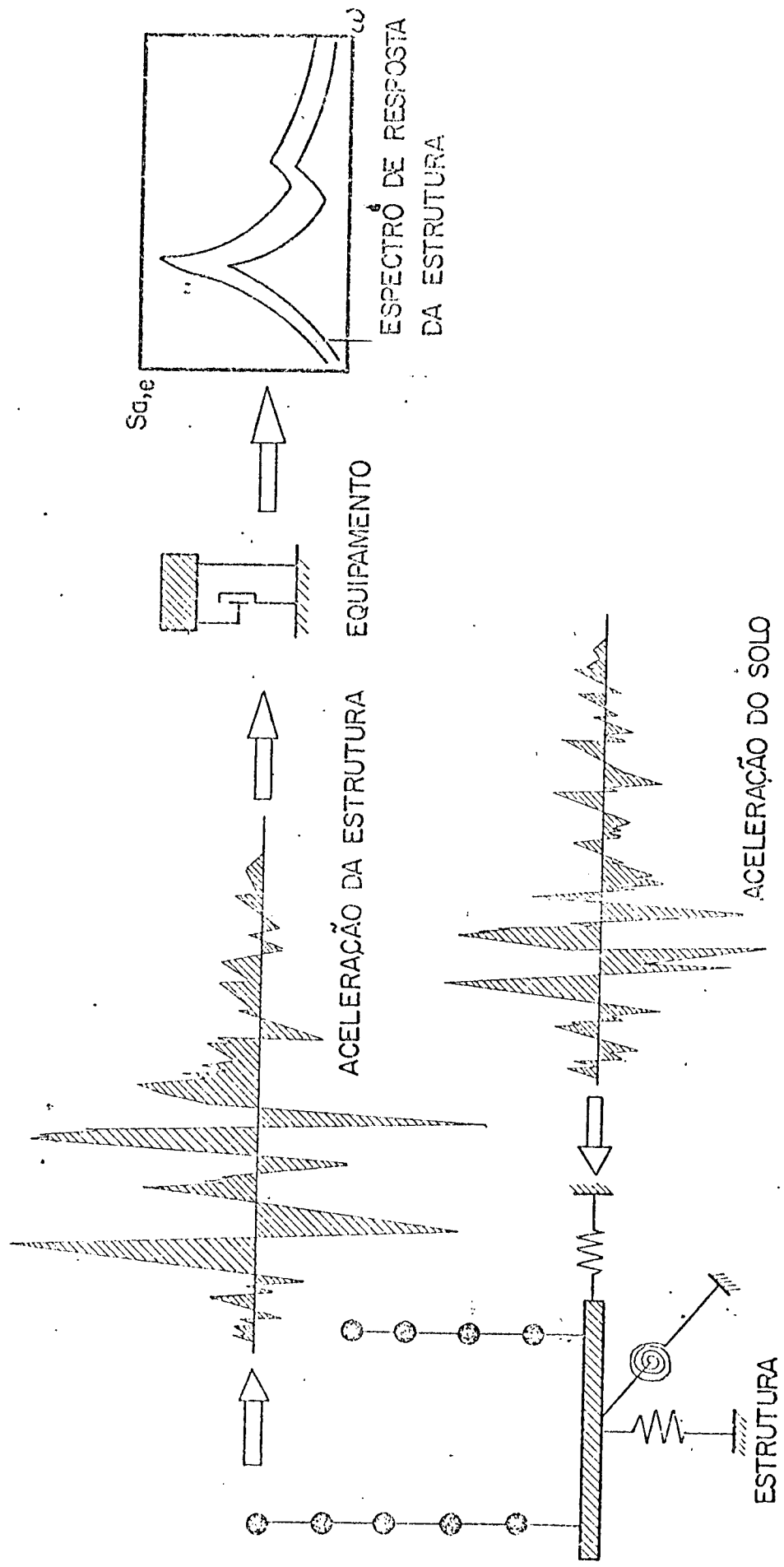


FIG. 3.15

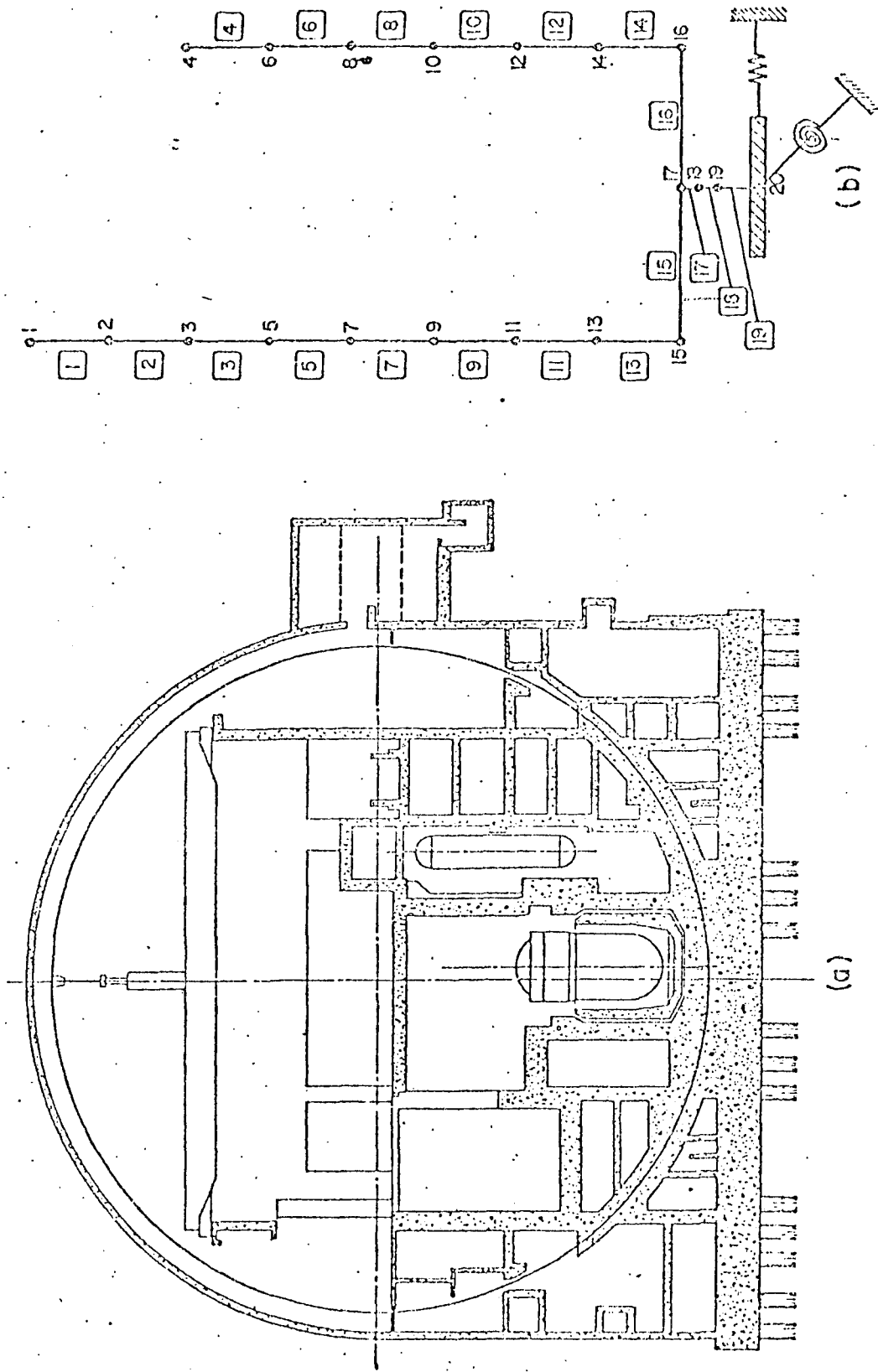


FIG. 3.16

AMORTECIMENTO A = 0.010, 3, 10, 100, 1000

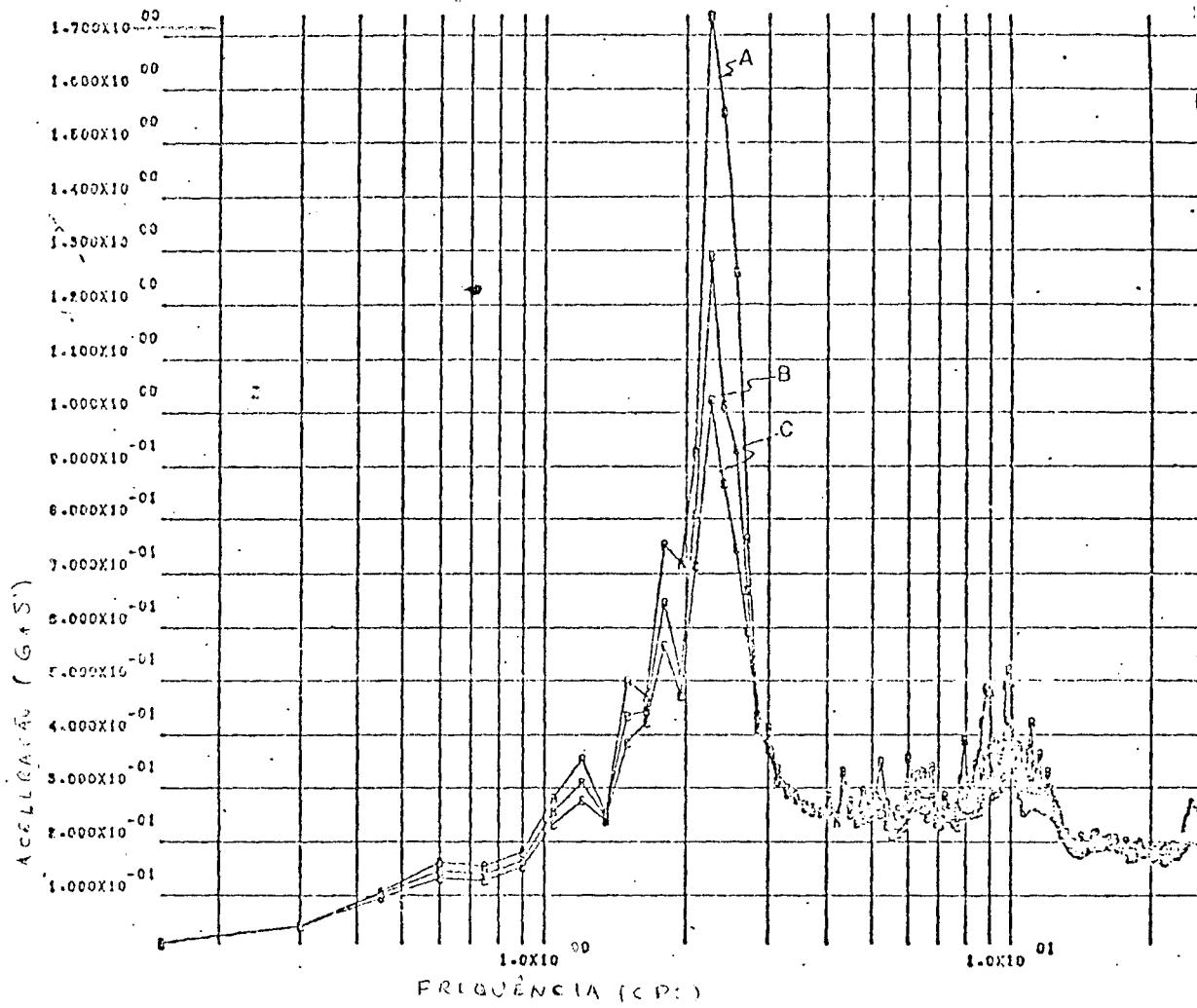


FIG. 3.17

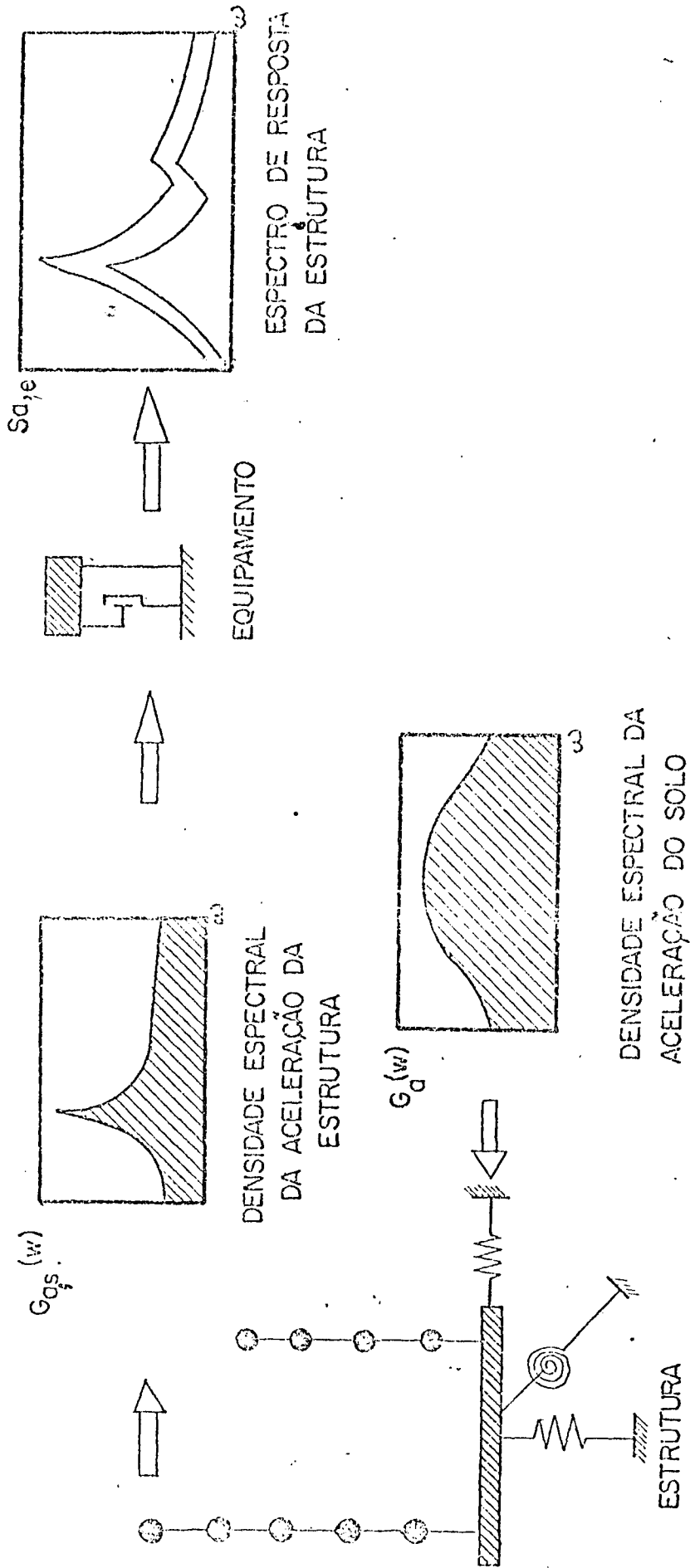


FIG. 3.18

4. CONSIDERAÇÕES SOBRE PROJETO ESTRUTURAL

A discussão de efeitos sísmicos, aqui apresentada, na maioria das vezes, enfatiza o comportamento de estruturas e edifícios comuns mais do que instalações de centrais nucleares. No entanto, os princípios básicos são os mesmos para as diversas estruturas e, portanto, validam essas considerações iniciais.

Não se trata de análise de tensões de elementos estruturais sob forças sísmicas baseada nas características dinâmicas de estruturas e dos sismos.

4.1 Características Estruturais Que Contribuem Para Resistência Sísmica

4.1.1 - Sistema de Suporte

Um meio positivo que resista a forças sísmicas e fixe ao mesmo tempo a estrutura é uma necessidade óbvia. Em alguns casos as paredes, teto e piso da estrutura podem ser projetados para exercer esta função.

A experiência tem mostrado que (1) o sistema de suporte para este propósito requer cuidados específicos no projeto e detalhamento para ser adequado, (2) os sistemas de suporte projetados para resistir à ação do vento são frequentemente inadequados, e (3) ornamentação, guarnições, cornijas e outros elementos não estruturais constituem o maior perigo sem proteção adequada de elementos sismo-resistentes.

4.1.2 - Massa Pequena

Sendo todas as outras características iguais, quanto maior a massa da estrutura maior é a força sísmica. Os materiais de construção leves minimizam as forças sísmicas mas não resultam, necessariamente, em minimização de custos.

4.1.3- Ductilidade

Os materiais quebradiços devem ser evitados nos principais elementos sismo-resistentes. Alguma sobre-tensão resultante da ação de um grande terremoto é provável em muitas estruturas projetadas sob proteção sísmica de códigos tradicionais. Sob essas condições, a ductilidade é bastante importante.

4.1.4- Métodos Adequados de Construção

A importância de bons trabalhadores, inspeção e supervisão afim, da garantia da qualidade, é demonstrada em qualquer grande terremoto que afete áreas urbanas. Isto é melhor demonstrado em caso de danos em estruturas bem projetadas mas em que estes requisitos não foram satisfeitos. A importância destes é ressaltada pelo fato de que edifícios bem construídos sobrevivem com menores danos a grandes abalos, do que muitos projetados especificamente como sismo-resistentes.

4.1.5- Fundações Adequadas

O movimento diferencial de fundações devido a movimentações sísmicas é um caso importante de dano estrutural, especialmente para estruturas rígidas e pesadas que não podem acomodar esses movimentos. Um projeto adequado deve minimizar a possibilidade de deslocamentos entre a fundação e o resto da estrutura.

4.1.6- Amortecimento

As características de amortecimento da estrutura tem um grande efeito sobre sua resposta a movimentos dinâmicos porque um pequeno amortecimento reduz significativamente as tensões sísmicas. Assim, o concreto armado tem um grau de amortecimento maior que o aço estrutural. No entanto, o amortecimento sozinho não é um índice completo do valor anti-sísmico do material.

4.1.7- Simetria Estrutural

A experiência tem demonstrado que edifícios que são as simétricos em plano tem uma susceptibilidade maior a danos sísmicos do que estruturas simétricas. Estruturas que tem um formato de L em plano, por exemplo, frequentemente sofrem danos na junção dos dois ramos.

A dissimetria estrutural pode ocorrer também em edifícios que são simétricos em plano, mas que tem sistemas de supor te excêntricos. Tal condição pode existir, por exemplo, em edi fícios que tem uma parede frontal flexível com grandes abertu- ras e uma sólida parede traseira essencialmente não flexível.

O efeito da dissimetria é induzir oscilações torsionais da estrutura. Edifícios com dissimetrias desse tipo não são ne cessariamente desqualificados para áreas sísmicas porque podem tornar-se resistentes a sismos por métodos correntes de projeto sísmico.

4.1.8- Separação de Estruturas Adjacentes

Para permitir uma livre deflexão horizontal de estruturas adjacentes, sob a ação de forças sísmicas, requer-se uma separa ção adequada pois que, em geral, as oscilações de edifícios não ocorrem em fase. O choque entre estruturas, resultante de espa ço livre insuficiente foi causador de grandes danos no passado.

4.1.9- Detalhes Que Permitem Movimento Estrutural Sem Causar Danos a Elementos Não Estruturais

Danos a tubulações, vidros, argamassa e divisões consti- tuem as maiores perdas financeiras mesmo quando o dano em ele- mentos estruturais é menor. Deve-se tomar cuidado especial para minimizar esse tipo de dano. No entanto, em alguns casos os da-

nos não estruturais não podem ser completamente eliminados sem que haja interferência nos requisitos funcionais.

4.2- Características Estruturais Que Contribuem Para Danos Sísmicos

As condições de maximização de danos sísmicos tornam-se óbvias depois da exposição precedente. Uma estrutura completamente sem suporte, com paredes pouco firmes, construída com material não reforçado usando calcáreo como argamassa teria um grande risco sísmico. As chances de sobrevivência são significativamente menores em caso de construção mal feita, deslocamento diferencial de fundações, dissimetria estrutural e separação insuficiente dos edifícios adjacentes. Pintura e reparos em argamassa, frequentemente utilizados em vez de uma reabilitação estrutural depois de danos causados por terremotos, deixam a estrutura vulnerável a posterior danificação e possível colapso em caso de um segundo terremoto.

4.3- Método Estático de Projeto

O problema dinâmico de vibrações estruturais induzidas sismicamente é geralmente tratado como um problema estático no qual a estrutura é projetada para resistir a certas forças horizontais estáticas. Presume-se que essas forças induzem tensões estáticas grosseiramente correspondentes às tensões dinâmicas máximas causadas por terremotos. Não é possível para um método estático de projeto equivalente cobrir adequadamente todos os tipos de estruturas e, por essa razão, as forças especificadas nos códigos de construção podem não ser adequadas. Assim, devem ser considerados como aproximações a serem revistas de acordo com o aumento de conhecimentos sobre a matéria.

4.3.1- Forças Laterais na Estrutura Principal

O sistema estrutural principal é projetado para suportar forças horizontais que são proporcionais ao peso da estrutura. Supõe-se que o peso W de cada elemento de massa da estrutura aplica uma força horizontal F de acordo com a equação

O valor de C reflete a opinião e julgamento, de acordo com a sismicidade de diversas regiões, dos autores dos códigos de edificação. De acordo com alguns, o valor de C é especificado para variar com a altura tendo um valor diferente para cada nível. Essa modificação é feita para fornecer valores de carga estática que se aproximem das forças dinâmicas do movimento. Em outros códigos, C varia com a capacidade de suporte do solo e o tipo de base. A função da estrutura também influencia o valor de C: valores altos são usados para edifícios escolares e partes importantes de centrais e valores baixos para moradias. O parâmetro C também varia com o tipo de estrutura; por exemplo, valores altos são freqüentemente usados em caso de torres e tanques.

O valor de W na equação inclui o peso morto da estrutura mais a porcentagem de carga vertical que varia nos diferentes códigos de 0 a 100.

Independentemente da porcentagem de carga utilizada na determinação de forças sísmicas, geralmente requer-se que os membros que suportam ambas as cargas sejam projetados para suportar forças sísmicas em combinação com a carga efetiva. Considera-se que o vento e sismos agem simultaneamente.

4.3.2- Forças Laterais em Partes da Estrutura

As componentes da estrutura também são projetadas para uma força horizontal estática como definido na equação $F=CW$. No entanto, o valor de C pode diferir dos utilizados para o sistema estrutural principal. O valor é maior para componentes cuja falha seria particularmente perigosa.

4.3.3- Tensões Admissíveis

É comum permitir-se um aumento nas tensões admissíveis básicas sob condições sísmicas. Geralmente, as tensões admissíveis sob a ação combinada de cargas verticais e forças sísmicas é considerada como $1/3$ maior que as básicas.

4.3.4- Métodos Gerais de Projeto de Elementos Estruturais

No método de projeto estático, as cargas horizontais tributárias de cada nível são distribuídas para os elementos resistentes principais na base de rigidez relativa. Os assoalhos e tetos são geralmente utilizados como vigas ou diafragmas para distribuir as tensões horizontais nos encaixes e suportes verticais e paredes. No caso de pisos de concreto e colunas de aço, o diafragma pode ser normalmente considerado como infinitamente rígido e, admitindo-se esse fato, cada coluna fica com uma parte da tensão total que é proporcional à sua rigidez relativa.

Consideração especial é feita para a situação em que o centro de massa não coincide com o centro de rigidez dos elementos verticais. Neste caso, os elementos de resistência são projetados na base de uma análise elástica e levam em conta o torque sobre o centro de rigidez.

Diafragmas flexíveis, formados de revestimento de madeira, madeira compensada, suporte de barra, ornato de metal, não são considerados como capazes de cisalhamento para os elementos verticais como um diafragma rígido. Por essa razão, quando se usa tais diafragmas o cisalhamento proporcionado aos elementos verticais é frequentemente baseado na massa tributária de cada um.

Para tensões cisalhantes e de flexão, os diafragmas são checados como vigas horizontais. Fixações controlam a força dos diafragmas com revestimento de madeira e de madeira compensada. A análise de diafragmas de metal é baseada em resultados de testes e é comumente controlada por tamanho de soldaduras, padrão e espaçamento. Os sistemas de suporte de barra são analisados aproximadamente como treliças. O cisalhamento general

tos e armações rígidas, e curvas são calculadas por métodos padrões tais como aqueles baseados na distribuição de momento e deflexão de inclinação /55-57/.

Quando se usa paredes ao invés de armações rígidas, as porções dessas paredes entre aberturas são consideradas como pilares fixos no topo ou na base ou em ambos. Leva-se em conta as deflexões de curvatura e cisalhamento da rigidez dos vários pilares. As tensões cisalhantes em cada pilar são computadas, checam-se todas as tensões nos pilares e introduz-se um reforço vertical devido a momentos de flexão /58,59/.

4.4 Projeto de Fundações

4.4.1- Sobre Pressão do Solo

O sistema de fundação é projetado para resistir à maioria dos momentos de tombamento desenvolvidos pelas forças estáticas horizontais e aplicadas à estrutura sobrejacente. É permitida alguma redução no momento pelo fato de que a pressão dinâmica de solo, admissível, excede a pressão estática admissível.

4.4.2- Assentamento e Arranjo Diferencial

As vibrações sísmicas podem causar o assentamento de solos, e o rearranjo das fundações de edifícios raramente é uniforme. No caso de estruturas rígidas mantidas por suportes individuais, os rearranjos podem resultar em dano extensivo à superestrutura. Para a solução desse problema ou se faz a estabilização do solo antes da construção ou se utilizam blocos, pilares, ensecadeiras de suporte sobre um estrato firme.

4.5 Movimento Relativo Entre Estruturas e Partes de Estruturas

O movimento relativo entre estruturas adjacentes ou entre partes de uma mesma estrutura é um tópico de considerável importância no que se refere a danos sísmicos. Podem ocorrer dois tipos principais de danos: o primeiro tipo é o dano devi-

do ao impacto de estruturas ou partes separadas por um espaço insuficiente para acomodar os movimentos diferenciais envolvidos, o segundo tipo é o dano devido à falha de elementos que ligam as estruturas ou suas partes em vibração, onde a falha é causada pelo movimento diferencial.

Freqüentemente, o meio mais simples de se evitar ou minimizar o primeiro tipo de dano é que haja suficiente espaço livre para que as partes vibrem livremente. Quando o espaço livre não pode ser suficientemente aumentado, uma alternativa possível é a vinculação de estruturas de modo a formarem um sistema integrado. No entanto, as grandes forças que são transmitidas através desse sistema podem torná-lo impraticável. Quando isso acontece, a única alternativa, em geral, é aceitar os danos.

O segundo tipo de dano também pode ser minimizado pela vinculação das estruturas a um sistema de suporte, para agir como uma só unidade se a magnitude das forças permitirem um projeto razoável dessa natureza. Freqüentemente, são mais aceitáveis as providências que favorecem um movimento relativo independente de cada estrutura sem danos aos elementos de conexão. Isso é conseguido tornando os elementos de conexão mais flexíveis de modo que a necessária reflexão diferencial seja acomodada sem que ocorra sobretensão.

4.5.1- Juntas de Separação

Em terrenos do passado, o choque entre edifícios muito próximos causou danos suficientes para justificar a inclusão de providências em muitos códigos de construção, que requerem uma separação estrutural mínima. A separação aumenta com a altura da estrutura. Foram feitos vários estudos e propostas /59/ bem como regulamentações que limitam a deflexão permitida para cada edificação /60/.

As junções entre partes distintas de uma edificação, tais como a intersecção de uma ala com a parte principal do edifício são freqüentemente projetadas como juntas frágeis que permitem movimento relativo. Quando isso se dá, cada parte do edifício deve ser considerado como uma estrutura separada tendo seu próprio sistema de suporte.

4.5.2- Juntas Flexíveis

Certos tipos de estruturas comumente encontradas em instalações industriais são ligadas entre si em seus topos ou na proximidade dos mesmos por elementos de conexão como tubulações, dutos, correias, deslizadores, etc. Como já foi mencionado, as alternativas são: (1) projetar um sistema estruturalmente integrado para transmitir as forças sísmicas envolvidas ou (2) prover junções flexíveis para reduzir essas forças a valores desprezíveis. A primeira alternativa pode não ser realizável para estruturas grandes, pesadas ou complexas.

A movimentação sofrida pelas junções é produzida parcialmente pelas deflexões das próprias estruturas e parcialmente por balanço ou arranjo das fundações. No caso de estruturas que são relativamente rígidas mas que estão sobre um solo comprimível, pode-se obter uma redução considerável no movimento relativo entre essas estruturas e o solo pelo uso de uma base comum ao invés de duas separadas.

4.6 Efeitos das Propriedades dos Materiais

4.6.1- Ductilidade

Os materiais dúcteis são altamente desejáveis para projetos sísmoresistentes. Os materiais quebradiços não devem ser usados para resistir a forças sísmicas; nesta categoria estão o

concreto sem armadura e todos os materiais de alvenaria não reforçados como blocos de concreto, tijolos, cerâmicas. Quando a dequadamente reforçado com aço, o concreto é razoavelmente dúctil em flexão e é bastante usado em construções sismoresistentes.

4.6.2- Amortecimento

A quantidade de amortecimento numa estrutura afeta significativamente sua resposta; valores tão pequenos como um amortecimento crítico de 2% podem causar marcadas reduções nas tensões sísmicas. O amortecimento interno que se encontra em estruturas de aço elásticas é menor que o de estruturas de alvenaria ou concreto armado. O amortecimento é largamente associado com ação inelástica, o que ocorre em grau mínimo numa estrutura soldada com aço, e em alto grau em concreto armado e num grau maior ainda para alvenaria reforçada. No entanto, a não resistência plástica de uma estrutura de aço pode ter efeito equivalente a uma alta capacidade de amortecimento.

4.6.3- Rigidez Relativa

A rigidez relativa é importante na determinação da distribuição das tensões sísmicas entre os elementos de resistência. Os módulos de elasticidade e cisalhamento relacionam-se com a rigidez relativa. No caso do aço, esses módulos têm valores relativamente constantes e predizíveis na faixa usual de tensões de trabalho. Em geral, as deflexões cisalhantes são importantes em vigas de profundidade de pequeno vão. No entanto, desde que vigas de aço raramente têm tais proporções, apenas o módulo de elasticidade é de grande interesse.

No caso de concreto e materiais de alvenaria reforçados, os módulos de elasticidade e cisalhamento variam com a intensidade da carga, duração e com a resistência do material. No projeto sísmico, deflexões de cisalhamento foram uma porcentagem

importante da deflexão total no caso de paredes de cisalhamento pilares construídos desses materiais. Devido a isso, ambos os módulos são significativos. A precisão com a qual pode ser estimada a divisão de carga entre os elementos de resistência, é reduzida quando esses elementos são compostos de diferentes materiais, com alguns elementos possuindo módulos que não são conhecidos com precisão. Sob essas circunstâncias são necessárias sobreposições utilizando os limites superiores e inferiores para se ter certeza da adequação do projeto. Por exemplo, a distribuição de força lateral entre uma armação rígida de aço e uma parede de cisalhamento de concreto armado é difícil de se estabelecer devido as incertezas envolvidas no cálculo da rigidez da parede de cisalhamento. Devido a isso, a parede de cisalhamento deve ser projetada assumindo-se que sua rigidez é relativamente alta e a armação deve ser projetada assumindo-se que a rigidez dessa mesma parede é relativamente baixa.

O efeito de sobretensão deveria ser considerado quando se combina materiais de diferente rigidez. No caso de sobrecarga, um elemento estrutural relativamente rígido mas quebradiço pode falhar quando atingido em combinação com um segundo elemento, flexível mas dúctil, transferindo assim sua carga para o segundo elemento.

A questão da rigidez relativa também se torna importante no suporte de partes relativamente rígidas de uma estrutura por elementos de suporte flexíveis. As limitações colocadas na quantidade de deflexão horizontal por pavimento para reduzir quebras nas paredes de alvenaria, vidro e gesso mostra que esse problema é reconhecido.

4.7 Detalhes Específicos de Projeto

4.7.1- Detalhes de Estruturas de Aço

Deve-se considerar a possibilidade de tensão reserva sob condições sísmicas. As orlas de vigas, que estão normalmente sob tensão, requerem um suporte lateral devido à compressão.

Devem ser utilizadas conexões de vigas de aço não rígidas tais como ângulos com grampos em forma de palma ou os tipos angulares de topo e de base (Fig. 4.1), quando os momentos sísmicos puderem ser obtidos. Devem ser usados tipos rígidos de conexões: Alguns exemplos são o tipo viga partida (Fig. 4.1) ou seu equivalente, soldado ou com suportes soldados, cravados ou cavilhados e em forma de braceletes de joelhos. Notaram-se algumas deficiências no comportamento sísmico de estruturas do tipo torre circundada por tirantes, inclusive o estiramento de barras, cavilhas e placas finas que foram retorcidas. Foram também observadas falhas sem junções devido a cisalhamento de contra-chavetas, que fazem com que se quebrem pinos de acoplamento /61/.

Para barras de suporte, os grampos forjados são preferíveis aos do tipo de chapa dobrada. Como ordinariamente projetado, o grampo de chapa dobrada tende a falhar sem aumentar a resistência da barra. Sabe-se que erros de fabricação devido a subdimensionamento de molde de rosqueamento de barras causaram falhas devido ao espanamento de roscas / 62 / . Barras de recalque tem uma maior capacidade de dissipação de energia através de dilatação do que as barras padrão, e devem ser preferidas em certas estruturas como torres tanques, onde é comum a sobretensão devido a forças sísmicas.

Nas instalações do vaso de pressão e similares, requer-se freqüentemente detalhes antissísmicos que permitam movimento devido a variações de temperatura. Das várias maneiras de se fazer isso; duas são apresentadas nas Figs. 4.2 e 4.3 .

Um sistema de suporte para um vaso cilíndrico suspenso é indicado esquematicamente na Fig. 4.2 . O movimento térmico na direção x é permitida para B; o movimento sísmico nessa direção é suportado pelo membro de suporte AE. Os membros AC e BD suportam o movimento sísmico na direção y; o membro BD é articulado para acomodar o movimento térmico em B.

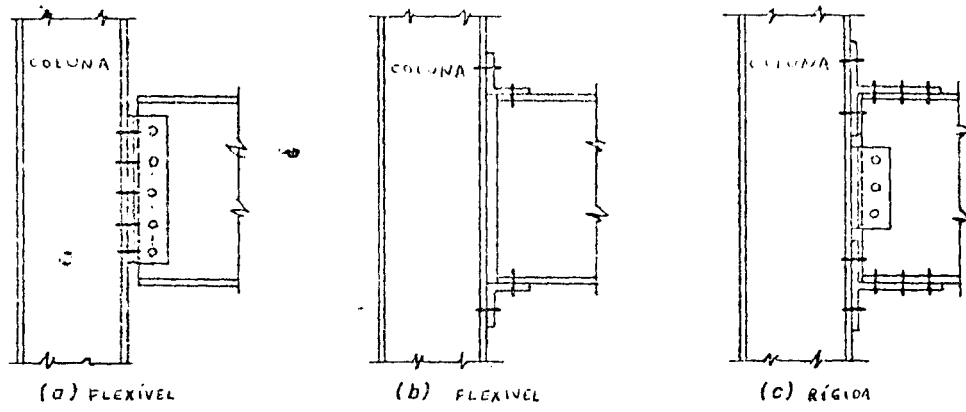


FIG. 4.1

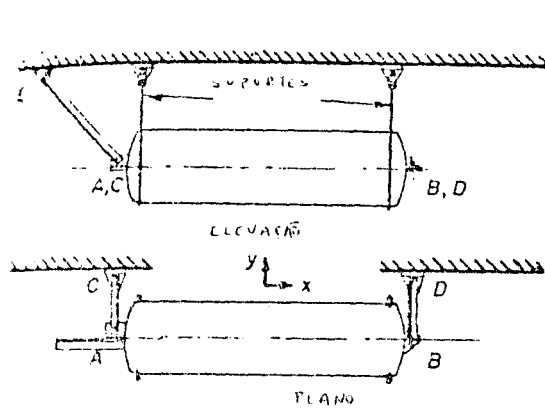


FIG. 4.2

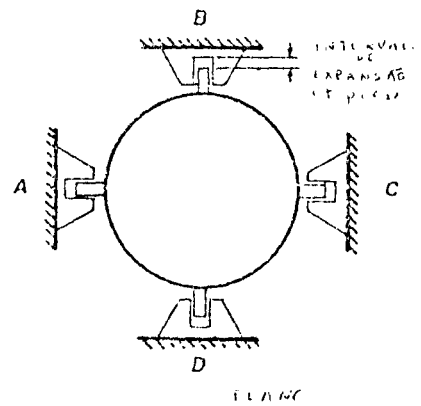


FIG. 4.3

O sistema mostrado na Fig. 4.3 para suporte sísmico de um vaso cilíndrico vertical suporta o movimento térmico vertical e radial devido a um grande espaço livre. A translação do vaso num plano horizontal é limitado pelo pequeno espaçamento entre as superfícies de contacto das asas nas paredes do vaso e as da estrutura de suporte.

4.7.2- Detalhes do Concreto

Na construção sismo resistente com concreto armado deve-se tomar cuidado para que pontos potenciais de fraqueza, que em circunstâncias normais não oferecem problemas, falhem sob a ação de cargas sísmicas.

É desejável a continuidade da armadura para evitar reversões nos sinais dos momentos de flexão. Parte da armadura do topo deve cobrir todo o comprimento do vão, e uma parte da armadura do fundo deve ser contínua com a dos vãos adjacentes. Os arcos que utilizam barras diagonais podem ser usados vantajosamente para reforçar intersecções vigas-pilares.

Em geral, é preferível projetar edifícios de laje plana de diversos andares como estruturas com parede de cisalhamento pois é difícil transmitir grandes momentos de flexão da laje para os pilares. As barras colocadas na parte inferior das lajes planas principais, são de valia na prevenção de rachaduras onde os momentos de flexão podem se desenvolver.

Em lajes de piso inferior, usadas como diafragma, costuma-se utilizar rebordas de aço concentradas nos cantos da laje, para suportar as tensões. A armadura para combater a retração na laje bem como a armadura principal agem conjuntamente com a armadura da parede, através de cavilhas entre laje e parede com o intuito de minimizar fissuras na laje. As tensões de tração devidas aos momentos de flexão nas paredes de cisalhamento também são suportadas por armadura concentrada nas arestas verticais da parede.

Falhas devido a cisalhamento em certos tipos de membros de concreto armado resultam em sucessivas revisões de códigos. Essas revisões se aplicam a vigas contínuas ou limitadas ligadas a uma laje de tal modo que uma ação tipo viga T não possa o correr. Essas revisões aconselham ainda que a armadura de membrana projetada para $2/3$ do cisalhamento total em uma dada seção seja usada em regiões de momento negativo.

Ocasionalmente, o cisalhamento sísmico em uma dada seção transversal combinado com os devidos a outras cargas resultam em cisalhamento positivo ou negativo máximo com intensidade suficiente para requerer armadura de membrana. Sob essas condições, estribos verticais devem ser usados pois são eficazes independentemente do sinal de cisalhamento, enquanto armaduras inclinadas são inteiramente aptas para cisalhamentos com sentidos que induzam tensões nelás.

Sob o efeito combinado de compressão e flexão, um modo comum de falha para os pilares ligados é pelo empenamento da armadura principal e lascamento da cobertura de concreto próximo ao nível do piso. Deve-se usar um espaçamento reduzido entre os nós. Pilares com armadura em espiral tem uma maior resistência, sendo menos vulneráveis a esse tipo de falha.

Foram observados, freqüentemente, danos sísmicos em junções de construções. Tal tipo de dano pode ser minimizado pelo uso dos métodos de preparação de junções que resultam numa resistência maior. Quando as forças cisalhantes são altas, algumas vezes se utilizam barras diagonais.

Escadas de concreto, freqüentemente sofrem dano sísmico devido a deslocamento diferencial entre os pisos conectados. Isso pode ser evitado através das junções abertas em cada piso da escada para eliminar o efeito de suporte ou proporcionar um caminho de carga adequado para as forças utilizando paredes de escadadas que se estendem por toda a sua altura.

A experiência sísmica com construção inclinada premoldada é bastante limitada. Fontes potenciais de fraqueza são as junções entre as unidades. No caso de paredes inclinadas, o uso ou de concretagem local ou guniço com barras de parede imbricadas nas junções é considerada a mais aceitável / 63 / .

No topo e no fundo requer-se uma ligação contínua. Em alguns casos, a transferência de carga através das juntas tem que ser feita utilizando-se elementos de ligação mecânica como barras de reforço, cavilhas, soldas e chavetas.

4.7.3- Fundações

Fundações sobre estacas e fundações sobre solos com pequeno valor de suporte, devem ser inteiramente unidas de modo a não permitir movimento relativo entre as diversas partes. Uma rede de interconexão precisa ser utilizada, cada membro sendo projetado para uma carga axial igual à porcentagem da carga vertical carregada pela mais pesada das sapatas de alicerce. Alternativamente, uma laje de interconexão de concreto armado restringindo os movimentos em todas as direções horizontais poderia ser usada para esse propósito.

4.7.4- Separação Estrutural

O espaçamento entre estruturas adjacentes ou partes de uma mesma estrutura com massas ou rigidez diferentes deve facilitar amplitudes máximas do movimento de cada estrutura ou parte. Juntas enrugadas frágeis que devem ser contínuas através de paredes e piso são freqüentemente usadas para cobrir esse espaço.

A prática no uso de separações estruturais varia com os tipos de construção. Tais separações são usadas mais freqüentemente em estruturas de concreto armado e de alvenaria em junções entre partes distintas de edifícios e em outros locais onde haja grandes e possivelmente indeterminadas forças utilizando-se uma construção integrada.

As separações são usadas menos freqüentemente em construções de aço, onde estão envolvidas pequenas forças sísmicas. As separações de estruturas longas de aço devido a expansões e contrações térmicas geralmente, funcionam como separações sísmicas.

Raramente utilizam-se separações estruturais em edifícios

os de armação de madeira, pois, nesse caso, uma construção integrada pode ser economicamente projetada para trans mitir as re-
lativamente pequenas forças sísmicas geradas na estrutura.

5. CARACTERÍSTICAS SISMO-RESISTENTES DAS USINAS PWR

5.1 - Considerações Gerais Sobre Segurança Nuclear

O pior acidente, que os especialistas julgam ter uma pequena mas identificável probabilidade de ocorrer, é tomado como base para se avaliar a segurança dos reatores. O critério fundamental para a escolha de um local para sua instalação, do projeto de seu sistema de contenção, e dos procedimentos de operação e administração baseia-se na resposta dos sistemas e equipamentos na ocorrência do que se chama de Máximo Acidente Crível. Utilizam-se os seguintes termos para descrever os acidentes em ordem decrescente de severidade / 64 /:

Máximo Acidente Concebível - Este acidente envolve a perda de toda, ou quase toda, energia armazenada no reator e sistemas conexos. Neste caso, o mecanismo que inicia o acidente não pode ser postulado, e o modelo do acidente é puramente hipotético.

Máximo Acidente Crível - Este é um acidente de máxima consequência e pode ocorrer com probabilidade finita mas pequeníssima e é iniciado por mecanismos compreensíveis. Os reatores devem ser projetados para evitar este tipo de acidente.

Máximo Acidente Provável - Este é um acidente máximo, com uma significativa possibilidade de ocorrer. Os mecanismos para iniciá-lo são bem conhecidos e incluem erros humanos. A proteção contra este tipo de acidente é feita por controle administrativo, instrumentação de proteção e previsões apropriadas de projeto.

Quando se avalia a segurança de um reator e de sua localização, é necessário analisar e minimizar todos os fatores que podem aumentar a possibilidade de liberação descontrolada de radioatividade. O aperfeiçoamento do projeto e da operação de reatores serviu para reduzir a probabilidade de muitos tipos de acidente. Os maiores sismos assumem, relativamente, grande importância como possível

causa de acidentes. É possível projetar reatores, muitas vezes sem um aumento excessivo de custos (particularmente nas instalações menores), que não sofram danos perigosos na ocorrência do pior sismo postulado (quando sua magnitude esteja sob limites tais que as formações rochosas subjacentes possam resistir).

O problema básico, é que os efeitos fisiológicos e genéticos da radiação no ser humano requerem que se minimize a exposição, bem como a contaminação do meio ambiente. A necessidade de contenção para reatores, depende primeiramente, da quantidade de produtos de fissão existentes no núcleo, da proximidade do reator das habitações, e da extensão que pode atingir a dispersão dos produtos de fissão quando da ocorrência do máximo acidente crível e eventos subsequentes.

Embora do ponto de vista governamental, a segurança da população torne o possível escape de material radioativo devido a efeitos sísmicos o fator decisivo nos danos a uma central nuclear, um outro critério bastante severo é imposto pelo operador da central. Ele, ordinariamente, requer a máxima utilização econômica do reator e, portanto, não lhe são aceitáveis danos físicos ou funcionais. Na escolha de locais para a instalação de reatores, o julgamento deve ser qualitativo e quantitativo, embora seja impraticável assinalar as probabilidades exatas da cadeia de eventos diferentes que pode resultar em acidente.

Os fatores que tendem a aumentar o risco de liberação de radiação numa central incluem:

- o nível de potência e duração do ciclo de carregamento do combustível, que determinam o inventário de produtos de fissão
- a velocidade da ação de controle e os fatores nucleares inerentes que alteram a reatividade relacionada à magnitude de uma possível transiente de potência
- o projeto do núcleo, na medida em que decrescem:
 - a- o tempo de vida neutrônica que determina, em parte, a taxa de aumento de potência
 - b- a capacidade térmica
 - c- a maneira como o calor é retirado do núcleo
- altas pressões e temperaturas de operação

Os fatores que tendem a diminuir o risco de liberação de radiação, são:

- o grau de contenção a possíveis liberações de produtos de fissão
- seleção de materiais resistentes ao calor, não inflamáveis, não tóxicos e que não sejam ativados sob irradiação
- instrumentação de proteção
- proteção contra explosões
- controles administrativos para todas as condições de operação e procedimentos padronizados para todas as condições de manutenção
- sistemas de emergência, tais como suprimentos extras de energia elétrica, refrigeração suplementar ...

Os fatores que determinam a adequação de um local, para a instalação de uma central nuclear incluem:

- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| - densidade populacional | - sismicidade |
| - meteorologia | - geologia |
| - hidrologia | - distância de exclusão |

Muitos outros fatores estão envolvidos; assim, quando se vai construir um determinado tipo de central nuclear em um dado local, cada central deve ser estudada em particular com todas suas especificidades.

5.2 Acidentes Potenciais

5.2.1- Fenômenos Sísmicos como causa de falhas em reatores

A - Início do acidente

Durante os últimos anos, tem-se desenvolvido uma sofisticação considerável na análise de máximos acidentes críveis.

Desenvolveu-se uma literatura baseada, fundamentalmente, na experimentação, onde o máximo acidente crível é, principalmente, de caráter nuclear. Foram feitos testes em vários tipos de reatores. Notáveis a esse respeito, foram os experimentos SPERT, BORAX, KEWB, EBR-1 e de Godiva, que englobaram o comportamento cinético sobre um largo domínio de variáveis de operação. Esses programas delinearam áreas seguras de operação de muitas configurações de núcleos de reatores; programas posteriores incluíram outros tipos. Algumas outras pesquisas incluíram: (1) considerações sobre transferência de calor transiente, tais como fluxos de calor em que o bloqueio de vapor do elemento combustível em reatores com refrigerante líquido, ocorre com concomitante decréscimo na transferência de calor e subsequente fusão, (2) condições sob as quais muitos materiais do reator reagem explosivamente com a água, (3) a resistência de vasos de pressão e de estruturas de contenção a explosões internas, e (4) estudos sobre a liberação de produtos de fissão em condições simuladas de acidente.

No último decênio, contudo, a atenção dos especialistas nucleares voltou-se para os sistemas periféricos da usina nuclear, uma vez que o conhecimento do comportamento do núcleo atingiu domínio adequado.

Assim, perdas de refrigeração do circuito secundário da usina, além do circuito primário, tornou-se motivo de investigações detalhadas. Envolvem-se nestes casos, todos os sistemas auxiliares e de serviços conexos. Mesmo as considerações sobre estabilidade da rede elétrica e suprimentos de energia externa tornaram-se importantes nas considerações de segurança. É interessante notar, aliás, que o recente acidente de Three Mile Island teve seu início em falhas dos sistemas de serviço do circuito secundário de potência da usina. O mais recente incidente em Crystal River, Florida, envolvendo também um PWR fabricado pela

Babcock & Wilcox, o mesmo fabricante do reator de Three Mile Island, teve início com uma falha do suprimento de potência de corrente contínua aos sistemas de controle e instrumentação do reator.

Outro importante item sobre a segurança da usina nuclear, que se encontra também na periferia da mesma, é a química da água de refrigeração do condensador, ou seja, circuito terciário. A química da água de refrigeração, por exemplo, do mar, pode provocar problemas sérios de comportamento de materiais nos geradores de vapor, ocasionado pelo vazamento da água do mar para dentro do condensador e, portanto, do circuito secundário. Lembremos que o sistema de desaeração do condensador mantém o seu interior em pressão muito abaixo da atmosférica (1 pol. Hg, por exemplo) o que possibilita a entrada despropositada da água do mar no circuito secundário através de vazamentos.

A razão para estudos de segurança não nucleares, está no fato de que o mecanismo iniciador de uma liberação de produtos de fissão não é, necessariamente, um transiente nuclear. Um acidente pode ocorrer devido a causas químicas, termodinâmicas ou mecânicas. Danos severos, causados por sismos ou súbita liberação de energia acumulada em sistemas pressurizados, caem nessa categoria. Uma liberação muito grande de produtos de fissão ocorre, somente, se há fusão do encamisamento do elemento combustível ou sua destruição (exposição a combustível irradiado) como resultado de um mecanismo inicial. No entanto, uma certa quantidade de radioatividade po ser encontrada em muitos sistemas, externos aos elementos combustíveis, como resultado da radiação prolongada; isso pode ser significativo para a central, em casos de acidente.

As primeiras especulações sobre causas de acidentes em reatores, focalizaram as ações humanas como tendo a mais alta probabilidade de precipitar um desastre. As ações humanas podem ser parcialmente controladas e o projeto de uma central tem características de segurança para prevenir o início de acidentes devido

a erro humano. Com a minimização do erro humano como um provável causador de acidentes graves, os eventos sísmicos assumiram um papel mais importante nas discussões sobre segurança. De fato, na identificação de um possível evento que poderia precipitar a liberação de grandes quantidades de produtos de fissão para a atmosfera, as análises podem singularizar os sismos fortes (se bem que o máximo acidente crível pode não envolver um evento sísmico).

B - Aumento de potência

Os aumentos na potência do reator, que acompanham aumentos na taxa de fissão, podem ser causados por má operação dos sistemas de controle. Os requisitos de transferência de calor para reatores, fazem com que eles sejam operados com um pequeno fator de segurança para remoção de calor. Um aumento de potência em um fator de 2 ou 3 é, em geral, suficiente para causar a fusão dos elementos combustíveis. Normalmente, os níveis de desligamento causado por sobrepotência estão entre 110 e 125% da potência máxima e, raramente, acima de 150%. Esse nível é, principalmente, para evitar súbitos aumentos de potência, e a fusão do cerne do reator sob aumento mantido de potência é impedida por controles adicionais de proteção e a melhoria no projeto mecânico das barras de controle, eliminaram grandemente a possibilidade de transientes de potência com suficiente perda de energia para exceder a capacidade de calor armazenado nos elementos combustíveis. No entanto, abalos sísmicos podem induzir pequenos sinais errôneos na instrumentação medidora de potência (a menos que tal equipamento esteja instalado para resistir a qualquer deslocamento lateral que possa afetar a operação normal dos controles) ou danos sísmicos podem acionar as barras de controle, mas impedir sua inserção mecânica em caso de aumento excessivo na potência e danos no cerne do reator.

Pode ocorrer também, num reator com um coeficiente de reatividade altamente negativo, um aumento de potência se a temperatura do cerne é diminuída pela adição de um volume de água fria,

como no ato de ligar um circuito que esteve desligado por um período considerável. Não é inconcebível que distúrbios sísmicos possam romper tubulações ou vasos e causar este tipo de acidente, mas esta é uma possibilidade remota num reator bem projetado.

C - Perda de fluxo

A integridade do elemento combustível é dependente da continuidade do fluxo refrigerante, sendo este, geralmente, do tipo de circulação forçada. Normalmente, existe uma bomba de suporte e um sistema de emergência para produzir pelo menos o fluxo necessário para a remoção do calor devido ao decaimento de produtos de fissão num reator desligado. Grandes bombas centrífugas e, em particular, as conexões de eixo com a força motriz são sensíveis a desalinhamentos que podem ser produzidos por abalos sísmicos. Similarmente, um sismo pode ser o iniciador de reduções no fluxo se as válvulas da instrumentação de controle de fluxo são sensíveis a vibrações.

D - Perda de Refrigerante

O máximo acidente crível para reatores refrigerados por água, com vasos de pressão, bombas, tubulação e trocadores de calor é a perda de refrigerante do cerne (LOCA, loss of coolant accident). Fissuras no circuito primário podem ocorrer. Tais fissuras ocorreriam em áreas com material fatigado pela radiação, sendo que um sismo poderia precipitar tal acidente.

Embora menos provável, pode ocorrer deslocamento entre pontos de suporte. Tubulações longas com pouco suporte podem oscilar com frequências próximas da ressonância induzindo rupturas nas juntas. Há, em geral, um perigo adicional quando o suprimento não pressurizado de água de emergência é envolvido. Este suprimento secundário, pode sofrer danos quando sob a ação de ondas sísmicas. Reservatórios elevados, sobre suportes flexíveis podem estar sujeitos a grandes forças dinâmicas o que no passado, em instalações não nucleares, levou ao colapso da torre.

O LOCA é o mecanismo mais provável pelo qual um grande sismo causaria o máximo acidente crível. Perda de fluxo é o segundo evento em severidade de consequências que poderia ser causado por um sismo. Ambos poderiam causar a fusão do encamisamento e a liberação de produtos de fissão.

Um acidente do tipo LOCA previsto mas, inesperadamente freqüente, pode ocorrer quando as válvulas de alívio do pressurizador, em reatores PWR, não fecham automaticamente quando são abertas por sobrepressão e deviam voltar a fechar com a queda de pressão subsequente. Esse tipo de LOCA é o que ocorreu em Three Mile Island e em Crystal River. Normalmente, ele pode ser facilmente contornado pelo sistema de refrigeração de emergência e correção mecânica. No caso de Three Mile Island, o subsequente desligamento da bomba do circuito primário foi que provocou o sobreaquecimento do cerne do reator.

5.2.2 Fontes de Energia e Mecanismos de Liberação

A energia acumulada no refrigerante é a maior fonte da energia que é liberada durante um máximo acidente crível. Outras fontes de energia podem ser químicas ou nucleares.

A energia liberada em transientes nucleares ou a perda súbita da refrigeração do reator, além de ser um fator em qualquer dano mecânico, pode causar grandes problemas de segurança com a fusão dos elementos combustíveis. Produtos de fissão seriam liberados desses elementos ao mesmo tempo que a temperatura e a pressão de vapor do refrigerante remanescente estariam aumentando. As forças resultantes poderiam causar fissuras na contenção primária (se já não ocorreu perda de refrigerante através das mesmas) acarretando a liberação de produtos de fissão. A liberação da energia acumulada poderia fissurar os envoltórios mais externos da contenção (no entanto, estes são projetados para resistir a forças que possam ser geradas pela liberação de energia acumulada de qualquer fonte) liberando radioatividade para a vizinhança imediata da central. A extensão em que distúrbios

sísmicos possam iniciar ou agravar qualquer tendência para liberação de produtos de fissão deve ser avaliada para cada caso particular.

Além da quantidade de energia liberada, a taxa de liberação para os sucessivos envoltórios é importante. Abalos ou cargas de pressão transiente podem ocorrer e a natureza dos mecanismos de liberação precisariam ser incluídos nos critérios de projeto dos envoltórios.

Se todos os envoltórios de contenção fossem fissurados, a energia liberada no acidente poderia produzir uma nuvem de produtos de fissão liberados a uma certa altitude sobre o local da central, de onde seria dispersada pelos ventos. A difusão a partir de uma fonte elevada poderia, em certas circunstâncias, produzir danos biológicos maiores que uma fonte equivalente no solo, embora o contrário seja normalmente verdadeiro.

A - Fontes de energia nuclear

Têm sido postulados vários mecanismos pelos quais o nível de potência de um reator pode ser aumentado. O inventário de material fissionável do núcleo poder ser aumentado, venenos retirados, ou o escape de nêutrons do núcleo pode ser diminuído. Isso pode ocorrer, por exemplo devido a rápida remoção das barras de controle, queda de conjunto combustível no cerne do reator, adição súbita de moderador em um conjunto não moderado, ou remoção instantânea de um material experimentador e diminuidor de reati vidade. É concebível que tais eventos sejam causados por efeitos sísmicos (apesar de improvável), e tal possibilidade deve ser analisada para cada reator. Há, no entanto, certos fenômenos inerentes que podem fazer o reator retornar a uma condição não crítica antes que ocorra qualquer excursão, mesmo no caso de um sismo. Esses operam independentemente de qualquer mecanismo de segurança projetado. Aumento na fuga de neutrons, decréscimo na densidade do moderador e auto expansão térmica do núcleo, são exemplos. Também é possível que uma eventual fusão dos elementos combustíveis resulte em dispersão para uma configuração subcrítica (O reverso também é possível).

A taxa de aumento da potência de um reator é governada pelo excesso de reatividade do cerne e pelo tempo de vida dos nêutrons (tempo entre a geração de um nêutron e sua subsequente participação na fissão). Em reatores térmicos (aqueles em que a maioria das fissões é causada nêutrons de baixa velocidade, em equilíbrio térmico com seu ambiente), a energia pode ser dissipada com rapidez suficiente (devido a tempos de vida relativamente longos) de modo que uma taxa de liberação de energia que se aproxime de uma explosão é dificilmente alcançável. Assim, os reatores térmicos são relativamente insusceptíveis a mal funcionamento induzido por sismos que tenda a aumentar rapidamente seu nível de potência levando a situações perigosas.

B - Energia acumulada

Grandes volumes de refrigerante líquido ou gasoso a grandes pressões podem ser a maior fonte de energia susceptível a liberação em caso de sismos. Tensões de longa duração existentes no sistema de refrigeração podem causar rupturas se há superposição de vibrações sísmicas ou deslocamento relativo de componentes. O refrigerante que escapa pode alargar a ruptura e talvez criar e arremessar mísseis com velocidade suficiente para alcançar e perfurar outros envoltórios que não estão adequadamente projetados. A própria liberação de energia irá, em uma central com contenção firme, alcançar a pressão do gás no interior do escudo envoltório. Desde que uma falha no circuito primário é um acidente concebível; a especificação para pressão mínima no envoltório é freqüentemente calculada (a despeito da ocorrência ou não de sismos), assume-se que toda a energia liberada alcança temperatura e pressão no interior do envoltório com o equilíbrio termodinâmico. A energia térmica acumulada deve ser somada às provenientes de outras fontes para se avaliar a carga total em cada contenção ou a altitude que uma nuvem dos produtos de fissão pode alcançar caso a contenção externa sofra grandes rupturas. A distribuição por ventos e a radiação direta dependem dessa altitude. Em comparação com quantidades de energia de outras fontes, a energia térmica é freqüen

temente a maior, tornando-se o fator de controle no projeto de escudos contra mísseis, vendavais e de contenção. Dificilmente se concebe que toda energia térmica seja liberada mas a maior incerteza em cálculos de periculosidade está na fração de energia que é liberada. Uma grande quantidade de estudos realizados tem reduzido essa incerteza.

C - Fontes de energia química

Os danos mecânicos devido a sismos violentos, embora não causando diretamente o máximo acidente podem resultar na mistura de materiais que são normalmente mantidos separados (devido à sua mútua natureza reativa). A reação subsequente e a liberação de energia podem causar danos adicionais acarretando sérias conseqüências.

No acidente de Three Mile Island tornou-se notório o perigo da explosão do hidrogênio produzido no interior do vaso de pressão. Essa notoriedade, em verdade, deveu-se em boa parte ao sensacionalismo jornalístico. O que ocorreu é que, com a alta temperatura resultante do fato do cerne do reator estar em parte a descoberto e, portanto, sem refrigeração, o vapor de água reagiu quimicamente com o zircônio do encamisamento dos elementos combustíveis, oxidando-o e liberando conseqüentemente o hidrogênio da água. O hidrogênio poderia explodir se houvesse oxigênio disponível o que não era o caso. Na verdade, em sistemas PWR, coloca-se propositadamente hidrogênio em pequena quantidade no circuito primário, em operação normal, a fim de absorver o oxigênio eventualmente contido neste circuito, pois, a presença do oxigênio é danosa aos materiais que compõem o circuito primário.

D - Liberação de contaminantes

Na maioria dos reatores, há tres barreiras entre os produtos de fissão e o meio ambiente. A primeira barreira é o encamisamento do elemento combustível; a segunda é o circuito primário; e a terceira é o vaso de contenção. O efeito da energia sobre essas barreiras precisa ser analisado para se avaliar o risco potencial sobre a central. Se apenas uma dessas barreiras resistir intacta a um acidente, provavelmente não haverá perigo para a saúde e segurança da população dentro do raio de possíveis efeitos diretos de radiação.

Os abalos sísmicos podem afetar essas barreiras direta ou indiretamente:

(1) Barreira primária (encamisamento do elemento combustível)

a - Uma ruptura direta devido a movimentos sísmicos é inverossímil para elementos combustíveis metálicos. A ruptura de elementos cerâmicos quebradiços ou celas metálicas em elementos cerâmicos é possível, mas a fração de produtos de fissão liberada através dessas fraturas seria provavelmente pequena.

b - Os efeitos indiretos, que causam a fusão dessa barreira durante um aumento de potência, produzidos devido ao mal funcionamento das barras de controle ou por temperatura excessiva em caso de perda de fluxo refrigerante, poderiam ser iniciados por distúrbios sísmicos.

(2) Barreira secundária (envoltório do sistema primário de refrigeração)

a - As pressões internas podem aumentar quando da vaporização do refrigerante devido a aumentos de potência, fluxo reduzido, ou quantidade de refrigerante e excede a resistência do vaso. Reações água-metal após a fusão do combustível poderiam auxiliar este excesso de energia.

b - A ruptura direta da barreira secundária por dano sísmico é, provavelmente, o acidente mais verossímil que pode ser iniciado por um sismo. Em centrais com refrigerantes de alta pressão,

como os reatores refrigerados por água, o sistema primário é maciço e complexo. Os suportes de todas as componentes devem admitir expansão térmica diferencial (ou restrita) para permitir o movimento enquanto resiste a oscilações causadas por movimentos sísmicos. Fadiga, quebramento por radiação e modificações mal feitas tornam a central mais sujeita a danos de vibração com o tempo. Este dano pode ter a forma de:

- ruptura de vasos e tubulação causada por movimento relativo de componentes da central ou cargas súbitas.
- danos a penetrações de instrumentos (entradas de barras de controle, circuito elétrico, etc.)
- danos externos causados pela queda de objetos como paredes en-voltórias, guindastes ou outras estruturas elevadas.

(3) Barreira terciária (vaso de contenção)

Salto na pressão interna dado a falha de origem sísmica na central podem romper a contenção ou, o mais provável, aumentar a taxa de liberação de produtos de fissão através das aberturas existentes. Esta taxa de liberação, bem como a radiação direta, é considerada quando da escolha de um local para um reator e seu raio de exclusão.

No entanto, na consideração de perigos potenciais é difícil predizer a taxa de liberação de um grande vaso. A precipitação, por um evento sísmico, de um máximo acidente crível pode levar a uma sobrepressão predita e à perda de produtos de fissão, mas não criará, necessariamente, um único perigo a menos que a liberação através da barreira final constituída pelo vaso de contenção seja aumentada. São muitas as possibilidades para produzir esse aumento. Por exemplo, subestimativas grosseiras das pressões criadas (com a ruptura no vaso primário) permitiriam esse aumento, bem como falhas na vedação do vaso na fundação ou ao redor de penetrações causadas por movimentos sísmicos. No entanto, danos diretos na contenção por ressonância destrutiva causada por movimento sísmico é inverossímil porque as frequências fundamentais dessas estruturas não caem normalmente na faixa crítica dos espectros de resposta sísmica e porque elas são geometricamente simples e severamente construídas. Podem ocorrer

também danos causados por mísseis, devido à fragmentação do circuito primário. Também é possível que ocorram danos causados por queda de objetos. Como já foi discutido, as vibrações sísmicas podem ser significativas em caso de rupturas no sistema primário e também na geração de mísseis.

Para o escudo terciário, as possíveis linhas de defesa contra mísseis incluem os escudos para atenuação de explosões, vendavais e diminuição das ondas de choque.

5.3 - Danos Potenciais em um PWR

A extensão de danos sofridos por uma estrutura é, em geral, dependente de: (1) tensões causadas por abalos sísmicos (juntamente com outras forças significativas), (2) propriedades sismo-resistentes da estrutura e, (3) a atividade na central no momento dos abalos sísmicos.

5.3.1- Áreas gerais dos sistemas do reator

O objetivo principal dos sistemas de segurança de um reator é o de prevenir e impedir a liberação de produtos de fissão para o meio ambiente. Esse aspecto de segurança, distingue as centrais nucleares das centrais convencionais, onde os riscos são relativamente localizados. Apresenta-se, a seguir, uma listagem de certos componentes do reator que podem ser sensíveis a danos mecânicos durante sismos de grande intensidade, podendo envolver maiores problemas de segurança:

(1) Sistema primário do reator

a. cerne do reator

1. suportes
2. elementos combustíveis ou subconjuntos
3. posicionadores
4. barras de controle e segurança

b. vaso de pressão

- c. circuito primário de refrigeração
 - 1. trocador de calor
 - 2. pressurizador
 - 3. tubulação, válvulas, bombas, etc.
- (2) Sistema secundário
 - a. trocador de calor
 - b. turbogerador
 - c. condensador
 - d. sistema de refrigeração
- (3) Sistemas auxiliares
 - a. sistema de colchão de gás inerte
 - b. sistema de água de emergência
 - c. sistema elétrico
 - d. instrumentação
 - e. sistema de purificação do refrigerante
 - f. sistema de ventilação
- (4) Sistema de manuseio e estocagem de combustível
- (5) Edifício de contenção secundário
 - a. escudo envoltório
 - b. fundação

5.3.2- Danos mecânicos diretos

Danos em estruturas sobrecarregadas devido à transmissão direta do movimento do solo, são chamados "danos mecânicos diretos". Tais falhas podem ser classificadas da seguinte maneira:

- (1) falhas em unidades estruturais isoladas devido a encurvamento, dobramento, ou tensões cisalhantes causadas pela movimentação das mesmas unidades. Em particular, estruturas longas e finas tais como as barras de controle, conjuntos combustíveis, respiradouros, torres de água, podem estar sujeitos a sofrer torções ou rupturas.
- (2) falhas de linhas ou membros ligados a unidades estruturais sujeitas a grandes movimentações diferenciais. Por exemplo, a tubulação de refrigeração que liga o vaso de pressão aos trocadores de calor, pode ser sobrecarregada durante a ação de sismos.

(3) falha na base das unidades estruturais. Por exemplo, cavilhas de ancorar e cavilhas de fixação, podem ser estiradas acima de seus limites elásticos até sua completa ruptura. O concreto da base pode rachar ou até desagregar.

(4) falha causada por cargas dinâmicas tais como movimentos de líquidos já que oscilações de líquidos com superfície livre, podem aumentar as tensões causadas por um sismo.

(5) falha em estruturas causada por abalos sísmicos impostos a materiais enfraquecidos com ataque químico, quebraimento por radiação, tensão-corrosão, choque térmico, ou sobrecarga anterior.

5.3.3- Danos nucleares

Os abalos sísmicos podem levar a perigosas flutuações de potência, através de mecanismos de instabilidade e ressonância e retardamento na inserção de reatividade negativa pelas barras de controle. Se ocorrerem surtos de potência no reator, o calor gerado pode causar sérios danos. Pode haver falha por choque térmico devido às altas temperaturas e pequeno intervalo de tempo envolvidos, fusão parcial do cerne e um aumento de pressão suficiente para causar rupturas no circuito primário. Pode ocorrer ainda, a liberação da energia armazenada por vaporização do refrigerante, possíveis reações água-metal e explosões de hidrogênio.

5.3.4- Danos indiretos

Os possíveis danos indiretos, causados por fenômenos sísmicos em centrais nucleares, incluem: queda de objetos, fogo, pânico de operadores.

Atenção especial deve ser dada a grandes massas, colocadas em posições elevadas como, por exemplo, o sistema suspenso de ponte rolante, que pode ser uma área sensível durante a ocorrência de movimentos sísmicos laterais. O possível desabamento de estruturas externas, tais como chaminés de exaustão e danos no escudo envoltório da contenção, devem ser considerados no projeto sísmico.

5.3.5- Interação entre as componentes maiores

Num sismo típico, uma fundação bem projetada, em solo firme ou rocha duplicará o movimento imposto pela passagem de ondas sísmicas /65/. Não haverá desacoplamento, definido como movimento relativo entre o solo e aquela parte da estrutura que se estende abaixo do nível de superfície, que seria evidenciado por fissuras ou rachaduras entre a fundação e o solo depois de um evento sísmico.

Tais fundações deveriam ser de espessura suficiente e ter o reforço necessário para suportar forças cisalhantes e de curvatura causadas pela passagem de ondas sísmicas. Essas forças incluem reações dinâmicas do escudo biológico, trocadores de calor, vaso de pressão, e outros equipamentos maciços suportados pela fundação.

O escudo biológico é, provavelmente, uma estrutura monolítica firmemente presa às fundações. Se esta é rígida (alto coeficiente de amortecimento) e vinculada à fundação com reforço de aço, mesmo em caso de terremotos desastrosos a probabilidade de dano é pequena. Assim, envoltórios construídos com blocos de concreto cimentados sem reforço deveriam ser evitados pois tais estruturas, usadas como escudos temporários para propósitos experimentais, são susceptíveis a danos por acelerações laterais. A instalação de reservatórios de líquidos de superfície livre, estruturas com alta elasticidade e pequeno amortecimento, máquinas pesadas ou equipamento alto e pesado com pouco suporte lateral, não deve ser permitida no topo da proteção biológica. Tal equipamento, além de sua alta probabilidade de falha poderia ainda fomentar tensões no envoltório causadas por forças ocasionadas pela amplificação de velocidades e deslocamentos do sismo.

Em grandes reatores, um deslocamento de massa de um conjunto juntamente com detalhes de projeto que permitem liberdade para

expansão térmica radial e axial, colocam problemas especiais. Chavetamento bidimensional de componentes adjacentes ao cerne mais o uso de anéis de suporte circunferencial, são métodos que têm sido empregados para manter a integridade do cerne sob a ação de sismos.

Os suportes e contenções laterais do vaso de pressão, para grandes reatores, onde o vaso está sujeito a uma ciclagem considerável de temperatura, também causam problemas. É desejável que o aparato de suporte do vaso seja de baixa fricção tais como rolamentos de esferas, mancais de bastões, para que se evite uma excessiva carga térmica. Isto deixa o vaso livre para se expandir radialmente a partir de uma linha vertical e axialmente em qualquer direção, a partir do plano de suporte, com curvaturas de expansão adequadas ou juntas flexíveis na tubulação contactante ou outro mecanismo na tubulação para acomodar esse movimento. Nesta situação, deve-se procurar algum meio de restrição lateral, durante sismos, que permita ao mesmo tempo livre ajuste radial para a expansão térmica. Uma solução, parece ser um sistema em que o suporte lateral é feito por uma série de linguetas e escatéis arranjados radialmente ao redor do vaso de pressão. O espaço livre tangencial entre lingueta e escatel é suficiente apenas para pequenas expansões térmicas da lingueta relativamente ao escatel; ao passo que a lingueta possui movimento radial livre, relativamente ao escatel, para acomodar expansões térmicas maiores. Assim, em qualquer direção do plano horizontal, a translação do vaso relativamente aos membros de suporte é limitada pela folga entre lingueta e escatel; ao passo que é permitida expansão radial uniforme ilimitada, pelo deslizamento da lingueta relativamente ao escatel. Na utilização desse ou de outros esquemas similares para evitar danos sísmicos, a tubulação, dutos, barras de controle etc., devem ser projetados para evitar possíveis deslocamentos, assim como movimentos causados por expansão térmica.

No projeto global do reator, as componentes devem, se possível, assentar-se sobre uma mesma fundação. Isso inclui todas as componentes interligadas por dutos ou tubulação que transporta fluidos radioativos ou que podem tornar-se radioativos em caso de acidente ou outros vitais para a segurança do reator, a saber o circuito primário de refrigeração e abastecedores hidráulicos para a operação das barras de controle. Curvaturas de expansão e junções flexíveis, devem ser projetadas para dirigir não apenas movimentos devidos a expansão térmica, mas também, o máximo movimento previsível em caso de sismo.

Em centrais de grande porte, torna-se necessário construir as diversas componentes sobre fundações separadas. Por exemplo, o reator e o escudo biológico podem ser montados separadamente dos trocadores de calor e equipamento de conversão. É improvável que haja um deslocamento entre as fundações capaz de causar, sózinho, danos nas interconexões entre as diversas componentes, pois a separação máxima das fundações é pequena em comparação com o comprimento das ondas sísmicas. Também é improvável que oscilações de estruturas, sobre fundações independentes, exerçam forças na fundação que causem mais do que pequenos deslocamentos. Um desalinhamento de partes do reator sobre diferentes fundações, causado por sismos seria, principalmente, o resultado da soma de três fatores: (1) as pequenas diferenças nas acelerações, (2) a deformação diferencial em resposta ao movimento sísmico, dada as relações de massa e das estruturas suportadas pelas fundações, e (3) a possibilidade de ajustamento diferencial de fundação. Desses, o segundo fator é, provavelmente o mais importante. Interconexões entre bases separadas são, freqüentemente, feitas em pontos bem acima da superfície da fundação, por exemplo, do topo do vaso do reator com os topos dos trocadores de calor. Desde que as estruturas, tendo períodos e coeficientes de amortecimento diferentes, vão

responder com frequências e amplitudes diferentes a uma mesma excitação, os movimentos relativos nas bases podem ser amplificados pelo chicoteamento dessas componentes altas. Forças sísmicas podem mover o apoio de fundações em solos que não foram compactados com uniformidade. Além disso, as próprias interconexões oscilam, pressionando os pontos de conexão.

5.4 - Sistemas de Proteção

5.4.1- Introdução

A sobrevivência de uma central nuclear durante um evento sísmico requer que edifícios, fundações e componentes de sistemas internos sejam projetados de acordo com práticas sísmo-resistentes efetivas. Essas práticas são discutidas a seguir. Supõe-se que uma central é capaz de sobreviver durante um sismo severo, sem dano mecânico. Trata-se de equipamentos, processos e procedimentos que requerem atenção especial em caso de grandes abalos sísmicos.

É de grande importância o sistema de controle automático do reator, fundamental durante atividade sísmica, pois um sismo ocorre inesperadamente e sua duração é pequena, não possibilitando medidas de emergência por controle manual, que são dependentes do julgamento do operador.

5.4.2- Controle do reator

5.4.2.1 - Mecanismos inerentes

Os efeitos naturais, devido a mudanças nas propriedades nucleares, físicas, químicas ou geométricas do reator, que acompanham o aumento de temperatura ou potência, são de fundamental importância para o controle do reator. Se essas mudanças reduzem a taxa de população de nêutrons no fim do ciclo

neutrônico, ou aumento, no início, a tendência para a auto-estabilização existe. Dependendo do tipo do reator, sua sensibilidade a tais efeitos naturais pode ser maior ou menor e seu efeito sobre a potência, positivo ou negativo. O coeficiente total seria uma função complexa de diversos parâmetros do reator mudando de acordo com as condições de operação.

Uma diminuição na densidade de metais e líquidos com o aumento de temperatura implica, geralmente, na tendência de redução da população neutrônica. Já que transientes incipientes podem aumentar a temperatura, esse efeito tende à auto-estabilização.

As propriedades de geração e absorção de nêutrons pelos materiais do reator são dependentes da temperatura, existindo efeitos estabilizadores (de magnitude secundária em comparação com outros mecanismos). Um deles é o da mudança na secção de choque de absorção que é aproximadamente proporcional à recíproca da temperatura. Este efeito reduz a população de nêutrons com o aumento da secção de choque. O efeito Doppler relaciona-se com este mecanismo: para um reator contendo U^{238} , a secção de choque de absorção atinge valores extremamente altos para a população neutrônica de certos níveis de energia, produzindo picos de ressonância correspondentes a esses níveis de ressonância de energia.

O efeito líquido é um aumento na captura de ressonância de nêutrons por U^{238} , que geralmente age para reduzir a população neutrônica (e sua tendência a transientes) com o aumento de temperatura no reator.

Distorção geométrica na estrutura do cerne como resultado de abalos sísmicos pode causar mudança na importância dos efeitos naturais; no entanto, a extensão e direção de mudança

são de difícil estimativa. Observa-se que alguns fatores inerentes à natureza da reação em cadeia de fissão podem produzir efeitos auto-estabilizadores. No entanto, o efeito atual é peculiar a cada reator e não é confiável para propósitos de segurança em caso de abalos sísmicos. A extensão de sua dependência sísmica não é completamente conhecida mas acredita-se que seja pequena.

5.4.2.2- Mecanismos criados

Dado o fato de que os efeitos naturais de desligamento não podem ser sempre acuradamente preditos, podendo ser inadequados para moderar e manter um nível particular de potência, o controle prático do reator é feito geralmente pela inserção ou remoção de material fortemente absorvedor de nêutrons (na forma de barras) no cerne do reator. Esses materiais diminuem a população neutrônica em sua vizinhança imediata, restringindo sua tendência à fuga, e garante uma taxa de ascensão razoável para qualquer nível desejado de potência.

As barras de controle são, em geral, dirigidas mecanicamente, e utilizam motores elétricos que agem mecânica, hidráulica ou magneticamente. A prioridade, em segurança, deve ser dada à integridade estrutural e funcional dos mecanismos de controle durante os eventos sísmicos. É claro que também é necessário que os medidores e outros aparelhos (que controlam o movimento das barras de controle) não sofram danos durante os sismos.

Sob condições normais, as barras de controle podem operar manual ou automaticamente em resposta a sinais de detectores de radiação como o fluxo neutrônico (e potência do reator) que flutua próximo ao nível da potência desejado. Em casos onde um desligamento rápido é necessário (como em caso de grandes terremotos), mecanismos de desligamento súbito são empregados, eles desengatam as barras de suas unidades de direção permitindo a queda livre das barras no cerne (algumas vezes ajudadas por um impulso inicial) ou as barras podem ser inseridas rapidamente por fontes de força de suporte ao lado dos mecanismos normais de direção. Esses mecanismos devem ser projetados de modo a assegurar sua operação durante abalos sísmicos, e devem ser acionados rapi-

damente de modo a prevenir liberações. O desligamento súbito pode ser iniciado sob condição considerada precursora de operação insegura, as condições mais significativas são o excesso de potência e um período (medida inversa da taxa de aumento de potência) anormalmente pequeno. A instrumentação de controle que responde a esses parâmetros deve permanecer operável além do ponto em que outras componentes do reator tenham sido significativamente danificadas, indiferentemente da operação do sistema de controle.

Um mecanismo adicional de controle existe em todos os reatores e pode ser usado em caso de grandes eventos sísmicos. Por exemplo, os reatores que utilizam combustível ou moderador líquido podem ser quimicamente envenenados pela adição de um forte absorvedor de nêutrons, geralmente ácido bórico, para a solução da corrente. Poder-se-ia recorrer a isso quando todos os mecanismos normais de controle tivessem falhado.

5.4.3- Sensibilidade sísmica dos tipos de barras de controle

5.4.3.1- Barras de queda livre

Em um reator típico, o desligamento súbito é obtido pela interrupção da corrente dos magnetos, que suspendem as barras, pelo que estas estão livres para cair em seus tubos guia. Estes tubos podem ser considerados, inicialmente como de fricção. Suponhamos que um desligamento súbito é iniciado durante um sismo que faz com que toda estrutura vibre na direção vertical com um período na faixa de 0,1 ou 0,2 segundos e com a aceleração variando de acordo. As forças laterais são de importância secundária (exceto no caso discutido em 5.4.3.5) com respeito ao tempo de queda da barra. Quando a corrente elétrica cessa, a barra de controle, juntamente com todo reator, terá uma velocidade inicial, maior ou menor com respeito à massa terrestre como um todo. Desde que a magnitude de deslocamento vertical de terreno durante um sismo típico raramente excedeu a ± 2 cm, o efeito de qualquer mudança no percurso total sobre o tempo de queda da barra, é insignificante.

O efeito da velocidade inicial da barra no instante da liberação do magneto, pode ser mais significativo. Suponhamos que nesse instante a barra tenha uma velocidade ascendente de 9,2 cm/seg., a qual é razoável para grandes abalos. A barra, uma vez livre, deveria continuar subindo até que essa velocidade se invertesse, o que causaria uma demora teórica de $\frac{2v}{g} = \frac{2(9,2)}{982} = 0,02$ seg.

Desde que movimentos individuais e inversos do cerne e barras de controle impostos pelos fenômenos sísmicos, são erráticos tanto em tempo quanto em magnitude; uma análise detalhada de todas as prováveis seqüências de eventos neste pequeno intervalo de tempo parece improvável. No entanto, no pior dos casos, pode-se assumir uma demora na queda da barra da ordem de 0,02s. Uma demora semelhante poderia ocorrer no final do ciclo, mas seria de pouca importância pois então a reatividade teria sido reduzida bem abaixo da unidade.

Esse possível atraso de cerca de 0,02segs. é pequeno, mas representa uma fração significativa do atraso normal num mecanismo de paralisação típico. Assume-se aqui que não haja amplificação na componente vertical de movimento. Os suportes do reator (tais como grid ou vaso de pressão) deveriam ter características de molas sensíveis a sismos e pequeno amortecimento na direção vertical, este movimento pode ser aumentado com o consequente aumento dos efeitos descritos anteriormente. Este deveria ser o objeto de um estudo especial para assegurar controle automático adequado durante sismos.

5.4.3.2- Barras com amortecimento por fricção

Na maioria dos reatores que empregam sistemas de paralisação que atuam por gravidade, o efeito de fricção afeta significativamente o tempo de queda das barras. Forças sísmicas laterais na barra podem aumentar o atrito metal contra metal. A

barra permanece parcialmente ligada ao reator através das forças de fricção de modo que o movimento para baixo e para cima do reator durante um sismo resulta em aumentos e diminuições alternados na aceleração da barra, relativamente ao reator, de acordo com a dependência da velocidade dessas forças de fricção. Desde que o período dessas oscilações seja da ordem de 0,1 seg., comparada com um tempo de queda da barra de aproximadamente 0,5 seg., o efeito total dessas perturbações se cancelaria. No entanto, a significância de um possível atraso inicial, como foi explicado, permanece inalterada.

5.4.3.3- Barras dirigidas mecanicamente

Os reatores que empregam sistemas de desligamento súbito dirigidos mecanicamente deveriam ser os menos afetados mecanicamente. Se as fontes de energia usadas para desligamento súbito, eletricidade, acumulador hidráulico, volante rotacional, são capazes de aplicar muitas vezes as forças necessárias para a inserção da barra, os efeitos de uma aceleração vertical de 0,1g de tremores fortes seria desprezível. Esta vantagem, é claro, influencia apenas se tudo estiver em ordem, e tais sistemas devem ser cuidadosamente projetados para uso em áreas de alta atividade sísmica. As componentes devem ser simples, fortes, firmemente ligadas e montadas sobre uma fundação altamente resistente.

Os sistemas de desligamento súbito têm a vantagem de que as barras são conectadas com o mecanismo de direção de modo que não se depende apenas da gravidade para rete-la após um desligamento. Isto, se bem que não seja significativo com respeito às acelerações sísmicas esperadas (sempre bem menores que uma vez a aceleração da gravidade=1g), previniriam a expulsão das barras do núcleo pelo escape de refrigerante, resultante possivelmente de danos sísmicos no complexo do vaso de pressão.

5.4.3.4 - Chicoteamento de barras de controle durante um sismo.

Considere-se a barra de controle, mostrada esquematicamente na Fig. 5.1, um instante após o início das vibrações causadas por um sismo. Supõe-se que o reator está sendo acelerado para a esquerda com uma taxa g devida ao sismo, que a barra é rígida, e que sua densidade não varie ao longo de seu comprimento.

Se o centro de massa da barra está num canal do núcleo ou outro guia rígido, o efeito da aceleração lateral será o de criar pequenas forças de fricção entre a barra eo guia. Desde que a aceleração g provavelmente não excederá $3 \text{ m/seg}^2/65$, mesmo num sismo muito severo, essas forças serão geralmente pequenas dependendo do coeficiente de fricção e da massa da barra. A força retardadora não é constante. Na realidade, a aceleração pode reverter seu sentido muitas vezes durante a queda da barra, variando de zero a $\pm 3 \text{ m/seg}^2$ (máx.), assim a barra poderia atritar alternadamente em lados opostos do tubo guia, enquanto desce. Este efeito deve ser desprezível em um sistema bem projetado.

Com referência novamente à Fig. 5.1, uma situação diferente acontece se o centro da massa da barra está fora do tubo guia ou reator. Neste caso a barra, com grande parte de sua massa fora do guia, vai revolver ao longo de R_1 , e com as reações resultantes em R_1 e R_2 , pode tornar-se grande devido à ação de alavanca da barra. Quando a soma dessas reações, multiplicada pelo coeficiente de fricção, excede o peso da barra, esta cairá sob a influência da gravidade. De fato, no caso de barras cilíndricas um movimento rotativo pode se desenvolver pois este efeito retardante é contínuo, e a entrada da barra pode ser retardada pela duração do sismo, que pode ser de minutos. As barras retangulares ou chaveadas são então preferíveis, embora, se as barras cilíndricas estiverem bem guiadas em toda extensão de seu comprimento a diferença será desprezível.

Com referência à Fig. 5.1, uma condição sob a qual poderia ocorrer emperramento da barra, seria a seguinte: para uma aceleração \ddot{x} para a esquerda, a soma das forças horizontais é:

$R_1 = \frac{w\ddot{x}}{g} + R_2$ (1) onde w é igual ao peso da barra. Com a soma dos momentos sobre R temos:

$$R_2 a = \frac{w\ddot{x}}{g} \left(\frac{l}{2} - a \right) \quad \text{ou} \quad R_2 = \frac{w\ddot{x}}{g} \left(\frac{l}{2a} - 1 \right) \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1) temos: $R_1 = \frac{w\ddot{x} l}{2ag}$

Para que a barra não emperre, $\mu (R_1 + R_2) < w$, onde μ é o coeficiente de fricção. Assim, $\mu \frac{w\ddot{x}}{g} \left[\frac{l}{2a} + \frac{l}{2a} - 1 \right] = \frac{\mu w\ddot{x}}{g} \left[\frac{l}{a} - 1 \right] < w$

$$\text{ou } \frac{l}{a} < 1 + \frac{g}{\mu\ddot{x}} \quad \text{ou} \quad \left[1 + \frac{g}{\mu\ddot{x}} \right]^{-1} < \frac{a}{l}$$

Isto serve para ilustrar a necessidade de cuidado no projeto de barras e seus guias, se bem que apenas em casos extremos possa ocorrer emperramento sem que ocorram para isso desalinhamentos mecânicos ou distorsão nos guias e barras.

5.4.4 - Instrumentação de Controle do Reator

5.4.4.1- Partida

No instante de partida, o fluxo neutrônico é muito baixo e os elementos sensores podem estar medindo apenas 1 ou 2 nêutrons por segundo. Nesta faixa são usados apenas medidores contadores de taxa de nêutrons ou raios gama, que consistem de câmaras de pulsos, amplificadores, e circuitos de contagem. As câmaras de pulso respondem a reações nucleares individuais que envolvem nêutrons e consistem de dois tipos comuns, i. e., câmaras com trifluoreto de boro BF_3 (gás) e câmaras de fissão com revestimento interior de U^{235} .

Medidores contadores de taxa atingem seu limite de utilização a 10^{-6} da potência total, que corresponde no caso médio à criticalidade. Acima dessa faixa, empregam-se circuitos eletrônicos logarítmicos, contadores (log-n). O detetor para este circuito normalmente consiste de uma câmara de ionização, que mede a ionização total para um dado fluxo ao invés de pulsos individuais, sendo pequeno e mecanicamente rudimentar. Essas câmaras cobrem uma grande faixa de densidade neutrônica (digamos, 10^{-6} a 1,5 da potência total). Ocorre uma sobreposição considerável para permitir uma transferência segura de uma faixa de contagem para outra; ambas deveriam ser estudadas do ponto de vista sísmico. Um circuito de desligamento súbito sempre pode ser acionado quando o fluxo de nêutrons atinge níveis perigosos independentemente de sua potência.

5.4.4.2- Faixa intermediária de potência

De 10^{-4} à potência plena, quando o reator está sujeito a largas variações no nível de potência, a radiação gama do decaimento dos produtos de fissão pode mascarar o fluxo neutrônico observado em câmara de ionização. No estado fixo, o controle

da radiação gama dos produtos de fissão é desprezível; mas, na região intermediária, necessita-se de câmaras adicionais para separar os efeitos do fluxo neutrônico do fluxo de radiação gama. Estas câmaras, se bem que mais complicadas, são construídas ao longo das mesmas linhas utilizadas pelo equipamento de faixa inferior não sendo sismicamente mais sensível.

5.4.4.3- Potência plena

Para operação normal à potência plena, são usados indicadores de nível neutrônico com operação semi ou inteiramente automática. A instrumentação convencional, calibrada para ler o nível da potência como indicado pela taxa de fluxo refrigerante e aumento de temperatura, é geralmente empregada nesta faixa além da instrumentação nuclear.

5.4.4.4- Sensibilidade sísmica

O sistema de controle do reator (i.e., elementos sensores, amplificadores e outros equipamentos eletrônicos) é suficientemente forte para sobreviver, em si, a grandes acelerações sísmicas. Não deve haver problemas a esse respeito durante sismos se for dada a devida atenção ao suporte lateral de prateleiras, cabos, armários, detalhes da instalação elétrica, linhas de suprimento de gás, etc. As câmaras de ionização são encontráveis comercialmente e sofreram testes de abalo e vibração para fins militares muito mais severos que os que parecem necessários para resistência sísmica. Danos nos circuitos e componentes devido à queda de objetos ou massas móveis parecem ser as ameaças principais. Instalações elétricas expostas, são particularmente vulneráveis a esse tipo de dano.

Dado os critérios de segurança que os circuitos de controle obedecem em seu projeto, praticamente todos os danos sísmicos

imagináveis ao sistema de controle resultariam em desligamento automático do reator. No entanto, o emperramento de barras de controle, por si mesmo, é ainda uma possibilidade a ser considerada, e que causaria a adoção de medidas de emergência. Por esta razão, o mecanismo de desligamento de emergência para reatores de potência em áreas com risco sísmico, deveria ser examinado criticamente com respeito à possibilidade de que ele também poderia se tornar inoperável em caso de danos sísmicos extremos.

Os reatores são freqüentemente, equipados com tubos metálicos horizontais onde estão câmaras de fissão e ionização para medição de radiação. Esses tubos fornecem uma larga faixa de ajustamento da posição radial da câmara relativamente ao reator. A prática usual é determinar-se empiricamente a posição que fornece uma leitura total quando o reator está operando a uma certa potência. Em alguns casos, apenas a fricção estática mantém esta posição. Em áreas de alta atividade sísmica, as vibrações laterais podem modificar as posições das câmaras dando origem a leituras errôneas. As barras de controle poderiam ser retiradas, causando alterações indesejáveis na potência. Essa mudança embora normalmente não seja uma condição séria, pode causar dificuldades na confusão que usualmente acompanha abalos severos. Recomenda-se que meios positivos de localização desses instrumentos sejam adotados para uma boa resistência sísmica de reatores.

5.4.5 - Sismômetros

Os sismômetros, se bem que não sejam uma parte específica dos sistemas de controle ou de proteção, podem ser razoavelmente considerados para sua inclusão em reatores. Um sismômetro pode ser descrito como qualquer instrumento que mede vibrações do terreno sob seus suportes. O mais largamente utilizado é o inercial ou tipo pêndulo, que em sua forma simples, consiste de uma massa inerte suspensa de tal maneira que permaneça em repouso enquanto o terreno vibra devido à passagem de conjuntos de ondas sísmicas.

Três sismômetros que abrangem as componentes em registros de deslocamento, leste-oeste, norte-sul e vertical, são usualmente utilizados para conseguir um registro significativo do movimento.

Para o projetista e para o operador de um reator é de interesse um sismômetro sensível a fortes abalos e a vibrações de pequenos períodos 0,03 a 0,10 segs., pois, este instrumento responde muito bem a abalos fortes em uma vizinhança imediata, e sua ação reflete os efeitos locais com respeito a acelerações, períodos e durações desses abalos. Uma rede de sismômetros pode ser necessária para garantir que, no caso de ondas sísmicas fortemente direcionais, a instrumentação do reator não seja insensível a ondas na pior direção enquanto não registra ondas mais fracas.

Onde há uma grande confiança, um sistema que desliga contactos elétricos quando ocorrem abalos é provavelmente preferível a um que faz contactos. A colocação, que é determinada baseada nos circuitos protetores, deveria sempre considerar as características de resposta da própria estrutura de suporte.

Um sismoscópio, como mostrado na Fig. 5.2, foi padronizado pelo U.S. Coast and Geodetic Survey. O aparelho consiste de um pêndulo giratório rodeado por um membro anelar com uma bolha de ar em estado estático. As acelerações laterais fazem com que o pêndulo gire; e, se a amplitude é suficientemente grande, há contacto com o anel, completando um circuito elétrico que inicia o registro / 65 /. Tal aparelho pode ser insensível a abalos verticais e incapaz de distinguir as fontes de tais abalos. Um aparelho similar é usado como chave de desligamento súbito dado a movimentos sísmicos em muitos reatores, mesmo que o registro não seja necessariamente requerido para qualquer sistema de proteção sísmica.

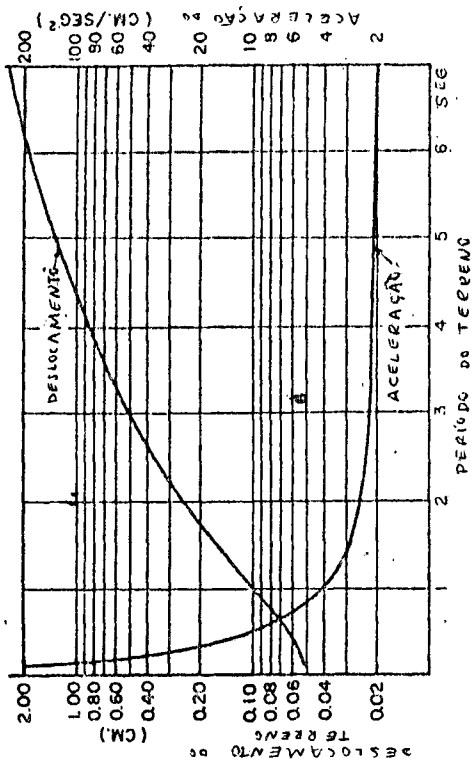
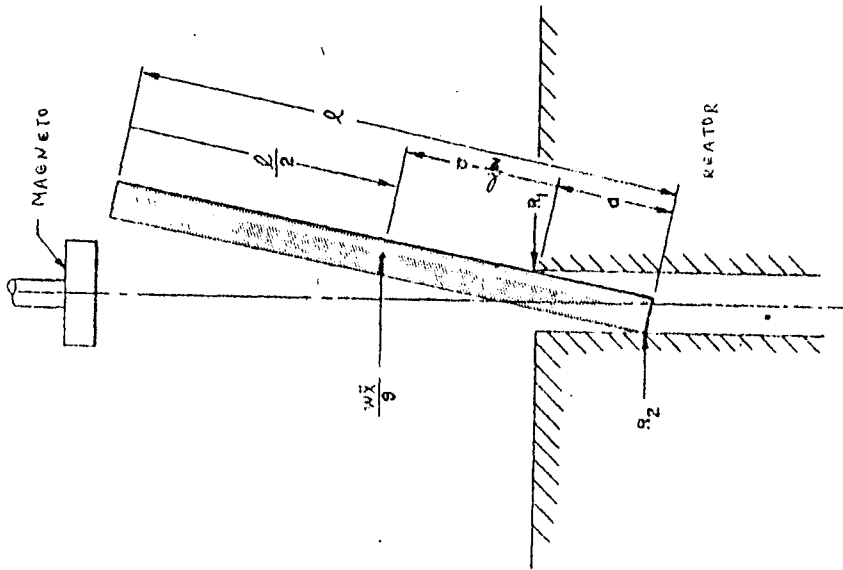
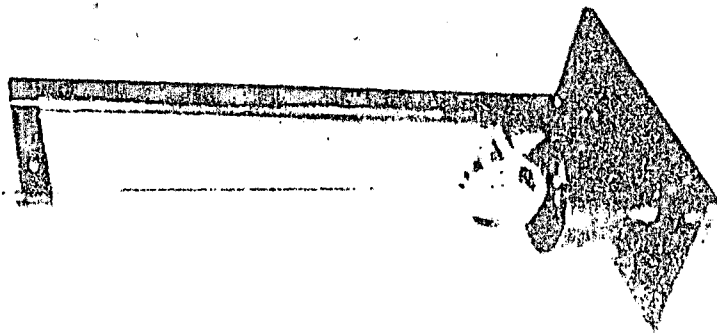


FIG. 5.2 - Sismoscópio.

FIG. 5.1

5.4.6 - Instrumentação sísmica recomendável

Um sistema integrado de proteção sísmica, de um reator, deveria desempenhar as seguintes funções:

- (1) monitorar continuamente distúrbios sísmicos fortes
- (2) assinalar sua própria falha ou mal funcionamento se um projeto de circuitos ativos é empregado
- (3) dar sinal de alarme para um painel quando é sobrepassado um nível de referência indicador de uma dada intensidade sísmica
- (4) iniciar a redução de potência com abalos de pequena intensidade, dirigindo todos os controles de reatividade com velocidade normal para reatividade reduzida
- (5) anular o cancelamento manual de redução de potência com a persistência de sinais fortes
- (6) acionar o mecanismo de paralização quando a força do sinal atinge proporções que exigem parada total
- (7) registrar acelerogramas para comparação com registros de outras centrais na análise de incidentes

Esta última função pode ser cumprida mais satisfatoriamente pelo uso de registros multicanais de fita magnética. Esta técnica sugere a possibilidade de registro simultâneo de outros parâmetros importantes durante sismos ou outros distúrbios transitórios. Isso não seria possível depois numa reconstrução do comportamento de um reator em caso de acidente.

São os seguintes os critérios sugeridos para o projeto de sismômetros para centrais nucleares:

- (1) período na faixa de 0,03 a 0,1 seg. com amortecimento crítico
- (2) funcionamento seguro, não requerendo contactos para completar um circuito elétrico para iniciar os sinais.
- (3) livre de fricção entre os elementos
- (4) pequenos efeitos de histerese em comparação com as forças guias

- (5) resistente e seguro
- (6) sinal proporcional à intensidade do distúrbio sísmico de tal modo que uma resposta do controle do reator é possível se o tipo de reator justifica tal proteção
- (7) capaz de testes funcionais simples, no campo

A seguir, teceremos considerações sobre a sismicidade do terreno brasileiro e sua relação com a segurança das usinas nucleares no Brasil.

6. CONSIDERAÇÕES SISMO-GEOLÓGICAS SOBRE A REGIÃO DE ANGRA DOS REIS

6.1 - Sismicidade do Brasil

6.1.1-Introdução

Sabe-se da existência de sismos naturais no Brasil desde o século XVI. Mas, até alguns anos atrás, a atividade sísmica foi considerada como de importância secundária.

A preocupação com a sismicidade tem crescido ultimamente. Isto se deve, principalmente, à implantação de obras de engenharia com dimensões cada vez maiores e obras como as usinas nucleares cuja segurança operacional exige precauções especiais.

Paralelamente com o desenvolvimento industrial ocorre a crescente ampliação das áreas densamente habitadas pelo homem e a tendência é ocupar regiões que há pouco tempo eram consideradas remotas. Até a primeira metade deste século a maior parte da população brasileira concentrava-se na região costeira atlântica numa faixa com poucas centenas de quilômetros de largura. Apenas nas últimas décadas iniciou-se a ocupação mais efetiva das regiões oeste e norte do país. Evidentemente, o número de relatos de sismos aumentou com o incremento da ocupação humana.

É um fato que, na maior parte do território brasileiro, e principalmente nas áreas com maiores densidades populacionais, até hoje não foram reportados sismos de grande magnitude. No entanto, as informações disponíveis são incompletas e em grande parte fragmentárias. Registros instrumentais tiveram início primeiro em centros estrangeiros e só mais recentemente através de equipamentos aqui instalados, mas poucos têm sido os dados divulgados.

Apesar de que alguns sismos possam ter ocorrido devido a acomodações de camadas, colapsos em zonas calcárias ou como simples reflexos de sismos longínquos e que os abalos ocorridos

sejam de baixa intensidade (em geral, menos de VI na Escala MM) e não sejam tão frequentes quanto nas zonas sísmicas, já em fins da década de sessenta seja em função da implantação de grandes obras, seja em função do avanço no conhecimento da geologia brasileira, percebeu-se que pelo menos boa parte dos sismos têm relação com movimentos tectônicos.

6.1.2-Evolução Geológica do Brasil

A reconstituição das unidades geotectônicas da Plataforma Sul-Americana e da sua evolução geológica é tanto mais difícil quanto mais se recua no tempo. Contudo, grandes progressos têm sido alcançados nos últimos anos e algumas sínteses já foram divulgadas (Almeida et al., 1976; Almeida e Hasui, 1978; Hasui et al., 1978; Almeida, 1978).

Reconhece-se hoje que após o Ciclo Transamazônico, terminado a 1,8 b.a., o território brasileiro fazia parte de uma vasta plataforma. No Proterozóico Médio (1,8 - 1,0 b.a.) essa plataforma: 1) passou por uma longa etapa de evolução, que permitiu a constituição das formações molassóides, vulcânicas e intrusivas ácidas e básicas, reconhecidas na Amazônia (Almeida, 1975); 2) ganhou condições ortoplatafornais em época não determinada, permitindo a deposição de coberturas (Grupos Chapada Diamantina e similares); 3) há cerca de 1,2 ± 0,2 b.a. sofreu ativa fragmentação (Episódios Nickerie, K'mudku, Jari-Falsino), propiciando não só o desenvolvimento de cataclase (como na região Amazônica), como deslocamentos e alto fluxo térmico induzindo dobramento e metamorfismo das coberturas orto-platafornais ao longo de zonas estreitas e longas (Grupo Espinhaço, Zona Rondoniense); 4) ainda nesse intervalo de tempo, chegou a se regenerar, permitindo subsidência, sedimentação, magmatismo básico-ultrabásico, metamorfismo e dobramento, dando origem à Faixa de Dobramentos Uruaçu, Fig. 6.1.

No Proterozóico Superior implantaram-se as regiões de dobramento Centro-Norte, Central, Sudeste e Nordeste, que incluem faixas (ou sistemas) de dobramento e maciços medianos, formando como que molduras dos cratons Amazônico, São Francisco e Rio de La Plata. Ao fim do Ciclo Brasileiro, o território brasileiro fazia parte de uma vasta plataforma, agora bastante modificada em relação àquela constituída após o Ciclo Trans-Amazônico, Fig. 6.1. A evolução das regiões de dobramento envolveu uma etapa de transição que adentrou em tempos cambro-ordovicianos.

Ao atual nível de erosão, as regiões de dobramento expõem rochas constituídas no Ciclo Brasileiro, bem como do embasamento, estas com evidências de remobilização (mineralógica, textural, estrutural e isotópica). Os cratons, restos daquele mega-continente, têm coberturas, deslocamentos, intrusões e rejuvenescimentos isotópicos de idade brasileira, mostrando que não permaneceram refratários às profundas modificações da crosta.

A ortoplataforma já existia pouco antes da deposição das primeiras formações das bacias do Paraná, Maranhão e Amazonas. Nellas Almeida (1969) já reconheceu um estágio telassocrático (Siluriano-Carbonífero) seguido de um estágio geocrático (Permiano-Jurássico), pelo que os sedimentos de início são essencialmente marinhos e depois continentais. Das bacias vemos hoje seus limites erosivos, mas os sedimentos paleozóicos encontrados na região central de Goiás mostram que elas estiveram interconectadas e as ocorrências do Nordeste oriental atestam a extensão para leste.

A partir do Jurássico até o Terciário, a metade oriental do Brasil sujeitou-se a processos magmáticos, tafrogênicos, de sedimentação e de morfogênese, que Almeida (1969) atribuiu à Reativação Wealdeniana e que deve ter relação com a separação da América do Sul-África.

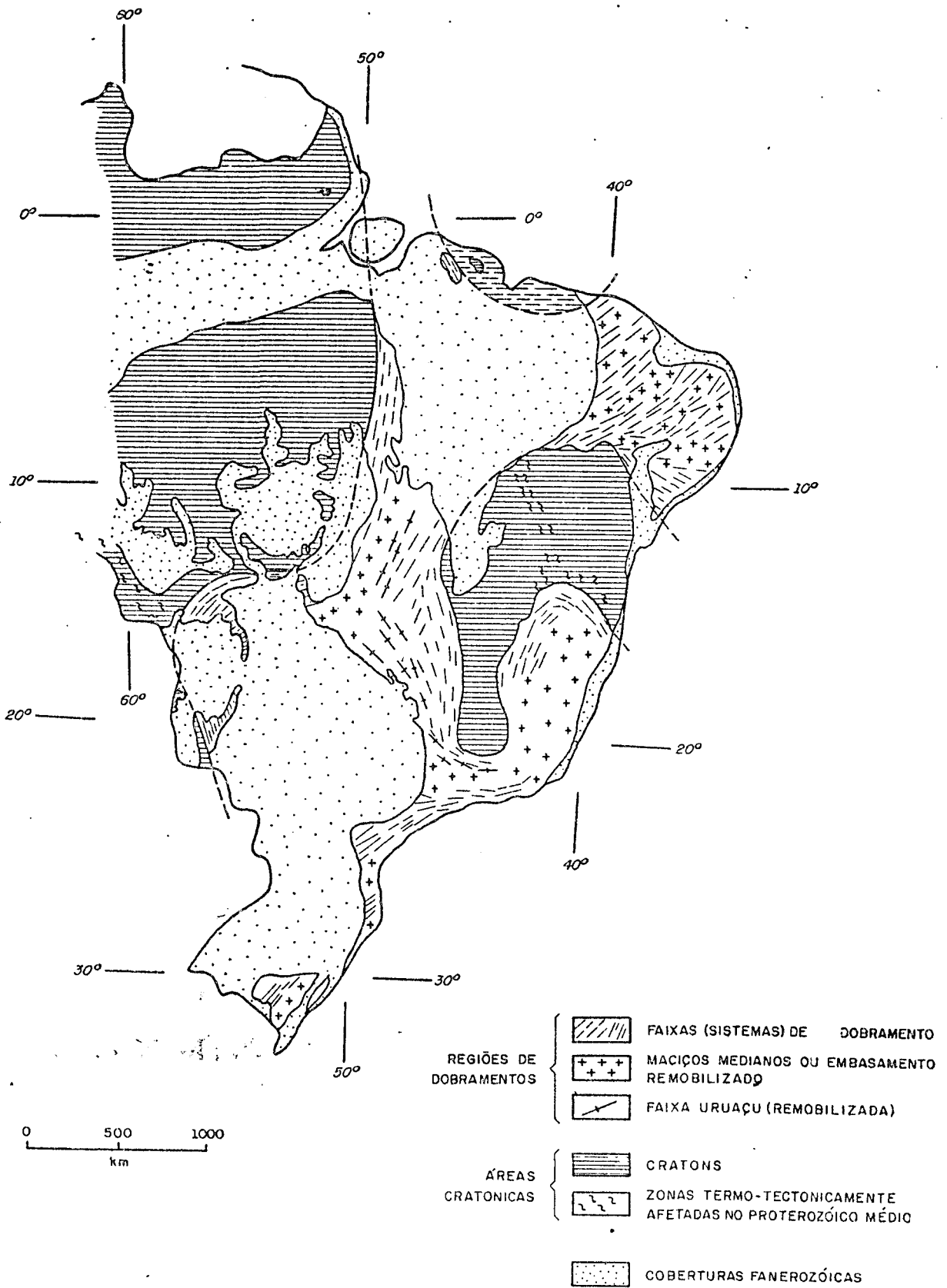


FIG. 6.1 - Unidades geotectônicas do ciclo brasileiro / 105 /.

A evolução quaternária carece ainda de dados e interpretações. Reconhece-se de modo genérico uma epeirogênese positiva, pelo menos a leste do Craton Amazônico, e não uniforme. Sedimentos existem em bacias interiores (Solimões, Bananal, Pantanal) e marginais (Marajó, Rio Doce, Santos, Pelotas, etc.).

Com relação aos tempos mais recentes não existem informações geodésicas, arqueológicas ou geológicas que permitam configurar precisamente movimentos tectônicos em progressão. Apenas a sismicidade natural e a sedimentação quaternária evidenciam sua existência.

6.1.3 - Mapa Sismotectônico e Regiões Sismotectônicas

O mapa sismotectônico do Brasil e regiões correlacionadas (Haberlehner, 1978) é baseado numa coleta de dados de 251 sismos ocorridos no Brasil durante quatro séculos, ou mais exatamente, nos de 1560 a 1977, Fig. 6.2a.

O quadro da Fig. 6.2b contém os sismos distribuídos pelos Estados e Territórios da União, divididos pela intensidade e magnitude em três grupos: sismos com intensidade até IV (magnitude de 4) acima de IV até VI (magnitude 5,2) e acima de VI. O quadro informa também sobre registro ou não por estação sismológica, sobre a profundidade focal, se for menor do que 100 km. Informa também sobre tremores relacionados com enchimentos de grandes reservatórios. O gráfico da Fig. 6.3 apresenta a distribuição regional e cronológica dos tremores registrados no Brasil entre 1800 e 1977. Nota-se o grande aumento de registros depois da primeira década deste século. Este aumento decorre em primeiro lugar dos registros feitos por estações sismográficas estrangeiras. Aumentou também a frequência de notícias em jornais brasileiros. A Estação Sismológica de Brasília (ESB) que entrou em operação em 1966, até a data, não publicou boletins de sismos locais. Os poucos dados fornecidos a interessados mostram no entanto, que a ESB dado a sua excelente localização e equipamento moderno tem capacidade de registrar a maior parte da atividade sísmica ocorrida no Brasil.

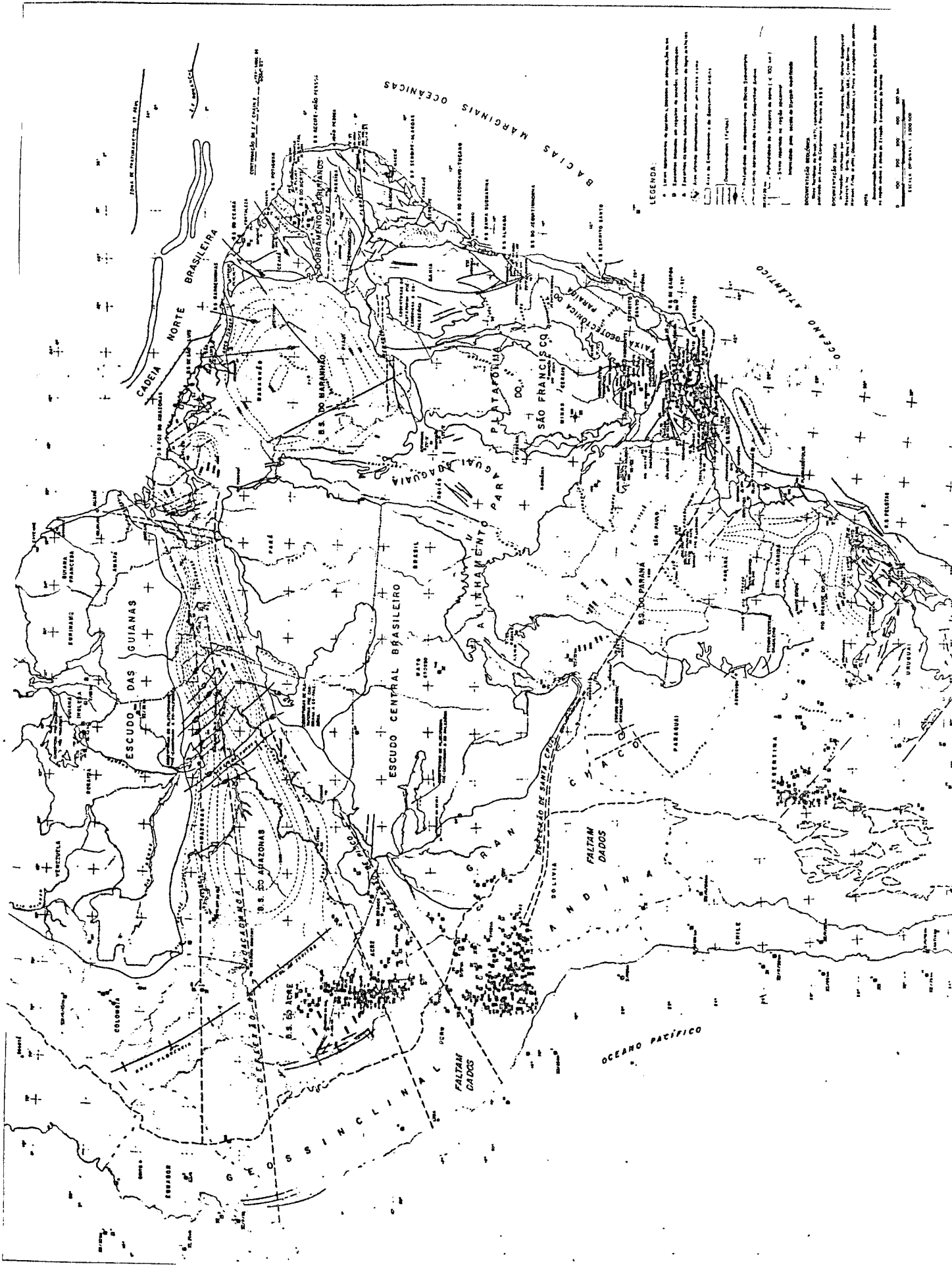


FIG. 6.2a - Mapa Sismotectônico do Brasil e regiões correlacionadas /96/.

ESTADO OU TERRITÓRIO	FORÇA DO TREMOR				REGISTRADO POR ESTAÇÃO SISMOLÓGICA		PROF. FOCAL < 100 km	PROVOC. POR ENCH.DE RESERV.	TOTAL EVENT. NO ESTADO
	ATÉ IV (4,0)	> IV (4,0) ATÉ VI (5,2)	> VI (5,2)	VALOR DESCON.	SIM	NÃO			
Acre	3	10	24	21	52	6		58	
Amapá				5	1	4		5	
Amazonas	2	1	5	22	16	14	1	30	
Bahia	3	1	1	7	1	11		12	
Ceará		4	2	11	4	13		17	
Espírito Santo				1		1		1	
Goiás		2				2		2	
Maranhão		1		3		4		4	
Mato Grosso	2	4	3	2	3	8	1	11	
Minas Gerais	17	8	1	10	6	30	14	4	36
Pará	1	2		2	2	3		5	
Paraíba		2		1	3		3	3	
Paraná	2			10	8	4	9	9	12
Pernambuco		1	1	9	6	5		11	
Rio de Janeiro		6	1	3	2	8	1	10	
R. G. do Norte				10		10		10	
R. G. do Sul		2		6	1	7		9	
Rondonia				1		1		1	
Roraima		3		1	3	1	3	4	
Sta. Catarina		1	1		2			2	
São Paulo	2	3	1	12	3	15	1	2	18
T O T A L	32	51	40	137	113	147	33	15	261

FIG. 6.2b - Sismos No Brasil, registrados entre 1560 e 1977 /96/.

Vibrações causadas por grandes terremotos na faixa andina muitas vezes foram sentidas no Brasil. É muito provável também a existência de zonas de fraturas no embasamento continental que atravessam o Brasil e influenciam o tectonismo andino. Por estas razões, a área do mapa foi estendida até o Oceano Pacífico contendo 275 epicentros no Equador, Colombia, Peru, Bolívia, Chile, Argentina, Uruguai e Paraguai. Porém, estes dados são incompletos. Faltam ainda muitos epicentros de terremotos ocorridos a oeste do meridiano 72 W, entre os paralelos 4N e 16S, e a oeste do meridiano 60 W, entre os paralelos 16 S e 34 S. Nestas regiões foram indicados somente os epicentros de terremotos com magnitude 7,5 ou maior.

Os locais dos sismos no mapa estão numerados. A numeração é feita separadamente para o Brasil e para os países vizinhos. Os números permitem identificar os sismos nas tabelas que aparecem no Apêndice A. As tabelas contêm, quando existe, a datação com hora, minuto e segundo, coordenadas geográficas dos epicentros e ou o local onde o tremor foi sentido, profundidade focal, magnitude ou intensidade pela escala MM, fonte da informação e observações adicionais.

A finalidade prática do mapa é possibilitar a avaliação preliminar do nível de risco sísmico nas diversas regiões do Brasil. Regiões onde há concentração de atividade sísmica podem ser identificadas como províncias sismotectônicas onde a existência de falhas ativas é provável e investigações geológicas pormenorizadas devem preceder a execução de projetos de engenharia.

Examinando rapidamente o mapa sismotectônico, é possível verificar a concentração da atividade sísmica em certas áreas. A estas áreas podemos chamar províncias sismotectônicas. Foram chamadas assim, áreas que têm sismicidade e características geológico-estruturais em comum (Rizzo e Werner, 1973).

No território brasileiro são definidas as seguintes províncias sismotectônicas (Haberlechner, 1978):

- a. Boavista-Tacutu
- b. Bacia do Acre
- c. Bacia do Amazonas-Região de Manaus
- d. Bacia Sedimentar na Foz do Amazonas
- e. Região de São Luís (MA)
- f. Região Caririana
- g. Região Itabuna-Salvador
- h. Região Bonsucesso-Cajuru
- i. Zona de Transcorrência São Paulo
- j. Zona de Transcorrência Paranapanema-Santa Cruz

As dez províncias sismotectônicas ocupam aproximadamente 10% da superfície total do Brasil, mas concentram perto de 60% de toda atividade sísmica.

O estado atual dos conhecimentos da geologia do Brasil permite-nos esboçar o seguinte quadro sismotectônico do país:

- a. Boa Vista-Tacutu

As rochas pré-cambrianas do escudo guianês estão separadas por uma descontinuidade estrutural. É uma fossa tectônica preenchida por espesso pacote de sedimentos dos quais o membro superior é a Formação Tacutu, constituída por sedimentos jurássicos e cretáceos. Medidas gravimétricas indicam vários quilômetros de profundidade até o embasamento (Loczy, 1972). Os sedimentos seguindo a direção ENE-WSW estendem-se até as proximidades de Boavista. O Graben de Tacutu representa um sistema de falhas transcorrentes. No território de Roraima o "U. S. Coast and Geodetic Survey" registrou sismos em 1963 e 1965 e o "Geological Survey", em 1976.

Foram sismos rasos onde a profundidade focal foi de 36 km, 42 km e 33 km, respectivamente. A magnitude máxima registrada foi de 5,1. O Graben de Tacutu, segundo Loczy, com extensão mínima de 160 km e máxima de 480 km, deve ser responsável pelos tremores que ocorrem isoladamente numa região cratônica estável.

b. Bacia do Acre

A Bacia Sedimentar do Acre, a Bacia do Oriente no Equador e a Bacia de Pastaza no Peru formam um conjunto de bacias limitado a oeste pela cordilheira andina oriental e a leste pelo Arco de Iquitos e o seu prolongamento no sentido noroeste denominado Arco de Florência.

Um tectonismo produzindo deformações na litosfera, ainda no Terciário Superior, corresponde a uma instabilidade que se traduz no maior índice de atividade sísmica que ocorre sob o território do Brasil. Entre os anos de 1915 e 1976 foram registrados por estações sismológicas estrangeiras 54 sismos, com magnitude variando entre 3,7 e 7,25. São todos profundos, com profundidade focal variando entre 545 e 700 km.

Nas regiões a oeste do meridiano 72 W faltam dados. Note-se, porém, uma clara separação entre as concentrações de epicentros no Acre e nos Andes bolivianos. A faixa de separação com poucos epicentros coincide aproximadamente com a zona transcorrente da deflexão de Pisco.

Segundo Loczy (1970), as deflexões Huacamba e Pisco associadas com falhas transcorrentes foram formados pelos movimentos da crosta em consequência da deriva continental devido ao avanço do escudo Guiano para oeste. O período de tempo deste processo de movimento vai desde o Eo-Paleozóico até o Cenozóico.

c. Bacia do Amazonas - Região Manaus-Itacoatiara

A Bacia do Amazonas é um "rift-valley" que resultou do rompimento e separação dos escudos guianês e central-brasileiro (Loczy, 1968, 1970, 1977). Admite-se movimento roto-translacional ao longo de grandes falhas transcorrentes. Ocorreu reativação das fraturas pré-Cambrianas no Mesozóico demonstrado pelo magmatismo toleítico e no Terciário, demonstrado pelo padrão de drenagem (Sternberg 1953, Rezende 1973).

A atividade sísmica na Bacia do Amazonas espalha-se sobre uma imensa área. Os locais de onde foram reportados tremores situam-se em regiões periféricas da bacia e parecem marcar alinhamentos relacionados com as grandes falhas transcorrentes.

A região Manaus-Itacoatiara onde entre 1885 e 1963 foram registrados cinco tremores situa-se numa região que foi enfraquecida por falhas cisalhantes (Rezende e Brito, 1973).

d. Bacia Sedimentar da Foz do Amazonas

As cidades de Belém e Vigia onde ocorreram tremores situam-se na plataforma do Pará nas proximidades de grandes falhas que delimitam a bacia na foz do Amazonas. Esta bacia sofreu grande subsidência no Cretáceo e Terciário quando até 15 km de sedimentos foram depositados.

e. Região de São Luís (MA)

São Luís situa-se nas proximidades da profunda fossa da Ilha Nova que está interligando as bacias sedimentares de São Luís e Barreirinhas. A formação destas bacias está associada à separação dos continentes sul-americano e africano. Milhares de metros de sedimentos foram depositados na fossa a partir do Cretáceo Inferior.

O baixo nível de atividade sísmica naquela região poderá ser ligada a uma instabilidade residual na área do Arco Ferrer que separa as bacias costeiras da Bacia do Maranhão.

f. Região Caririana (CE)

Berrocal et al. e Cravo Barros (1971), apontaram como causadores dos freqüentes tremores na região de Pereiro os falhamentos de grande extensão. Como podemos ver no mapa, as falhas que delimitam a Bacia Sedimentar Potiguar também parecem influir na instabilidade da região.

Sobre os abalos sentidos em Recife, Cravo Barros (1971) opinou que o evento de magnitude 5,4 ocorrido em 04/08/71 na Cadeia do Meio-Atlântico foi o responsável, indiretamente.

g. Região Salvador-Itabuna

A falha de Salvador que limita a fossa do recôncavo em sua borda leste possui na sua parte sul um rejeito máximo de cerca de 7 km. A falha de Salvador e numerosas outras que cortam o recôncavo formam o sistema principal de falhas com direção NNE. Em sua continuação para sudoeste encontramos a falha da escarpa de Conquista e a falha de cisalhamento Itaju do Colonia-Itabuna. Na região dos rios Pardo e Jequitinhonha, este sistema de falhas encontra-se com outro sistema de Planalto-Potiguara e de Poços-Itororó, com orientações NW-SE. A extensão das falhas mencionadas na superfície é de 200 km a 460 km (Mascarenhas, 1973).

A atividade sísmica na região, aparentemente, é dividida em duas fases: a primeira, com tremores em 1724, 1769 e 1912 atingiu a parte norte da região, Salvador, Itaparica e Jequiriça. O tremor de Joazeiro, em 1905, tem localização incerta. A segunda fase atingiu a parte sul da região entre 1973 e 1976, e as áreas de Itabuna-Ibicaraí e de Ibatinga sofreram tremores de intensidade variando entre IV e VI MM.

A instabilidade das falhas do sistema da falha de Salvador, e do seu prolongamento na falha de cisalhamento Itaju do Colonia - Itabuna, deve ser apontado como causa dos tremores.

h. Região Bonsucesso-Cajuru

A atividade sísmica nesta região ocorre em rochas pré-cambrianas bastante deformadas. Moraes e Malamphy (1937), apontaram pequenos ajustamentos ao longo de falhas locais como causadores dos tremores em Bonsucesso.

Brito (1974), procurando explicar os tremores ocorridos na área do pequeno reservatório em Carmo de Cajuru menciona a existência de fortes anomalias magnéticas com orientação NW-SE e comprimento de até 600 km. Seguindo a direção NW das anomalias magnéticas, atinge-se a borda norte do Paraná. É possível que este alinhamento marque importante zona de fraqueza de origem pré-cambriana que em tempos mais recentes foi reativada.

Os registros da Estação Sismológica de Brasília indicam continuada atividade sísmica na região de Bonsucesso (MG).

Os tremores ocorridos na área dos reservatórios em Volta Grande e Porto Colombia no vale do rio Grande tem possíveis conexões com o alinhamento mencionado. No entanto, no reservatório de Furnas, o maior de todos os existentes na região nunca foi registrado um tremor.

i. Zona de Transcorrência São Paulo

Os sistemas de dobramentos pré-cambrianos na região costeira entre Bahia e Uruguai apresentam importante deflexão na área dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo. Muitas falhas transcorrentes foram descobertas nesta região que mais recentemente foi chamada Zona de Transcorrência São Paulo (Hasui et al., 1975). Esta região,

do ponto de vista da atividade sísmica, ocupa no Brasil o segundo lugar depois da bacia do Acre, mas somente pelo número de tremores registrados e não pela intensidade dos mesmos. O grande número de eventos registrados quase todos por pessoas que sentiram o tremor em parte podem ser atribuídos à relativamente densa população desde os tempos coloniais. Assim, tremores de fraca intensidade foram sentidos simultaneamente numa dúzia de lugares ou mais.

O que importa para explicar a atividade sísmica é a reativação que as geofaturas pré-cambrianas sofreram pelo neotectonismo. No Terciário, e possivelmente em consequência das atividades tecto-orogênicas nos Andes, ocorreram movimentos verticais de grande porte. Foram levantadas as Serras do Mar e Mantiqueira e formaram-se as depressões de Taubaté-Paraiíba, a baixada Fluminense e a baía de Guanabara. Os trabalhos de Bjoernberg et al. e Bjoernberg (1972) demonstraram a continuação de movimentos crustais em São Paulo durante o Cenozóico que se estendem até a atualidade.

j. Zona de Transcorrência Paranapanema-Santa Cruz

A região do Arco de Ponta Grossa é uma das maiores áreas onde há concentração de diques de basalto. As grandes intrusões de lava nas camadas sedimentares causaram a formação de estruturas de blocos falhados com rejeitos de falhas verticais superiores a 200m. Fulfaro (1974) descobriu na região do Paranapanema importante alto estrutural e Hasui et al. (1975) admitem uma ligação entre a região do Paranapanema e a Zona de Transcorrência São Paulo. Em direção a noroeste é provável também a existência de uma interligação com a deflexão de Santa Cruz.

A atividade sísmica ao longo da suposta linha de fraqueza é manifestada com epicentros em 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 andinas e costeira atlântica, a interpretação dos tremores sentidos com certa frequência em São Paulo como reflexos de terremotos nos Andes. Isto ocorreu ultimamente em 23/11/77 quando foi destruída a cidade de Caucete próximo a San Juan na Argentina.

No que se refere aos reservatórios de Capivari (Cachoeira), Cajuru, Porto Colombia, Volta Grande, Capivare, Salto Santiago e Paraibuna-Paraitinga onde ocorreram fracos tremores após o enchimento dos mesmos, a explicação por meio de estruturas geológicas existentes ou com razão supostas é mais fácil do que explicar por que outros como Furnas, Três Marias, Jupia e Ilha Solteira nunca foram sacudidos.

Até agora não estamos em condições de prever a ocorrência de tremores e isto será, também no futuro, mais difícil nos países com atividade sísmica mais fraca.

Estudos geológicos pormenorizados executados na fase de projeto podem prever com probabilidade maior ou menor a possibilidade de tremores.

6.2 - Geologia Regional

Focaliza-se aqui a zona marginal sul do Craton de São Francisco. Esta corresponde à região sul de Minas Gerais, leste de São Paulo e oeste de Rio de Janeiro que margeia aquela unidade geotectônica.

6.2.1 - Organização Estrutural

Ebert (1957,1968), coroadando uma série de investigações, considerou uma faixa de dobramentos assíntica na borda sul do

Craton de São Francisco. Os Grupos Paraíba, Andrelândia e São João del Rei corresponderiam às zonas interna, intermediária e externa da faixa, sucedendo-se do litoral para norte, com metamorfismo decrescente nesse sentido e vergência apontando para o craton.

Com base em datações geocronológicas de Delhal et al. (1969), Cordani et al. (1973), Almeida et al. (1973) atribuíram o Grupo Paraíba à Faixa de Dobramentos Paraíba do Sul, que se constituiu no Ciclo Transamazônico e foi intensamente remobilizado no Ciclo Brasileiro. Ao mesmo tempo, consideraram o Grupo Andrelândia como extensão do Araxá eo Grupo São João del Rei como representando prolongamento da Faixa de Dobramentos Brasília.

Mais recentemente, Almeida et al. (1976) consideraram que com o Ciclo Transamazônico consolidou-se ampla plataforma, em cuja constituição se tem reconhecido unidades atribuídas a esse ciclo e ao Jequié, todas ainda mal caracterizadas e vagamente delimitadas. O Ciclo Uruaçuano permitiu um processo de regeneração presumivelmente a 1300-1000 m. a., com o desenvolvimento da Faixa Uruaçu, à qual se associam os Grupos Andrelândia e Itapira. O Ciclo Brasileiro levou a nova e mais extensa regeneração, com o desenvolvimento da Faixa Brasília e da Região de Dobramentos Sudeste (Ribeira), bem como de amplo e intenso processo de remobilização envolvendo as unidades mais antigas, nelas impondo deformação, migmatização e granitização.

Esse quadro evolutivo e organizacional da borda sul do Craton de São Francisco se acha consubstanciado no esquema de províncias estruturais de Almeida et al. (1977). Assim é que se dá o confronto das Províncias Tocantins (Faixa Uruaçu e Brasília) e Mantiqueira, esta última aqui representada pelas sub-províncias Serra do Mar (Região de Dobramentos Sudeste) e Rio Doce (Faixa Paraíba do Sul e unidades mais antigas), Fig. 6.4.

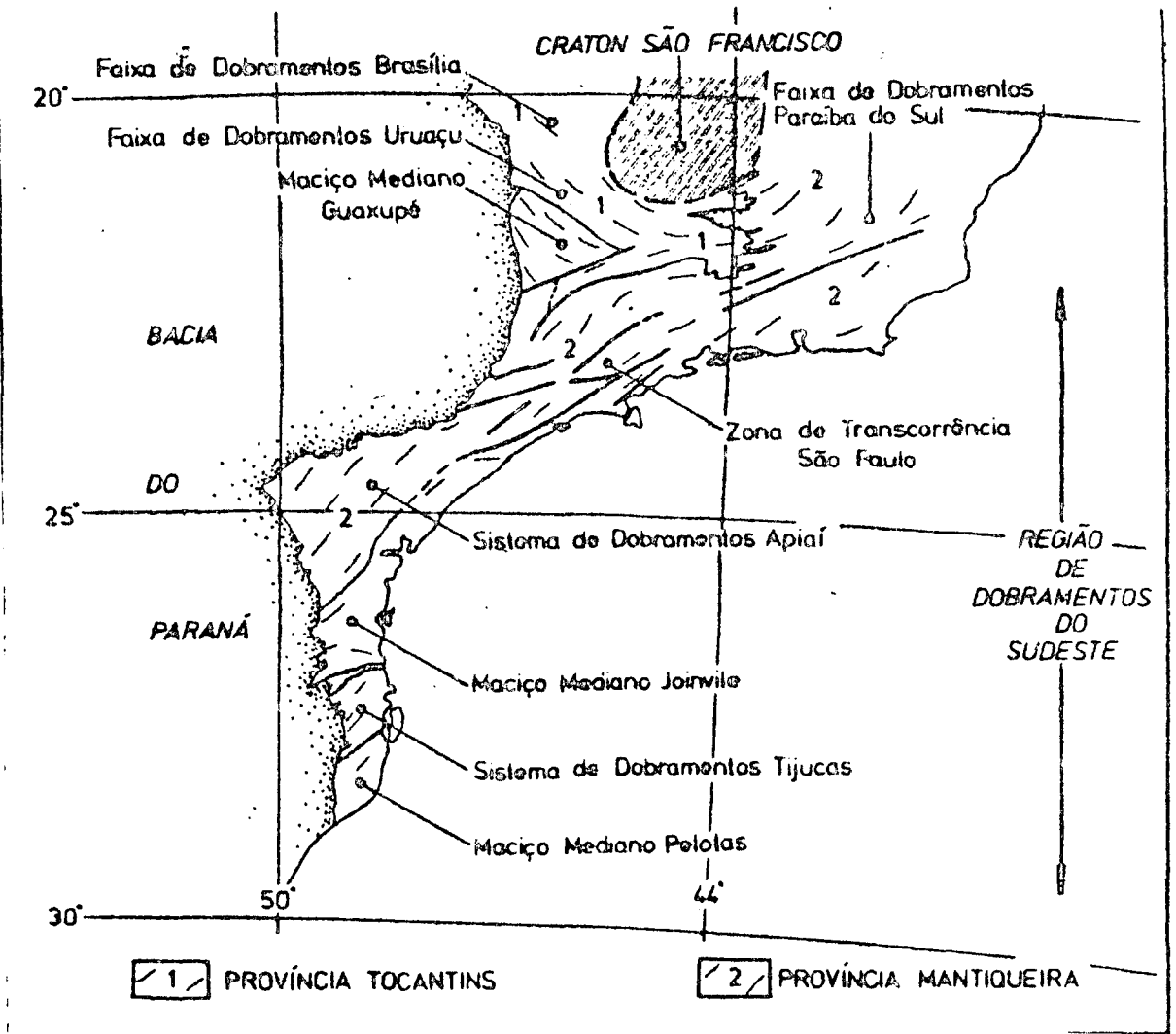


FIG. 6.4 - A zona marginal sul do Craton São Francisco.

6.2.2 - Província Tocantins

A Província Tocantins se estende à borda sul do Craton São Francisco, fazendo-se representar pelos Grupos Andrelândia e São João del Rei, anteriormente considerados como estruturas Araxaídes (Ebert, 1968) e agora atribuídos respectivamente às Faixas Uruaçu e Brasília. Essas unidades vêm de noroeste e desviam para E-W, descrevendo um arco, e acabam desaparecendo à altura do meridiano 44 W, cedendo lugar ao Grupo Barbacena, Fig. 6.5.

Ebert (1957) descreveu a Série Andrelândia e depois a considerou grupo (Ebert, 1968). É um pacote de metassedimentos de fácies anfibolito, representados por cerca de 100 m de quartzitos basais e por granada-micaxistos com estauroлита e cianita. Dobras isoclinais, escamas e empurrões indicam vergência para o lado côncavo do arco descrito pela faixa.

Um ramo dessa faixa se dirige para sudoeste a partir da região de Lambari-Três Corações. Os metassedimentos desse ramo constituem o Grupo Itapira (Ebert, 1971). Trata-se de micaxistos, quartzitos, metarcoseos, calcários e metabasitos, com grau de metamorfismo e infiltrações graníticas de menor grau que o Grupo Amparo presente a sul.

Entre a faixa principal e esse ramo, existe uma vasta área de rochas mais antigas, à qual Almeida et al. (1976) denominaram Maciço Guaxupé. As rochas que o constituem são charnockitos e granulitos, migmatizados e penetrados por granitos e migmatitos, quartzitos, mármore e rochas calcossilicatadas (Oliveira, 1973; Oliveira e Alves, 1974; Wernick e Penalva, 1974).

Ebert (1971) considera que o Grupo Andrelândia passa gradualmente, por incrementos do grau metamórfico, para o Grupo Paraíba. Por outro lado, acha que as estruturas Araxaídes, representadas pelo Grupo Varginha, viriam terminar na região de São Tomé das Letras, sob o Grupo São João del Rei. Essas assertivas chocam-se com a correlação do Araxá-Varginha com o Andrelândia (Almeida et al., 1973) e com o Itapira (Almeida et al., 1976), sobre as quais se fundamenta o esboço acima.

De modo geral, o metamorfismo se acentua para sul, assim como a deformação. A vergência se volta para o Craton São Francisco.

6.2.3 - Sub-Província Rio Doce

A sub-província Rio Doce tem amplo desenvolvimento a leste do meridiano 44 W, abrangendo a área entre o Craton São Francisco e o litoral. A oeste desse meridiano, ela se reduz a uma faixa entremeada de um lado com a sub-província Serra do Mar, e do outro, com a província Tocantins.

Barbosa (1934) reconheceu as séries Barbacena e Mantiqueira, esta última migmatizada e mostrando transformações mais acentuadas. Ebert (1957) redefiniu a série Barbacena, incorporando parte dela na Série São João del Rei, isolando parte sob o nome Formação Lafaiete, que ocorre na extremidade meridional do Craton de São Francisco, e denominando Formação Barbacena os metassedimentos e metabasitos associados, mais velhos que as séries Minas, Andrelândia e São João del Rei. Na região de Juiz de Fora, Ebert (1957) reconheceu a série Mantiqueira fortemente dobrada sob uma sequência a que chamou Série Juiz de Fora, constituída de quartzitos feldspáticos, metagrauvasas conglomeráticas, gnaisses kinsigticos e rochas charnockíticas. Mais a sudeste, a Série Mantiqueira apareceria em núcleos de anticlinórios desenhados pela série Juiz de Fora.

Rosier (1957, 1965) definiu no Estado do Rio de Janeiro a Série Paraíba-Desengano, um complexo metassedimentar de fácies fibrolito e granulito, representado por gnaisses, migmatitos, charnockitos, mármore e quartzitos. Descreveu também a Série Serra dos Órgãos, formada de migmatitos e rochas granitóides e quartzodioritóides, além de outras faixas de constituição litológica semelhante.

Ebert (1967) passa a denominar Grupo Paraíba ao conjunto das séries Paraíba-Desengano, Serra dos Órgãos e Juiz de Fora, esta última representando uma fácies granulítica do que chamou estruturas Paraibides (Ebert, 1968). Do mesmo modo, a Série Mantiqueira e a Formação Barbacena passaram a ser consideradas sob o nome de Grupo Barbacena.

O Grupo Amparo foi descrito por Ebert (1968) como uma unidade constituída de xistos, quartzitos, rochas calcossilicetadas, anfibolitos, gonditos, charnockitos e granulitos e, de início, correlacionado com o Grupo Barbacena. Hasui et al. (1977) distinguiram na região de Jundiá uma unidade essencialmente pelítica, coberta por outra psamo-pelítica, a que denominaram Formação Ermi da e Japi, respectivamente. Granitos intrusivos e migmatização afetaram essa seqüência que é atribuída ao Grupo Amparo.

As datações geocronológicas de Cordani et al. (1973) e Wernick et al. (1976) vieram mostrar que o Grupo Barbacena apresenta idade de 2800 m.a., tendo sido migmatizado a cerca de 2000 m.a., no Ciclo Transamazônico. Resultados K-Ar de 500-700 m.a. indicam rejuvenescimento isotópico no Ciclo Brasileiro.

O Grupo Paraíba foi datado em 2000 m.a., sendo atribuído ao ciclo Transamazônico. Sofreu ele intensa deformação, migmatização e intrusão de granitos no Ciclo Brasileiro. Granitóides com características sintectônicas, como as da chamada Série Serra dos Órgãos, forneceram idade de 620 m.a., enquanto granitos intrusivos foram datados em 540 m.a. e os pegmatitos em 460 m.a.

O Grupo Amparo mostrou idades análogas às do Grupo Paraíba, inclusive com indicação de processos brasileiros superpostos, o que não justifica portanto a manutenção desta primeira unidade.

Em suma, na sub-província Rio Doce à borda sul do Craton São Francisco reconhece-se o Grupo Paraíba, como unidade mais jovem e fortemente afetada por processos do Ciclo Brasileiro, Fig. 6.5.

6.2.4 - Sub-Província Serra do Mar

A sub-província Serra do Mar na área aqui abordada é representada pelos grupos São Roque e Açungui e por núcleos do embasamento pré-brasiliiano do Maciço Mediano Joinvile (Hasui et al., 1975), expostos ao longo da região costeira do Estado de São Paulo. Estas unidades foram recentemente descritas na região Jundiá-São Miguel Arcanjo-Santos por Hasui e Sadowski (1976), num estudo de síntese regional.

Os grupos São Roque e Açungui se constituem de metassedimentos de fácies xisto verde e anfibolito, em parte migmatizados. Assim, são eles constituídos de xistos, quartzitos e migmatitos de estruturas diversas, e raros calcários, metaconglomerados, itabiritos, rochas calcossilicáticas. Um magmatismo precoce de natureza básica e um pós-tectônico, de caráter ácido e datado em 540 m.a., são reconhecidos, ambos de incidência discreta. O magmatismo ácido sintectônico, datado em cerca de 620 m.a., contudo, foi extremamente ativo, originando corpos de dimensões variadas que se expõem em área total equivalente ou maior que à correspondente aos outros tipos litológicos. O dobramento foi polifásico nos dois grupos, mas há diferenças entre ambos quanto ao número de fases e, portanto, de estilos. Os núcleos do embasamento pré-brasiliiano são constituídos de charnockitos, granulitos e migmatitos, e envolvidos por migmatitos brasilianos, tendo sido os menores fortemente remobilizados (Sadowski, 1974, 1977).

Os limites entre os grupos Paraíba, São Roque e Açungui são tectônicos, dados por enormes falhas transcorrentes, Fig. 6.5.

Os estudos de Carneiro (1977), Cavalcante e Kaefer (1974), aqueles desenvolvidos pela disciplina Mapeamento Geológico do Curso de Geologia da U.S.P. em convênio com o Departamento Nacional de Produção Mineral, e as datações geocronológicas disponíveis

(Minioli, 1971; Wernick et al., 1976), mostram, ainda que de modo fragmentário, que as estruturas brasileiras continuam pelo extremo leste paulista, não se verificando aí a presença do Grupo Paraíba na extensão apontada por Ebert (1968). Por outro lado, como o Estado do Rio de Janeiro é o domínio do Grupo Paraíba, é de se inferir que as estruturas brasileiras desaparecem na altura do meridiano 33 W, tal como acontece com os Grupos Andrelândia e São João del Rei.

6.2.5 - Falhamentos Regionais

Já Hasui et al. (1969) insistiam na importância da estrutura em blocos, decorrente de um sistema de falhas transcorrentes. O conhecimento desse sistema é ainda incompleto, mas vem se ampliando gradativamente (Hennies et al., 1967; Hasui et al., 1969; Penalva e Wernick, 1973; Rideg, 1974; Cavalcante e Kaefer, 1974; Hasui, 1975; Almeida et al., 1975; Rodrigues, 1976; Hasui e Sadowski, 1976; Carneiro et al., 1976; Braun e Baptista, 1976). Elas constituem a Faixa Rúptil Paraíba (Braun, 1972) ou Zona de Transcorrência São Paulo (Hasui et al., 1975), de deslocamento total de caráter dextrógiro. O movimento da Zona de Transcorrência São Paulo deslocou os segmentos norte e sul da Faixa Ribeira. O rejeito horizontal não foi determinado em virtude de não haver referências geológicas mais precisas, estima-se um valor mínimo de 300 km considerando-se o Grupo Serra dos Órgãos como correlato dos migmatitos que ocorrem na Serra de Paranapiacaba.

Tais falhas podem ser antigas, como a de Além-Paraíba (Almeida et al., 1975), mas foram muito ativas no fim do Ciclo Brasileiro (fins do Pré-Cambriano ao Ordoviciano), truncando a supra-estrutura constituída nesse ciclo. Ainda em tempos meso-cenozóicos foram reativadas e juntamente com novas falhas, numa tectônica tracional, permitirem o advento de ativo magmatismo, inicialmente básico e depois alcalino, o desenvolvimento de bacias sedimentares e do relevo das serras do Mar e da Mantiqueira (Almeida, 1975; Hasui et al., 1976; Carneiro et al., 1976).

Dentre as grandes falhas antigas reconhecidas, pode-se citar a de Taxaquara que passa pelo norte da cidade de São Paulo, estende-se para leste até a região de Santa Branca, prolonga-se para os lados de Paraibuna, São Luís do Paraitinga, Cunha e Bananal, dirigindo-se para a Barra do Pirai, onde continua pela falha de Além-Paraíba. Sua extensão é de cerca de 650 km entre Itacoara e Pilar do Sul, Fig. 6.6.

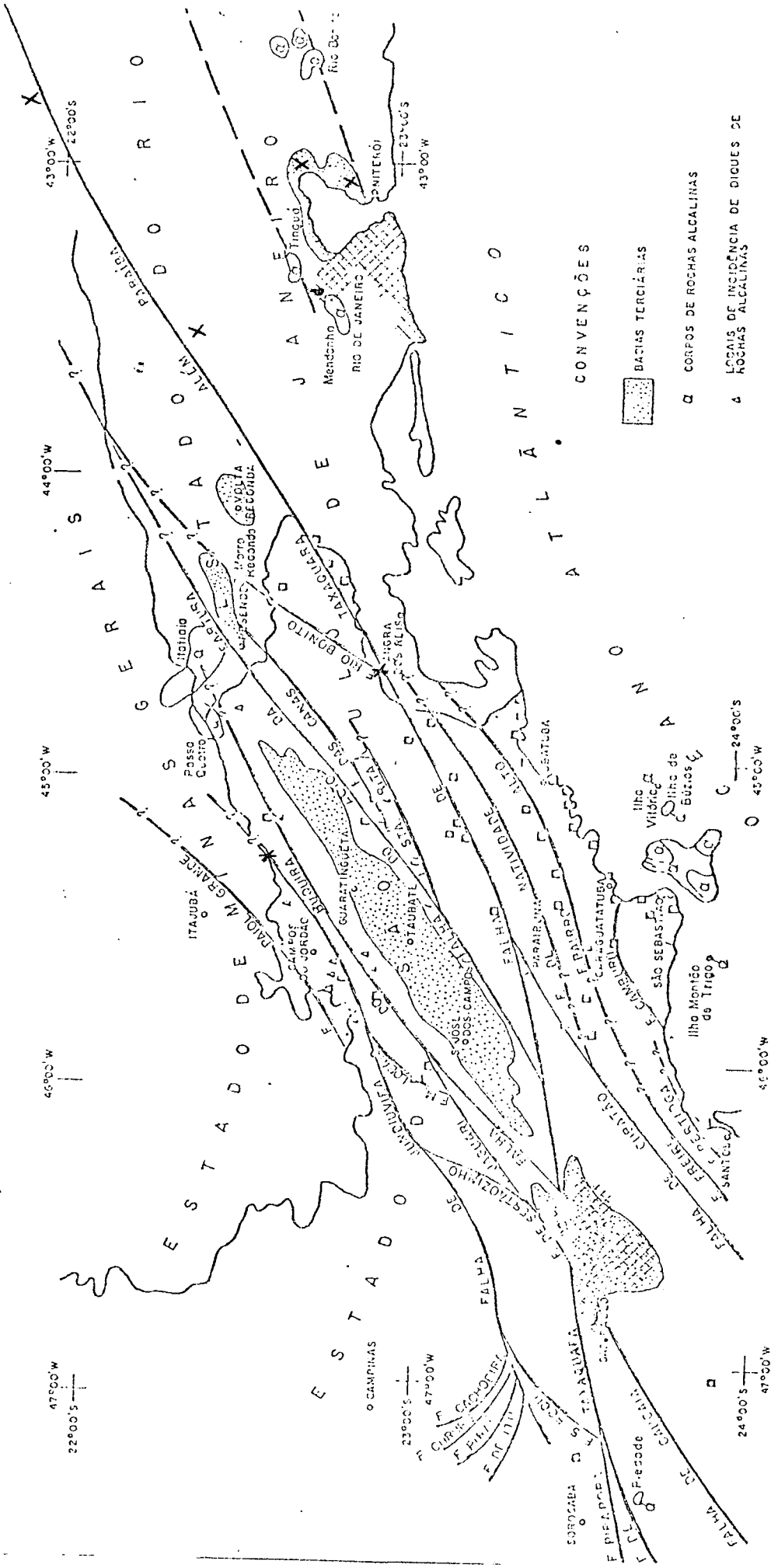
A falha do Alto da Fartura é uma ramificação da Falha de Taxaquara, que da região de Guararema se dirige no rumo de Silveiras, Areias, Resende e Rio Preto.

Outra grande falha é a de Cubatão, entre Pedro de Toledo e Biritiba-Mirim. Ela se prolonga rumo a Paraibuna e nas proximidades de Redenção da Serra vai se juntar à de Taxaquara.

Essas falhas respondem pela compartimentação tectônica indicada na Fig. 6.7. Os compartimentos separados têm características litológicas e estruturais próprias, assim como peculiaridades estratigráficas. Por exemplo, o compartimento litorâneo onde está situada Angra dos Reis se caracteriza pelos corpos granitóides e áreas migmatíticas de extensões de dezenas de quilômetros, num conjunto litologicamente monótono.

Para efeito de uma análise das possibilidades de ocorrência de abalos sísmicos na região onde está situada a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto é importante o conhecimento das características geológicas da plataforma continental. A principal e mais completa fonte de dados no que se refere a mapas e prospecções geológicas é uma coleção de mapas geológico-estruturais preparados pela Divisão de Exploração da Petrobrás quando da execução do trabalho de prospecção sísmica realizado na costa SE do Brasil. A partir destes mapas podemos chegar a um mapa estrutural generalizado, condensado, que destaca os principais elementos tectônicos da região, Fig. 6.8. Podemos observar que temos duas províncias tectônicas distintas constituindo o complexo

O JUIZ DE FORA



CONVENÇÕES

- BARIAS TERCIÁRIAS
- CORPOS DE ROCHAS ALCALINAS
- LOCAIS DE INCIDÊNCIA DE DIQUES DE ROCHAS ALCALINAS
- LOCAIS DE INCIDÊNCIA DE DIQUES DE ROCHAS BÁSICAS E INTERMEDIÁRIAS
- EMBASAMENTO PRÉ-CAMBRIANO

FALHAS TRANSCORRENTES

FALHAS NÃO CLASSIFICADAS

X SISMOS

90 km

FIG. 6.6 - Principais feições estruturais do litoral paulista e oeste fluminense.

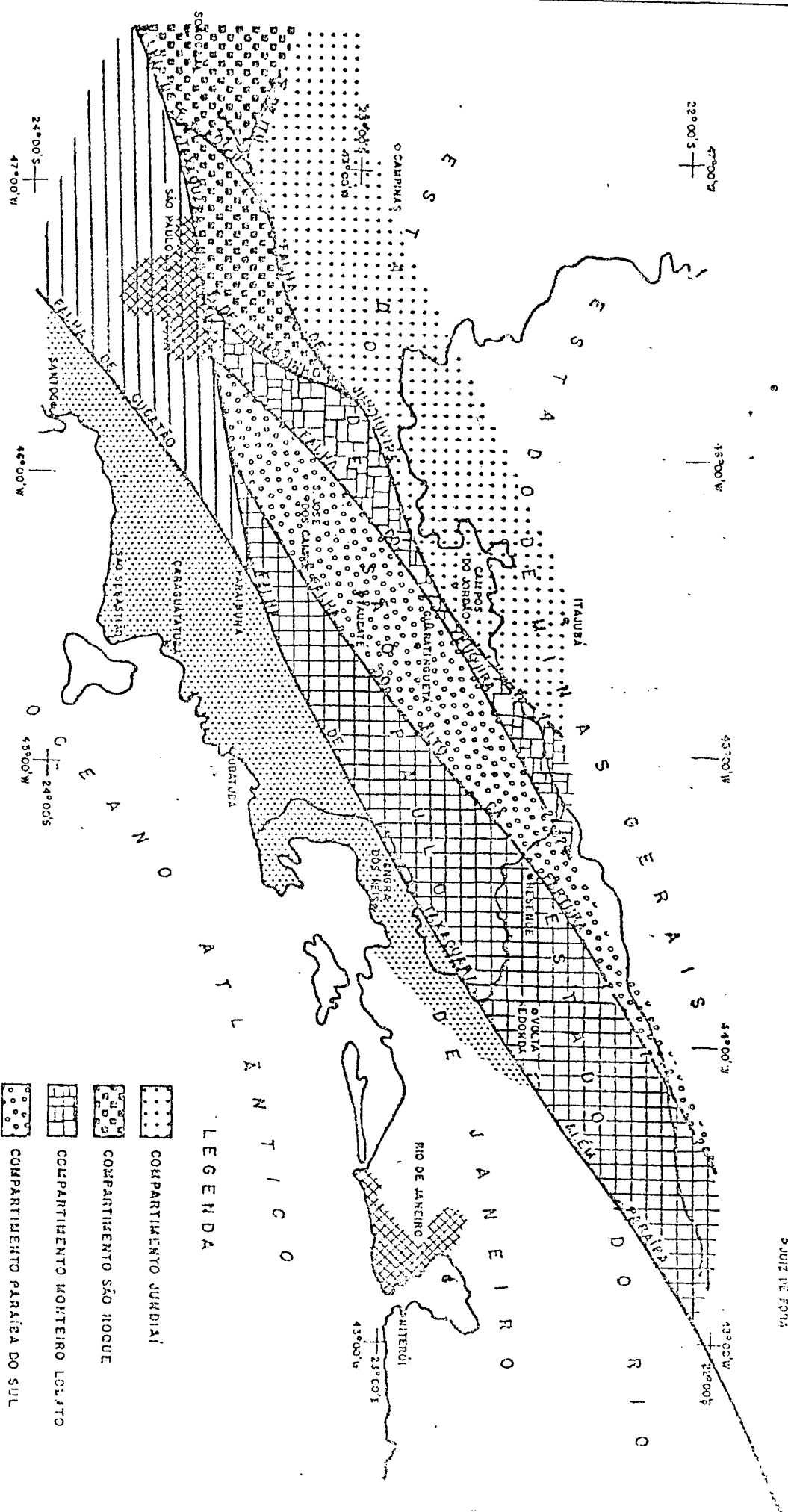









FIG. 6.7- GRANDES FALHAS E COMPARTIMENTAÇÃO TECTÔNICA DO LESTE PAULISTA /107/.



- LEGENDA
-  COMPARTIMENTO JURDIAI
 -  COMPARTIMENTO SÃO ROQUE
 -  COMPARTIMENTO MONTEIRO LOUITO
 -  COMPARTIMENTO PARAÍBA DO SUL
 -  COMPARTIMENTO QUERRA-CANGALHA
 -  COMPARTIMENTO PARANAPIACAGA
 -  COMPARTIMENTO LITORÂNICO

geológico da plataforma continental, entre as cidades de Vitória (ES) e Itajaí (SC).

A primeira província tectônica é constituída por falhamento antigo (pré-terciário, uma vez que os sedimentos terciários, sobrejacentes não estão perturbados pelas falhas que cortam o embasamento cristalino) de direções semelhantes à da costa atual.

Destacam-se, nesta província tectônica, a Falha da Bacia e a Falha de São Tomé (conforme nomenclatura da Petrobrás) representadas no mapa, Fig. 6.8.

Estas falhas marcam as bordas de bacias sedimentares espessas na costa brasileira e não apresentam quaisquer evidências de reativação.

A Falha da Bacia apresenta um rejeito diminuindo progressivamente para leste em direção ao Arco de Cabo Frio; a Falha de São Tomé, similarmente, tem seu rejeito diminuído no Arco de Cabo Frio e também para o norte, no Arco de Vitória.

Os arcos de Cabo Frio e de Vitória promovem os limites entre as feições sedimentares espessas (Bacias Sedimentares de Campos e do Espírito Santo).

A segunda província tectônica é constituída por falhamentos recentes pós-terciários (inferidos como pré-aternários devido a não se ter observado nos depósitos quaternários sobrejacentes, perturbações por falhamento) de direção dominante norte-sul, nas Bacias Sedimentares de Campos e do Espírito Santo.

A pequena espessura do depósito quaternário submarino que recobre o terciário, deixa indeterminada a idade dessa última fase do tectonismo embora inferida como pré-aternária.

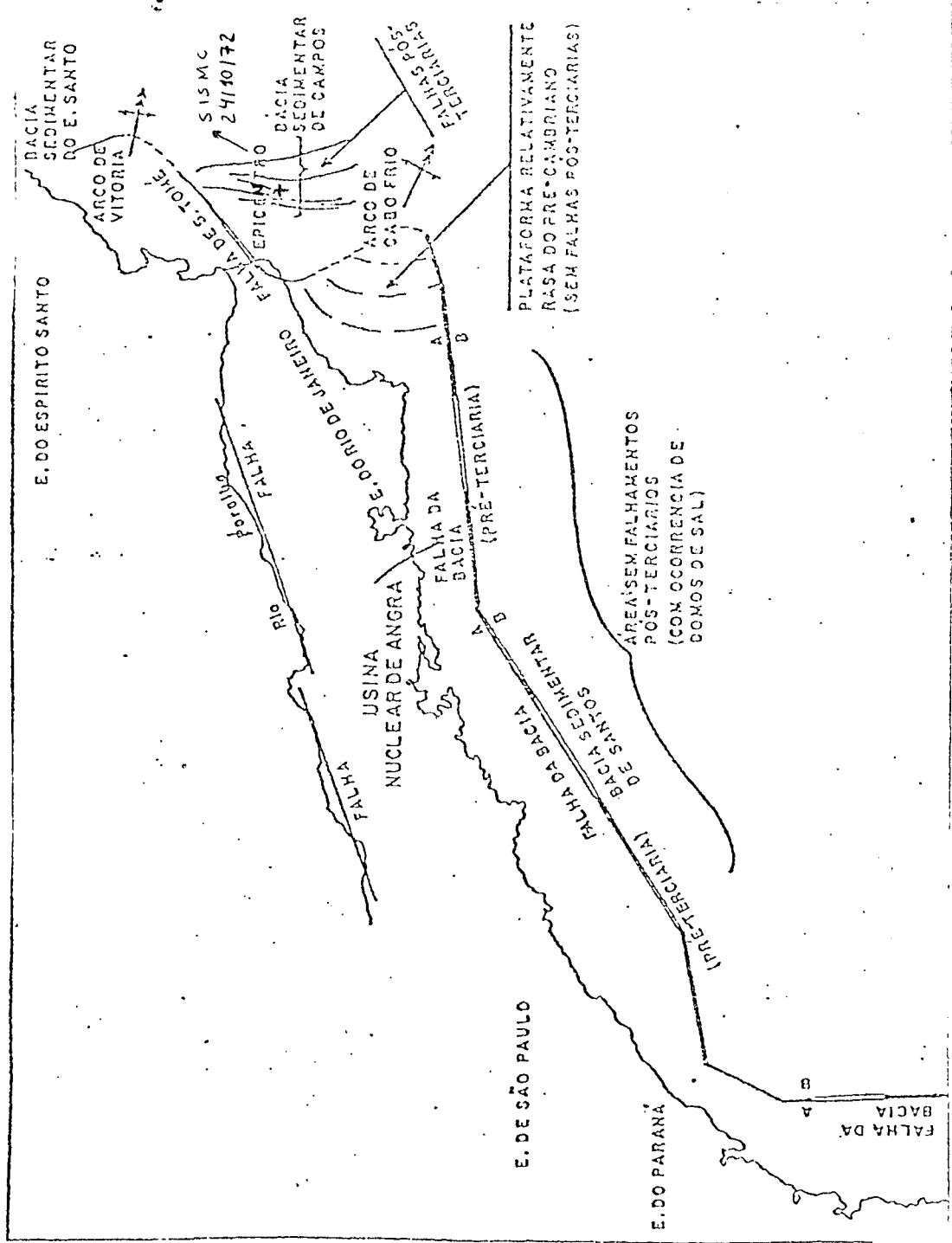


FIG. 6.8

Verifica-se que o rejeito dos falhamentos pós-terciários, nas bacias sedimentares de Campos e do Espírito Santo tende a zero nos arcos de Cabo Frio e Vitória; na bacia de Santos não estão presentes falhamentos pós-terciários.

Em todas as bacias sedimentares submarinas ocorrem domos de sal, que também são estruturas de natureza tectônica. Não obstante essa natureza, os falhamentos induzidos pela intrusão (diapirismo) dos domos de sal na secção terciária, não atingem o embasamento cristalino, não podendo esse tectonismo ser correlacionado, conseqüentemente, com perturbações profundas na crosta terrestre. Daí não constituírem, apesar de sua gênese, uma província tectônica do ponto de vista geológico.

6.2.6 - Geologia da Praia de Itaorna

Os principais tipos de solos e rochas no local da usina incluem, do mais jovem para o mais antigo, solos superficiais recentes e coluvião; camadas de areia e argila de idade quaternária; solos residuais e saprólitos de idade desconhecida; granito e diorito intrusivos além de gnaisses granitóides do pré-cambriano superior. O gnaisse ocorre como biotita-gnaisse e plagioclásio gnaisse, este intrudido por numerosos veios de pegmatito.

a - Coluvião

Os solos recentes coluviais aparecem na superfície das encostas das colinas ou próximo a elas e geralmente incluem um pouco de solos residuais lixiviados e matacões espalhados, originados pela erosão e intemperismo da parte superior do embasamento exposto.

b - Sedimentos (areias e argilas)

Os sedimentos do quaternário (predominantemente areias marinhas finas, de cor cinzenta a amarelada, contendo fragmentos de conchas, sobrepondo-se a camadas finas de argilas marinhas cinzas) ocorrem preenchendo depressões semelhantes a bacias isoladas, as enseadas ao longo da linha da costa. A espessura máxima

da camada de sedimentos é de 25 m, com a base da camada de argila mais profunda a 20 m da superfície.

c - Solos Residuais/Saprólito

Os depósitos de solos residuais são inferidos abaixo dos sedimentos do Quaternário na linha da costa da enseada e especialmente na zona da plataforma. Eles são geralmente um saprólito derivado de intenso intemperismo e decomposição do embasamento, sendo observados como razoavelmente compactos alcançando no local espessura superior a 40 m.

d - Diques de Diabásio

O diabásio normalmente ocorre como diques tabulares (de idade mesozóica), com mergulho acentuado, alcançando espessuras mensuráveis de 10 m ou menos. É uma rocha ígnea de cor cinza escura, com granulação fina e afanítica, que exhibe em afloramento contato frio e soldado com o gnaisse no qual está intrudido.

Não se constatou nenhuma evidência de movimentos subsequentes à intrusão nos contatos diabásio/gnaisse. O diabásio raramente aflora, possuindo somente boas exposições para exame na linha de costa.

e - Diorito

Em Ponta Fina, 800 m ao sul do local da usina, uma pequena exposição do embasamento de gnaisse mostra o relacionamento intrusivo do diorito com o gnaisse e com os veios de pegmatito.

O diorito é uma rocha ígnea maciça, cinza a cinza escura, granulação média, equigranular, aparentemente não mostrando bandamento ou outra petrofábrica orientada. Ele aparenta ser intrusivo na rocha gnáissica, em grandes massas em forma de lentes orientadas subparalelas à direção nordeste da petrofábrica regional, provavelmente concordante com o forte mergulho noroeste do bandamento do gnaisse.

f - Granito

Grandes massas de granito formam as mais proeminentes colinas em torno do local da usina. Próximo ao topo destas colinas o granito aflora sob a forma de picos proeminentes. O granito é uma rocha ígnea maciça, equigranular, com feldspato, quartzo e biotita,

granulação média e em contato intrusivo transaccional com os gnaisses adjacentes.

g - Gnaisse

Os gnaisses são as rochas fundamentais do embasamento no sítio da usina, no qual o granito, o diorito e os diques de diá-básio foram intrudidos.

Estes diques são considerados como derivados do último evento orogênico (estimado entre 800 e 600 milhões de anos atrás), bem como os quase contemporâneos granito e diorito intrusivos. Ocorre o plagioclásio-gnaisse (augen) ou o biotita-gnaisse. O primeiro é caracterizado por cristais grosseiros de plagioclásio ou porfiroblastos (textura oftálmica) e bandeamento gnáissico irregular, enquanto o biotita gnaisse é geralmente de granulação fina, com bandeamento mais destacado. Ambos os tipos de rocha são intrudidos por diques de pegmatito com orientação ao acaso.

Os gnaisses tendem a se alterar mais rapidamente do que o granito e o diorito, formando geralmente uma zona de solos residuais mais espessa que as encontradas sobre aquelas outras rochas.

h - Situação Estrutural

O mapeamento geológico de superfície e subsuperfície no local da usina indicou que todas as juntas e falhas com direção N46 54E estão soldadas. Atribui-se uma idade antiga para a última movimentação não tendo sido determinado nenhum falhamento recente.

6.3 - Sismicidade Histórica

Embora Branner (1912, 1920), já reconhecesse a existência de alguma atividade sísmica na região, são precárias as informações disponíveis, consistindo principalmente de relatos em jornais e alguns poucos trabalhos científicos publicados. São conhecidos apenas quatro eventos sísmicos que fizeram sentir seus efeitos nas proximidades do local da usina de Angra I. Pelo que se sabe, nenhum desses sismos produziu danos significativos e são estimados como tendo uma intensidade máxima menor do que VI (MM). As informações disponíveis sobre os sismos de 1962 e 1967 não são muito detalhadas

pois a região esteve submetida justamente na mesma época a pesadas chuvas, Fig. 6.9.

a - Sismo de 31 de Julho de 1861

Este sismo afetou uma grande parte da região meridional de Minas Gerais e regiões adjacentes dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, Fig. 6.10. O limite oeste da área afetada não está bem definido em razão da baixa densidade populacional desta região de Minas Gerais e porque o sismo ocorreu à 1 hora da manhã. A localização do epicentro deste sismo, de curta duração, pode ser estimada como sendo perto do centro da área afetada e pode ser admitido um erro de localização superior a 50 km. Os máximos efeitos relatados ocorreram em Itajubá, ao norte da localização aproximada do epicentro, onde o tremor foi fortemente sentido, "derrubando móveis, atirando telhas ao chão e o ruído acordando as pessoas que estavam dormindo", (Nelson de Senna, Anuário de Minas Gerais 1906, Belo Horizonte, 1906). A intensidade estimada no epicentro de V-VI (MM) para este evento é baseada no relato acima. Uma testemunha relatou que este sismo foi sentido em Mambucaba (RJ), alguns quilômetros a oeste de Itaorna, porém, não forneceu qualquer comentário sobre seus efeitos. É provável que o local tenha experimentado uma intensidade próxima de IV-V MM.

b - Sismo de 9 de Maio de 1886

Este sismo foi sentido na região meridional de Minas Gerais e sudoeste do Rio de Janeiro. Comunicações feitas por telégrafos ao longo das ferrovias que correm para norte e oeste da cidade do Rio de Janeiro proporcionaram informações relativamente detalhadas a respeito da área afetada por este sismo. As descrições do mesmo, indicam que seus efeitos foram relativamente uniformes e espalhados. A localização estimada do epicentro é perto do centro da área afetada como mostra a Fig. 6.11, o que também é evidenciado pelos efeitos em Palmeiras (RJ), onde móveis e utensílios de cozinha foram derrubados e as paredes de uma casa ficaram rachadas ("Diário de Notícias", 1886; Alípio Gama, "Serão Impossíveis as Manifestações Vulcânicas no Brasil? Memórias sobre os Phenomenos Vul-

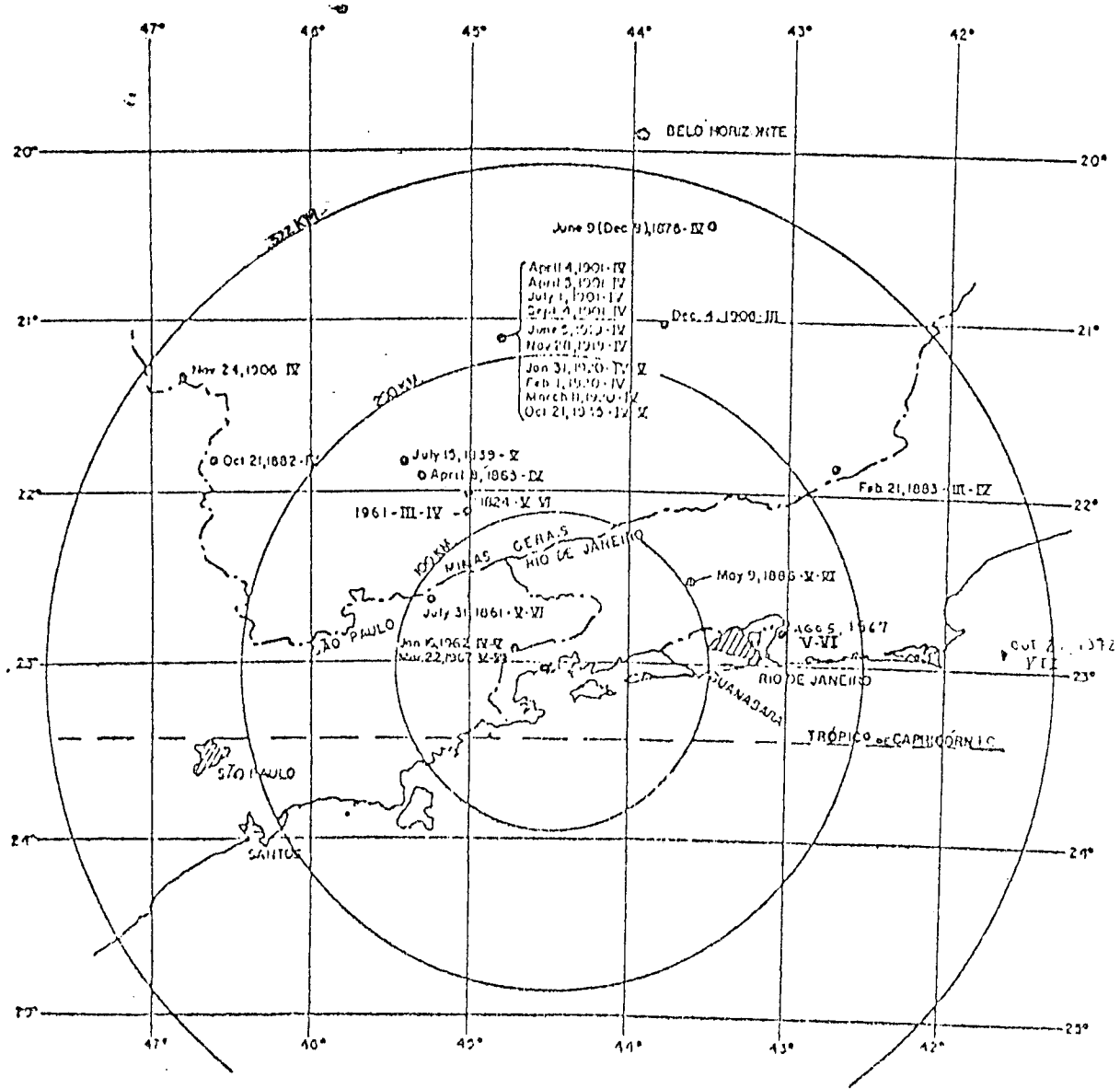


FIG. 6.9 - Sismos registrados num raio de 322 km da C.N.A.A.A.

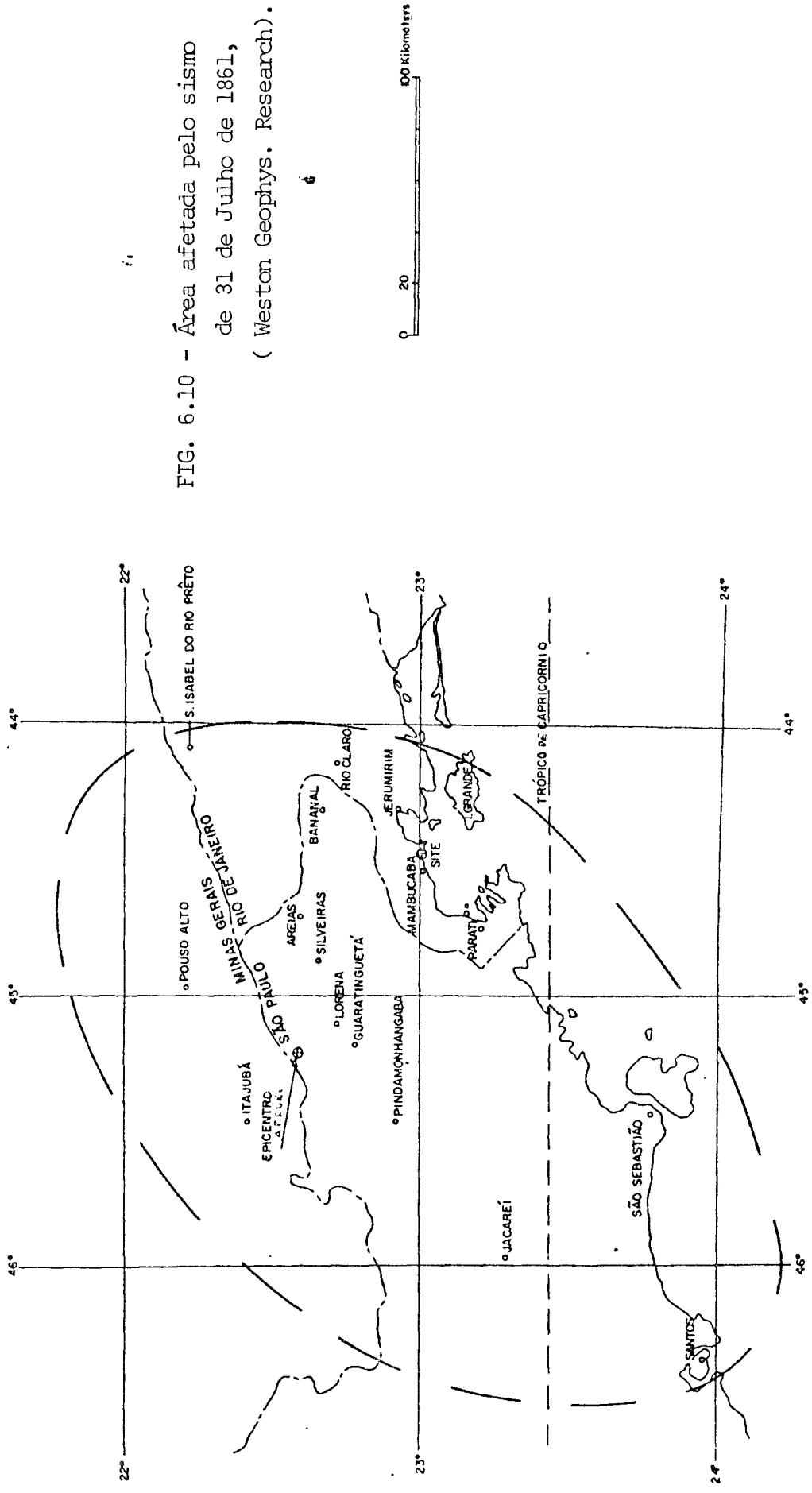


FIG. 6.10 - Área afetada pelo sismo de 31 de Julho de 1861, (Weston Geophys. Research).

cânicos no Brasil", Rio de Janeiro, 1910). Baseada nesta e em outras descrições este evento teve uma intensidade, no epicentro, estimada em V-VI MM.

Nas proximidades do sítio da usina, o sismo foi descrito como sendo fraco em Angra dos Reis e forte em Mambucaba, porém, poucos detalhes são conhecidos ("Diário de Notícias", Rio de Janeiro, 11 de Maio de 1889). Para o local de Angra, foi estimada uma intensidade máxima de IV MM.

c - Sismo de 16 de Janeiro de 1962

Este sismo foi sentido em regiões dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, Fig. 6.12. A localização estimada do epicentro foi baseada em estudos da área afetada e principalmente pela conclusão de Marcus Gorini ("Earthquake in Brazil", 1969) onde diz que "o sismo ocorreu em uma estreita faixa do litoral, mais ou menos associada com a Serra do Mar". Os efeitos e a intensidade no epicentro deste evento são bastante incertos devido ao fato do mesmo ter ocorrido durante pesadas chuvas, tendo havido inundações e desmoronamentos. Poder-se-ia aventar a possibilidade deste sismo ter tido alguma influência nos deslizamentos ocorridos. Considerando-se essa possibilidade certamente a intensidade do sismo seria maior que a estimativa de IV-V MM para a região epicentral. Esta estimativa foi feita num estudo comparativo com o sismo de 22 de Março de 1967 e considerando que o sismo não teve nenhuma participação nos deslizamentos mencionados acima. Para o local de Angra foi estimada uma intensidade de similar de IV-V MM.

d - Sismo de 22 de Março de 1967

Este sismo foi sentido em uma área maior do que a do sismo anterior e incluiu partes dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro, Fig. 6.13. A localização do epicentro deste evento é baseada na opinião do Prof. Josué de Camargo Mendes, da U.S.P. ("Jornal do Brasil", 24/03/67), bem como nas descrições dos efeitos do tremor.

Os efeitos máximos deste sismo ocorreram em São Luiz do Paraitinga e Cunha na região da Serra do Mar, e em Angra dos Reis.

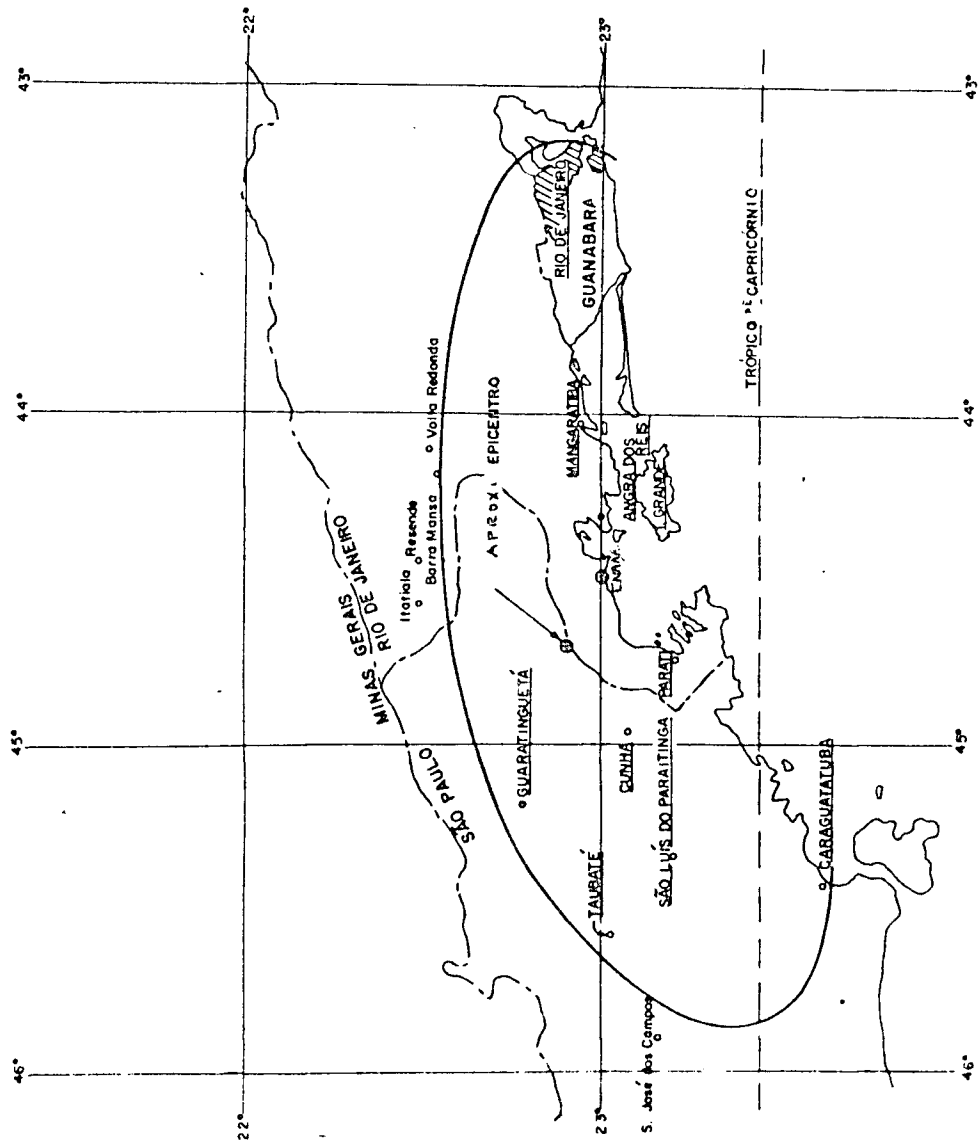
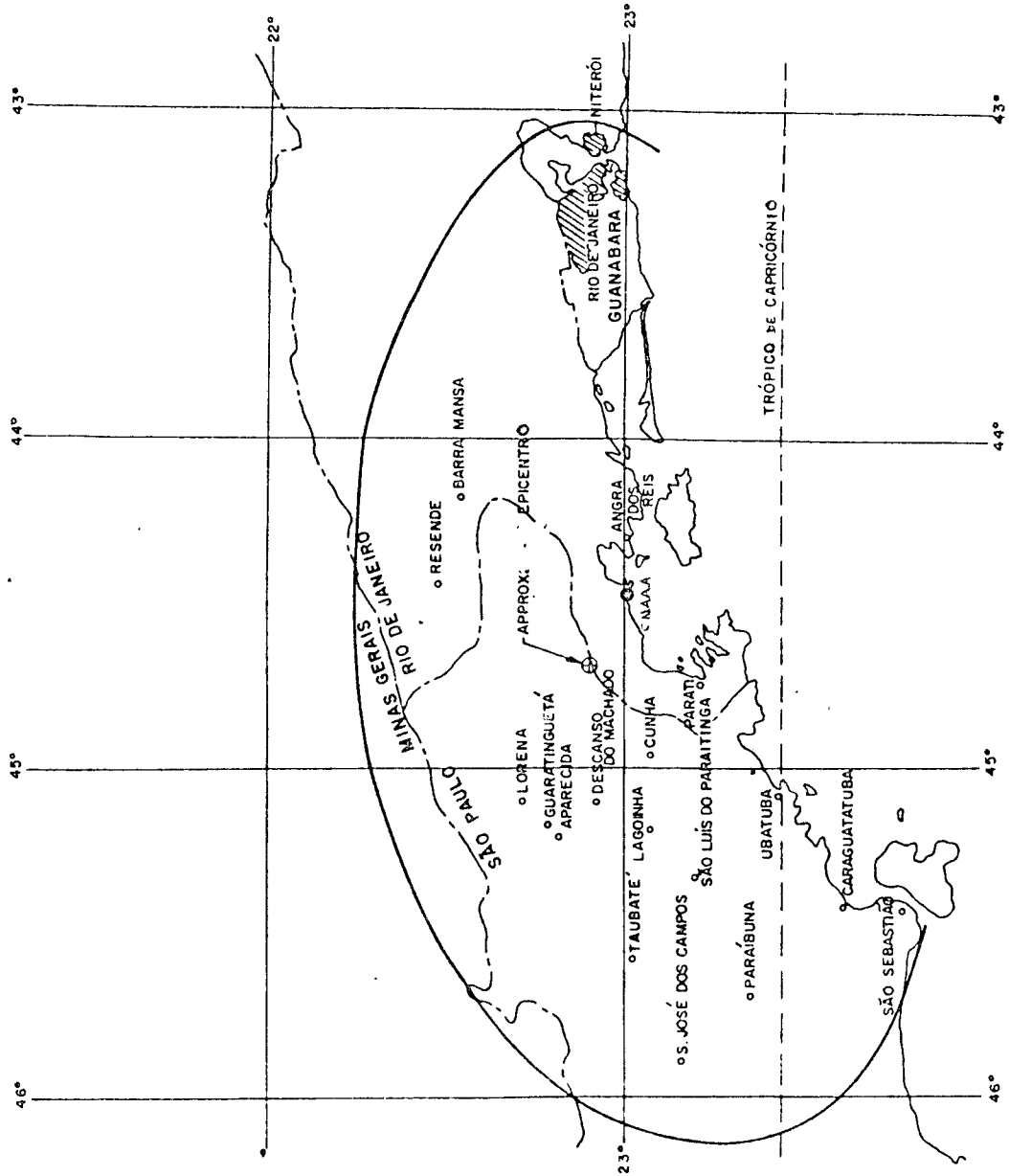


FIG. 6.12 - Área afetada pelo sismo de 16/01/62 (W.G.R.).

FIG. 6.13 - Área afetada pelo sismo de 22 de Março de 1967 (W.G.R.).



Janelas e louças quebradas, paredes rachadas e outros danos similares indicam, segundo a Weston Geophysical, uma intensidade no epicentro de V-VI MM. O relato de que "três casas em Angra dos Reis sofreram pequenas fissuras em suas paredes como uma consequência do tremor" ("Jornal do Brasil", 24/03/67), foi tomado como base para a estimativa de que local da usina teria experimentado uma intensidade de V-VI MM.

Os eventos sísmicos que, provavelmente, afetaram o sítio da usina mostram algumas características dignas de nota. Em cada caso, a área afetada está alinhada com o traço geológico estrutural de direção NE-SW. Os movimentos causados por estes eventos parecem ser de duração relativamente curta, provavelmente da ordem de 10 a 15 segundos e de alta frequência. Segundo a Weston Geophysical, as atenuações das intensidades dos sismos com a distância é muito lenta, devido ao embasamento rochoso ser pouco profundo, dessa maneira sismos de intensidade relativamente baixa são sentidos em áreas relativamente grandes.

A intensidade máxima de um evento sísmico, no local da usina, foi estimada como estando entre V-VI MM, o que corresponde a uma aceleração horizontal da rocha de 0,05g (segundo a relação intensidade-aceleração de Gutenberg e Richter de 1942). Levando-se em consideração a amplificação através do solo estimada em cerca de 80%, resulta uma aceleração de 0,09g na superfície do solo. Portanto, a aceleração horizontal do solo para o SSE (Safe Shutdown Earthquake) durante cuja ocorrência os equipamentos devem apenas efetuar suas funções de segurança não havendo requisito de funcionamento normal de equipamento, foi escolhida como sendo 0,10g, e que também equivale ao valor mínimo estabelecido pelos regulamentos internacionais. A aceleração vertical foi tomada como 2/3 da aceleração horizontal, ou seja, 0,067g. A aceleração horizontal do OBE (Operating Basis Earthquake) que é o maior sismo que pode razoavelmente ocorrer no lugar de construção da usina nuclear durante a vida útil desta, foi tomada como 0,05g e sua aceleração vertical como 0,034g. Deve-se salientar que, durante o OBE, os equipamentos devem permanecer operacionais ou devem ser capazes de interrupção brusca e reinício de operação.

7. ANÁLISE DOS CRITÉRIOS SÍSMICOS ADOTADOS NO PROJETO DA CENTRAL NUCLEAR ALMIRANTE ÁLVARO ALBERTO

7.1 - Geologia e Tectônica

Um levantamento geológico regional e a coleta de subsídios geológicos para os trabalhos de detalhe de grandes obras de engenharia são imprescindíveis. É de grande importância a reconstituição de aspectos da evolução geológica, ainda que eles não se manifestem necessariamente no local exato da obra.

Dado o pequeno número de estudos anteriores e ao levantamento extensivo quando dos estudos de localização, torna-se difícil apresentar resultados com a profundidade desejada. Nos estudos que tratam da estrutura geológica regional poder-se-ia ter apresentado uma gama maior de opiniões sobre alguns dados obscuros ou polêmicos. Por exemplo, cita-se uma comunicação pessoal (1972) para justificar uma afirmativa de que a bacia do Paraíba (Taubaté) formou-se no período Cretáceo. Acontece que, na época, já existia um trabalho de Couto e Mezzalana (1971) que dava conta que a referida bacia se formou no Terciário. Com respeito à plataforma continental atribuiu-se uma espessura de sedimentos de cerca de quatro quilômetros à Bacia de Santos, no entanto, Baccar (1970) cita evidências geofísicas de que esse pacote sedimentar tem uma espessura variando de 4,5 km no plateau a 6,5 km no talude continental. Mencionou-se ainda a existência de domos salinos, mas não se estudou adequadamente se esse diapirismo, ainda ativo /108/, pode causar sismos que afetem o local da usina. Não houve uma discussão a respeito do fato da topografia do local escolhido ser considerada inusual para a instalação de centrais nucleares e de que o espaço disponível para construção era formado por uma área plana relativamente pequena (500 m x 400 m) completamente circundada por elevações (200 m a 700 m de altitude). Em virtude disto, ficou comprometida a distribuição local dos edifícios da central, como o da turbina, que deveria ser construído de preferência longitudinalmente em relação ao edifício do reator /119/, o que não ocorreu em Angra I.

Nos taludes em torno da praia, onde estão localizadas as duas unidades da C.N.A.A.A., foram observados escorregamentos em toda sua extensão. Ao lado da unidade I, foi calculado um eventual escorregamento de talude, concluindo-se que se esse escorregamento ocorresse não atingiria a unidade I. O talude atrás da unidade II, não apresenta perigo, recebendo tratamento convencional e constantes observações. Na eventual construção da unidade III, o talude atrás desta, deverá receber tratamento especial/120/.

Não houve também a atenção necessária para com o subsolo, que se revelou altamente heterogêneo. Isso fez com que as fundações dos edifícios do reator e de segurança de Angra I estejam assentados sobre dois tipos de rochas (diorito e gnaisse) quando o ideal teria sido locá-las sobre um único tipo de rocha. Durante a execução das obras das fundações de Angra II encontrou-se um número de matacões acima do previsto nos ensaios geotécnicos, atrasando o cronograma de execução das fundações. A solução encontrada para a remoção dos matacões consistiu na desagregação por explosivos.

7.2 - Sismicidade

O coeficiente sísmico é um item comum em qualquer grande projeto de engenharia. Em linhas gerais, sua finalidade é preventiva aos efeitos sísmicos, desde simples tremores até terremotos. Como no Brasil, até hoje, não se tem registro de grandes atividades sísmicas, como na faixa andina, por exemplo, os empreiteiros brasileiros praticamente não levam em conta este cálculo. No caso da construção de uma usina nuclear, este cálculo é imprescindível.

A região das Serras do Mar e da Mantiqueira possuem falhamentos antigos que foram reativados várias vezes, com caráter diversificado, pelo que é difícil precisar sua idade como também os rejeitos. Contudo, esses falhamentos são as linhas mestras da

evolução geológica regional, como se depreende do exame da organização geométrica e distribuição geográfica das entidades geotectônicas e unidades estratigráficas pré-cambrianas, distribuição dos corpos gerados pelo magmatismo mesozóico e das bacias terciárias, e do padrão dos grandes traços da geomorfologia/107/.

A área é marcada por fortes características de uma tectônica residual / 93 / o que permitiria dizer que há uma relação entre os abalos sísmicos e os grandes falhamentos regionais. Assim, por exemplo, podemos considerar que os deslizamentos na Serra das Araras (Março de 1967) e o abalo registrado na mesma época em Cunha (SP) e arredores, cerca de 25 km do local da usina, foram uma resposta da estrutura geológica (o epicentro estimado desses abalos está próximo às falhas de Taxaquara, Natividade e Rio Bonito) em busca de uma nova posição de equilíbrio. Note-se que o sismo de 16 de janeiro de 1962 teve seu epicentro inferido para o mesmo local. O epicentro do sismo de 3 de julho de 1861 é estimado com um maior grau de incerteza, no entanto, pode-se inferi-lo para as proximidades das falhas de Jundiuvira e do Buquira a noroeste da Bacia de Taubaté que se formou devido a falhamentos pliocênicos /107/, e apresenta maior subsidência no seu limite noroeste. Mesmo o sismo de 9 de Maio de 1886, situado em região menos conhecida geologicamente, tem seu epicentro estimado como bastante próximo do falhamento Taxaquara - Além-Paraíba, Fig. 7.1 . Observa-se, então, que embora os estudos geológicos na região de Angra sejam ainda incipientes, pode ser identificada uma certa atividade sísmica relacionada, principalmente, com os traços das antigas falhas transcorrentes.

Os dados sísmicos referentes às unidades nucleares de Angra dos Reis basearam-se em registros históricos, tendo sido determinada como VI MM a intensidade máxima para o local. Entretanto, na determinação dessa intensidade máxima deve-se levar em conta um princípio sismológico segundo o qual a intensidade máxima observada não é, necessariamente, igual à intensidade máxima que o sismo pode ter tido em seu epicentro. Deve-se ter em mente, também, o fato dos sismos no Brasil serem superficiais, de profundidade rasa e atenuação maior. Assim, no seu epicentro, a intensidade pode corresponder a pelo menos um grau a mais que a determinada para áreas próximas.

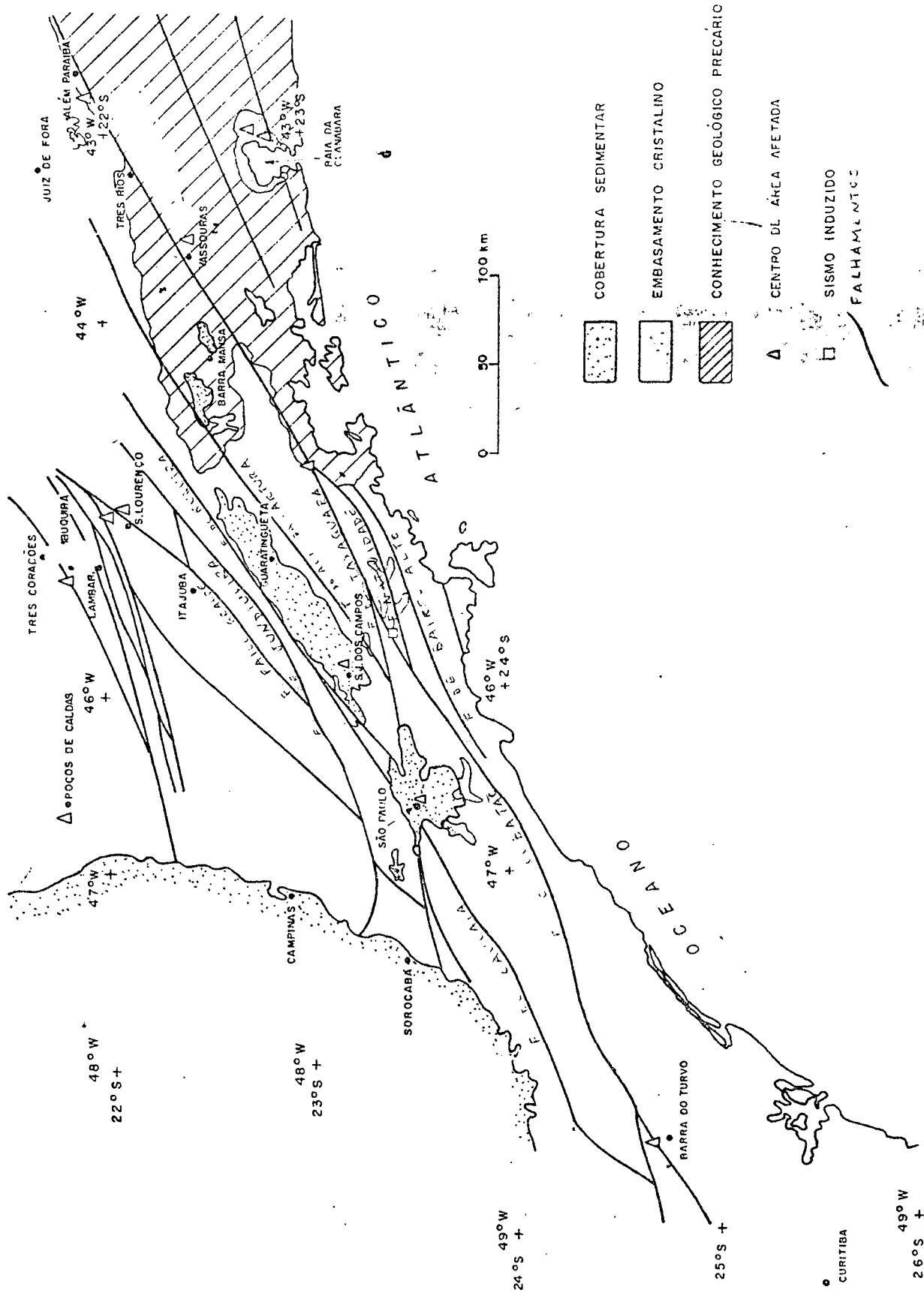


FIG. 7.1-GRANDES FALHAMENTOS x SISMOS.

É necessário também fazer estimativas realísticas da atenuação sísmica, segundo especialistas, os dados existentes de alguns eventos passados indicam a possibilidade de se obter este parâmetro. No que tange à sismicidade deve-se dar também maior atenção à Bacia de Campos, cujas falhas (de idade pós-terciária), podem ser ainda ativas como o indica o sismo aí registrado em 24 de outubro de 1972. Este sismo teve uma magnitude entre 5,3 e 6,4 na escala Richter, e aplicando $M = 1 + \frac{2}{3} I / 6$, obtemos os seguintes valores para sua intensidade:

$$M = 5,3$$

$$I_0 = \frac{3(M-1)}{2} = \frac{3(5,3-1)}{2} = 6,5$$

$$I_0 = \text{VI - VII MM}$$

$$M = 6,4$$

$$I_0 = \frac{3(M-1)}{2} = \frac{3(6,4-1)}{2} = 8,1$$

$$I_0 = \text{VIII MM}$$

Ou seja, este sismo teve uma intensidade VII MM que é a maior para os sismos registrados num raio de 322 km do local da usina.

Outra consideração necessária diz respeito ao relacionamento entre intensidade e aceleração das ondas sísmicas, pois utilizou-se na época em que foi realizado o levantamento geológico-geofísico, uma relação feita por Gutenberg e Richter na década de 40 baseada, principalmente, em dados californianos para solos que apresentam resistência de regular a boa. Esta relação foi considerada conservativa para as condições de fundação em rocha que existem no local de Angra I. No entanto, essas condições não são, no mínimo, válidas para toda a praia de Itaorna que apresenta nos locais cogitados para as unidades II e III um terreno mais frágil.

7.3 - Estruturas

O projeto sísmico das estruturas e componentes de Angra I, apresentado em seu relatório final de análise de segurança (FSAR), está bem desenvolvido e aprofundado. Nota-se no entanto um desequilíbrio entre a grande ênfase dada ao projeto de estruturas e o pouco que se disse sobre o comportamento geológico-estrutural das regiões vizinhas. Haveria necessidade de se avaliar, pelo menos de uma forma inicial, o comportamento dos morros e encostas vizinhos quando da ocorrência de um SSE bem como a possível geração de míssis a partir das usinas II e III, quer durante a construção quer durante a operação da usina. Desta forma, ter-se-ia um nível de

garantia de projeto, como um todo, mais homogêneo. Outra observação plausível diz respeito aos dispositivos específicos de segurança. Foram apresentadas apenas as condições de acidente, não se mencionando a extensão de ocorrências simultâneas como, por exemplo, o evento sísmico e a perda de potência externa. Faltam considerações sobre o impacto de eventos sísmicos nas linhas de transmissão. Não se menciona se foram tomadas todas as precauções necessárias à proteção das fundações das linhas de transmissão para que suportem eventuais escorregamentos de terreno.

7.4 - Problemas com Análise Sísmica e Estaqueamento de Angra II

Como já foi observado, há no sítio de Angra uma zona de depósitos marinhos preenchidos de areia em diversas camadas intercaladas entre areias grossas e argilas orgânicas, logo, esse solo possui um SPT muito baixo. Sendo que o leito rochoso no local de Angra II está a uma profundidade de aproximadamente 40 m, optou-se por um método de fundações por estaqueamento. O grande problema encontrado em Angra II foi o de como fazer a análise sísmica para o local. Só se tinha conhecimento de programas de análise sísmica sobre fundações diretas, pouco se conhecendo sobre efeitos sísmicos em estacas, no Brasil e no Mundo, tanto que poucas usinas nucleares possuem fundações sobre estacas.

Para os cálculos sísmicos de estruturas sobre tubulações profundas adotou-se uma hipótese simplificada de que o solo vibra, em caso de abalos, em conjunto com as estacas. Com esta hipótese a KWU, empresa construtora alemã, fez uma primeira análise simplificada dos efeitos sísmicos nas fundações do reator de Angra II, entre 1976 e 1977. Para tanto o método alemão utilizava-se da hipótese uni-dimensional, que na realidade utilizava o efeito como unidirecional. Utilizou-se também de outra hipótese, para este cálculo, o de que as vibrações propagam-se de camadas do solo até atingir as estruturas dos prédios. Este método foi, posteriormente, revisado pois constatou-se falhas nas hipóteses adotadas. O substrato

das fundações não é plano, logo, a hipótese de adotar o efeito unidirecional não é satisfatória, devendo-se adotar os efeitos como bi-direcionais. Em 1976, Roesset, apresentou um cálculo de projeto simplificado que foi desenvolvido com auxílio do Prof. Kawel. Num primeiro estágio as estacas foram consideradas como um grupo, adotando-se para limite externo das mesmas uma formação quadrada enquanto que na realidade a formação é aproximadamente circular. Um segundo estágio adotado analisou os efeitos do conjunto estaca-solo. E o terceiro estágio constou da utilização de programas computacionais que transferiram as análises das fundações para as estruturas. Como se sabe, o sismo é transferido pela rocha, que, sendo mais densa facilita a transmissão das ondas sísmicas. Em cada ponto de contato há transferência para o solo e o conjunto estaca-solo. Nos cálculos adotados percebe-se a ampliação da aceleração pelo solo e pelo conjunto. A aceleração inicial considerada que é 0,1 g, quando atinge as estruturas é ampliada chegando a 0,2 g. Observa-se um efeito muito superior ao admitido inicialmente, quando não se considerava a ampliação e se adotava para o conjunto das fundações e estrutura a aceleração de 0,1 g. Esta nova análise levou a uma reformulação das fundações de Angra II. Chegou-se à conclusão que as estacas deveriam sofrer um reforço na parte superior, pois os efeitos seriam grandes até a cota -12 m. Para a execução deste reforço fez-se necessário escavar o solo até a cota -12,5 m, sendo este reforço executado a céu aberto, para se poder efetuar o corte nesse ponto das estacas. Tendo em vista a grande densidade de estacas, e a aproximação entre si, variando em torno dos 2 m, ficou estabelecido que o diâmetro das estacas não deveria ser alterado mas as armações seriam substituídas por outras mais rígidas e reforçadas, concretadas posteriormente com o auxílio de formas deslizantes, para só depois aterrá-las. Para o aterro novamente sérios problemas foram enfrentados. A análise dinâmica dos efeitos sísmicos levou à consideração de um certo módulo de cisalhamento e fator de amortecimento em todo o cálculo de fundações. Como estes cálculos não devem ser modificados, o solo de reaterro deve ter o mesmo módulo de cisalhamento e fator de amortecimento so que foi removido. Este trabalho de reaterro e compactação do solo, para deixá-lo com as mesmas características do anterior, será altamente trabalhoso, sendo algo nunca antes realizado em qualquer parte do mundo

/120/.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao iniciarmos este trabalho, mencionamos que os principais objetivos deste estudo eram a compilação de dados e informações e o conhecimento da função da sismicidade no projeto de usinas nucleares.

O critério inicial fundamental é a determinação da sismicidade do local em que se pretende construir uma usina nuclear. Para essa determinação são necessárias investigações em três áreas fundamentais:

1 - geologia regional: inclui estudos de fisiografia, estratigrafia, tectônica e geologia histórica. Nesta área, a principal recomendação diz respeito à implementação de estudos básicos de tectônica regional e evolução geológica, principalmente, para a região sudeste do país (zona de dobramentos sudeste e plataforma continental) onde se encontram em processo de instalação ou projeto, pelo menos cinco unidades nucleo-elétricas.

2 - sismologia: inclui dados gerais sobre grandeza e localização de cada evento sísmico (no capítulo 2 estuda-se com maior detalhe as características do movimento sísmico de maior interesse para a engenharia). Algumas recomendações específicas pertinentes a este campo de estudo são:

- elaboração de mapas de eventos sísmicos (epicentros) cada vez mais detalhados, unificando-se os esforços de instituições e pesquisadores isolados responsáveis pelos primeiros mapas já disponíveis;
- estudos sobre a correlação entre epicentros e estruturas tectônicas com a elaboração de mapas sismo-tectônicos;
- estudos em profundidade para estimativas realísticas de atenuação sísmica, mapas de isossistas;
- determinação de intervalos de recorrência de fenômenos sísmicos;
- elaboração dos primeiros mapas de risco sísmico.

3 - geologia local e propriedades do solo: as investigações de geologia regional e sismologia servem para definir os eventos sísmicos mais significativos para o local, enquanto as investigações geotécnicas locais, conduzidas para a instalação de usinas nucleares fornecem dados importantes para o estabelecimento de critérios sísmicos básicos. Incluem dados de campo (sondagens, trincheiras, explorações geofísicas) e testes de laboratório para a confecção do perfil geral do solo e conhecimento de suas propriedades dinâmicas. Neste trabalho não nos aprofundamos nas questões de escopo fundamentalmente geotécnico que merecem, indubitavelmente, um estudo próprio. Recomendamos que um trabalho dessa natureza inclua uma avaliação sobre as diferentes relações intensidade MM-aceleração de ondas sísmicas, existentes, considerando quais são as mais apropriadas para o nosso país. Outro tópico importante diz respeito à interação solo-estrutura, ao conhecimento dos efeitos sísmicos em fundações sobre estacas, que não são ainda completamente compreendidos necessitando assim de análises e procedimentos de projeto conservativos.

Os estudos nessas três áreas fornecem dados básicos iniciais para o projeto sísmico que pode ser sintetizado em considerações sobre resposta estrutural à aceleração máxima do solo. Com esses dados definimos os sismos de projeto (OBE e SSE).

As normas adotadas em diversos países apresentam diferenças quanto aos sismos de referência para o projeto de centrais nucleares. Por exemplo, na R.F.A. os sismos de referência são determinados independentemente um do outro, sem que haja uma razão fixa entre os mesmos, enquanto que nos E.U.A. normalmente considera-se a intensidade do OBE como 50% da do SSE. A norma norte-americana considera um valor mínimo de 0,1g para a aceleração de terreno enquanto que os alemães utilizam um valor de 0,05g. No caso japonês também são adotados dois sismos

de referência. Um, que é o sismo de máxima intensidade esperada para um local, é a base de projeto. O outro sismo considerado (Safety Margin Check Earthquake) é 50% mais severo, definindo-se então uma margem de segurança. Ainda com referência ao projeto sísmico, os alemães requerem apenas a segurança sísmica das componentes nucleares de uma central, enquanto japoneses e norte-americanos consideram também a análise sísmica das partes convencionais das usinas. As justificativas alemãs para essas considerações baseiam-se no alto grau de conhecimento geológico-sismológico do país, definindo-se uma sismicidade pequena em comparação com o Japão e a Califórnia (base dos estudos norte-americanos)/ 121 /.

No Brasil, seguiu-se basicamente a norma norte-americana. Como já foi mencionado, no caso de Angra I, obteve-se uma aceleração de 0,09g (0,05g na rocha, 80% de amplificação do solo), adotando-se o coeficiente mínimo norte-americano de 0,1g. Temos aí, então, uma margem de segurança de 11%. Comparando o caso brasileiro com os dos países já mencionados, podem ser feitas as seguintes considerações:

- a sismicidade do território brasileiro aproxima-se mais da alemã que da japonesa ou norte-americana (Califórnia);
- o conhecimento geológico-sismológico do território brasileiro, no entanto, é bem menor que o dos países considerados;
- a margem de segurança de 11% para Angra I pode ser considerada como razoável;
- o caso de Angra II é mais delicado, somando-se a falta de dados regionais de profundidade com as características do trabalho realizado nas fundações dessa unidade. Contudo, o reestudo da aceleração sísmica, adotando-se o novo valor de 0,2g, torna mais confiável esse parâmetro de projeto.

No que se refere à engenharia estrutural, o projeto das tubulações e equipamentos é um tópico importantíssimo. Por exemplo, considere-se o terremoto de El Centro (1940) como sismo de projeto

para uma usina, tem-se então uma aceleração de entrada de 1,6g. Fazendo-se a análise dinâmica de uma estrutura típica para a determinação do movimento num ponto da estrutura e usando este dado para a elaboração de um novo espectro de resposta. Este novo espectro pode, então, ser usado para o projeto do equipamento a ser montado nesse ponto da estrutura. Encontramos que no topo da estrutura um equipamento possuindo um período natural de cerca de 0,2 seg. vai sofrer uma aceleração de 20g /64/. Esse aumento na aceleração é resultante da coincidência entre a frequência característica do terreno, o período natural da estrutura, e, finalmente, o período natural do equipamento. Dado a sua importância, torna-se clara a necessidade de formação de pessoal capacitado para a análise estrutural dinâmica.

Finalmente, queremos salienta, novamente, que apesar de o Brasil não possuir movimentos sísmicos tão intensos como os de algumas outras áreas do mundo, possui-os em escala não desprezível. E que, a frequência menor de eventos sísmicos ao invés de simplificar, dificulta, o problema de previsão desses eventos.

A P Ê N D I C E - A

ABALOS SÍSMICOS NO BRASIL REGISTRADOS E (OU) REPORTADOS
 NOS ANOS DE 1560 ATÉ 1977 /96/

FONTES

1. John K. Branner, Bulletin of the Seismological Society of America Vol. II, 1912 e Vol X, 1920
2. Hilgard O'Reilly Sternberg, Anais da Academia Brasileira de Ciências Vol. 25, 1953
3. Marcus Gorini, Instituto de Geociências, UFRJ, Rio de Janeiro, 1969 (Relatório não publicado)
4. Weston Geophysical Research Inc. - Seismicity Analysis and Response Spectra Proposed for Angra Nuclear Power Plant (Relatório não publicado)
5. Jorge G. do Cravo Barros, Síntese da Atualidade Sismológica no Brasil, XII Semana de Estudos, Siseq, 1971
6. Sergio Brito, Seismic Activity Around the Cajuru Reservoir, Proc. 2º Congr. IAEC, 1974
7. P.L. Marques Filho, A. Sobinski, José U. Lopes, Fenômeno de Decompressão nos Túneis do Aproveitamento Capivari-Cachoeira, Anais da 3a. Semana Paulista de Geologia Aplicada, 1971
8. National Geophysical and Solar-Terrestrial Data Center, Boulder Col. USA, 1976
9. Observatório Astronômico, Universidade Nacional de La Plata, Argentina, 1978
10. Hidroservice, Aproveitamento Hidroelétrico de Itaipu, Geologia e Sismologia, 1977 (relatório não publicado)
11. Refreências publicadas em jornais brasileiros
12. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo S.A.

Nº SIS	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
001	1560								SP	Não especificada				1	Não constam
002	1690								AM	Região dos rios Amazonas e Negro				2	do mapa
003	1729	01	04						BA	Bahia-Itaparica		IV	1		
004	1744	09	24						MT	Cuiabá e outras		V-VI	1		
005	1746	10	28						MT	Cuiabá		IV-V	1		Lima capital do Peru destruído
006	1749	09	24						MT	Não especificada			3		Não constam do mapa pode ser idêntico com nº 008
007	1767	08	01						ES	--			1		
008	1769	08	01						BA	Salvador?		IV-V	1		
009	1785								AM	Região do rio Purus			2		Não consta do mapa
010	1789								SP	Cananea			3		
011	1789								AM	Região entre os rios Guaviare e Negro			2		Não consta do mapa
012	1807	08	08						CE	Vale do rio Jaguaribe		IV-V	1		Pode ser idêntico com nº 013
013	1808	08	08						RN	Açu			3		
014	1810	05	31						CE	Granja			1		
015	1811	10	29						PE	Recife, Olinda		V-VI	1		
016	1811								RS	Porto Alegre, Stº Cristo		IV-V	1		
017	1812								RS	Porto Alegre?			1		

Nº DO SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL, km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
018	1813								RS	Na foz do rio Jacuí				1	Não consta do mapa
019	1822								RS	Não especificada				3	
020	1824								CE	Jardim			VIII-IX	1	
021	1824						22°S	45°W	MG	Caxambu, Picuí			V-VI	1	Coordenadas da Weston
022	1826								GO	Natividade, Conceição	=		IV-V	4	
023	1827								AM	Região do rio Purus				1	Não consta do mapa
024	1832	09	18						RO	Forte Príncipe da Beira				1	
025	1834								GO	Natividade, Conceição			IV-V	1	
026	1839	07	15	23			21,85	45,4W	MG	Campanha			IV-V	1	Coordenadas da Weston
027	1840								AM	Região do rio Purus				4	Não consta do mapa
028	1845	04	19						PR	Paranaguá				2	
029	1846								CE	Granja				3	
030	1851								RS	Não especificada				1	Reflexo de tremor em Montevideo
031	1852	12	02	13-14					CE	Aracati (Arati)			VI-VII	1	Não consta do mapa

Nº DO SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE M	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
032	1852								CE	Granja				1	Não consta do mapa
033	1854	01	10						RN	Tenros				1	Não consta do mapa
034	1855	07	25						MG	Morro Grande		IV		1	
035	1855								CE	Granja				1	
036	1860								PA	Vigia		IV		1	
037	1860	10	01						MT	Não especificada				1	Não consta do mapa.
038	1861	06							RJ	Parati				1	Pode ser idêntico com nº 039
039	1861	07	31				22,6±0,5° S	45,4±0,5° W	RJ	Mambucaba, Parati, Jerumirim, Rio Claro, Sta. Isabel do Rio Negro		V-VI		1	Coordenadas da Weston
040	1863	08	04	23	45		91,9S	45,3W	MG	Itajubá, Pouso Alto				4	
									SP	Santos, São Sebastião, Jacarei, Pinhão, Jacareí, Loreã, Guaratinguetã, Areias, Bananal, Silveiras					
										Campanha, Lambari, Águas Virtuosas, Rio Verde, Vale do Rio Grande, Serra Mantiqueira					
041	1864	11	23	11	30				MA	São Luiz		IV		3	Coordenadas da Weston
042	1864	12	26						MA	São Luiz				1	

Nº SISB	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
043	1865	09	03						MT	Cuiabá			1	1	
044	1866	07							RJ	Rio de Janeiro			3	3	Não consta do mapa
045	1867								RS	Não especificada			1	1	Houve vários tre- mores
046	1867								MG	Jaguará		IV	1	1	
047	1871	04	05						MA	Itapicuru		V-VI	1	1	
048	1872	11	11						MG	Condado, Serro Frio		V-VI	1	1	
049	1876	06	09						MG	Ouro Preto			1	1	
050	1876	06	26						MT	Ao norte de Corum- bá			1	1	Não consta do mapa
051	1876	12	09						MG	Ouro Preto, Cris- tina			1	1	
052	1879	03	01	21	30				MT	Cuiabá		VI-VII	1	1	
053	1879	07	01	17					RN	Natal			1	1	
054	1879	08	27						RN	Lages			3	3	
055	1879	09	03						RN	Lages			3	3	
056	1879	09							RN	Baixa Verde			3	3	Pode ser idênti- co com nº 055
057	1882	10	21						MG	Poços de Caldas		V-VI	1	1	
058	1883	02	21				21,8°S 42,7°W		MG	São José de Alêm, Paraíba		III-IV	4	4	Coordenadas da Weston
059	1885	01	29						AM	Manaus			2	2	
060	1886	05	09	15			22,5±0,25°S 43,6±0,25°W		RJ	Rio, Niterói, Tres Rios, Petrópolis,		V-VI	4	4	Coordenadas da Weston

Nº DO SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
061	1886	07	25					MG	Vassouras, V. Redonda, Angra dos Reis, Mambucaba, Japeri, Mendes, Mangaratiba, Barra do Pirai, Anta, Conceição				4		
062	1887	08	27					SP	Chiador, Martins				4		
063	1889							MG	Barbosa, Passo Verde, Pouso Alto				1		
064	1898							PR	Bananal				1		
065	1901	04	04				21,1°S	44,8°W	MG	Jequitinhonha, Serro Frio	>100	IV	11	Jornal do Brasil	Coordenadas da Weston
066	"	04	05				"	"	"		"		4		
067	"	07	01				"	"	"		"		4		
068		09	04				"	"	"		"		4		
069	1905	03	12	16				MA	São Luiz				3		
070	1905	07	18					BA	Joazeiro				1		
071	Antes de 1906							AM	Itacoatiara				2		
072	1906	11						MT	Miranda, Coimbra, Corumbá, etc.				1		
073	1906	11	24					MG	Guaranesia				1		
074	1906	12	04					MG	Carandaí				1		

Nº DO SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
075	1907	08							CE	Fortaleza, Aracati, Baturité, Icó				11	O Estado de São Paulo
076	1911	02							BA	Itabarica				1	
077	1911	08	26						CE	Granja				1	
078	1912	04	19						BA	Jequiriçá		IV		1	
079	1915						3°S	68°W	AM	Região de Sto. Antonio do Içá				2	Registro por estação geofísica não especificada
080	1915	04	23	15	18		8°S	68°W	AC		625	7,25		8	Registro G-R
081	1916	05	01						AC	Cruzeiro do Sul				2	
082	1917	08	19						AM	Lábrea				2	
083	1918								CE	Pereiro				11	Jornal do Brasil
084	1919	06	05				21,1°S	44,8°W	MG	Bom Sucesso	>100		IV	1	Coordenadas da Weston
085	"	11	28				"	"	"	"			"	1	
086	1920	01	31				"	"	"	"			"	1	
087	"	02	01				"	"	"	"			"	1	
088	"	03	11				"	"	"	"			"	1	
089	1921	01	21						AM	Ig.da Perseverança, rio Madeira				2	
090	Antes	de	1922						PA	Obidos				2	
091	1922	01	16						AM	Manaus				2	
092	1922	01	17						AM	Manicoré				2	
093	1922	01	27	03	45				SP	S.Paulo, Itapeti-				11	O Estado de

Nº DO SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
															São Paulo
094	1922	01	27	03	45		9°S	60°W	MG	ninga, Campinas, S.Carlos, S.Vicente, Ribeirão Preto				11	--
095	"	"	"	"	"		10,5°S	69,5°W	RJ	Poços de Caldas	660	6,9		11	--
096	1922	09	04						AM	Rio de Janeiro				2	Registro por est.geofís. Não especificado
097	"	"	"						AC		660	6,9		8	Registro G-R. Po de ser idêntico com nº 094
098	1926	01	01				9°S	66°W	AP					2	
099	1927	04	06						AM					2	Registro por estação geofís. Não especificado
100	1927	04	06	18	54	15	10°S	70°W	AC	Japuri	600	6,0		8	Registro G-R
101	1928	04	09						AC	Rio Branco				2	
102	1929								AC	Na fronteira com Peru	650	6,5		2	
103	1930	08	04	05	14	31	9,5°S	70,5°W	AC					8	Registro G-R
104	1931	07	02						AC	Cruzeiro do Sul				2	
105	1933	05	06						AP	Anapá			IV-V	2	
106	1935	10	21				21,2°S	44,8°W	MG	Bom Sucesso	>100			1	Coordenadas da Weston
107	1935	12	14	01	31	13	9,5°S	70,5°W	AC		650	6,9		8	Registro G-R
108	"	12	16	16	57	24	--	--	AC		650	6,25		8	--
109	"	12	28	04	50	49	--	--	AC		650	5,75		8	--

Nº DO SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
108	1938	04	24	20	21	6,0	2°N	69,0°W	AM					8	-"-
109	1939	06	28	11	32	27	27,5°S	48,5°W	SC	Região de Florianópolis		5,6		6	Coordenadas de Rothê e G-R
110	1939	12	24	22	27	40	6,5°S	71°W	AM		600	5,5		8	Registro G-R
111	1940	09	24	09	55	44	9,5°S	70,5°W	AC	Na fronteira com Peru	600	6,0		8	
112	Antes	de	1941						AM	Margem direita do rio Madeira. Ajuz. Humaitã				2	6
113	1944	06	08	02	38	04	10°S	71°W	AC		600	6,25		8	Registro G-R
114	1945	11	26	01	03	58	11°S	69°W	AC		700				Registro OGS
115	1946	07	20						SP	Xiricica, Jacupiranga				3	
116	1946	10	07						PA	Belém				2	
117	1947	08	06	05	46	58	9,25°S	71,5°W	AC		600	6,75		8	Registro G-R
118	1947	11	01						AC	Cruzeiro do Sul				2	
119	1947	11							AM	Benjamin Constant				2	
120	1948	11	01						AC	Japuri				2	
121	1949	09	17						AP	Anapã				2	
122	1950	02	07				8°S	73,6°W	AC					2	Registro de est. geofis. Não especificado
123	1950	07	09	04	40	14	8°S	70,75°W	AC		650	7,0		8	Registro G-R
124	1950	07	09	09	45	07	8,2°S	71,0°W	AC		667	6,37		8	Registro ISS
125	1950	07	21	08	16	28	7,5°S	71,0°W	AM					8	Registro OGS
126	1950	09	18	19	36	43	8,0°S	71,0°W	AC		650	6,0		8	

Nº SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
127	1950	12	02	15	19	22	8,2°S	71,0°W	AC		667	6,75		8	Registro ISS
128	1950	12	02	18	40	38	7,5°S	71,0°W	AM		650			8	Registro CGS
129	1950	12	11	14	46	41	8,0°S	70,75°W	AC		650	6,25		8	Registro G-R
130	1950	12	28				9,0°S	72,0°W	AC					2	Registro de est. geofís. Não especificado
131	1950	12	28	14	17	26	7,5°S	71,0°W	AM		650	6,25		8	Registro CGS
132	1951	04	24						AP	Amapá, Oiapoque Cayene				2	
133	1957	12	23				10,0°S	71,0°W	AC					2	Registro de est. geofís. Não especificado
134	1957	12	28	15	59	06	10,0°S	71,5°W	AC		650			8	Registro CGS
135	1952	04	08	00	19	07	9,0°S	71,0°W	AC		603			8	Registro ISS
136	1952	08	16	?					AM	Paraná do Cambae, Manaus				2	
137	1953	03	19						TR	Boa Vista				2	
138	1953	04	14	13	29	26	8,2°S	71,0°W	AC		603	6,6	IV	8	Registro ISS
139	1955	03	01	01	46	13	19,9°S	36,7°W	BA	Oceano Atlântico		6,5		8	Registro ISS = 400 km ao leste de Vitória
140	1955	01	31	05	03	02	12,5°S	57,4°W	MT		400	6,75		8	Registro CGS
141	1955	08	19	16	28	50	9,0°S	71,0°W	AC		650			8	--
142	1957	04	16	18	17	12	9,5°S	67,0°W	AM					8	--
143	1960	07	04	08	02	07	8,0°S	71,0°W	AC		600			8	--
144	1960	07	05	21	15	09	8,0°S	71,5°W	AC		600			8	--

Nº DO SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL KM	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							IAT.	LONG.							
145	1961						22,1°S	45°W	MG	S.Lourenço, Cachambu			III-IV	3	Coordenadas da Weston
146	1961	02	08	08	0,4	13,4	10,4°S	71,0°W	AC		600	5,75	8	8	Registro CGS
147	1961	05	26	08	42	16,1	10,2°S	70,8°W	AC		650		8	8	"
148	1961	07	25	02	48	13,4	8,9°S	71,4°W	AC		593		8	8	"
149	1961	08	20	00	07	24	10,4°S	70,6°W	AC		614		8	8	"
150	1961	09	16	20	02	47,8	10,7°S	69,8°W	AC		629		8	8	"
151	1962	01	16	23	27	45	22,9° ± 0,1°S	44,7° ± 0,2°W	RJ	Rio de Janeiro, Mangaratiba, Angra			IV-V	4	Coordenadas da Weston
	"	"	"	"					SP	Guaratinguetá, Cunha, Taubaté, Caraguatatuba					
152	1963	01	05	17	43	33,1	7,1°S	71,6°W	AM		546		8	8	Registro CGS
153	1963	10	08	06	25	07,9	6,8°S	71,6°W	AM		557	3,7	8	8	"
154	1963								PE	Caruaru			3		
155	1963	11	09	21	15	30,4	9,0°S	71,5°W	AC		600	5,9	8	8	Registro CGS
156	1963	11	10	01	00	38,8	9,2°S	71,5°W	AC		600	5,6	8	8	"
157	1963	11	10	01	36	41,3	9,4°S	71,3°W	AC		600	4,1	8	8	"
158	1963	11	11	19	54	9,4	9,1°S	71,4°W	AC		585	4,9	8	8	"
159	1963	11	13	04	17	59,9	8,9°S	71,5°W	AC		545	3,6	8	8	"
160	1963	12	13	10	15				AM	Manaus			8	8	
161	1963	12	14	00	05	39,8	2,3°S	61,2°W	TR		036	4,8	8	8	Registro CGS
162	1964	02	13	11	21	46,7	18,1°S	56,8°W	MT		033	5,3	8	8	"
163	1964								PE	Caruaru			3	3	"

Nº DO SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
164	1964	03	21						MG	Porta Vila				3	Não consta do mapa
165	1964	06	19				2,5°N	58,9°W	AP	?				6	Coordenadas Rothe-Unesco
166	1964	11	28	16	41	33,4	7,7°S	71,2°W	AM		626	5,4	8	Registro CGS	
167	1964	11	28	16	49	30,3	8,0°S	71,4°W	AC		655	5,6	8	Registro CGS	
168	1964	12	22	00	24	48,7	9,5°S	71,3°W	AC		614	5,3	8	--	
169	1965	02	18	22	32	19,6	9,9°S	71,2°W	AC		594	5,2	8	--	
170	1965	03	07	16	58	54,0	8,5°S	71,1°W	AC		572	3,7	8	--	
171	1965	07							MG	Pará de Minas, Igaratinga, Antunes, São Gonçalo			3		
172	1965	08	15	10	36	56,5	2,6°S	60,2°W	TR		042	5,1	8	Registro CGS	
173	1965								PE	Caruaru			3		
174	1965	11	03	01	39	3,1	9,1°S	71,4°W	AC		593	6,2	8	Registro CGS	
175	1966	02	15	11	58	59,6	8,6°S	70,3°W	AC		629	4,6	8	--	
176	1966	06	05	19	03	10,4	9,7°S	70,6°W	AC		608	4,6	8	--	
177	1966	10	14	22	42	51,0	6,8°S	71,2°W	AM		631	3,9	8	--	
178	1966	12	21				9,0°S	50,0°W	PA		600	4,3	6	Coordenadas Rothe-Unesco	
179	1967	01	27	08	38	51,2	8,8°S	71,4°W	AC		600	4,7	8	Registro CGS	
180	1967	02	15	16	11	11,5	9,075°S	71,38°W	AC		595	6,1	8	--	
181	1967	03	22				22,9 ± 0,1°S	44,7 ± 0,2°W	RJ	Rio de Janeiro, Niterói, Angra,			4	Coordenadas da Weston	

Nº DO SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
-"	1967	03	22				22,9 ± 0,1°S	44,7 ± 0,2°W	SP	Resende, Barra Mansa				11	Jornal do Brasil
182	1967	03	25	20	32	1,7	8,34°S	71,32°W	AC	Ubatuba, Caraguatatuba, S. Sebastião, Paraibuna, S. José dos Campos, Cunha, Taubaté, Lorena	583	4,2	8	Registro CGS	
183	1967	03	27	08	26	34,6	8,91°S	71,35°W	AC		605	5,3	8	8	"
184	1967	04	03				2,0°S	46,0°W	PA			4,7	6	6	Coordenadas Rothe-Uresco
185	1967	05	11				17,0°S	58,0°W	MT			4,6	6	6	"
186	1967	06	08				18,0°S	46,0°W	MG			4,6	6	6	"
187	1967	08	05	09	55	20,4	22,85°S	43,1°W	RJ	Rio de Janeiro, São Gonçalo	609	4,5	4	4	Registro ESB (Brasília)
188	1967	08	28	00	56	51	10,0°S	71,2°W	AC			4,7	8	8	Registro CGS
189	1968	01	13	01	58		7,0°S	37,0°W	CE			4,1	5	5	Registro ESB (Brasília)

Nº SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL KM	MAGNITUDE	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
190	1968	01	16				19,0°S	49,0°W	MG		4,1		6	Coord. Rothe-Unes CO	
191	1968	01	29				29,0°S	50,0°W	RS		4,6		6	"-	
192	1968	01	29				27,0°S	49,0°W	SC		4,5		6	"-	
193	1968	02	08	22	50	46	9,1°S	71,4°W	AC		4,7		8	Registro CGS	
194	1968	02	15				6,8°S	37,8°W	PB		33		6	Coord. Rothe-Unes CO	
195	1968	02	23	14	23	3,3	6,1°S	38,9°W	PB		4,5		8	Registro CGS	
196	1968	02	23	14	23	03,3	6,1°S	38,4°W	PB		4,5		8	Registro CGS	
197	1968	02	23				3,8°S	39,0°W	CE		4,1		6	Coord. Rothe-Unes CO	
198	1968	04	12				22,5°S	47,0°W	SP		4,3		6	"-	
199	1968	08	05	04	20	44,4	8,765°S	71,165°W	AC		3,8		8	Coord. CGS	
200	1968	02	23	14	26	05,07			CE	Pereiro	4,9		5	Registro ESB (BSB)	
201	1968	08	23	15	36	07,95	20,0°-	44,0°-	CE	Pereiro			5	"	
202	1970	04	24				20,6°S	45,0°W	MG	Reservatório	3-4		6	Primeiro tremor registrado por ESB	
203	1970								PE	Cajuru Recife			11	O Estado de São Paulo	
204	1970	07	31	14	45				SP	São Paulo			11	"	
205	1970	12							MG	Reservatório Cajuru	<100	III	6	Tremor sentido mais forte pela população	
206	1971								PR	Reservatório Capi vari	<100		7		

Nº SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFEITADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
207	1971	07	08	24					SP	São Paulo				11	O Estado de São Paulo
208	1971	08	04	23	04	14	2,27°S	20,7°W	PE	Recife - fossa do meio Atlântico	5,4			5	Registro ESB (Brasília) não consta do mapa
209	1971	08	04	23	19	54			PE	Recife				5	Registro ESB (Brasília)
210	1971	08	04	23	26	28			PE	"				5	" "
211	1971	08	04	23	33	38			PE	"				5	" "
212	1971	08	04	23	48	05			PE	"				5	" "
213	1971	08	05	00	02	00			PE	"				5	" "
214	1971	12	13	16	19	0,1	8,887°S	71,642°W	AC		614	5,3		8	Registro ERL
215	1972	01	12	09	59	10,3	6,859°S	71,824°W	AM		580	5,9		8	--
216	1972	01	21	19	18	57,2	6,705°S	71,888°W	AM		562	5,6		8	--
217	1972	01	23	03	05	43,6	20°- 20,6°S	44°- 45°N	MG	Carmo de Cajuru	<100	4,7		6	De 24/4/1970 até março/1972, 17 tremores foram recordados pela ESB
218	1972	10	24	15	36	35,9	21,754°S	40,485°W	RJ	Oceano Atlântico	33	5,3		8	Registro ERL Bacia Sed. Campos
219	1972	12	20	16	11	25,7	9,683°S	71,227°W	AC		588	4,8		8	Registro ERL
220	1973	04	20						BA	Ibicarai				11	"O Globo"
221	1973	10	25						SP	São Paulo				11	O Estado de São Paulo
222	1973	11	20						SP	São Paulo				11	Coincide com tremores em

Nº DO SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL, km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
223	1974	03							RN	Riachuelo				11	Salta (Argentina) e Copiador (Chile) que não constam da relação fornecida pelo D.C.Boulder
224	1974	04	20						BA	Ibicarai				11	Jornal do Brasil "O Globo"
225	1974	04	24						SP/MG	Porto Colombia, Volta Grande	<100	5,1	VI-VII	6	Ocorrência de vários tremores. Foram relacionados com o enchimento das represas.
226	1975								RN	Riachuelo, João Câmara				11	Jornal do Brasil
227	1975	12	27	12	07	59,1	9,986°S	70,734°W	AC		622	4,9		8	Registro: GS
228	1976	02	22	03	24	49,6	0,339°N	59,325°W	TR		33	4,9		8	"-
229	1976	02	29	05	59	6,8	9,101°S	71,329°W	AC		614	4,8		8	"-
230	1976	04							PR	Salto Santiago	<100			10	ESB (Brasília), tremor relacionado c/ a represa
231	1976	04	01						SP	Iepê				11	"O Globo". Relacionado com a represa de H.E. Capivara, vários tremores
232	1976	05	25	05	30				BA	Ibicarai, Floresta Azul, Itabuna,				11	"O Globo", vários tremores num

Nº DO SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE MM	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
233	1976	06	07						RN	Itapé, Lomanto Junior				"	raio de 40 km
234	1976	06	13						PR	Primeiro de Maio	<100			12	"O Globo", 2 tremores
235	1976	06	16	01	45				PR	"-	"			"	Relacionado c/a represa da H.E. Capivara
236	1976	06	22						PR	"-	"			"	Registro: IFT S. Paulo
237	1976	01	25	de	22:30	até	23:00 h		PR	"-	"			"	1 tremor forte
238	1976	06	26	de	9:13	até	23:34 h		PR	"-	"			"	14 tremores regulares
239	1976	06	27						PR	"-	"			"	3 tremores fortes
240	1976	06							PR	Salto Santiago	<100	1,5		10	7 tremores fortes e 5 tremores regulares
241	1976	07	13						BA	Ipatinga				"	3 tremores
242	1976	10	01						MG	Coração de Jesus					Registro ESB (Brasília)
243	1976	10	05	de	11:00	até	14:00 h		SP	Diadema				11	"O Globo"
244	1976	10	26						BA	Ibicaraí				11	2 tremores em 15 dias
														11	"O Globo"
														11	"O Globo"
														11	"O Globo", 6 tremores entre 26/7

Nº DO SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE	INTENSIDADE	FONTE	OBSERVAÇÕES
							INT.	LONG.							
245	1976	10	29						MA	Ibicarai				11	15 km
246	1976	11							CE	Coité, Pedra e Cal, (Município Quixadá)				11	O Estado de São Paulo, mais de 8 tremores em 20 dias
247	1976	11	29	23					SP	São Paulo		1.2-		11	"O Globo", Jornal do Brasil, O Estado de São Paulo. Coincide com tremores de magnitude de 6-7 que abalou o Equador, Peru, Chile e Argentina
248	1977	03	04	10	45				RN	Riachuelo				11	Jornal do Brasil, tremores até 10 por dia desde o início de fevereiro
249	1977	03	14						CE	Ibaretana (Quixadá)				11	Jornal do Brasil
250	1977	11	16						SP	Paraibuna, Piratininga	<100			11	Jornal do Brasil Relacionado c/a represa
251	1977	11	23	09	31	36			SP	São Paulo, Santos, S. José dos Campos	6,4			11	"O Globo", Folha de São Paulo Coincide com terremoto que destruiu Caubete

Nº DO SISMO	ANO	MES	DIA	HORA	MINUTO	SEGUNDO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ESTADO	LOCALIDADE AFETADA PELO SISMO	PROFUNDIDADE FOCAL km	MAGNITUDE M	INTENSIDADE M	FONTE	OBSERVAÇÕES
							LAT.	LONG.							
251	1977								RS	Porto Alegre, Pelotas, Santana do Livramento, Uruguaiana, Rio Grande, Santa Maria				II	na Argentina (M = 7,2) Foi registrado pela ESB (Brasília) (M = 6,4)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-CAP. 1 ao 5:

1. VENÂNCIO FILHO, F. Análise Dinâmica e Sísmica e Critérios de Segurança no Projeto de Estruturas de Centrais Nucleares. In: III CURSO SOBRE CENTRAIS NUCLEARES PWR, Instituto de Energia Atômica, São Paulo, Nov. 1977.
2. NEWMARK, N.M. & ROSENBLUETH, E. Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1970.
3. RICHTER, C.F. Elementary Seismology, Freeman, San Francisco, 1958.
4. HOUSNER, G.W. Strong ground motions. In: Earthquake Engineering, ed. R. L. Wiegle, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1970.
5. RICHTER, C.F. An Instrumental Earthquake Magnitude Scale. Bull. of the Seismological Society of America, 25, (1935), p. 1.
6. GUTENBERG & RICHTER, C.F. Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. Bull. of the Seismological Society of America, 46, (1956), p. 105.
7. BATH Introduction to Seismology, John Wiley & Sons, (1973), p.112.
8. HUDSON, D.E. Strong Motion Seismology, Proc. of the Int. Conf. on Microzonation for Safer Construction Research and Application, Vol.1, University of Washington, Seattle (1972).
9. MEDVEDEV, S.V., SPONHEUER, W. & KARNIK, V. Seismische Scala, Inst. fur Bodendynamik und Erdbebenforschung, Jena (1963).
10. SIEBERG, A. Erdbebenkunde, Fischer, Jena (1923).

11. KAWASUMI, H. Measures of earthquake danger and expectancy of maximum intensity throughout Japan as inferred from the seismic activity in historical times. Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ. 29 (1951).
12. STEINBRUGGE, K.V. ET AL. San Fernando earthquake, February 9, 1971 , Pacific Fire Rating Bureau, San Francisco, Aug. (1971).
13. WERNER, S.D. A Study of earthquake input motions for seismic design , Agbabian-Jacobsen Associates, Los Angeles, June (1970) (TID-25438).
14. NEWMARK, N.M. & HALL, W.J. Seismic design criteria for nuclear reactor facilities, Proc. of the Fourth World Conference on ...
15. HOUSNER, G.W. Behavior of structures during earthquakes, J. Eng. Mech. Div., Amer. Soc. Civ. Eng. 85 (EM4), Oct. (1959).
16. ARIAS, A. A measure of earthquake intensity. In: Seismic Design for Nuclear Power Plants, ed. R.J. Hansen, Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, Mass. (1970).
17. HOUSNER, G.W. Measures of severity of earthquake ground shaking, Proc. of First National Conference on Earthquake Engineering, Ann Arbor , Michigan, June (1975).
18. BOLT, B.A. Duration of strong ground motion, Proc. of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy (1973).
19. TRIFUNAC, M.D. & BRADY, A.G. A study on the duration of strong earthquake motion. Bull. Seismol. Soc. Amer. 65 (3), June (1975).
20. HOUSNER, G.W. Requirements of seismic analysis and research needs , Paper presented at Annual Environmental Meeting, American Society of Civil Engineers, Oct. 1969.

21. WOOD, H.O. Distribution of apparent intensity in San Francisco, In: The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Earthquake Investigation Commission, Vol. 1, Carnegie Institution, Washington, D.C. (1908).
22. TRIFUNAC, M.D. & BRUNE, J.N. Complexity of energy release during the Imperial Valley, California, Earthquake of 1940, Bull. Seism. Soc. Amer. 60 (1), Feb. (1970).
23. RICHARDS, P.G. Dynamic properties of an earthquake source, Proc. of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy (1973).
24. BONILLA, M.G. & BUCHANAN, J.M. Interim report on worldwide historic surface faulting, Open file report, United States Geological Survey, Washington, D.C. (1970).
25. HOUSNER, G.W. Important features of earthquake ground motion, Proc. of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy (1973).
26. WERNER, S.D. Engineering Characteristics of Earthquake Ground Motions, Nuclear Engineering and Design, vol. 36, 1976, p. 376.
27. BOLT, B.A. Elastic Waves in the Vicinity of the Earthquake Source . Earthquake Engineering, Prentice-Hall (1970), pp. 1-20.
28. WHITMAN, R.V. Effect of local soil conditions upon seismic threat to nuclear power plants, Stone & Webster Eng. Corp., Boston (1968).
29. SEED, H.B. The Influence of local soil conditions on earthquake damage, Proc., Soil Dynamics Specialty Session, Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City , Mexico, August (1969).

30. HUDSON, D.E. Destructive earthquake ground motions. In: Applied Mechanics in Earthquake Engineering, ed. W.D. Iwan, American Society of Mechanical Engineers, New York (1974).
31. JENNINGS, P.C. ET AL. Simulated earthquake motions for design purposes, Proc. of the Fourth World Conference on Earthquake Eng., Santiago, Chile (1969).
32. AMIN, M. A nonstationary stochastic model for strong-motion earthquakes, Structural Research Series N° 306, University of Illinois, Urbana, Illinois, April (1966).
33. CORNELL, C.A. Stochastic process models in structural engineering, Technical Report 34, Stanford University, Dept. of Civil Eng., Palo Alto, California, May (1964).
34. LINEHAN, D. Geological and seismological factors influencing the assessment of a seismic threat to nuclear reactors, In: Seismic Design for Nuclear Power Plants, ed. R.J. Hansen, M.I.T. Press, Cambridge, Mass. (1970).
35. EIBY, G.A. The assessment of earthquake felt intensities, Proc. of the Third World Conference on Earthquake Engineering, Auckland and Wellington, New Zealand (1965).
36. COULTER, H.W., WALDRON, H.H. & DEVINE, J.F. Seismic and geologic siting considerations for nuclear facilities, Proc. of the Fifth World Conf. on Earthquake Eng., Rome, Italy (1973).
37. NEUMANN, F. Earthquake Intensity and Related Ground Motion, Univ. of Washington Press, Seattle (1954).

38. TRIFUNAC, M.D. & BRADY, A.G. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion, Bulletin Seismol. Soc. Amer. 65 (1), Feb. (1975).
39. HOUSNER, G.W. Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault, Proc. of the Third World Conference on Earthquake Eng., Auckland and Wellington, New Zealand (1965).
40. BLUME, J.A. Earthquake ground motion and engineering procedures for important installations near active faults, Proc. of the Third World Conf. on Earthquake Eng., Vol. IV, Auckland and Wellington, New Zealand (1965).
41. KANAI, K. Improved empirical formula for characteristics of stray earthquake motions, Proc., Japanese Earthquake Symposium, (1966)1-4.
42. MILNE, W.G. & DAVENPORT, A.G. Distribution of earthquake risk in Canada, Bull. Seismol. Soc. Amer. 59 (2), April (1969).
43. ESTEVA, L. Seismic risk and seismic design decisions, In: Seismic Design for Nuclear Power Plants, ed. R.J. Hansen, M.I.T. Press, Cambridge, Mass. (1970).
44. CLOUD, W.K. Strong motion earthquake records, In: Earthquake Resistant Design of Engineering Structures, Univ. of Calif., Berkeley, June (1972).
45. PAGE, R.A. ET AL. Ground motion values for use in the seismic design of the Trans-Alaska pipeline system, Geological Survey Circular 672, U.S. Geol. Survey, Washington, D.C. (1972).

46. TRIFUNAC, M.D. & BRADY, A.G. Correlations of peak acceleration , velocity, and displacement with earthquake magnitude, distance, and site conditions. Earthquake Eng. Struct. Dyn. J. (1976).
47. JENNINGS, P.C. & HOUSNER, G.W. Conclusions and recommendations. In: Engineering Features of the San Fernando Earthquake, February 9, 1971, ed. P.C. Jennings, EERL 71-2, Earthquake Engineering Res. Lab., California Inst. of Tech., Pasadena, June (1971).
48. SCHNABEL, P.B. & SEED, H.B. Acceleration in rock for earthquake in the western United States, EERC 72-2, University of California , Berkeley (1972).
49. SEED, H.B. ET AL. Characteristics of rock motions during earthquakes, EERC 68-5, University of California, Berkeley (1968).
50. NUTTLI, O.W. Seismic wave attenuation and magnitude relations for eastern North-America, J. Geophys. Res. 78(5), Feb. (1973).
51. NUTTLI, O.W. Design earthquakes for the central United States, Miscellaneous Paper S-73-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, Jan. (1973).
52. CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY (CIT) Strong Motion Earthquake Accelerograms, Vols. I-IV, Parts A-Y, CIT Earthquake Engineering Research Laboratory, Pasadena (1969-1975).
53. AMBRASEYS, N.N. Dynamics and response of foundation materials in epicentral regions of strong earthquakes, Proc. of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy (1973).

54. ESTEVA, L. & ROSENBLUETH, E. Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes, Bol. Soc. Mex. Ing. Sism. 2(1) , 1964.
55. MAUGH, L.C. Statically Indeterminate Structures, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1946.
56. GRINTER, L.E. Theory of Modern Steel Structures, Vol. II, revised ed., The Macmillan Company, New York, 1949.
57. SUTHERLAND, H. & BOWMAN, H.L. Structural Theory, fourth ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, 1950.
58. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION Analysis of Small Reinforced Concrete Buildings for Earthquake Forces, Chicago, 1955.
59. PLUMMER, H.C. & BLUME, J.A. Reinforced Brick Masonry and Lateral Force Design, Structural Clay Products Inst., Washington, 1953.
60. STRUCTURAL ENGINEERS ASSOCIATION OF SOUTHERN CALIFORNIA Horizontal Bracing Systems in Buildings Having Masonry or Concrete Walls, Tech. Bull. N°1, 1950.
61. STEINBRUGGE, K.V. & MORGAN, D.F. An Engineering Study of the Southern California Earthquake of July 21, 1952, and Its Aftershocks, Bull. Seismol. Soc. of Am., 44 (2B): 2nd pt. (1954).
62. DEGENKOLB, H.J. Structural Observations of the Kern County Earthquake, Trans. Am. Soc. Civil Engineers, Paper N° 2777, (1955).
63. STRUCTURAL ENGINEERS ASSOCIATION OF SOUTHERN CALIFORNIA Til-up construction, Tech. Bull. N° 2, 1950.

64. HANSEN, R.J. (ed.) Seismic Design of Nuclear Power Plants,
The M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1972.
65. UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION, DIVISION OF TECHNICAL
INFORMATION Nuclear Reactors and Earthquakes, Washington ,
1963² (TID-7024).

Capítulos 6 a 8:

66. ALMEIDA, F.F.M. de. As camadas de São Paulo e a tectônica da
Serra da Cantareira. Bol. Soc. Bras. Geol., 4 (2): 23-40,
Set. 1955.
67. ALMEIDA, F.F.M. de. Origem e evolução da plataforma brasileira.
Bol. Div. Geol. Min., 241, 1967.
68. ALMEIDA, F.F.M. de. Diferenciação Tectônica da plataforma brasi-
leira. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXV
Congresso Brasileiro de Geologia. São Paulo, 1969.
69. ALMEIDA, F.F.M. de. Sistema tectônico marginal do craton de Gua-
poré. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXVIII
Congresso Brasileiro de Geologia. Porto Alegre, 1974.
70. ALMEIDA, F.F.M. de; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B. de. The Upper
precambrian of South America. Bol Inst. Geoc. (USP), 7(1): 5-80,
1976.
71. ALMEIDA, F.F.M. de. O proterozoico médio no Brasil. In:
SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXX Congresso
Brasileiro de Geologia. Recife, 1978.

72. ALMEIDA, F.F.M. de; WERNICK, E.W. The Archean in Brazil. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia. Recife, 1978.
73. ASMUS, H.E. & PORTO, E.R. Classificação das bacias sedimentares brasileiras segundo a tectônica de placas. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Geologia. Belém, 1972. v. 2.
74. BACCAR, M.A. Evidências geofísicas no pacote sedimentar no plateau de São Paulo. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Geologia. Brasília, 1970.
75. BARROS, J. Síntese da atualidade sismológica no Brasil. In: 12º Seminário SICEG. Ouro Preto, 1971.
76. BARROS, J. & BERROCAL, J. Contribuição da estação sismológica de Brasília ao estudo da sismicidade do leste brasileiro. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Resumo das comunicações do XXVI Congresso Brasileiro de Geologia. Belém, 1972.
77. BERROCAL, J.; BARROS, J.; OLIVEIRA, J. Sismotectônica no nordeste brasileiro. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia. São Paulo, 1971.
78. BERROCAL, J.; LADEIRA, E.A.; FARIA, A. Anomalia tectônica na bacia amazônica detectada pelo SAAS. Rev. Bras. Geoc., 2: 161, 1972.
79. BJOERNBERG, A.J.S.; GANDOLFI, N.; PARAGUASSU, A.B. Basculamentos tectônicos modernos no estado de São Paulo. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia. São Paulo, 1971. v.2.

80. BJOERNBERG, A.J.S. Sismogênese e Neotectônica do Sul do Brasil. In: VIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. São Paulo, 1972.
81. BJOERNBERG, A.J.S. & GANDOLFI, N. Falhamentos recentes na região de São Carlos, S.P. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Resumo das comunicações do XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia. Porto Alegre, 1974.
82. BOSUM, W. O levantamento aeromagnético de Minas Gerais e Espírito Santo e sua consequência quanto à estrutura geológica. Rev. Bras. Geoc., 3(3).
83. BRANNER, J.C. The earthquakes in Brazil. In: The Bulletin of Seismological Society of America, 2 (2): 105-117. jun. 1912.
84. BRANNER, J.C. Recent Earthquakes in Brazil. IN: The Bull. Seismol. Soc. of Am., 10 (2): 90-104. 1920.
85. BRAUN, O.P.G. Considerações sobre a geologia precambriana da Região Sudeste e parte da Região Centro-Oeste do Brasil. Reunião preparatória do Simpósio sobre o Craton do São Francisco e suas zonas marginais, Salvador, 1977.
86. BRITO, S. Seismic activity around Cajuru Reservoir. In: Anais do 2º Congresso da Associação Internacional de Geologia de Engenharia, São Paulo, 1974.
87. BUTLER, L.W. Shallow structure of the continental margin, Southern Brazil and Uruguay. Geol. Soc. Am., Bull., 81:1079-96, 1970.

88. CAVALCANTE, J.C. & KAEFER, L. Q. Geologia da folha de Santos (parcial). In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia. Porto Alegre, 1974. v.4 , p.227-45.
89. NATIONAL GEOPHYSICAL AND SOLAR TERRESTRIAL DATA CENTER, Earthquake Data File Summary, May 1976, Boulder, Colorado.
90. FANG, P.C.; VENÂNCIO FILHO, F.; ZAGOTTIS, D. de. Projeto Sísmico de Barragens e Usinas Nucleares. In: XI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Fortaleza, 1976.
91. FERREIRA, E.O. La carte tectonique du Bresil aperçu sur la plate-forme bresilienne. In: Anais da Academia Brasileira de Ciências. Rio de Janeiro, 1968. v. 40, supl.
92. FÚLFARO, V.J. Tectônica da Faixa Estrutural do Paranapanema. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Resumo das comunicações do XXVIII Cong. Bras. de Geol., Porto Alegre , 1974.
93. FÚLFARO, V.J. Recent Tectonic Features in the Serra do Mar Region, State of São Paulo, Brazil and its Importance to Engineering Geology. Proc. 2º Int. Cong. International Association of Engineering Geology. Vol. 1, São Paulo, 1974.
94. 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. Resumo dos Trabalhos, Anais do XXIX Cong. Bras. de Geol., Belo Horizonte, 1976.

95. GORINI, M. Earthquakes in Brazil. Rel. Inst. Geoc. U.F.R.J., Rio de Janeiro (1969) (não publicado).
96. HABERLEHNER, H. Análise Sismotectônica do Brasil. Notas Explicativas Sobre o Mapa Sismotectônico do Brasil e Regiões Correlacionadas. 2º Cong. Bras. de Geol. de Eng., Vol.1, São Paulo, 1978.
97. HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; COIMBRA, A.M. Rev. Bras. Geoc., vol. 5(4). São Paulo, 1975.
98. HASUI, Y. & SADOWSKI, G.R. Evolução geológica do pré-cambriano da região sudeste do Estado de São Paulo. Rev. Bras. Geoc., 6(3): 182-200, Set. 1976.
99. HASUI, Y. ET AL. As grandes falhas do leste paulista. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA REGIONAL, 1º, São Paulo, 1977. Atas...
100. HASUI, Y.; ALMEIDA, F.F.M. de; BRITO NEVES, B.B. de. As estruturas brasileiras. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia. Recife, 1978.
101. HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A. A região de dobramentos sudeste nos estados de São Paulo e Paraná e seu magmatismo ácido. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia. Recife, 1978.
102. HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A. Os granitos e granitóides da região de dobramentos sudeste nos estados de São Paulo e Paraná. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia. Recife, 1978.

103. HASUI, Y.; ALMEIDA, F.F.M.de; BRITO NEVES, B.B. de. As unidades brasileiras. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia. Recife, 1978.
104. 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: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 29, São Paulo, 1978, Anais..., São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia.
105. HASUI, Y. & PONÇANO, W.L. Geossuturas e Sismicidade no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA; A.B.G.E., São Paulo, 1978.
106. HENNIES, W.T.; HASUI, Y.; PENALVA, F. O falhamento transcorrente de Taxaquara. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Geologia. Curitiba, 1967.p.159-168.
107. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Geologia da região administrativa 3 (vale do Paraíba) e parte da região administrativa 2 (litoral) do Estado de São Paulo. São Paulo, 1978.
108. LEYDEN, R. & NUNES, J.R. Diapir Structures offshore Southern Brazil. Trans. 26th C.B.G.; pp.45-50.
109. LOCZY, L. de. The System of Equatorial Transcorrent Faulting and Oceanic Fracture Zones and its role in Tectonic Framework of Northern South America. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 49(2), Rio de Janeiro, 1977.

110. MALAMPHY, M.C. Movimentos Sísmicos de Bom Sucesso, Minas Gerais. Bol. 17, Serv. Fom. Prod. Min., Rio de Janeiro, 1937.
111. MANFREDINI, M.; VENTRIGLIA, U. Seismic Evaluation of an Area. Proc. 2º Int. Congr. of the International Association of Engineering Geology. Vol. 1, São Paulo, 1974.
112. MARQUES FILHO, P.L.; SOBANSKI, A.; LOPES, J.N. Fenômeno de Decompressão nos Túneis do Aproveitamento Capivari-Cachoeira. In: ASSOCIAÇÃO PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA. Anais do 3º Seminário Paulista de Geologia Aplicada. São Paulo, 1971.
113. MASCARENHAS, J. F. A geologia do centro-leste do Estado da Bahia. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Geologia. Aracaju, 1973. v.2.
114. MEZZALIRA, S. & COUTO, C.P. Nova Conceituação Geocronológica de Tremembé, Estado de São Paulo, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA. Anais da Academia Brasileira de Ciências. Rio de Janeiro, 43: 473-488. 1971 (suplemento).
115. MIURA, K. Possibilidades petrolíferas da bacia do Acre. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Geologia. Belém, 1972. v.3.
116. NICOLAEV, N.I. Tectonic Conditions Favourable for Causing Earthquakes Occurring in Connection With Reservoir Filling. Engineering Geology. vol.8 , 1,2, Elsevier, Amsterdam(1974).

117. OBORN, L.E. Seismic Phenomena and Engineering Geology, Proc. of the 2^o Int. Congr. of the International Association of Engineering Geology. vol. 1, São Paulo, 1974.
118. PICADA, R.S. Ensaio sobre a tectônica do escudo sul-riograndense: caracterização do sistema de falhas. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo, 1971.
119. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR Relatório nº 44 (CNAEA), Março 1974.
120. KANJI, M.A. RNC-731 Aspectos Geológicos e Geotécnicos de Instalações Nucleares. (anotações de aula no IPEN, março-junho 1980).
121. BORK, M. & SCHWARZER, W. Earthquake Safety of Nuclear Power Plants Based on a Balanced Risk Concept. In: Proc. of a Symp. on Principles and Standards of Reactor Safety, I.A.E.A, Vienna, Aug. 1973.