

**NUCLEBRÁS**

Empresas Nucleares Brasileiras SA



**CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR**

**CAIXA POSTAL, 1941 - 30.000 - BELO HORIZONTE - BRASIL**

**EMPRESAS NUCLEARES BRASILEIRAS S.A. - NUCLEBRÁS**  
**CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR**  
**DEPARTAMENTO DE RADIOPROTEÇÃO E APOIO AO LICEN-**  
**CIAMENTO**

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO MOVIMENTO**  
**SÍSMICO PADRÃO EM LOCAIS DE INSTALAÇÕES**  
**NUCLEARES**

**Wellington Antonio Soares**  
**NUCLEBRÁS/CDTN 464**

**Belo Horizonte**  
**1983**

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO MOVIMENTO  
SÍSMICO PADRÃO EM LOCAIS DE INSTALAÇÕES  
NUCLEARES**

**Autor: Wellington Antonio Soares  
Orientador: Luiz Augusto de Queiroz e  
Oliveira**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO MOVIMENTO  
SÍSMICO PADRÃO EM LOCAIS DE INSTALAÇÕES  
NUCLEARES**

**Autor: Wellington Antonio Soares**

**Orientador: Luiz Augusto de Queiroz e  
Oliveira**

**Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências e  
Técnicas Nucleares da UFMG, como parte dos requisitos necessá  
rios para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)**

**Belo Horizonte - Brasil**

**Março/1983**

Este trabalho foi realizado nas instalações do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - NUCLEBRÁS, e constitui uma tarefa do programa de atividades do Departamento de Radioproteção e Apoio ao Licenciamento.

Dedico este trabalho aos meus pais, Lino e Misblande (Mãezinha), à minha avó Emídia, aos meus irmãos Felizardo, Maria do Carmo, Nildéia e Nilzete e à amiga dona Tereza P.L. Mosqueira.

## AGRADECIMENTOS

Ao Sr. Luiz Augusto de Queiroz e Oliveira, meu orientador, pelo estímulo e contribuição na elaboração desta dissertação.

Aos Srs. Virgílio Mattos de Andrade e Silva e José Olympio Nardelli M. de Castro, respectivamente, Superintendente Geral de Pesquisa e Desenvolvimento e Chefe do Departamento de Radioproteção e Apoio ao Licenciamento do CDTN, por haverem permitido a realização deste trabalho.

Ao professor Arysio Nunes dos Santos, Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da UFMG, pelos auxílios prestados na coordenação.

Ao professor Aécio Freitas Lira, da Escola de Engenharia da UFMG, que foi inicialmente meu orientador, mas que teve de ser substituído por motivo de viagem para o exterior.

Em especial, ao amigo Valdívio Damasceno Pego e à minha noiva, Theres de Oliveira, pelo laborioso trabalho de revisão do texto.

Aos colegas do CDTN, Flávio Soares de Menezes, Paulo Roberto Ribeiro Alves, Arivaldo Morais do Sacramento, Vanderley de Vasconcelos, Antonio Carlos Lopes da Costa, Celso Pinto Coelho, Fausto Carvalho Pinto, pelas contribuições prestadas.

As bibliotecárias do CDTN, Lenira Santos Passos Ferreira, Maria Mabel de Menezes Scotti e Laura Martins da Costa pela valiosa ajuda na preparação das Referências Bibliográficas. À Srta. Italúcia R. Oliveira, bem como às outras bibliotecárias já mencionadas, pela presteza no serviço de documentação técnica.

À Sra. Ana Maria Gomes e Souza Alves e Srta. Ismênia Pereira Bonaparte, do CCTN, pela atenção e cordialidade dispensada.

Ao professor Marco Antonio de Mendonça Vecci, da Escola de Engenharia, pelas valiosas sugestões e comentários.

Ao auxiliar de administração, Olímpio César B. dos Santos pelo cuidado e eficiência na execução dos serviços datilográficos desta dissertação. Também à Sra. Márcia Valéria L. S. Fagundes pelo auxílio de datilografia na etapa de preparação deste trabalho.

Ao desenhista, Maurício Vieira de Carvalho, pela valiosa contribuição na elaboração dos desenhos.

Ao Serviço de Reprografia do CDTN, pelos serviços de reprodução xerográfica.

A todas as pessoas que incentivaram a continuidade deste trabalho e ainda àquelas que, direta ou indiretamente, contribuíram,

meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

No projeto sísmico de instalações nucleares, o movimento de excitação, a partir do qual procede-se à análise sísmica das estruturas, normalmente é definido através da aceleração horizontal máxima prevista para o terreno, e de um espectro de resposta do local, nas condições de campo livre. Esse espectro de resposta é calculado com base nos registros de sismos de movimentos fortes. A esse conjunto aceleração máxima—espectro de resposta, denominou-se, nesta dissertação, movimento sísmico padrão para o local.

Este trabalho foi elaborado com o objetivo de dar uma visão global dos assuntos envolvidos na determinação do movimento sísmico padrão para o local de uma instalação nuclear. Os principais tópicos apresentados são: princípios básicos de instrumentação sísmica; conceitos dinâmicos e espectrais; definição de sismos de projeto; fundamentos de sismologia; curvas empíricas desenvolvidas a partir de informações sísmicas anteriores; técnicas disponíveis e procedimentos recomendados para a obtenção do movimento sísmico padrão. São apresentados, ainda, outros tópicos considerados importantes para a compreensão do tema central desta dissertação.

## ABSTRACT

For the seismic design of nuclear facilities, the input motion is normally defined by the predicted maximum ground horizontal acceleration and the free field ground response spectrum. This spectrum is computed on the basis of records of strong motion earthquakes. In this thesis, the pair maximum acceleration-response spectrum is called the site standard seismic motion.

The purpose of this work is to present an overall view of the subjects involved in the determination of the site standard seismic motion to a nuclear facility. The main topics discussed are: basic principles of seismic instrumentation; dynamic and spectral concepts; design earthquakes definitions; fundamentals of seismology; empirical curves developed from prior seismic data; available methodologies and recommended procedures to evaluate the site standard seismic motion. Other topics deemed important to the comprehension of the main subjects of this thesis are also presented.

## SUMÁRIO

|                                                                                | Pág. |
|--------------------------------------------------------------------------------|------|
| LISTA DE TABELAS .....                                                         | i    |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                         | ii   |
| SIGLAS UTILIZADAS .....                                                        | vii  |
| <br>                                                                           |      |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                            | 1    |
| 1.1 Generalidades .....                                                        | 1    |
| 1.2 Estruturação do Trabalho .....                                             | 2    |
| 1.3 Observações .....                                                          | 6    |
| <br>                                                                           |      |
| 2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A SISMOLOGIA NO LICENCIAMENTO .....                     | 7    |
| 2.1 Necessidade de Estudos Sismológicos .....                                  | 7    |
| 2.2 Legislação e Guias Regulatórios .....                                      | 9    |
| <br>                                                                           |      |
| 3. CONCEITOS DINÂMICOS E ESPECTRAIS .....                                      | 13   |
| 3.1 Conceituação do Problema Dinâmico .....                                    | 13   |
| 3.1.1 Histórico .....                                                          | 14   |
| 3.1.2 Excitação .....                                                          | 14   |
| 3.1.3 Resposta .....                                                           | 15   |
| 3.1.4 Parâmetros Característicos do Comportamento Dinâmico de um Sistema ..... | 16   |
| 3.1.5 Tipos de Frequências de Vibração .....                                   | 19   |
| 3.1.6 Formulação da Equação de Movimento .....                                 | 21   |
| 3.2 Parâmetros Espectrais .....                                                | 25   |
| 3.2.1 Espectros de Resposta .....                                              | 27   |
| 3.2.2 Espectros de Resposta de Projeto .....                                   | 32   |
| 3.3 Representação de Funções no Domínio da Frequência .....                    | 35   |
| 3.3.1 Espectro de Fourier .....                                                | 35   |
| 3.3.2 Análise Numérica no Domínio da Frequência .....                          | 37   |
| 3.4 Alternativas para Cálculo da Resposta Dinâmica de um Sistema .....         | 39   |
| 3.4.1 Convolução e Deconvolução .....                                          | 39   |

|       |                                                                            |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.2 | Funções nos Domínios do Tempo e da Freqüência.                             | 41 |
| 4.    | PRINCÍPIOS BÁSICOS DE INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA .                             | 43 |
| 4.1   | Conceituação de Sismógrafo .....                                           | 43 |
| 4.2   | Elementos Básicos de um Sismógrafo .....                                   | 44 |
| 4.3   | Análise da Resposta de um Sismógrafo à Excitação Permanente Senoidal ..... | 46 |
| 4.4   | Acelerógrafo e Ganho .....                                                 | 51 |
| 4.5   | Acelerógrafo para Registro de Movimentos Fortes .....                      | 51 |
| 5.    | INFORMAÇÕES GEOLÓGICO-SISMOLÓGICAS BÁSICAS ...                             | 53 |
| 5.1   | Sismo .....                                                                | 53 |
| 5.2   | Falha Geológica e Falhamento de Superfície ...                             | 55 |
| 5.3   | Atividades de Falhas .....                                                 | 56 |
| 5.4   | Falha Capaz .....                                                          | 56 |
| 5.5   | Província Tectônica .....                                                  | 58 |
| 6.    | DEFINIÇÃO DE SISMOS DE PROJETO .....                                       | 59 |
| 6.1   | Metodologia de Projeto Sísmico .....                                       | 61 |
| 6.2   | Definição de Sismos de Referência .....                                    | 63 |
| 6.2.1 | Sismo de Desligamento Seguro - SSE .....                                   | 64 |
| 6.2.2 | Sismo Básico de Operação - OBE .....                                       | 65 |
| 6.3   | Avaliação do Efeito Sísmico Local devido aos Sismos de Referência .....    | 66 |
| 7.    | FUNDAMENTOS DE SISMOLOGIA .....                                            | 69 |
| 7.1   | Tipos de Ondas Sísmicas .....                                              | 69 |
| 7.1.1 | Ondas de Volume .....                                                      | 70 |
| 7.1.2 | Ondas Superficiais .....                                                   | 72 |
| 7.2   | Propagação de Ondas Sísmicas .....                                         | 73 |
| 7.3   | Registro Instrumental de Sismos .....                                      | 74 |
| 7.4   | Identificação de Ondas num Sismograma .....                                | 77 |
| 7.5   | Localização de Acelerógrafos .....                                         | 78 |
| 7.6   | Foco e Epicentro .....                                                     | 79 |
| 7.7   | A Medida dos Sismos .....                                                  | 81 |
| 7.7.1 | Magnitude .....                                                            | 82 |

|       |                                                                                                |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.7.2 | Intensidade .....                                                                              | 87  |
| 7.8   | Parâmetros Diretamente Relacionados a Sismos SM                                                | 91  |
| 7.8.1 | Valores de Pico de Aceleração, Velocidade e<br>Deslocamento .....                              | 91  |
| 7.8.2 | Espectro de Resposta do Terreno .....                                                          | 93  |
| 7.8.3 | Intensidade do Espectro de Resposta .....                                                      | 95  |
| 7.8.4 | Valor Eficaz da Aceleração .....                                                               | 96  |
| 7.8.5 | Fator de Intensidade .....                                                                     | 97  |
| 7.8.6 | Duração da Fase mais Intensa de um Sismo SM ..                                                 | 97  |
| 8.    | CURVAS EMPÍRICAS DESENVOLVIDAS A PARTIR DE IN<br>FORMAÇÕES SÍSMICAS ANTERIORES .....           | 101 |
| 8.1   | Valores de Pico dos Movimentos Superficiais do<br>Terreno .....                                | 102 |
| 8.1.1 | Correlações de Resposta de Pico do Terreno com<br>Intensidade .....                            | 102 |
| 8.1.2 | Correlações de Resposta de Pico do Terreno com<br>Magnitude e Distância .....                  | 104 |
| 8.2   | Duração da Fase mais Intensa de Sismo SM .....                                                 | 107 |
| 9.    | TÉCNICAS DISPONÍVEIS PARA OBTENÇÃO DO MOVIMEN<br>TO SÍSMICO PADRÃO DE CAMPO LIVRE PARA O LOCAL | 109 |
| 9.1   | Metodologia Independente do Local .....                                                        | 110 |
| 9.1.1 | Procedimentos de Housner .....                                                                 | 111 |
| 9.1.2 | Procedimentos de Newmark e Hall .....                                                          | 115 |
| 9.1.3 | Procedimentos do Guia Regulatório 1.60 .....                                                   | 117 |
| 9.1.4 | Comparação de Espectros .....                                                                  | 121 |
| 9.2   | Técnicas de Registros de Locais Semelhantes ..                                                 | 124 |
| 9.2.1 | Exemplos de Aplicação .....                                                                    | 125 |
| 9.2.2 | Variabilidade de Registros Individuais Perten<br>centes a um mesmo Grupo de Registros .....    | 128 |
| 9.3   | Análise da Resposta do Local .....                                                             | 130 |
| 9.3.1 | Conceituação do Problema de Análise de Respos<br>ta do Local .....                             | 130 |
| 9.3.2 | Movimentos de Excitação em Subsuperfície .....                                                 | 134 |
| 9.3.3 | Modelagem do Pacote de Solo .....                                                              | 138 |

|        |                                                                                         |     |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.3.4  | Análise da Resposta Horizontal do Pacote de Solo .....                                  | 143 |
| 9.3.5  | Análise por meio de Elementos Finitos .....                                             | 148 |
| 9.3.6  | Resultados Obtidos a Partir da Análise de Resposta do Local .....                       | 150 |
| 10.    | PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DO MOVIMENTO SÍSMICO PADRÃO DE CAMPO LIVRE PARA O LOCAL ... | 152 |
| 10.1   | Descrição dos Procedimentos .....                                                       | 152 |
| 10.2   | Exemplo de Aplicação dos Procedimentos .....                                            | 154 |
| 10.2.1 | Etapa A: Estudos Geológicos e Sismológicos ...                                          | 155 |
| 10.2.2 | Etapa B: Investigação de Solo no Local .....                                            | 157 |
| 10.2.3 | Etapa C: Estudos de Sensibilidade da Resposta do Local .....                            | 158 |
| 10.2.4 | Etapa D: Avaliação das Formas de Resposta do Local .....                                | 163 |
| 10.2.5 | Etapa E: Seleção de Registros de Locais Semelhantes .....                               | 164 |
| 10.2.6 | Etapa F: Avaliação e Seleção do Movimento Sísmico Padrão de Projeto .....               | 165 |
| 10.3   | Considerações Finais .....                                                              | 168 |
| 11.    | CONCLUSÃO .....                                                                         | 169 |
|        | ANEXO A - DEFINIÇÕES E FORMAS ABREVIADAS .....                                          | 170 |
|        | ANEXO B - CONCEITOS ESTATÍSTICOS E MATEMÁTICOS .....                                    | 177 |
|        | ANEXO C - TABELAS .....                                                                 | 189 |
|        | ANEXO D - FIGURAS .....                                                                 | 206 |
|        | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                        | 268 |

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 Relação dos Sismos Brasileiros de Maior Magnitude Já Registrados.
- Tabela 2 Sismos que Produziram as Maiores Acelerações do Terreno nos EUA.
- Tabela 3 Exemplo de Classificação de Estruturas de Centrais Nucleares.
- Tabela 4 Descrição dos Efeitos Correspondentes aos Graus da Escala de Mercalli Modificada.
- Tabela 5 Intensidade do Espectro de Resposta de Sismos Instrumentalmente Registrados.
- Tabela 6 Fatores de Amplificação do Espectro Recomendados por Newmark e Hall.
- Tabela 7 Relação dos Acelerogramas que Serviram de Base para Obtenção dos Espectros de Resposta do RG 1.60.
- Tabela 8 Dados Básicos para Obtenção dos Espectros de Resposta Independentes do Local.
- Tabela 9 Fatores de Amplificação dos Espectros de Resposta do RG 1.60.
- Tabela 10 Descrição do Procedimento Recomendado para Obtenção do Movimento Sísmico Padrão de Campo Livre para o Local de Uma Instalação Nuclear.
- Tabela 11 Fatores a Serem Considerados na Avaliação Final do Movimento Sísmico Padrão de Campo Livre para o Local de uma Instalação.
- Tabela 12 Acelerações de Pico do Terreno Obtidas a Partir da Análise de Resposta do Local (Exemplo de Aplicação).

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Epicentro e Locais de Relato de Sismos no Brasil.
- Figura 2 Localização dos Principais Eventos Sísmicos no Brasil.
- Figura 3 Tipos de Excitação.
- Figura 4 Resposta de Sistemas Lineares Amortecidos Sob Ação de Excitação Permanente (Senoidal).
- Figura 5 Exemplos Típicos de Sistemas Amortecidos com um Grau de Liberdade.
- Figura 6 Abordagem do Problema de Excitação Sísmica.
- Figura 7 Exemplo Típico de Construção de um Espectro de Resposta.
- Figura 8 Espectro de Resposta - Velocidade da Componente NS do Sismo de El Centro - 1940.
- Figura 9 Espectro de Resposta Médio - Velocidade do Sismo de El Centro - 1940.
- Figura 10 Espectro de Resposta no Gráfico Logarítmico Especial.
- Figura 11 Espectro de Resposta (Elástico) para o Sismo de El Centro - 1940.
- Figura 12 Limites do Espectro de Resposta Comparados com os Movimentos Máximos do Terreno.
- Figura 13 Comparação entre Espectros de Resposta Horizontal e Vertical.
- Figura 14 Sismogramas do Sismo de Taft - 1952.
- Figura 15 Espectros de Resposta de Deslocamento, Velocidade e Aceleração para o Sismo de Taft - 1952.
- Figura 16 Espectros de Resposta Médios.
- Figura 17 Espectros de Resposta de Projeto do RG 1.60.
- Figura 18 Espectros de Fourier para Funções Periódicas e Transientes.

- Figura 19 Espectros de Fourier - Amplitude e Fase.
- Figura 20 Espectro de Fourier - Amplitude para o Sismo de Taft - 1965.
- Figura 21 Alternativas para Cálculo da Resposta de um Sistema Linear a uma Excitação Arbitrária.
- Figura 22 Pêndulo e Esquema Típico de um Sismômetro.
- Figura 23 Fator de Amplificação em Função da Relação de Frequências e do Fator de Amortecimento.
- Figura 24 Ângulo de Fase em Função da Relação de Frequências e do Fator de Amortecimento.
- Figura 25 Tipos de Falhas.
- Figura 26 Procedimentos para Transferência dos Efeitos dos Sismos de Referência para o Local.
- Figura 27 Movimento das Partículas de um Meio Durante a Passagem das Ondas P ou S.
- Figura 28 Ilustração Sobre as Formas do Movimento do Terreno , Próximo a Superfície, Durante a Passagem de Ondas Sísmicas.
- Figura 29 Acelerogramas do Sismo de El Centro - 1940, Obtidos a Aproximadamente 30 Milhas do Epicentro.
- Figura 30 Acelerogramas do Sismo de Taft - 1952, Obtidos a Aproximadamente 30 Milhas do Epicentro.
- Figura 31 Acelerogramas do Sismo de San Francisco - 1957, Obtidos a Aproximadamente 7 Milhas do Epicentro.
- Figura 32 Acelerogramas do Sismo de Taft - 1952, Obtidos a Aproximadamente 70 Milhas do Epicentro.
- Figura 33 Esquema de Sismógrafo para Registro da Componente Vertical de Ondas Sísmicas.
- Figura 34 Esquema de Sismógrafo para Registro da Componente Horizontal de Ondas Sísmicas.
- Figura 35 Componente Vertical do Sismo de Skopje - 1963.

- Figura 36 Sismograma Típico Mostrando as Ondas P, S e Longas.
- Figura 37 Esquema da Diferença do Tempo de Chegada de Ondas Sísmicas em Diferentes Estações Sismográficas.
- Figura 38 Comparação Entre Sismos de Focos Profundo e Raso.
- Figura 39 Nomograma para Cálculo da Magnitude Local.
- Figura 40 Comparação Gráfica Entre as Várias Escalas de Intensidade Sísmica Propostas.
- Figura 41 Equivalência Gráfica Entre a Escala Rossi-Forel e Outras Escalas de Intensidade.
- Figura 42 Nomograma para Determinação de Um dos Valores de Intensidade, Magnitude ou Profundidade Focal.
- Figura 43 Curvas Isossitas do Choque Principal do Sismo de Parkfield - 1966.
- Figura 44 Históricos do Movimento do Terreno para o Sismo de Parkfield - 1966.
- Figura 45 Valores de Pico do Terreno Correspondentes a Componente NS do Sismo de El Centro - 1940.
- Figura 46 Definição da Intensidade Espectral de Housner.
- Figura 47 Definição de Bolt para Duração da Fase Mais Intensa de um Sismo SM.
- Figura 48 Definição da Fase Mais Intensa de um Sismo SM de acordo com Trifunac e Brady.
- Figura 49 Respostas Típicas aos Sismos de Parkfield - 1966 e El Centro - 1940.
- Figura 50 Correlações Entre Aceleração Horizontal Máxima do Terreno e Intensidade MM.
- Figura 51 Correlações Médias Entre Respostas do Terreno e Intensidade MM.
- Figura 52 Correlações Entre Aceleração Horizontal de Pico, Magnitude e Distância.

- Figura 53 Comparação de Correlações Entre Aceleração Horizontal de Pico e Distância para Sismos de Magnitudes de 6,5 a 6,6.
- Figura 54 Correlações de Aceleração Horizontal de Pico em Rocha com Magnitude e Distância.
- Figura 55 Correlações Entre Velocidade Horizontal de Pico, Magnitude e Distância.
- Figura 56 Duração de Aceleração Horizontal de Sismos SM em Função de Magnitude e Distância.
- Figura 57 Correlações Médias de Duração com Intensidade Local Feitas por Trifunac e Brady.
- Figura 58 Curvas Espectrais de Housner.
- Figura 59 Curvas Espectrais de Newmark e Hall.
- Figura 60 Curvas Espectrais Médias do Sismo de El Centro - 1940.
- Figura 61 Espectros Médios e MSD Desenvolvidos por Newmark et alii.
- Figura 62 Espectro de Resposta Horizontal do RG 1.60.
- Figura 63 Espectro de Resposta Vertical do RG 1.60.
- Figura 64 Comparação de Espectros de Resposta Independentes do Local.
- Figura 65 Curvas Espectrais de Seed, Ugas e Lysmer.
- Figura 66 Comparação de Curvas Espectrais de Locais com Solos Profundos.
- Figura 67 Influência do Embasamento Rochoso Sobre o Espectro de Resposta Superficial do Terreno.
- Figura 68 Propriedades Limites - Fator de Amortecimento e Módulo de Cisalhamento de Solos.
- Figura 69 Variação do Módulo de Cisalhamento com a Deformação de Cisalhamento para Solos Típicos.
- Figura 70 Variação do Fator de Amortecimento com a Deformação de Cisalhamento para Solos Típicos.

- Figura 71 Parâmetros Lineares Equivalentes para Solos com Comportamento Histerético Não Linear. Com
- Figura 72 Representação Bilinear das Propriedades do Solo.
- Figura 73 Modelos Unidimensionais para Análise de Resposta Horizontal de Locais com Camadas Horizontais. Ho
- Figura 74 Modelo de Elementos Finitos para Locais com Formações Rochosas Inclínadas.
- Figura 75 Dados Empíricos para Estimativa das Acelerações de Pico - Exemplo de Aplicação. de
- Figura 76 Descrição do Perfil Geotécnico do Terreno - Exemplo de Aplicação.
- Figura 77 Procedimentos para Análise de Resposta do Local - Exemplo de Aplicação. Exem
- Figura 78 Propriedades Dinâmicas do Solo - Exemplo de Aplicação.
- Figura 79 Espectros de Resposta Obtidos dos Estudos de Sensibilidade da Resposta do Local. Sensibi
- Figura 80 Comparação Entre Espectros de Registros de Locais Semelhantes e da Análise de Resposta do Local. Se
- Figura 81 Espectro Padrão para o Local - Exemplo de Aplicação.
- Figura 82 Comparação de Espectros: Resultados do Exemplo de Aplicação e Registros Sísmicos de Orion. de

**SIGLAS UTILIZADAS**

|                         |                                                                              |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>DFT</b>              | <b>Transformada de Fourier Discreta ("Discrete Fourier Transform").</b>      |
| <b>FFT</b>              | <b>Transformada de Fourier Simplificada ("Fast Fourier Transform").</b>      |
| <b><math>m_b</math></b> | <b>Magnitude de ondas de volume ("Body Wave Magnitude").</b>                 |
| <b>ML</b>               | <b>Magnitude Local ("Local Magnitude").</b>                                  |
| <b>MM</b>               | <b>Mercalli Modificada.</b>                                                  |
| <b>MS</b>               | <b>Magnitude de onda superficial ("Surface-wave Magnitude").</b>             |
| <b>MSD</b>              | <b>Média mais um desvio padrão ("Mean plus one Standard Deviation").</b>     |
| <b>NRC</b>              | <b>Comissão de Regulamentação Nuclear ("Nuclear Regulatory Commission").</b> |
| <b>OBE</b>              | <b>Sismo Básico de Operação ("Operating Basis Earthquake").</b>              |
| <b>RG 1.60</b>          | <b>Guia Regulatório 1.60 ("Regulatory Guide 1.60").</b>                      |
| <b>RMS</b>              | <b>Valor Eficaz ("Root Mean Square").</b>                                    |
| <b>SSE</b>              | <b>Sismo de Desligamento Seguro ("Safety Shutdown Earthquake").</b>          |

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Generalidades

As construções de grandes barragens e de instalações nucleares no Brasil deram grande incentivo à pesquisa de eventos sísmicos no continente brasileiro. Relativamente à grandes barragens, as pesquisas no Brasil estão voltadas mais para a sismicidade induzido pelo enchimento dos respectivos reservatórios. Normalmente os sismos associados com esses reservatórios são eventos de pequeno porte. Já no caso de construção de instalações nucleares, interessam os sismos cujos efeitos num determinado local sejam suficientes para causarem danos às estruturas e componentes. Esses sismos, denominados de sismos SM neste trabalho, correspondem ao termo inglês "strong motion earthquakes".

De acordo com a literatura sísmica disponível, o relato de danos sísmicos no Brasil limita-se a construções fracas e de pequeno porte; não são conhecidos, por exemplo, relatos de danos a estruturas de concreto armado. Normalmente, os dados sísmicos registrados no Brasil são aqueles de interesse para os sismologistas, ou seja, magnitude, distância focal, coordenadas epicentrais, etc.. Não se tem, entretanto, registros de sismos SM, os quais são aqueles de maior interesse do ponto de vista de projeto anti-sísmico. Apesar de não se dispor desses dados para o Brasil, o projeto de centrais nucleares está sendo feito com base em parâmetros de projeto calculados a partir de registros de sismos SM de outros países. Este procedimento em certos casos, apesar de conservativo, pode levar a um superdimensionamento das

estruturas ou equipamentos projetados a partir desses parâmetros.

Este trabalho, além de proporcionar um conhecimento dos fundamentos necessários ao cálculo dos parâmetros sísmicos de projeto, e fornecer orientação sobre procedimentos lógicos para o cálculo dos referidos parâmetros, vem suprir a falta de bibliografia em português nessa área.

Procurou-se caracterizar o fenômeno, o sismo SM, desde sua geração até a ação à distância do mesmo em locais destinados a construção de instalações nucleares. Neste trabalho, aos efeitos sísmicos máximos de sismos SM, no local destinado a construção de uma instalação nuclear serão denominados de movimento sísmico padrão de campo livre. Por campo livre, entender-se-á que o movimento sísmico, num determinado local, foi calculado sem levar em consideração a presença da estrutura da instalação prevista para esse local. Esse movimento sísmico padrão de campo livre se constitui no dado de entrada para efeito do projeto sísmico da própria estrutura ou da análise do conjunto solo-estrutura, se for o caso.

## 1.2 Estruturação do Trabalho

Com este trabalho procurou-se dar uma visão global do problema da sismicidade do local de uma instalação nuclear. Para tanto, procedeu-se a apresentação de assuntos que vão desde a caracterização do evento sísmico, princípios básicos de instrumentação sísmica, conceitos dinâmicos e espectrais, até a

avaliação final do movimento sísmico padrão, de campo livre, para o local. Objetivando dar apoio aos novos conceitos apresentados, foram introduzidos conceitos auxiliares, com o intuito de facilitar o entendimento e desenvolvimento deste trabalho. Nos parágrafos seguintes é feita, de forma resumida, uma apresentação dos tópicos abordados.

No Capítulo 2 procede-se a uma abordagem concisa da sismologia no licenciamento de instalações nucleares, chamando-se a atenção para a necessidade de estudos sismológicos no caso de tais instalações. É apresentada, ainda, uma relação dos eventos sísmicos mais importantes no Brasil. No item 2.2 são apresentados os documentos norte-americanos básicos relacionados com o projeto sísmico de instalações nucleares.

O registro de um instrumento sísmico, normalmente, apresenta a variação da amplitude de um determinado parâmetro com o tempo (histórico do movimento). Entretanto, o resultado, nessa forma, é de pouco interesse do ponto de vista de caracterização de efeitos estruturais. Assim, em vez do histórico são utilizados dois outros parâmetros que traduzem, numa outra forma, as informações contidas num histórico do movimento. Isso pode ser feito através do espectro de resposta ou por meio do espectro de Fourier. O objetivo básico do Capítulo 3 é introduzir os conceitos sobre esses dois tipos de espectros. Além disso, é apresentado, também, o inter-relacionamento existente entre a excitação e a resposta de um sistema linear, em termos de frequência e tempo.

Para que se possa utilizar os dados provenientes de um determinado instrumento, é necessário que se tenha um conhe

cimento, pelo menos, dos conceitos básicos que regem o funcionamento do mesmo. O Capítulo 4 apresenta, de modo sucinto, o princípio básico de funcionamento de um acelerômetro, o qual é o instrumento que proporciona a obtenção do histórico de acelerações de um sismo.

No Capítulo 5 é apresentada uma definição concisa sobre evento sísmico, bem como dos elementos geológico-estruturais diretamente relacionados ao mesmo. Esses elementos, falha geológica capaz e província tectônica, se constituem num dado básico, para efeito de posicionamento do epicentro, quando se deseja calcular os efeitos, no local de uma instalação nuclear, provenientes de um sismo à distância.

De acordo com a metodologia de projeto sísmico, são definidos dois sismos de referência a partir dos quais uma central nuclear é projetada. Internacionalmente eles são conhecidos pelas siglas SSE e OBE. O primeiro é o Sismo de Desligamento Seguro e o segundo é o Sismo Básico de Operação. No Capítulo 6, além da definição desses dois sismos são apresentados, de forma resumida, os procedimentos gerais para transferência do efeito sísmico, do SSE ou OBE, do epicentro ou região de intensidade máxima para o local de uma instalação nuclear.

No Capítulo 7 são apresentados os conceitos básicos da área de sismologia e engenharia sísmica. Inicialmente são caracterizados os tipos de ondas relacionadas a um evento sísmico e a propagação dessas ondas através do terreno. É feita, também, uma identificação dos vários tipos de ondas, num sismograma, à medida que a estação de registro se afasta da fonte sísmica. Os itens 7.6 a 7.8 estão voltados para a caracterização do

evento sísmico, sendo que o item 7.8 é direcionado para os parâmetros representativos dos efeitos de sismos SM.

As curvas empíricas relacionando parâmetros sísmicos, efeitos sísmicos, condições de locais do terreno, etc., se constituem num dado valioso para previsão de dados sísmicos a serem utilizados no projeto de uma instalação nuclear. Algumas dessas curvas empíricas mais conhecidas são apresentadas no Capítulo 8.

De acordo com a regulamentação americana é necessário que sejam definidos os efeitos sísmicos do SSE e do OBE, no local, através do espectro de resposta, considerando o terreno nas condições de campo livre. No Capítulo 9 são apresentadas as técnicas disponíveis para a obtenção desses espectros. Essas técnicas podem ser agrupadas em duas categorias: (a) a metodologia independente do local, na qual são utilizados espectros de resposta padronizados, sem que sejam necessárias maiores considerações sobre as condições do terreno local; (b) a metodologia dependente do local, na qual os espectros de resposta do local são ditados pelo tipo de comportamento do solo local sob a ação de ondas sísmicas.

No Capítulo 10 são apresentados procedimentos, recomendados na referência [47], para obtenção do movimento sísmico padrão de campo livre no local de uma instalação nuclear. É feito, ainda, um acompanhamento da aplicação desses procedimentos a um exemplo típico. Nesse exemplo, que exigiria de antemão, uma aplicação da metodologia dependente do local, é feita uma comparação dos resultados provenientes dos dois tipos de metodologias citadas.

No final do trabalho são apresentados quatro anexos . O Anexo "A" apresenta algumas definições e formas abreviadas , que foram utilizadas com a finalidade de facilitar a redação do texto. No Anexo "B" são apresentados alguns conceitos estatísticos e matemáticos de interesse para o desenvolvimento do trabalho. Os anexos "C" e "D" apresentam, respectivamente, as Tabelas e Figuras citadas no texto.

### 1.3 Observações

As referências bibliográficas [1] a [47] foram relacionadas de acordo com a ordem em que elas são citadas, pela primeira vez, no texto ou nas Figuras. Na realidade, as referências [48] a [126] se constituem em Bibliografia Adicional do trabalho

As palavras, ou expressões, definidas nos Anexos "A" ou "B" serão, pela primeira vez em que aparecem no texto, marcadas com um asterisco. Isto significa que maiores explicações sobre as palavras marcadas são encontradas nesses anexos.

## 2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A SISMOLOGIA NO LICENCIAMENTO

O licenciamento de uma instalação nuclear abrange um estudo amplo, incluindo várias áreas tais como hidrologia, geologia, sismologia, meteorologia, etc., em níveis local e regional, de modo que, a partir da interação instalação e ambiente, sejam determinadas as medidas a serem tomadas visando a se ter uma instalação segura quaisquer que sejam as condições de solicitação da mesma. A partir desses estudos é elaborado um Relatório de Análise de Segurança (RAS), que é enviado a um órgão licenciador, que irá julgar o assunto tratado no referido relatório, e decidir pela emissão de uma licença de construção da instalação em apreço. Se o local apresentar características muito desfavoráveis, na ausência de outros locais adequados, poderão ser exigidas medidas adicionais no projeto da própria instalação nuclear, o que poderia inclusive inviabilizar a construção da instalação no local escolhido. No Brasil o órgão licenciador é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), com sede no Rio de Janeiro.

### 2.1 Necessidade de Estudos Sismológicos

Na escolha de um local para construção de uma instalação nuclear são analisados vários aspectos para se determinar a viabilidade de tal local. Um desses aspectos, que pode assumir papel relevante, é a sismologia do local propriamente dito e da região. Em certas áreas sismicamente ativas do globo, os

critérios sísmicos estão entre os critérios dominantes no processo de exclusão de locais destinados a construção de instalações nucleares.

Face às conseqüências radiológicas perigosas que poderiam advir da ocorrência de solicitações sísmicas em tais locais, internacionalmente são adotados valores mínimos de solicitação sísmica, mesmo para áreas consideradas assísmicas. Até há pouco tempo, em virtude do desconhecimento da ocorrência de eventos sísmicos no continente brasileiro, o Brasil era considerado um país de natureza assísmica. Com a construção de grandes barragens e posterior registro de abalos sísmicos na vizinhança das mesmas, e ainda com o ingresso no Brasil na era nuclear, o que provocou a pesquisa de eventos sísmicos ocorridos no passado, houve uma reformulação do conceito de estabilidade sísmica do Brasil. No parágrafo seguinte é feito um resumo da sismicidade no Brasil.

A referência [1] consiste num trabalho de regionalização sísmica do Brasil, feito pelo Instituto Geofísico da Universidade de São Paulo para a CNEN. Nas referências [2] a [11] são abordados, também, os problemas da sismicidade no Brasil. A Tabela 1, obtida a partir da referência [1], apresenta uma relação dos sismos brasileiros de maior magnitude que já foram registrados. A Figura 1, apresenta a localização ou locais de relato de sismos no Brasil. Já a Figura 2, apresenta a localização, de acordo com Mendiguren e Richter [11], dos principais eventos sísmicos no Brasil. Algumas das referências mencionadas tratam, particularmente, da sismicidade induzida, assunto que

está tendo grande divulgação, principalmente com relação ao enchimento de reservatório de barragens no Brasil. Entretanto, o objetivo desse trabalho de tese está voltado para a sismicidade de natural e não para a sismicidade induzida. De acordo com as referências consultadas, o sismo de maior magnitude, já registrado no Brasil, foi o de 31.01.1955, ocorrido no noroeste de Mato Grosso. Segundo a referência [1], esse sismo teve uma magnitude "Richter" de 6,6. Os outros sismos maiores apresentaram magnitudes Richter entre 4,5 e 5,5.

A sismicidade do local destinado a construção de instalações nucleares é objeto de consideração por parte da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) no processo de licenciamento dessas instalações. Atualmente, a ABNT, através do COBREN, Comitê Brasileiro de Energia Nuclear, está preparando uma norma que regulamenta as "Ações Sísmicas para Projeto de Instalações Nucleares".

No projeto das unidades I e II, das Centrais Nucleares de Angra dos Reis, foram utilizados, total ou em parte, os conceitos apresentados nesta dissertação. As outras instalações do ciclo estão utilizando, também, esses conceitos na determinação dos sismos máximos associados com os locais das mesmas.

## 2.2 Legislação e Guias Regulatórios

Os procedimentos que estão sendo utilizados no Brasil, no processo de licenciamento de instalações nucleares são similares aos adotados nos Estados Unidos que já possuem ampla expe

riência nessa área.

Nos Estados Unidos, o órgão licenciador dessas instalações é a NRC ("Nuclear Regulatory Commission"). Antes de iniciar a construção de uma instalação nuclear, o proprietário tem que estar de posse de uma licença emitida pela NRC. Para obter essa licença o proprietário tem que submeter à NRC, para julgamento, um documento denominado Relatório de Análise de Segurança. Esse relatório apresenta o resultado dos estudos realizados, abrangendo a instalação nuclear bem como o ambiente da mesma, onde o proprietário demonstra o quão segura será a sua instalação. Os assuntos tratados nesse Relatório deverão estar em consonância com as exigências do Código de Leis Federais ("Code of Federal Regulations - CFR"), documentação que tem força de lei. A NRC publica Guias Regulatórios, que não são de caráter legal, os quais fornecem informações mais detalhadas sobre assuntos apresentados no CFR. Esses guias tem por finalidade orientar o proprietário na elaboração e disposição dos assuntos contidos nos relatórios, de modo a facilitar o julgamento, pela NRC, de tais relatórios quanto a sua aceitabilidade para efeito de emissão da respectiva licença.

No Brasil, a CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) é o órgão similar a NRC dos Estados Unidos. Não existe, no Brasil, um documento equivalente ao CFR. Entretanto, existem vários decretos e leis que procuram oficializar alguns assuntos abordados no CFR. No que diz respeito aos guias regulatórios, para formato padrão de apresentação de Relatórios de Análise de Segurança, a CNEN está emitindo-os na forma de Normas. Como estas Normas são praticamente adaptações de documentos norte-americanos, somente esses documentos serão mencionados no presente trabalho.

Os critérios básicos da NRC a serem seguidos pelo proprietário de uma instalação nuclear são publicados no Diário Oficial ("Federal Register"). O documento nº 10 do Diário Oficial (10 CFR) é o que se aplica a área de energia. Nesse documento, as partes 50 e 100, denominadas, respectivamente, de "Licenciamento de Instalações de Produção e Utilização" e "Critérios para Locais de Reatores" são as mais importantes. O apêndice A da parte 50 [12], apresenta os "Critérios Gerais de Projeto para Centrais Nucleares\*". O nº 2 desses critérios é denominado "Bases de Projeto para Proteção Contra Fenômenos Naturais", onde é exigido que certas partes de estruturas, sistemas e componentes de uma central nuclear, importantes para a segurança, sejam projetadas para resistir ao efeito de sismos. O apêndice A da parte 100 [13], apresenta os "Critérios Sísmicos e Geológicos de Localização" pertinentes a uma central nuclear. Esse apêndice tem como finalidade a obtenção de dois sismos de projeto para a instalação e ainda determinar se a instalação de verá ser projetada, também, para resistir ao efeito de falhamentos de superfície.

Nas referências [14] a [20] são relacionados alguns guias regulatórios americanos voltados, total ou em parte, para a área de sismologia e/ou engenharia sísmica. A referência [14] trata do formato e conteúdo de Relatórios de Análise de Segurança para centrais nucleares. Já a referência [20] trata dos critérios gerais de viabilidade de locais para centrais nucleares.

Embora os guias regulatórios e outros documentos da NRC, sejam específicos para centrais nucleares, eles tem sido,

com devidas adaptações, utilizados para outras instalações do ciclo do combustível nuclear.

### 3. CONCEITOS DINÂMICOS E ESPECTRAIS

O objetivo deste capítulo é introduzir os conceitos básicos relacionados com a formulação do problema dinâmico, a qual serve de base para obtenção do espectro de resposta. É introduzido, também, o conceito de espectro de Fourier.

No item 3.1, precedendo a formulação da equação de movimento, é apresentada uma série de definições pertinentes à análise dinâmica de sistemas com comportamento linear. No item 3.2 são abordados os parâmetros espectrais, os quais no caso em questão, representam respostas máximas, reais ou probabilísticas, de modelos lineares, amortecidos, de um grau de liberdade. O espectro de Fourier é apresentado no item 3.3. No item 3.4 são apresentadas as alternativas disponíveis para, partindo-se de uma excitação no domínio do tempo, chegar-se a resposta de um sistema, também expressa no domínio do tempo.

#### 3.1 Conceituação do Problema Dinâmico

O problema de se calcular os efeitos de sismos sobre estruturas, ou sobre o próprio terreno, é fundamentalmente um problema de vibrações dinâmicas, o qual engloba três fatores básicos: o sistema analisado, a excitação do ambiente e a resposta do sistema. Esses fatores serão analisados, respectivamente , nos itens 3.1.4, 3.1.2 e 3.1.3. No item 3.1.5 são caracterizados os tipos de freqüência envolvidos num problema de análise dinâ

mica. No item 3.1.6 é feita uma caracterização de um problema dinâmico, além de ser apresentada a formulação do mesmo em termos de equações diferenciais.

### 3.1.1 Histórico

Tanto no caso de excitação, como no de resposta (definidos nos subitens seguintes) os parâmetros envolvidos, normalmente, são deslocamento, velocidade, aceleração, deformação, tensão e força. A variação da amplitude de cada um desses parâmetros em função do tempo será denominado de histórico do parâmetro. Assim, poder-se-á ter históricos de aceleração, de deslocamento, de tensões, de deformações, etc..

### 3.1.2 Excitação

A excitação é um estímulo do ambiente (força, aceleração, etc.) a um determinado sistema em estudo. A excitação dinâmica é uma função cuja amplitude varia com o tempo. A referência [27] apresenta uma classificação para os vários tipos de excitação dinâmica. A seguir serão definidos dois tipos de excitações dinâmicas de interesse para este trabalho.

#### Excitação Permanente

Nesse tipo de excitação o estímulo é descrito por

meio de um histórico periódico, o qual se repete, indefinidamente, a cada  $T_0$  segundos. O período  $T_0$ , de repetição, é o mesmo qualquer que seja o valor da amplitude de referência para medida do período [21]. A Figura 3(a) exemplifica esse tipo de histórico.

### Excitação Transiente

É o tipo de excitação no qual o histórico do estímulo é diferente de zero, somente num período de tempo  $T_d$ , relativamente curto, no qual ocorrem variações significativas [21]. Na Figura 3(b) é caracterizado esse tipo de histórico.

#### 3.1.3 Resposta

É uma medida quantitativa de como o sistema reage a uma determinada excitação do ambiente. A função de resposta dinâmica é também dependente do tempo. A resposta dinâmica pode ser classificada em Resposta de Vibração Livre e Resposta Forçada.

#### Resposta de Vibração Livre

É a resposta de um sistema quando nenhuma excitação dinâmica do ambiente é aplicada ao mesmo. A energia anteriormente armazenada, na forma de condições iniciais impostas ao sistema, é que produz essa resposta. Para um sistema linear, essa res

posta é descrita a partir de solução da equação diferencial homogênea associada a equação de movimento do sistema. Essa solução é conhecida como solução complementar da equação de movimento forçado.

### Resposta Forçada

É a resposta do sistema, em função do tempo, produzida por uma excitação dinâmica do ambiente aplicada ao mesmo. Se a excitação aplicada ao sistema é do tipo permanente, então a resposta total do mesmo é igual a soma de duas respostas, uma transiente e outra permanente. Quando o amortecimento é positivo, o que ocorre para a maioria dos casos práticos, a parcela transiente é do tipo exponencial decrescente; a partir de um determinado instante passa a existir somente a resposta permanente. A Figura 4 ilustra esse tipo de resposta.

#### 3.1.4 Parâmetros Característicos do Comportamento Dinâmico de Um Sistema

Existem vários modelos dinâmicos para representar um sistema sob ações dinâmicas. De um modo geral, as propriedades do sistema são traduzidas através de três parâmetros básicos, o amortecimento, a força elástica e a força de inércia do sistema.

##### a) Amortecimento

O amortecimento é o mecanismo através do qual o

sistema dissipa energia, seja em função do tempo ou em função da distância [22]. Nos modelos, normalmente utilizados, esse fenômeno é representado através de um elemento denominado amortecedor. Há vários tipos de amortecimentos sendo que o amortecimento do tipo viscoso é, normalmente, o que tem maior utilização.

#### a.1) Amortecimento Viscoso

Esse tipo de amortecimento ocorre quando, no sistema vibrante, cada partícula é resistida por uma força cuja amplitude é proporcional a amplitude da velocidade da partícula e cujo sentido é oposto ao da partícula [22]. Esse amortecimento será expresso nos modelos matemáticos através do coeficiente de amortecimento representado pela letra "c".

#### a.2) Amortecimento Crítico

O amortecimento crítico é definido como o amortecimento viscoso mínimo que permite ao meio deslocado retornar a sua posição inicial sem oscilar. Um sistema oscila em relação a um determinado valor de referência quando a amplitude do movimento das partículas, assume, alternadamente, valores maiores e menores do que o valor de referência [22]. O amortecimento crítico será representado nos modelos matemáticos através do coeficiente de amortecimento crítico  $C_c$ , dado pela fórmula abaixo:

$$C_c = 2 mW$$

(Eq. 1)

onde "m" é a massa e "W" é a frequência natural de vibração do sistema analisado.

### a.3) Fator de Amortecimento

Face à dificuldade de determinar-se o amortecimento real de um meio, normalmente trabalha-se com um outro parâmetro denominado fator de amortecimento. Esse novo parâmetro, no caso de um sistema com amortecimento do tipo viscoso, é definido como a razão entre o coeficiente de amortecimento real e o coeficiente de amortecimento crítico. A equação (2) dá a expressão matemática para esse fator

$$\xi = \frac{C}{C_c} = \frac{C}{2mW} \quad (\text{Eq. 2})$$

Normalmente esse fator é expresso em percentagem.

### b) Propriedades Elásticas

Quando a um sistema é aplicada uma excitação, um dos mecanismos que traduz a capacidade do sistema em reagir à mesma, utilizando-se das suas propriedades elásticas, é traduzido através da constante de força elástica. A equação (3) dá a expressão matemática para essa constante.

$$K = f_s/v \quad (\text{Eq. 3})$$

onde  $f_s$  é a força elástica do sistema e  $v$  é o deslocamento resultante.

### c) Força de Inércia

É o outro mecanismo, através do qual o sistema reage à excitação. Nesse caso, a reação é proporcionada através da própria massa do sistema. De acordo com o princípio d'Alembert, a força de inércia, dada pela equação (4), é igual ao produto da massa pela aceleração da própria massa.

$$f_I = m \cdot \ddot{v} \quad (\text{Eq. 4})$$

### 3.1.5 Tipos de Freqüências de Vibração

Na análise dinâmica podem ser distinguidos três tipos gerais de freqüências: as freqüências naturais amortecida e não amortecida e a freqüência ressonante.

#### a) Freqüências Naturais

São as freqüências correspondentes à vibração livre de um sistema linear. No caso em que o sistema não possui amortecimento, o sistema vibra devido as suas características físicas próprias (massa e forma) e às forças elásticas restauradoras, que são desenvolvidas quando o sistema (preso em determinados pontos) é deslocado numa determinada direção e então

liberado. Nesse caso essa freqüência não amortecida, normalmente referida somente como freqüência natural, é dada pela expressão:

$$W = \sqrt{k/m} \quad (\text{Eq. 5})$$

No caso de haver amortecimento, o sistema linear correspondente passa a vibrar com uma freqüência amortecida, a qual é menor do que aquela anteriormente definida. Essa nova freqüência, além dos parâmetros já mencionados, passa a ser função, também, do amortecimento. Normalmente ela é denominada de freqüência amortecida, cuja expressão é dada a seguir:

$$W_a = W \sqrt{1 - \xi^2} \quad (\text{Eq. 6})$$

Como nos sistemas estruturais usuais o fator de amortecimento é normalmente pequeno ( $\xi < 20\%$ ), a freqüência amortecida difere pouco da freqüência natural. Assim, na maioria dos casos a freqüência amortecida é assumida como sendo igual à freqüência natural.

#### b) Freqüência Ressonante

Num problema de vibrações dinâmicas, além das freqüências naturais, características próprias da constituição do sistema analisado, existe uma outra freqüência de interesse, que resulta da comparação entre a freqüência natural e a freqüência da excitação permanente do sistema. No caso de um siste

ma sem amortecimento, quando as referidas frequências se igualam ocorre o fenômeno denominado ressonância, no qual a resposta do sistema tende para um valor infinito. Não se tem uma equação específica para expressar essa frequência, a qual é denominada frequência de ressonância. Entretanto, para sistemas pouco amortecidos, a frequência ressonante está próxima daquela em que ocorre a resposta máxima do sistema sob ação de uma excitação permanente senoidal. Assim, para sistemas com pouco amortecimento, que são os de interesse em termos de ressonância, a frequência ressonante é admitida como sendo aproximadamente igual a frequência em que ocorre a resposta máxima do sistema. Essa última frequência, aqui denominada de frequência de máximo,  $W_M$ , é definida pela seguinte equação:

$$W_M = W \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (\text{Eq. 7})$$

### 3.1.6 Formulação da Equação de Movimento

Proceder-se-á neste item a uma caracterização de um problema dinâmico, a qual normalmente é feita em comparação a um problema estático. A diferença fundamental entre um problema estático e um dinâmico, diz respeito às forças de inércia que são originadas no caso de vibrações dinâmicas. No caso de um problema estático, as deformações e esforços internos desenvolvidos são função direta das excitações (externas) aplicadas ao sistema analisado. Nesse caso as respostas estruturais podem ser calculadas por simples equilíbrio de forças. Já num pro

blema dinâmico, as deformações resultantes estão associadas com acelerações que produzem forças de inércia resistentes às acel<sup>er</sup>ações. Assim, os esforços internos tem que equilibrar não somente às excitações externas, mas também as forças de inér<sup>ci</sup>a resultantes das acelerações do sistema. Assim, num problema dinâmico, as forças de inércia resultam dos deslocamentos os quais por sua vez dependem das forças de inércia. Esse ciclo fechado de causa e efeito é resolvido formulando-se o problema em termos de equações diferenciais.

As propriedades físicas essenciais de um sistema linearmente elástico, quando submetido a uma excitação dinâmica, incluem sua massa, as propriedades elásticas (flexibilidade ou rigidez), seu mecanismo de dissipação de energia (amortecimen<sup>to</sup>) e a fonte externa de excitação. A massa está diretamente re<sup>l</sup>acionada com as forças de inércia desenvolvidas em resposta à aceleração do sistema.

Na análise dinâmica de um sistema, um dos problemas que se apresenta diz respeito à massa do mesmo, a qual não é um parâ<sup>m</sup>etro discretizado\* e sim contínuo. Para contornar esse proble<sup>m</sup>a, um dos procedimentos utilizados é substituir-se o sistema con<sup>t</sup>ínuo por um discretizado. Nesse caso são escolhidos pon<sup>to</sup>s-chaves, onde são concentradas frações da massa total do sistema. O número de deslocamentos associados a essas massas con<sup>t</sup> centradas é denominado número de graus de liberdade dinâmico do sistema. Esse novo sistema discretizado obtido é um modelo do sis<sup>t</sup>ema contínuo. No caso de se ter um modelo, no qual somente uma única massa seja representativa de toda a massa contínua do sis<sup>t</sup>ema, ter-se-á um modelo de um grau de liberdade.

A seguir, antes da formulação da equação de movimento, é feita uma caracterização dos modelos (osciladores) que servirão de base para a formulação da referida equação. Faz-se ainda menção ao parâmetro principal utilizado como dado de excitação do modelo, bem como o local onde ele é aplicado.

### Oscilador

O modelo mais simples de um grau de liberdade, e que engloba, além da massa, as propriedades elásticas e o mecanismo de dissipação de energia do sistema é mostrado na Figura 5(a). Cada uma dessas propriedades (massa, amortecimento, força elástica) é assumida como concentrada num único elemento físico. A esse modelo denomina-se oscilador amortecido de um grau de liberdade. Na Figura 5(b) é mostrado um outro tipo equivalente de oscilador.

### Excitação do Modelo

É possível projetar-se instrumentos que possam registrar deslocamentos, velocidades ou acelerações do terreno produzidos por sismos. Entretanto, usualmente, os instrumentos são projetados para registrar a variação das amplitudes das acelerações do terreno, em função do tempo, durante a ocorrência de um evento sísmico. Assim, normalmente a excitação dinâmica do modelo é feita em termos de acelerações do terreno. No caso do

oscilador mostrado na Figura 5(a) a aceleração é aplicada na direção da base do modelo. Já no caso da Figura 5(b), a aceleração do terreno é aplicada perpendicularmente à base do modelo.

### Equação do Movimento e Respostas

É possível demonstrar-se que o modelo apresentado na Figura 5(a), com a aceleração aplicada na base do modelo, pode ser substituído por aquele mostrado na Figura 6, onde a excitação é transformada numa força, aplicada diretamente à massa, cujo módulo é igual ao produto da massa pela aceleração da base do modelo [23]. Assim, com base no modelo da Figura 6, a formulação do equilíbrio de todas as forças atuantes sobre a massa leva à seguinte equação:

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = -M\ddot{y}_g \quad (\text{Eq. } 8)$$

onde  $y$  é o deslocamento relativo da massa e  $\ddot{y}_g$  é a aceleração do terreno (ou da base). O sinal negativo nessa equação indica que a carga efetiva (produto da massa pela aceleração) opõe-se ao movimento de aceleração do terreno. Essa equação pode ser rearranjada, assumindo a seguinte forma:

$$\ddot{y} + 2\xi W\dot{y} + W^2y = -\ddot{y}_g \quad (\text{Eq. } 9)$$

sendo que  $W$  é a frequência natural e  $\xi$  o fator de amortecimento.

O deslocamento resposta, dessa equação, pode ser obtido através da integral de Duhamel, a qual é dada pela equação:

$$Y(t) = \frac{1}{MW_a} \int_0^t -MY_g(T) e^{-\xi W_a(t-T)} \text{sen } W_a(t-T) dT \quad (\text{Eq. 10})$$

Como visto anteriormente, a maioria dos sistemas estruturais típicos apresentam fatores de amortecimento pequenos, o que permite fazer-se  $W_a = W$ . Desprezando-se o sinal negativo da equação (10), que na realidade não é importante no caso de excitação sísmica [23], chega-se a equação:

$$Y(t) = \frac{1}{W} \int_0^t Y_g(T) e^{-\xi W(t-T)} \text{sen } W(t-T) dT \quad (\text{Eq. 11})$$

Observa-se que a equação (9) fornece, na realidade, os deslocamentos relativos à base do modelo. Assim, as respostas em termos de velocidade e aceleração calculados a partir da equação (11) representarão, também, valores relativos. A aceleração absoluta da massa, a que interessa sob o ponto de vista das forças de inércia desenvolvidas, é obtida somando-se a aceleração relativa com a aceleração da base do modelo.

### 3.2 Parâmetros Espectrais

Na literatura sísmica é comum trabalhar-se com parâme

tros máximos calculados a partir da equação (11). O primeiro passo é calcular uma expressão para o deslocamento relativo máximo da massa, com relação à base, o qual é dado pela equação:

$$Y_{M\grave{A}X} = \frac{1}{W} \left[ \int_0^t \ddot{y}_g(T) e^{-\xi W(t-T)} \text{sen } W(t-T) dT \right]_{M\grave{A}X} \quad (\text{Eq. 12})$$

A partir dessa equação é definido o primeiro parâmetro de interesse, dado pela equação (13), o qual é denominado como Pseudo-velocidade Espectral da aceleração do terreno.

$$Sv(\xi, W) = \left[ \int_0^t \ddot{y}_g(T) e^{-\xi W(t-T)} \text{sen } W(t-T) dT \right]_{M\grave{A}X} \quad (\text{Eq. 13})$$

Os outros dois parâmetros são o Deslocamento Espectral  $Sd$ , o qual é o próprio deslocamento relativo máximo, e a Pseudo-aceleração Espectral  $Sa$ .

$$Sd = Y_{M\grave{A}X} = Sv(\xi, W)/W \quad (\text{Eq. 14})$$

$$Sa = W \cdot Sv(\xi, W) \quad (\text{Eq. 15})$$

Ao longo desse trabalho os três parâmetros espectrais mencionados serão referidos somente como: deslocamento, velocidade e aceleração espectrais.

A velocidade espectral  $S_v$ , está diretamente relacionada à velocidade relativa máxima entre a massa e a base do modelo. Entretanto, ela não é exatamente igual a velocidade relativa máxima. Para sistemas com freqüências de vibração moderada a alta, a velocidade espectral é aproximadamente igual a velocidade relativa máxima; já para sistemas de freqüências muito baixas a diferença pode ser considerável. Matematicamente, é possível demonstrar que a velocidade espectral, como definida anteriormente, está intimamente ligada à energia máxima que é introduzida no sistema pelo abalo sísmico; portanto ela está, também, intimamente ligada à energia máxima que o sistema tem que estar apto para armazenar ou dissipar sem sofrer dano.

A aceleração espectral é exatamente igual a aceleração máxima para sistemas sem amortecimento, e não é muito diferente da aceleração máxima para sistemas com fatores de amortecimento moderados, numa faixa de freqüências completa indo de freqüências muito baixas a muito altas [24].

### 3.2.1 Espectros de Resposta

Como pode ser observado na equação (13),  $S_v$  depende não somente do histórico do movimento do terreno, mas também da freqüência de vibração e do amortecimento do oscilador. Assim, para um determinado registro sísmico de aceleração do terreno, assumindo-se um dado fator de amortecimento, é possível calcular valores de  $S_v$  em função das freqüências de vibração. O grá

fico obtido a partir da utilização desse procedimento é denominado de espectro de resposta. A Figura 7 esquematiza o cálculo de uma curva do espectro de resposta, correspondente a um determinado fator de amortecimento, em função de vários valores de frequência natural de vibração. A frequência natural "W", dada pela equação (5), engloba os parâmetros de massa e rigidez, os quais caracterizam o comportamento elástico do sistema analisado. A variação de W pode ser obtida, por exemplo, variando-se a rigidez "K" no modelo; esse foi o critério adotado na elaboração da Figura 7.

O espectro de resposta  $S_v$ , descrito no parágrafo anterior, é denominado Espectro de Resposta de pseudo-velocidade do movimento sísmico do terreno. Utilizando-se as equações (14) e (15), obter-se-ão, respectivamente, os espectros de resposta de deslocamento e aceleração para o mesmo histórico sísmico utilizado para calcular  $S_v$ . A Figura 8 apresenta um exemplo típico de espectro de resposta de pseudo-velocidade para um sismo real.

Face ao relacionamento, através da frequência W, existente entre os parâmetros  $S_v$ ,  $S_d$  e  $S_a$ , eles são normalmente apresentados num único gráfico logarítmico especial\*. A Figura 10 apresenta, nesse tipo de gráfico, os espectros  $S_v$ ,  $S_d$  e  $S_a$ , correspondentes a um sismo cujo histórico de acelerações é mostrado também nessa mesma figura.

### Interpretação do Espectro de Resposta

A Figura 11(b) apresenta o espectro de resposta obti

do a partir do sismo de El Centro - 1940; é um exemplo típico de espectro de resposta para aproximadamente todos os tipos de movimentos sísmicos do terreno. O exemplo apresentado será interpretado em função do comportamento do modelo massa-mola-amortecedor.

Observa-se que na parte esquerda do espectro mostrado na Figura 11(b), correspondente a sistemas de frequências muito baixas, as respostas, independentemente do fator de amortecimento, tendem para um valor assintótico correspondente ao deslocamento máximo do terreno. Um sistema de baixa frequência corresponde a um sistema tendo uma massa grande e uma mola muito flexível. Quando o terreno move-se relativamente rápido, a massa não tem tempo de mover-se, e portanto, a deformação máxima na mola é exatamente igual ao deslocamento máximo do terreno. Por outro lado, para um sistema de frequência muito alta, a mola é relativamente rígida e a massa muito pequena. Portanto, quando o terreno move-se, a mola rígida força a massa a mover-se do mesmo modo que o terreno, e portanto, a massa tem que ter, em cada instante, a mesma aceleração apresentada pelo terreno. Portanto, a força na mola é aquela necessária para mover a massa com a mesma aceleração do terreno; nesse caso a aceleração máxima da massa é precisamente igual à aceleração máxima do terreno. Isto é mostrado pelo fato de que todas as curvas, no lado direito da Figura 11(b), se aproximam de um valor assintótico correspondente à aceleração máxima do terreno.

Para sistemas com frequências intermediárias, o que ocorre é uma amplificação do movimento. Em geral, o fator de amplificação para deslocamento é menor do que para velocidade,

o qual por sua vez é menor do que para aceleração.

Os espectros de resposta para outros sismos são consistentes com aquele mostrado na Figura 11(b). A forma geral de um espectro de resposta é caracterizada por uma região central de resposta amplificada e duas regiões limitadoras de respostas. Nessas últimas regiões ocorre o seguinte: para sistemas de baixa frequência o deslocamento resposta é igual ao deslocamento máximo do terreno e para sistemas de alta frequência, a aceleração resposta é igual à aceleração máxima do terreno. A Figura 12 ilustra o assunto exposto nesse parágrafo.

Na Figura 13 são apresentados dois espectros de resposta correspondentes a dois sismos típicos, onde são mostradas as respostas espectrais correspondentes às componentes horizontal e vertical desses sismos. A partir dessa Figura, pode-se ter uma idéia a respeito do valor relativo das amplitudes espectrais verticais quando comparadas às horizontais.

#### Utilidade do Espectro de Resposta

O espectro de resposta é especialmente utilizado na área de engenharia sísmica, uma vez que ele combina características importantes do movimento sísmico do terreno com os valores de amortecimento e de frequência envolvidos no cálculo de respostas estruturais [25]. A partir do espectro de resposta, o engenheiro pode, rapidamente, avaliar como estruturas de diferentes períodos (ou frequências) irão responder à um determinado movimento vibratório do terreno [26].

A Figura 15 apresenta os deslocamentos, velocidades e acelerações espectrais correspondentes a um fator de amortecimento de 2%, calculados a partir do sismo de Taft - 1952, cujo acelerograma é mostrado na Figura 14(a). Cada um dos gráficos da Figura 15, representa a mesma informação, uma vez que para qualquer período (ou freqüência) as ordenadas podem ser relacionadas entre si através do valor correspondente ao período (ou freqüência) natural [26]. Como pode ser observado na Figura 15, uma estrutura com um período natural muito grande é a que sofrerá o maior deslocamento espectral, ao passo que aquela com um período natural pequeno é a que experimentará maior aceleração espectral. A decisão sobre qual gráfico que terá maior utilidade dependerá do tipo de comportamento estrutural que esteja sendo analisado.

### Limitação dos Espectros

Até agora foram discutidos somente os espectros para sistemas linearmente elásticos. Os espectros inelásticos não serão abordados nesse trabalho. A limitação dos espectros de resposta aqui apresentados é que a resposta do oscilador é assumida como sendo linearmente elástica. Assim, o espectro de resposta não pode definir a grandeza do dano a partir de um determinado evento sísmico, uma vez que os danos envolvem deformações inelásticas. Apesar disso, a parcela de deformação elástica esperada, a partir de um determinado sismo, fornece uma indicação significativa da intensidade do movimento do terreno. Além

disso, o espectro de resposta indica as deformações máximas correspondentes à estruturas de vários períodos de vibração.

### Idealização dos Espectros

A Figura 8 apresenta o espectro de velocidade resposta à componente NS do sismo de El Centro - 1940. Os picos e depressões apresentadas pelas curvas espectrais são devidas à ressonâncias locais durante o registro sísmico. De acordo com a referência [23], tais irregularidades não são de fundamental importância. Além do mais, a experiência tem mostrado que há diferenças drásticas entre registros de sismos com magnitudes e distâncias similares, podendo as respostas estruturais, produzidas por tais sismos, serem as mais diferentes possíveis [27]. Com base nesses fatos, partiu-se para a elaboração de espectros idealizados com formas mais definidas e elaborados a partir de vários registros sísmicos. Na Figura 9 é apresentado um exemplo específico de espectro idealizado para o sismo de El Centro - 1940. A Figura 16 apresenta, também, vários espectros idealizados, inclusive no gráfico logarítmico especial. Esses espectros serão discutidos no próximo subitem.

#### 3.2.2 Espectros de Resposta de Projeto

Normalmente não se trabalha com espectros de resposta provenientes de um único registro de aceleração sísmica do ter

reno. Na realidade, o que se faz é calcular os espectros de resposta que sejam representativos de vários registros sísmicos. Na obtenção desses espectros seguem-se as seguintes etapas:

a) São calculados os espectros de resposta correspondentes a cada registro sísmico;

b) Submete-se cada um dos espectros calculados a um processo de normalização em relação a um parâmetro padrão escolhido;

c) Procede-se a uma análise estatística dos espectros normalizados;

d) Procuram-se curvas, ou segmentos de retas interconectados, que melhor se ajustem aos espectros calculados na alínea c.

Os espectros de resposta obtidos por meio desse procedimento são denominados espectros de resposta de projeto\*. Na realidade esses espectros de resposta fornecem somente coeficientes de projeto, os quais deverão ser ajustados em função do sismo de projeto selecionado para o local que esteja sendo analisado. A seguir serão abordados alguns itens importantes no processo de obtenção dos espectros de resposta de projeto.

### Normalização

Uma vez que os históricos sísmicos são registrados sob

diferentes condições geo-sismológicas, o que resulta, inclusive, em diferentes valores máximos de aceleração, velocidade e deslocamento do terreno, faz-se necessário, quando da elaboração dos espectros de resposta, selecionar um parâmetro de referência de modo que os resultados individuais possam ser comparados. Tais parâmetros, normalmente citados na literatura sísmica, são: aceleração, velocidade ou deslocamento máximos do terreno. A Figura 16(b) apresenta um espectro normalizado em relação à velocidade.

#### Análise Estatística dos Dados

Nessa etapa são calculadas as amplitudes dos espectros de resposta por meio de determinados parâmetros estatísticos que passam a ser os valores representativos dessas amplitudes. Na literatura sísmica, os parâmetros estatísticos mais comumente citados são a média\* e o valor MSD\*. Assim, se as amplitudes calculadas a partir dos espectros de resposta individuais forem representadas pela média, ter-se-á um espectro de resposta médio. Já, se as amplitudes forem representadas pelo valor MSD dos espectros analisados, ter-se-á um espectro de resposta MSD.

De acordo com a referência [28], os vários estudos realizados por Newmark et al [28] indicaram que a função de distribuição para os valores espectrais normalizados, ou para os fatores de amplificação, relativos ao movimento máximo do terreno,

é de um tipo que pode ser caracterizada por uma distribuição de probabilidades lognormal\*. Assim, com base nessa distribuição de probabilidades, o espectro médio significa que as amplitudes espectrais terão uma probabilidade de 50% de não serem excedidas. Já no espectro MSD as amplitudes terão uma probabilidade de 84,1% de não serem excedidas. O espectro de resposta de projeto do RG 1.60, o qual é apresentado na Figura 17 é do tipo MSD.

### 3.3 Representação de Funções no Domínio da Freqüência

Nesse subitem são introduzidos os conceitos de Espectro de Fourier, Transformada de Fourier Discreta e Transformada de Fourier Simplificada.

#### 3.3.1 Espectro de Fourier

Uma das formas de representação dos efeitos de sismos pode ser feita, por exemplo, através de um histórico de aceleração. A única informação obtida através desse histórico é como a amplitude das acelerações varia com o tempo. Sabe-se que qualquer função transiente, da qual o referido histórico é um exemplo típico, pode ser representado como a soma de componentes harmônicos de várias freqüências. É claro que, para uma representação completa de uma função transiente qualquer, por meio de componentes harmônicos, seria necessário um número infinito de

frequências. Entretanto, para cada função específica, existem certos componentes harmônicos (que podem ser identificados através de suas frequências), que são preponderantes na composição da função original. Isto equivale a dizer, que para determinados propósitos, pode-se trabalhar com uma soma finita de componentes harmônicos. O problema que se apresenta é saber quais as frequências que são predominantes na composição de um determinado histórico de aceleração. Esta informação pode ser obtida por meio do espectro de Fourier, onde se transforma uma função, periódica ou transiente, do domínio do tempo para o domínio da frequência.

No Anexo B são apresentados alguns conceitos sobre séries, integral e transformada de Fourier, necessários ao entendimento do que seja o espectro de Fourier. O espectro de Fourier pode ser definido a partir das seguintes equações:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (\text{Eq. 16})$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (\text{Eq. 17})$$

$$\phi(\omega) = \text{tg}^{-1} \left[ -\frac{b(\omega)}{a(\omega)} \right] + 2n\pi, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{Eq. 18})$$

onde (16) é denominada a Transformada de Fourier, (17) é a Transformada Inversa de Fourier e (18) é o ângulo de fase. A função complexa  $F(\omega)$  é denominada Espectro de Fourier. A amplitude  $|F(\omega)|$  e o argumento  $\phi(\omega)$  são chamados respectivamente, de Es

pectro de Amplitude e Espectro de Fase. A Figura 19 apresenta exemplos típicos de Espectros de Fourier, de Amplitude e Fase, calculados para diversos tipos de funções. Contrastando com o espectro de Fourier para uma função periódica, mostrado na Figura 18, o espectro de uma função transiente é uma função contínua ao longo da frequência. A Figura 20 apresenta o espectro de amplitude de Fourier para o sismo de Taft - 1965.

### 3.3.2 Análise Numérica no Domínio da Frequência

A aplicação formal da equação (19), para expressar uma função no domínio da frequência, só é possível nos casos em que se conhece a transformada de Fourier para a função analisada.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (\text{Eq. 19})$$

Mesmo nos casos em que se conhece a transformada, a avaliação das integrais resultantes pode ser um processo tedioso. Assim, para tornar prático a análise no domínio da frequência, tornou-se necessário formulá-la em termos de um procedimento baseado em análise numérica. A formulação numérica pode ser dividida em duas etapas: a obtenção das expressões da transformada de Fourier discreta (DFT) correspondentes às equações (16) e (17) e o desenvolvimento de uma técnica numérica eficiente para avaliação das equações DFT. Essas duas etapas são suscintamente relacionadas a seguir.

### Transformada de Fourier Discreta

As expressões discretas da Transformada de Fourier para uma função transiente são obtidas a partir da hipótese de que a função é periódica. A minimização dos erros resultantes dessa aproximação é obtida a partir de certas considerações sobre o período da função periódica básica. As formas discretas correspondentes às equações (16) e (17) são dadas, respectivamente pelas equações (20) e (21):

$$f(t_m) = \frac{\Delta w}{2\pi} \sum_{n=0}^{N-1} F(\bar{w}_n) e^{(2\pi i \frac{nm}{N})} \quad (\text{Eq. 20})$$

$$F(\bar{w}_n) = \Delta t \sum_{m=0}^{N-1} f(t_m) e^{(-2\pi i \frac{nm}{N})} \quad (\text{Eq. 21})$$

$$w = \frac{2\pi}{T_p} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$t_m = m \Delta t \quad (\text{Eq. 23})$$

onde  $T_p$  é o período da função periódica básica,  $N$  é o número de intervalos  $\Delta t$  em que o período  $T_p$  é dividido, e  $t_m$  é o tempo correspondente à função discretizada.

As equações (20) e (21) constituem o par caracterizador da Transformada de Fourier Discreta.

## Transformada de Fourier Simplificada

A técnica da Transformada de Fourier Simplificada - (FFT) é um algoritmo para computador que se constitui numa ferramenta eficiente e poderosa para análise no domínio da frequência, a partir das equações DFT. Essa técnica dispense muito menos tempo do que a análise convencional da transformada de Fourier. A vantagem principal desse método é que, nos cálculos com computador, tem-se uma maior economia de tempo e memória. Esse é o algoritmo básico utilizado no programa SHAKE.

### 3.4 Alternativas para Cálculo da Resposta Dinâmica de Um Sistema

Antes de ir diretamente ao tema, serão introduzidos dois conceitos iniciais que, além de serem citados posteriormente no texto, servirão para esclarecer as citadas alternativas de cálculo de resposta dinâmica.

#### 3.4.1 Convolução e Deconvolução

Esses conceitos dizem respeito ao relacionamento entre a excitação e resposta de um sistema através da função representativa do comportamento do mesmo durante a excitação. Para efeito de definição  $f(t)$ ,  $g(t)$  e  $h(t)$  representarão, respectivamente, excitação, resposta e comportamento do sistema.

### Convolução

O processo de obtenção da resposta do sistema, sendo conhecidos a excitação e a função descritiva do comportamento do mesmo é denominado convolução, e é expresso pela seguinte equação:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(T) h(t-T) dT \quad (\text{Eq. 24})$$

Essa integral é representada pela notação dada a seguir, sendo que o sinal  $\otimes$  significa convolução.

$$g(t) = f(t) \otimes h(t) \quad (\text{Eq. 25})$$

No caso da análise de pacotes de solos submetidos à excitação dinâmica, a função  $h(t)$  seria identificada como sendo a função de transferência do sistema.

### Deconvolução

É um outro conceito diretamente ligado ao conceito de convolução. O processo de obtenção de uma possível excitação devida a uma determinada resposta do sistema é conhecido como deconvolução, o qual é representado pela seguinte notação:

$$f(t) = g(t) \otimes \frac{1}{h(t)} \quad (\text{Eq. 26})$$

### 3.4.2 Funções nos Domínios do Tempo e da Freqüência

A partir de uma determinada excitação, expressa em função do tempo, há duas alternativas para se chegar à resposta do sistema, expressa, também, em função do tempo. A primeira, é o procedimento direto, em que a resposta é calculada através da integral de convolução. A segunda é o procedimento indireto, no qual antes de se chegar à resposta final, expressa em função do tempo, são feitas algumas transformações no domínio da freqüência por meio dos conceitos de Fourier. A Figura 21 ilustra esses dois procedimentos.

#### Procedimento Indireto

Uma vez conhecido o comportamento de um sistema linear, em termos da filtragem de freqüências (caracterizado por uma função  $K(\omega)$ ), o processo clássico para cálculo da resposta a uma determinada excitação segue as seguintes etapas:

(1) Obter o espectro (transformada de Fourier) da excitação;

(2) Multiplicar o espectro de Fourier obtido em (1) pela função  $K(\omega)$  do sistema, obtendo-se  $G(\omega)$ ;

(3) Tomar a transformada inversa de Fourier de  $G(\omega)$  para obter a resposta do sistema, em função do tempo.

Nesse procedimento o sistema é visto como se fosse um filtro que alterasse as amplitudes relativas e as fases dos componentes do espectro de Fourier da excitação.

Quando o espectro da excitação consiste de poucos componentes discretos, ou pode ser expresso numa forma analítica simples, e ainda quando a resposta (em termos de frequência) pode, também, ser expressa de forma analítica simples, o procedimento indireto pode ser o melhor e mais rápido caminho a ser seguido [29].

#### Procedimento Direto

Quando a função descritiva do comportamento do sistema e a excitação podem ser expressos de forma mais simples no domínio do tempo, do que no da frequência, é mais fácil ir, diretamente, da excitação à resposta, por meio da integral de convolução, dada pela equação (24). Entretanto, esse procedimento não será descrito no presente trabalho. Chama-se a atenção para o fato de que a multiplicação num domínio (tempo ou frequência), corresponde à convolução no outro domínio.

#### 4. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA

Proceder-se-á nesse capítulo a uma caracterização ,  
suscinta, dos instrumentos para detecção e registro dos movi  
mentos do terreno. Serão dispensadas considerações somente aos  
instrumentos destinados à medida das acelerações do terreno .  
A intenção não é apresentar um estudo amplo e criterioso do  
assunto, mas somente dar noções iniciais sobre os parâmetros bá  
sicos que regem o comportamento desses instrumentos, de modo que  
melhor se possa analisar os resultados do evento que se estiver  
medindo.

##### 4.1 Conceituação de Sismógrafo

Sismógrafo é o termo genérico utilizado para designar  
um dispositivo capaz de detectar, amplificar e registrar as vi  
brações do terreno, seja em termos de aceleração, velocidade  
ou deslocamento. A diversidade dos tipos de sismógrafos é devi  
da à grande variação apresentada pelos movimentos sísmicos do  
terreno. Por exemplo, a relação entre as amplitudes dos movimen  
tos dos menores e maiores sismos registrados pode atingir valores  
da ordem de  $10^9$ . Além disso o conteúdo de frequência\* de um sis  
mo, registrado próximo do local de origem do mesmo, pode dife  
rir grandemente daquele de um sismo registrado à distância [30].

## 4.2 Elementos Básicos de Um Sismógrafo

Os elementos básicos para comporem um sismógrafo completo são: um sensor, um dispositivo de condicionamento do sinal e um dispositivo registrador, cujos conceitos serão introduzidos nos parágrafos seguintes.

O sismógrafo é um instrumento que mede o movimento (deslocamento, velocidade ou aceleração) do terreno. Para se fazer tal medida necessitar-se-ia de um ponto de referência fixo, do qual não se dispõe. Em substituição, é utilizado um sistema inercial de referência, como por exemplo a massa de um pêndulo. No caso de um pêndulo vertical, quando o terreno move o ponto de apoio do pêndulo, a massa dele permanece parada. Isto é equivalente a mover o centro de gravidade do pêndulo a partir da sua posição de equilíbrio [31]. Nessa condição o movimento do pêndulo é descrito pela seguinte equação diferencial de movimento:

$$\ddot{Y} + 2\xi W\dot{Y} + W^2 Y = -\ddot{Y}_G \quad (\text{Eq. 27})$$

onde  $Y_G$  é o deslocamento relativo do ponto de apoio em relação ao ponto fixo no espaço (deslocamento do terreno) e  $Y$  é o deslocamento relativo da massa do pêndulo (deflexão do pêndulo). Os outros parâmetros caracterizadores do pêndulo são  $\xi$ , o fator de amortecimento, e  $W$  a frequência natural de vibração. O amortecimento do pêndulo pode ser obtido mecânica ou eletricamente. A Figura 22(a) ilustra os deslocamentos associados ao pêndulo. Na Figura 22(b) é apresentado um outro modelo representativo do

mesmo comportamento do pêndulo.

Relativamente a um sismógrafo completo, o pêndulo constitui o chamado sismômetro, ou seja a parte sensora do instrumento.

Uma vez escolhido o modelo físico representativo do instrumento que se deseja projetar, o passo seguinte diz respeito ao tratamento da variável em observação, a qual é a deflexão do pêndulo. Para isso é utilizado um dispositivo transdutor o qual transforma o movimento mecânico do pêndulo num outro parâmetro, o qual é ajustado e registrado. A finalidade do transdutor, no caso em questão, é a obtenção de um parâmetro que seja proporcional ao movimento relativo da massa do pêndulo. Esse parâmetro pode ser, por exemplo, um sinal elétrico. Um dos exemplos típicos de transdutores é uma bobina elétrica movendo-se num campo magnético. Nesse exemplo, a massa do pêndulo é conectada a uma bobina, a qual sofre o mesmo movimento da massa. O movimento da bobina, dentro do campo magnético, produz um sinal elétrico proporcional ao deslocamento relativo do pêndulo.

Ao conjunto de mecanismos usados para o tratamento do sinal de saída (sinal elétrico, por exemplo) do transdutor, para convertê-lo num parâmetro mensurável, em termos de aceleração, é denominado dispositivo de condicionamento do sinal.

O terceiro elemento, num sismógrafo completo, registra o sinal fornecido pelo dispositivo de condicionamento do sinal. O produto final desse dispositivo registrador em sua forma mais simples, consiste num gráfico obtido sobre uma folha de papel. Há outras formas de apresentação dos resultados as quais

não serão aqui discutidas. O dado final que se obtém de um registrador é denominado sismograma, o qual é o meio fundamental de apresentação dos dados na área de sismologia.

O tipo de movimento apresentado num sismograma (aceleração, velocidade ou deslocamento) dependerá, fundamentalmente, da frequência de vibração natural do pêndulo em relação à frequência do movimento de excitação do pêndulo.

#### 4.3 Análise da Resposta de um Sismógrafo à Excitação Permanente Senoidal

O tipo de movimento de maior interesse na caracterização dos parâmetros de um sismômetro é o movimento harmônico , dado pela seguinte equação:

$$\ddot{Y}_G = \ddot{Y}_{GO} \text{ sen } \bar{\omega} t \quad (\text{Eq. 28})$$

onde  $\bar{\omega}$  é a frequência da excitação aplicada ao sismômetro. A solução geral da equação (27) é dada pela soma de duas expressões, a primeira significando a resposta transiente à excitação aplicada e a segunda uma resposta permanente. Essa segunda é a que merece ser analisada, uma vez que a primeira, de natureza exponencial decrescente, decai rapidamente [27]. A resposta, ou a solução, permanente da equação (27) ao movimento dado por (28) tem a seguinte forma:

$$Y = \frac{m}{K} \ddot{Y}_{GO} \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \text{sen} (\bar{\omega}t - \theta) \quad (\text{Eq. 29})$$

onde  $\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega}$  sendo  $\beta$  a relação de freqüências. Fazendo-se:

$$D = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \quad (\text{Eq. 30})$$

obtém-se a seguinte forma para (29):

$$Y = \frac{m}{K} \ddot{Y}_{GO} D \text{sen} (\bar{\omega}t - \theta) \quad (\text{Eq. 31})$$

ou

$$Y = \rho \text{sen} (\bar{\omega}t - \theta) \quad (\text{Eq. 32})$$

onde  $D$  é o fator de amplificação dinâmica,  $\rho$  é a amplitude da resposta permanente, e  $\theta$  o ângulo de fase. Os parâmetros  $\rho$  e  $\theta$  são dados, respectivamente, pelas equações (33) e (34).

$$\rho = \frac{m}{K} \ddot{Y}_{GO} D \quad (\text{Eq. 33})$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\xi\beta}{1-\beta^2} \quad (\text{Eq. 34})$$

O ângulo de fase traduz o quanto a resposta (deflexão do pêndulo) está defasada em relação ao movimento aplicado ao suporte do pêndulo (movimento do terreno).

Observa-se que  $D$  é função da relação de frequências  $\beta$ , o que faz com que a amplitude também o seja. O ideal seria que se tivesse um sismômetro cuja amplitude da resposta fosse independente da relação de frequências. Isso ocorreria no caso em que se tivesse  $D = 1$ . Entretanto a condição ideal não existe. O que existe é uma combinação de valores de amortecimento e de relação de frequências, onde se tem  $D$  aproximadamente constante.

A Figura 23 apresenta o comportamento do fator de amplificação em função da relação de frequências  $\beta$ , para vários fatores de amortecimento  $\xi$ . Observa-se, nessa figura, que todas as curvas situam-se abaixo daquela correspondente a um fator de amortecimento nulo. Assim, pode-se ver que a amplitude das vibrações forçadas diminui à medida que aumenta o amortecimento. Um outro ponto interessante de ser observado, nessa mesma figura, é com relação aos pontos de máximo do fator de amplificação. Observa-se que os valores máximos da resposta permanente, para sistemas levemente amortecidos, ocorrem para valores de  $\beta$  próximos da unidade, ou seja,  $\omega = \bar{\omega}$ . A condição na qual  $\beta$  é unitário, ou seja, quando a frequência da excitação se iguala à frequência natural de vibração, é denominada ressonância. A partir da equação (30), fazendo-se  $\xi = 0$ , vê-se que a resposta permanente de um sistema não amortecido, na ressonância, tende para o infinito. Outro fato interessante é saber, para sistemas amortecidos, quais os valores de  $\beta$  correspondentes aos valores máximos dos fatores de amplificação. Pesquisando os pontos de máximo da função dada pela equação (30) chega-se à seguinte equação para  $\beta$  :

$$\beta = \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (\text{Eq. 35})$$

A partir dessa equação obtêm-se a seguinte equação para a frequência correspondente aos pontos de máximos do fator de amplificação dinâmica:

$$W_M = W \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (\text{Eq. 36})$$

Para sistemas pouco amortecidos essa é a equação utilizada como a definição de frequência ressonante.

A Figura 24 apresenta a variação do ângulo de fase com a relação de frequências  $\beta$  e o fator de amortecimento  $\xi$ . Para um fator de amortecimento nulo, pode-se observar que abaixo da ressonância tem-se  $\theta$  nulo; nesse caso a "aceleração" do ponto de apoio do pêndulo (aceleração do terreno) e o deslocamento relativo do pêndulo estão em fase. Já acima da ressonância esses dois movimentos estão defasados de  $180^\circ$ . A curva do ângulo de fase mostra uma descontinuidade no ponto de ressonância. Para fatores de amortecimento diferentes de zero as outras curvas representam o ângulo de fase correspondente. Pode ser visto que em geral o amortecimento tende a diminuir o ângulo de fase [31].

Conforme será visto posteriormente, o instrumento para medida de aceleração deve ter uma frequência natural de vibração igual a pelo menos 2,5 vezes a frequência mais alta da aceleração a ser registrada. Isso cria uma dificuldade real porque a excitação transiente contém, na verdade, harmônicos com frequências mais altas do que a frequência natural de vibração; nesse caso pode ser que uma dessas frequências seja muito próxi

ma da frequência natural do instrumento, o que provocaria ressonância no caso de amortecimento nulo. De modo a evitar esse problema é que se tem de introduzir amortecimento nesse tipo de instrumento [32].

Conforme pode ser visto na Figura 23, para um fator de amortecimento  $\xi = 0,707$  na faixa de frequências caracterizada por  $0 < \beta < 0,4$ , o valor de  $D$  é aproximadamente constante. Assim, a partir da equação (31) vê-se que a resposta indicada por esse instrumento será diretamente proporcional à amplitude do movimento aplicado ao ponto de apoio do pêndulo (movimento do terreno), desde que as frequências do movimento aplicado sejam no máximo igual a  $0,4 W$ .

Suponha que se tenha um instrumento com  $\xi = 0,707$  e que a excitação aplicada seja composta de harmônicos cuja frequência máxima seja  $\bar{\omega}_{MAX} = 0,4 W$ . Nesse caso a amplitude da resposta seria diretamente proporcional à amplitude da excitação aplicada. Resta saber qual deveria ser o comportamento do ângulo de fase com o amortecimento e com a relação de frequências  $\beta$ , para que não houvesse uma mudança na forma do movimento aplicado. De acordo com a Figura 24 observa-se que a curva do ângulo de fase, também para um fator de amortecimento  $\xi = 0,707$ , tem variação aproximadamente linear com a relação de frequências.

Assim, o tipo de instrumento descrito, quando adequadamente amortecido, servirá como um medidor efetivo de aceleração para frequências relativamente baixas; sua faixa de aplicabilidade aumentará na medida em que se aumentar sua frequência natural de vibração em relação à frequência da excitação [27].

A esse tipo de sismômetro, que fornece uma resposta diretamente proporcional à aceleração do ponto de apoio do pêndulo (movimento do terreno), dá-se o nome de acelerômetro. É devido as justificativas dadas nos dois parágrafos anteriores que alguns acelerômetros, normalmente, tem um fator de amortecimento próximo de 0,7.

É claro que um estudo mais detalhado sobre o assunto exigiria, inclusive considerações sobre frequências de outros dispositivos associados com o acelerômetro. Entretanto, tal estudo foge ao escopo desse trabalho.

#### 4.4 Acclerôgrafo e Ganho

A um sismôgrafo cujo elemento sensor é um acelerômetro denomina-se acclerôgrafo. O registro sísmico obtido a partir de um acclerôgrafo é denominado acclerograma.

Por ganho do acclerôgrafo, entender-se-á, no presente contexto, a relação entre as amplitudes do sinal de saída apresentado no dispositivo registrador e do sinal de entrada no sensor, para o caso específico em que o sinal de entrada corresponde a uma excitação permanente senoidal.

#### 4.5 Acclerôgrafo para Registro de Movimentos Fortes

Esse tipo de acclerôgrafo é destinado ao registro de movimentos fortes do terreno próximo a um sismo SM. Assim, eles

estão voltados para o registro de acelerações do terreno caracterizadas por grandes amplitudes e períodos curtos. Ao contrário dos acelerógrafos para registro de sismos distantes, os acelerógrafos SM são caracterizados por um ganho pequeno, face às grandes amplitudes do movimento do terreno na região em que eles atuam.

Como os grandes eventos sísmicos são pouco frequentes, a grande maioria dos acelerógrafos SM não opera continuamente. Eles somente são acionados quando chegam as primeiras ondas de sismos SM. O registro continua a ser feito por alguns instantes até que as acelerações do terreno atinjam valores imperceptíveis. Alguns desses instrumentos chegam a registrar acelerações maiores do que 1 g ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ). Normalmente a aceleração mínima registrada é da ordem de 0,01 g; entretanto existem outros instrumentos em que esse limite inferior é menor.

O registro sísmico proveniente de um acelerógrafo com acelerômetro de ganho pequeno é denominado "acelerograma de movimento forte". Esse é o tipo de registro sísmico que tem interesse do ponto de vista da engenharia sísmica. É a partir deles que são calculadas as respostas teóricas de sistemas com um grau de liberdade, em função do fator de amortecimento.

## 5. INFORMAÇÕES GEOLÓGICO-SISMOLÓGICAS BÁSICAS

Nas investigações geológico-sismológicas, tanto em nível local como regional, é de interesse a caracterização de falhas e falhamentos superficiais associados com a região onde será construída uma determinada instalação nuclear. As falhas geológicas devem ser analisadas de modo a determinar a capacidade de delas em gerar sismos que possam afetar o local ou provocar falhamentos de superfície no próprio local. Um outro conceito importante é o de província tectônica, o qual é utilizado quando não se consegue obter um relacionamento causa-efeito entre falha e sismo. Esses conceitos serão introduzidos nos itens seguintes. No item 4.1 é introduzido, também, o conceito de sismo de movimentos fortes conhecido na literatura inglesa como "strong-motion earthquake".

### 5.1 Sismo

Um sismo é um fenômeno durante o qual a crosta da Terra é sacudida durante um certo intervalo de tempo. Embora um sismo possa ser causado por uma variedade de fatores, tais como explosões subterrâneas, vulcões, deslissamento de rochas, etc., a presente discussão limitar-se-á aos sismos naturais causados por ações tectônicas. Por ações tectônicas entender-se-ão as ações relacionadas com movimentos de estruturas geológicas presentes na crosta terrestre.

O abalo da crosta é causado pela passagem de ondas

sísmicas de baixa freqüência, através da Terra, as quais são geradas num local, no interior da Terra, onde ocorre um movimento rápido e inesperado. Nesse local, denominado fonte sísmica\*, ocorre uma liberação brusca de ondas de deformação, resultantes da ação natural das forças existentes no interior da Terra.

De acordo com a referência [33], atualmente é mais conveniente utilizar-se o termo "sismo" para referir-se à fonte sísmica do que ao próprio fenômeno de abalo do terreno, o qual é um efeito do sismo.

Os mecanismos básicos, dentro da Terra, que dão origem aos sismos, ainda não são completamente compreendidos, sendo que as várias teorias propostas, com relação a esses mecanismos, tendem a ser conflitantes [27]. Uma das explicações mais realistas para os mecanismos que produzem sismos tectônicos é propiciada pela teoria da acomodação elástica ("elastic rebound"). Essa teoria postula que a fonte de um sismo é um deslocamento diferencial brusco do terreno que ocorre ao longo da superfície de uma falha, resultante de uma ruptura das rochas crustais. Resumidamente pode dizer-se que o deslocamento da falha é o resultado do acúmulo gradual de tensões cisalhantes, as quais crescem até que seja excedida a resistência de ruptura da rocha. A deformação é armazenada nas rochas deformadas, na forma de energia elástica, até a hora em que ocorre a ruptura. O falhamento que ocorre em função do deslocamento nem sempre se manifesta na superfície do terreno.

Os sismos podem ser de tamanhos os mais variados, indo desde pequenos eventos que só podem ser detectados por ins

trumentos muito sensíveis, até grandes sismos que podem causar danos extensivos, abrangendo grandes áreas. Aos sismologistas interessa, principalmente, os efeitos sísmicos globais e à longa distância; portanto, a atenção deles está voltada para movimentos do terreno com amplitudes muito pequenas, as quais não induzem danos estruturais significativos. Aos engenheiros que trabalham na área sísmica, interessam principalmente os efeitos locais de grandes sismos, onde os movimentos são intensos o suficiente para causarem danos estruturais. Esses sismos são conhecidos como sismos de fortes movimentos ("strong-motion earthquakes"). Eles são tão violentos para serem registrados pelos instrumentos tradicionais, utilizados pelos sismologistas, que foi necessário o desenvolvimento de tipos especiais de instrumentos para registro desses sismos.

A Tabela 2 apresenta uma relação dos sismos, nos Estados Unidos, que produziram as maiores acelerações do terreno.

## 5.2 Falha Geológica e Falhamento de Superfície

A falha geológica é uma estrutura geológica ao longo da qual tenha ocorrido deslocamento diferencial de materiais adjacentes constituintes do terreno, paralelamente ao plano de fratura.

Já o falhamento de superfície é definido como o deslocamento diferencial do terreno na superfície, ou próximo dela, causado diretamente pelo movimento da falha.

### 5.3 Atividade de Falhas

Os sismos naturais, ou seja, aqueles devidos a mecanismos intrínsecos da constituição geológica da Terra, estão diretamente relacionados com deslizamentos bruscos, que ocorrem ao longo da superfície de falhas geológicas e conseqüente liberação de energia armazenada na crosta terrestre. Quando isso ocorre as falhas responsáveis por tais fenômenos passam a ser denominadas de falhas ativas.

De acordo com a referência [34], durante um evento sísmico, o efeito do mesmo dependerá do tipo de falhamento que originou as ondas sísmicas. Três tipos gerais de falhas que podem estar associadas com sismos são mostrados na Figura 25. Raramente ocorrem exemplos particulares isolados como os mostrados nessa figura; geralmente o deslocamento da falha tem componentes paralela e normal à superfície da falha. Além disso, o deslizamento da falha, normalmente não ocorre ao longo de uma superfície plana, e sim ao longo de uma superfície irregular, podendo haver também uma ramificação que se constitui num falhamento secundário.

### 5.4 Falha Capaz

Segundo os critérios da NRC, uma falha geológica é considerada uma falha capaz se ela apresentar pelo menos uma das seguintes características:

a) Movimento na superfície do terreno, ou próximo dela, pelo menos uma vez, nos últimos 35.000 anos ou mais do que uma vez nos últimos 500.000 anos;

b) Macrossismicidade, instrumentalmente registrada e determinada com precisão suficiente de modo que se possa demonstrar um relacionamento direto com a falha;

c) Um relacionamento estrutural com uma falha capaz (tendo pelo menos uma das duas características anteriores), de modo a se esperar, dentro do bom senso, que a falha analisada possa sofrer movimentos induzidos pela falha capaz.

Nessa definição, fica implícito que uma falha ativa também é considerada como uma falha capaz [34].

Devido a variedade dos tipos e espessuras de solos de cobertura, algumas vezes o embasamento rochoso se apresenta totalmente coberto ou somente parcialmente exposto. Assim, em alguns casos pode ser difícil obter-se evidência geológica de atividade na superfície do terreno, ou próximo dela, ao longo de uma determinada falha. No caso em que essas evidências são dificultadas por espessa cobertura de solo no local, elas podem ser encontradas em algum lugar mais distante, ao longo da falha, as quais deverão ser analisadas para se avaliar se a falha, na vizinhança do local, é ou não considerada como capaz.

A despeito das características a, b e c, citadas, a associação estrutural de uma falha com estruturas geológicas antigas, pelo menos da era pré-Quaternária, desde que não hajam evidências conflitantes, já será o bastante para demonstrar que

a falha analisada não é uma falha capaz [34].

### 5.5 Província Tectônica

O conceito de província tectônica é particularmente útil quando os epicentros de sismos não podem ser relacionados à falhas geológicas conhecidas, ou a outras estruturas tectônicas específicas. Uma província tectônica é definida como uma região que apresenta características geológico-estruturais relativamente consistentes. Os limites da província são determinados por uma análise regional do ambiente geológico e tectônico e da história sísmica da região.

## 6. DEFINIÇÃO DE SISMOS DE PROJETO

Uma característica especial de projeto sísmico de centrais nucleares, que as distingue dos outros tipos de estruturas, é o fato de ser necessária uma análise dinâmica dos principais sistemas responsáveis pela integridade radiológica da central. Essa análise é necessária para garantir não somente a estabilidade estrutural das edificações envolvidas, o que é o fator determinante para outros tipos de edificações, mas também para garantir que irão funcionar, adequadamente, todos os sistemas responsáveis pelo controle dos processos nucleares e pelo desligamento seguro do reator. Em resumo, quer se dizer que além de estimar as tensões e deformações de sistemas estruturais e mecânicos, dever-se-á, também, assegurar que todos sistemas de controle irão funcionar [35].

As exigências simultâneas de confiabilidade e eficiência para centrais nucleares, construídas em áreas sísmicas, foram responsáveis pelo agrupamento de todos os sistemas envolvidos em categorias de segurança. Isto permite considerar-se, separadamente, estruturas, equipamentos mecânicos (incluindo tubulações, reator, gerador de vapor) e sistemas elétricos de controle e operação. Assim, dependendo da utilização que se pretenda dar a uma estrutura (ou componente) e da função de segurança que ela deva desempenhar, essa estrutura pode ser classificada de acordo com as seguintes categorias de segurança: classes 1, 2, 3 ou classe não relacionada à segurança. Essa estrutura pode também ser classificada como pertencente às categorias sísmica I ou não sísmica I, dependendo ou não dela ser

projetada para resistir ao denominado Sismo de Desligamento Seguro - SSE.

Na Classe 1 estão aquelas estruturas ou equipamentos cuja falha possa causar ou contribuir para um incidente nuclear; ou, alternativamente, aquelas estruturas ou equipamentos necessários para contenção dos produtos de fissão e desligamento seguro da central. Estas são as estruturas para as quais são aplicados os critérios de projeto sísmico mais severos. As estruturas Classe 1 são, geralmente, submetidas a uma análise dinâmica completa, de modo a determinar o tanto quanto possível (e conservativamente para cobrir as incertezas envolvidas), as respostas mais próximas da realidade que estas estruturas teriam às solicitações de projeto. Já as estruturas pertencentes às outras categorias de segurança seriam, tipicamente, projetadas de acordo com os procedimentos usados para edificações encontradas nas vizinhanças do local; em outras palavras, elas seriam projetadas de acordo com os conceitos envolvidos nas normas de edificações [26]. A Tabela 3 exemplifica as classificações sísmicas e de segurança para algumas das principais edificações de uma central nuclear.

No item 6.1 é apresentada uma justificativa para a necessidade de se projetar uma instalação nuclear para diferentes sismos de projeto. No item 6.2 é apresentada a definição dos sismos de referência, ou quais caracterizam os dois tipos de sismos para os quais uma instalação nuclear deve ser projetada.

## 6.1 Metodologia de Projeto Sísmico

A referência [26] chama a atenção para a distinção que existe entre projetar-se de acordo com uma norma e projetar-se de acordo com uma análise dinâmica. Numa análise dinâmica é escolhido o modelo matemático para a estrutura, o que permite determinar-se as frequências, ou períodos naturais, da estrutura e calcular-se a resposta da estrutura ao sismo de projeto. Já o projeto de acordo com uma norma é uma abordagem menos rigorosa. Algumas normas sugerem uma forma de espectro de resposta em que as edificações tendo diferentes períodos são projetadas em função de diferentes coeficientes sísmicos; entretanto, as normas dão, também, regras simples, e inevitavelmente inexatas, para a determinação do período natural de uma estrutura. Assim, enquanto que com uma norma pretende-se abranger um grande número de tipos de estruturas (mas com as inevitáveis incertezas e imprecisões), com uma análise dinâmica completa estar-se-á levando em consideração as características específicas de cada estrutura analisada.

Existe ainda uma outra diferença importante entre os dois conceitos em questão. A maioria das normas de edificações prevê a ocorrência de uma grande parcela de dano e deformação se a edificação for submetida ao maior sismo que poderia ser previsto. Numa análise dinâmica é possível estimar, com maior precisão, as dimensões do dano que poderia ocorrer, enquanto que numa abordagem de acordo com uma norma não se terá uma dimensão real do dano que poderá ocorrer [26].

No projeto de uma estrutura, a carga sísmica merece consideração especial pelas seguintes razões: (1) um sismo de grande porte, geralmente, causaria tensões e deformações nas várias partes críticas da estrutura maiores do que todas as outras cargas combinadas; (2) além disso, é muito pequena a probabilidade de um sismo do tipo mencionado ocorrer durante a vida útil da estrutura. De modo a trabalhar efetivamente com esta combinação de carga extrema e baixa probabilidade, na área de engenharia sísmica utiliza-se um critério dual de projeto, descrito a seguir:

1) Um sismo, de intensidade moderada que poderia razoavelmente ser esperado ocorrer no local da edificação durante a vida útil da estrutura, é adotado como base de projeto. A edificação deverá ser dimensionada para resistir ao movimento do terreno provocado por este sismo, sem que haja dano significativo à estrutura básica;

2) O sismo mais severo que poderia ocorrer no local é aplicado como um teste da segurança estrutural. Tendo este sismo uma pequena probabilidade de ocorrência durante a vida útil da estrutura, ao projetista é dada a liberdade, economicamente justificada, de permitir a estrutura sofrer danos significativos durante a ação desse sismo; entretanto, tanto o colapso da estrutura como a perda de vidas humanas tem que ser evitados [26].

## 6.2 Definição de Sismos de Referência

No projeto de centrais nucleares são definidos dois sismos de referência os quais são aplicados a estruturas ou a equipamentos específicos. De acordo com a referência [36], deve-se estar atento para as divergências que existem, tanto para a definição como para a determinação dos sismos de referência, os quais são determinados ou por métodos semi-estatísticos ou por meio de análise de falhas ou de atividade sísmica da área. Dois diferentes valores de sismos são considerados no projeto de uma central nuclear. O primeiro, o mais severo está associado com o desligamento seguro do reator, enquanto que o segundo está associado com a confiabilidade de operação do sistema. Nos países da Europa, de acordo com a referência [36], as definições dos sismos de referência são, de um modo geral, análogas às definições nos Estados Unidos; entretanto, eles são expressos de modos diferentes.

De acordo com os critérios sísmicos e geológicos de localização da Comissão de Regulamentação Nuclear dos Estados Unidos, os sismos de referência recebem as seguintes denominações: Sismo de Desligamento Seguro ("Safe Shutdown Earthquake - SSE") e Sismo Básico de Operação ("Operating Basis Earthquake - OBE"). Esses dois sismos serão definidos a seguir, de acordo com a entidade acima mencionada.

### 6.2.1 Sismo de Desligamento Seguro - SSE

O Sismo de Desligamento Seguro - SSE, representa o valor máximo possível de abalo sísmico do terreno, no local onde se pretende construir uma instalação nuclear. Provavelmente, este evento não tenha nem mesmo ocorrido, no passado, no referido local; nesse caso ele é, então, extrapolado a partir de uma investigação detalhada da geologia regional e local, da sismologia regional e das características locais do terreno. As estruturas, sistemas e componentes necessários a proteção da saúde e segurança do público deverão ser projetados para ação desse sismo, de modo que possam cumprir as suas finalidades previstas, tanto durante como após a ação do evento sísmico. Embora as estruturas e seus componentes internos possam sofrer danos severos devidos ao SSE, o projeto tem que garantir que haverá um desligamento seguro e ordenado seguindo-se a ação do mesmo. A aceleração de 0,1 g é um limite inferior para a aceleração horizontal de pico\*do terreno induzida no local pelo SSE.

Tanto nos Estados Unidos como nos países da Europa, os procedimentos utilizados para a determinação do SSE, no caso de centrais nucleares, são baseados, geralmente, em conceitos determinísticos. A determinação do SSE é baseada na influência máxima, no local, devida aos mais severos sismos históricos observados na região. Nos EUA, bem como na maioria dos países da Europa, essa região é aquela delimitada por um círculo de 320 km de raio centrado no local; já na Alemanha esse raio é de 200 km.

### 6.2.2 Sismo Básico de Operação - OBE

O Sismo Básico de Operação - OBE, representa o valor máximo do abalo sísmico do terreno que se espera ocorrer no local da instalação nuclear durante a vida útil da mesma. Provavelmente este evento não tenha ocorrido no passado, nas vizinhanças do local. O OBE é determinado, do mesmo modo que o SSE, com base numa investigação detalhada da geologia regional e local, da sismologia regional e das características locais do terreno. As partes da instalação, necessárias para operação contínua, sem risco indevido para a saúde e segurança do público, deverão ser projetadas para a ação do OBE, de modo que permaneçam funcionais durante a ação desse evento sísmico. Se durante a vida útil da instalação, ocorrer, no local, um movimento vibratório do terreno superior àquele correspondente ao OBE, a instalação deverá ser desligada, e assim permanecer, até que se tenha demonstrado à Comissão de Regulamentação Nuclear, de que as partes críticas da instalação não foram danificadas. De acordo com as normas vigentes nos EUA, a aceleração horizontal máxima do terreno, correspondente ao OBE deve ser tomada igual, a pelo menos, a metade da aceleração do SSE. A aceleração de 0,05 g é um limite inferior para a aceleração horizontal de pico para o OBE.

### 6.3 Avaliação do Efeito Sísmico Local Devido aos Sismos de Referência

Para a determinação dos Sismos de Referência, é necessário que sejam feitos estudos em nível regional e local. A área de interesse, na qual é feito o estudo regional, é normalmente definida como uma área circular, de raio igual a 320 km, centrada no local. Normalmente o epicentro, ou o ponto de maior intensidade sísmica, não coincide com a posição geográfica do local. Nesses casos é necessário saber quais seriam os efeitos que esses sismos teriam no próprio local, considerando-se as características de transmissão de energia sísmica da área.

Nos parágrafos seguintes serão apresentados os procedimentos utilizados nos Estados Unidos para a avaliação desses efeitos.

No item 6.2 foram definidos os sismos de referência, ou sismos de projeto, denominados Sismo de Desligamento Seguro (SSE) e Sismo Básico de Operação (OBE). Em resumo, o SSE é caracterizado como a intensidade (efeito) sísmica(o) máxima mais provável de ocorrer no local, ao passo que o OBE é caracterizado como o sismo máximo mais provável no local. Comparados em termos de efeitos no local, o SSE é maior ou igual ao OBE.

A partir de estudos geológicos e sismológicos, tanto em nível regional como local, são determinados os seguintes elementos necessários ao posicionamento do SSE: as falhas capazes e províncias tectônicas. Além disso, é preparado um mapa sísmico onde são posicionados os epicentros ou locais de intensidade

sísmica máxima dos sismos de interesse para a região analisada. Outras informações complementares que servirão para caracterizar os sismos são: profundidade do foco, intensidade máxima, magnitude, mecanismo de geração dos sismos, dimensões da fonte sísmica, registros de sismos SM, etc.. A seguir é feita uma correlação entre epicentros ou regiões de intensidade máxima (de sismos historicamente registrados) com estruturas geológicas ou províncias tectônicas. Quando um epicentro (ou área de concentração de epicentros) não puder ser relacionada a uma estrutura geológica específica, o epicentro passa a ser estudado em relação à província tectônica. Nesse caso, as acelerações (os efeitos) no local deverão ser determinadas a partir da hipótese de que os epicentros de sismos de maior magnitude ou os locais de intensidade máxima, relacionados a estruturas geológicas, estejam situados em pontos dessas estruturas que sejam os mais próximos do local. Para o caso em que os referidos epicentros, ou locais de intensidade máxima, forem associados a províncias tectônicas haverá duas alternativas: (1) se o local estiver situado dentro da província, as acelerações no local serão determinadas assumindo-se que os sismos ocorrem no próprio local; (2) se o local estiver situado fora da província, as acelerações no local serão determinadas a partir da hipótese de que os referidos epicentros e locais de intensidade máxima dos sismos estão localizados nos limites das províncias tectônicas, em pontos que estejam mais próximos do local. A Figura 26 ilustra esses procedimentos. O sismo que produzir a aceleração vibratória máxima no nível das fundações, superior a 0,1 g, de acordo com os procedimentos descritos é designado como o Sismo de Desliga

mento Seguro a ser usado na caracterização do movimento vibratório do terreno. Caso os cálculos levem a acelerações, no nível da fundação, inferiores a 0,1 g, assumir-se-á 0,1 g como a aceleração correspondente ao SSE no referido nível [13].

O movimento vibratório do terreno produzido pelo SSE é definido pelo espectro de resposta correspondente às acelerações vibratórias máximas no nível das fundações das estruturas das instalações nucleares. O espectro de resposta deve refletir a resposta das fundações das estruturas ao movimento vibratório, considerando-se que tais fundações são osciladores amortecidos de um grau de liberdade e que são desprezíveis os efeitos de interação solo-estrutura. Face à pouca disponibilidade de registros de sismos SM, normalmente, é conveniente que o espectro de resposta seja um espectro de resposta idealizado, desenvolvido a partir de vários espectros de resposta relativos a movimentos vibratórios causados por mais de um sismo [13].

Os estudos geológicos e sismológicos feitos para a determinação do SSE servem de base para a determinação do OBE o qual, também, deve ser definido pelo espectro de resposta. A aceleração vibratória máxima correspondente ao OBE deverá ser igual a no mínimo a metade da aceleração vibratória máxima do terreno correspondente ao SSE [13].

## 7. FUNDAMENTOS DE SISMOLOGIA

Nesse capítulo são apresentadas as informações básicas utilizadas nas áreas de sismologia e engenharia sísmica. Não se pretende apresentar aqui uma abordagem completa do assunto, mas sim apresentar, de forma simplificada, os conceitos e parâmetros mais citados na literatura sísmica.

### 7.1 Tipos de Ondas Sísmicas

Num abalo sísmico estão envolvidos três tipos básicos de ondas de choque. Dos três, somente dois deles se propagam no interior da terra; as ondas pertencentes a esses dois tipos são as ondas P e S, denominadas ondas de volume ("body waves"). Ao terceiro tipo de ondas sísmicas pertencem as ondas superficiais, assim denominadas porque o seu movimento é restrito às proximidades da superfície do terreno.

A Figura 27 ilustra o movimento de uma partícula de um meio sob ação das ondas P e das ondas S. A Figura 28 apresenta o posicionamento das partículas sob a ação das ondas P, S, Love e Rayleigh, separadamente.

### 7.1.1 Ondas de Volume

#### Ondas P

As ondas de volume, conhecidas como ondas P, Primárias, ou Longitudinais, são aquelas que se propagam com maior velocidade, sendo registradas num acelerograma como as primeiras a chegar. Estas ondas de tensão são criadas pelo movimento de vai e vem (tração e compressão) das partículas, num sólido elástico, na direção de propagação. O movimento é caracterizado por uma variação de volume e ausência de rotação. A velocidade de propagação dessas ondas através de rochas mais profundas e através do núcleo varia de cerca de 6,10 a 13,70 km/s .

#### Ondas S

O símbolo S é usado para designar as ondas elásticas de volume que se propagam com menor velocidade. As ondas S são conhecidas, também, como ondas Cisalhantes ou Transversais . Uma partícula no caminho de uma onda transversal pode oscilar em qualquer direção no plano normal à direção de avanço da onda. O movimento é caracterizado por invariabilidade no volume, mas é passível de rotação. Embora mais lentas do que as ondas P as ondas S transmitem mais energia do que as ondas P. As ondas S vibram numa proporção menor do que as ondas P de uma mesma fonte, ou seja, as ondas S apresentam períodos menores. As amplitudes do movimento vibratório do terreno produzidas pelas ondas S são maiores do que as das ondas P.

A velocidade das ondas S varia de cerca de 3,40 km/s

na superfície a cerca de 7,20 km/s próximo ao limite do núcleo terrestre. As ondas S não se propagam num meio líquido. As ondas S com o seu movimento para cima e para baixo e de lado a lado, num plano perpendicular à direção de propagação da onda, movimentam a superfície do terreno nas direções vertical e horizontal. Este é o tipo de movimento que, efetivamente, danifica as estruturas.

### Velocidade Teórica das Ondas P e S

As velocidades teóricas desses dois tipos de ondas, obtidas com base nas hipóteses de um meio infinito, homogêneo e elástico, são dadas pelas seguintes equações:

$$V_P = \left[ \frac{(1-\sigma)E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)s} \right]^{1/2} \quad (\text{Eq. 37})$$

$$V_S = \left[ \frac{E}{2(1+\sigma)s} \right]^{1/2} \quad (\text{Eq. 38})$$

onde  $V_P$  e  $V_S$  são, respectivamente, as velocidades das ondas P e S. Para um determinado meio, "E" é o módulo de elasticidade,  $\sigma$  é o coeficiente de Poisson e "s" é a densidade [37].

### 7.1.2 Ondas Superficiais

Estas ondas são assim denominadas porque o seu movimento é restrito às proximidades da superfície do terreno. O deslocamento delas decresce com o aumento da profundidade da camada de solo em que elas propagam. Há dois tipos de ondas superficiais, as ondas Love e as ondas Rayleigh. As ondas superficiais se propagam mais lentamente do que as ondas de volume.

#### Ondas Love

O movimento dessas ondas é essencialmente o mesmo das ondas S sem deslocamento vertical; essas ondas movem o terreno, para um lado e para outro, perpendicularmente à direção de propagação, num plano horizontal paralelo à superfície da Terra. Os efeitos da passagem das ondas Love são deslocamentos horizontais do terreno.

#### Ondas Rayleigh

Uma partícula de um meio perturbado pela passagem das ondas Rayleigh, move-se nas direções vertical e horizontal, num plano vertical, posicionado na direção de propagação da onda. O movimento dessa partícula é descrito por uma elipse com sentido anti-horário. Geralmente a onda Rayleigh tem menor velocidade de propagação do que a onda Love.

## 7.2 Propagação de Ondas Sísmicas

As ondas sísmicas propagam-se com velocidades variáveis, as quais dependem das propriedades de transmissão do meio de propagação. Por exemplo, em terrenos constituídos de aluviões de baixa resistência, as ondas sísmicas podem apresentar velocidades de até 483 m/s; já em terrenos de aluviões muito firmes, a velocidade das ondas sísmicas pode atingir valores de cerca de 1.448 a 1.931 m/s [37].

O distúrbio sísmico propaga-se, a partir da fonte sísmica, através de dois tipos principais de ondas citados, as ondas P e as ondas S. A velocidade das ondas S é menor do que a das ondas P. As ondas longitudinais tem as mesmas características de vibração das ondas sonoras, possuindo frequências que algumas vezes chegam a ser detectadas pelo ouvido humano. As ondas transversais tem características de deformação cisalhante, fazendo com que as partículas do meio por elas atravessado vibrem num plano normal à direção de propagação.

As ondas P e S ao atingirem a superfície, próximo ao epicentro, geram dois outros tipos de ondas, denominadas ondas Rayleigh (R) e ondas Love (L), as quais se propagam ao longo da superfície. As ondas R produzem um movimento elíptico da superfície num plano vertical; já a onda L, é uma onda do tipo cisalhante, vibrando num plano horizontal. Além da formação das ondas R e L, pode ocorrer, também, a reflexão das ondas P e S na superfície. As ondas P e S após uma reflexão são chamadas de ondas PP e SS, respectivamente, após duas reflexões elas são cha

ondas de PPP e SSS. É possível também a reflexão das ondas P na forma de ondas S. A onda resultante é, então, designada como onda PS; no caso de reflexão da onda S na forma de onda P, a nova onda é denominada onda SP. A diferença nos tempos de chegada dos vários tipos de ondas constitui o dado básico para localização de epicentros [37].

As amplitudes das ondas S são normalmente muito maiores do que aquelas das ondas P. As amplitudes das ondas sísmicas em geral diminuem rapidamente com a distância viajada, enquanto que os períodos aumentam. Nas regiões epicentrais as componentes de ondas de período mais curto decaem com a distância, muito mais rapidamente do que aquelas componentes de período mais longo. Assim, a 80 km de uma falha, por exemplo, as componentes de período entre 0,2 e 0,3 segundos terão sofrido um decaimento da ordem de duas a três vezes àquele sofrido pelas componentes de período igual ou maior do que 1 segundo. É por essa razão que as ondas sísmicas que chegam a pontos distantes tem períodos predominantemente maiores do que àquelas que ocorrem próximo ao epicentro [37].

### 7.3 Registro Instrumental de Sismos

Os instrumentos usados pelos sismologistas tem sido projetados cuidadosamente para atender interesses específicos de pesquisa dos geofísicos. Assim sendo, tais instrumentos são inadequados para aplicação direta no campo da engenharia, pelas seguintes razões:

a) O objetivo dos sismologistas é registrar sismos pequenos ocorrendo em qualquer ponto da terra. Isto requer a utilização de instrumentos de alta amplificação. Um sismo SM próximo ao instrumento irá, normalmente, produzir registros fora da faixa de utilização do instrumento, ou mesmo danificar o instrumento. Ao engenheiro interessa um instrumento robusto que registre com precisão os mais fortes abalos do terreno que possam ocorrer nas proximidades do instrumento;

b) Uma vez que o objetivo principal dos sismologistas tem sido estudar a constituição interna da terra, os seus instrumentos são localizados, se possível, no embasamento rochoso\*, de modo a eliminar os efeitos das condições locais\* de geologia e solo. Ao engenheiro interessa conhecer o movimento do terreno em locais nos quais serão construídas as estruturas de edificações ou instalações. Tais estruturas, freqüentemente, são construídas sobre espessas camadas de aluvião ou em locais inadequados para observações sismológicas;

c) Para investigações sismológicas é essencial uma determinação precisa do tempo absoluto de chegada das ondas sísmicas, enquanto que a medida do movimento real do terreno é, freqüentemente, de pouca importância. O engenheiro não necessita do tempo absoluto; entretanto ele tem que saber, com precisão, o movimento real do terreno para poder determinar os efeitos de sismos sobre estruturas.

Do que foi apresentado, pode-se concluir que em vista dos diferentes objetivos, o engenheiro necessita de uma instrumentação, basicamente, diferente daquela necessária para estudos sísmicos.

mológicos. Isto não quer dizer que o engenheiro não possa receber imensos benefícios das atividades dos sismologistas. É do sismologista que vem as informações sobre a distribuição temporal e espacial da sismicidade da Terra, o que possibilita ao engenheiro avaliar, num dado local, a probabilidade de ocorrência de sismos de várias intensidades.

O interesse da engenharia estrutural está voltado para os movimentos fortes que ocorrem próximo ao epicentro, ou seja, numa distância de aproximadamente 160 km do epicentro [37]. Registros típicos de acelerações de sismos SM são mostrados nas Figuras 29 a 31. Esses acelerogramas são registros típicos, obtidos em região epicentral por meio de acelerógrafos SM.

O registro do sismo de El Centro, mostrado na Figura 29, é um exemplo típico de registros obtidos próximo a epicentros de sismos de grande magnitude. As Figuras 30 e 32 são mostradas com o intuito de se comparar o registro obtido próximo a um grande sismo com um registro mais distante. O registro da Figura 30 foi obtido em Taft, Califórnia, a cerca de 48 km do centro da área da falha que sofreu deslocamento. A Figura 32 representa o registro do mesmo sismo obtido em Hollywood, Califórnia, a cerca de 113 km do referido centro. A Figura 31, referente ao sismo de San Francisco, 1957, é um exemplo típico de registro obtido próximo a um pequeno sismo.

Durante a ocorrência de um evento sísmico, o terreno sofre movimentos, tanto na direção horizontal como na direção vertical. As Figuras 33 e 34 são apresentadas com o intuito de exemplificar, esquematicamente, como é feito o registro das compo

mentos vertical e horizontal, respectivamente, da vibração sísmica do terreno.

#### 7.4 Identificação de Ondas num Sismograma

A representação gráfica, num sismógrafo, dos efeitos sofridos pelo terreno durante a ação de ondas sísmicas é denominada sismograma. As Figuras 35 e 36 ilustram dois sismogramas distintos. Nesses sismogramas pode-se observar a seqüência temporal de chegada das diferentes ondas sísmicas à estação de registro. As ondas primárias, por se deslocarem com maior velocidade, chegam em primeiro lugar; em seguida chegam as ondas secundárias e, finalmente as ondas longas (causadoras de destruições) [38]. As ondas longas incluem as ondas Rayleigh e as ondas Love.

Num sismograma, a primeira evidência de um sismo distante é uma linha irregular com amplitude relativamente pequena. Seguem-se, abruptamente, vários picos, com amplitudes maiores, que tendem a desaparecer. Finalmente há uma terceira fase, na qual ocorre um grande número de picos com amplitudes ainda maiores, só que em intervalos bem maiores do que os dos tipos anteriores. É evidente que as três fases do registro correspondem aos três tipos de ondas sísmicas [38]. A Figura 36 ilustra o assunto que foi exposto. Essa mesma figura ilustra a diferença de tempo de chegada de vários tipos de ondas sísmicas, em distintas estações sismográficas. Segundo a referência [38], o inter

valo entre as ondas aumenta com a distância a partir do ponto onde ocorreu o sismo.

Na Figura 37 são esquematizados os diferentes tipos de ondas sísmicas que são registrados num sismograma, à medida que a estação de registro se afasta da fonte sísmica.

Na região epicentral as amplitudes das ondas S são muito maiores do que aquelas das ondas P precursoras, e as distâncias envolvidas são muito pequenas para que haja grandes separações de ondas P e S. Como resultado disso, num acelerograma SM, o qual é obtido próximo ao epicentro, não há uma separação bem distinta entre os diferentes tipos de ondas que podem ser observadas num acelerograma de um sismo distante.

## 7.5 Localização de Acelerógrafos

De acordo com a referência [23], para que se obtenha a maioria das informações úteis possíveis, um acelerógrafo SM tem que estar localizado num raio de 48 km a partir do epicentro de um sismo SM. Considerando todas as áreas sísmicas do globo, é óbvio que seria impossível instrumentar, por completo, tais áreas com uma rede adequada de acelerógrafos SM. A prática utilizada no passado tem sido concentrar tais instrumentos próximo a cidades importantes, ou próximo a locais de grandes obras de engenharia, tais como barragens ou instalações nucleares. Entretanto, a área de informação útil, coberta por um único instrumento é aquela determinada por um círculo de raio aproximado de 48 km, centrado no local do instrumento [23].

A maioria dos acelerôgrafos nos Estados Unidos está localizada na Califórnia, por causa da atividade sísmica predominante nessa região. Os locais desses instrumentos representam uma diversidade de condições geológicas e de terrenos; alguns estão localizados em rocha (ou em material rochoso) e muitos outros estão localizados em solos que correspondem a uma ampla variedade de condições locais de geologia, topografia e de subsolo. Os instrumentos localizados em rocha podem estar fundados em afloramentos rochosos\* ou em rocha de subsuperfície.

Quando o instrumento de registro sísmico está localizado num local onde não existe nenhuma obra construída pelo homem, o movimento registrado é denominado de "movimento de campo livre". Esse movimento tanto pode ser de superfície como de subsolo. Alguns instrumentos são localizados nas fundações de edifícios altos ou de outras estruturas. Dependendo das propriedades de interação solo-estrutura, os movimentos registrados nas fundações mencionadas podem em alguns casos serem considerados como representativos do "movimento de campo livre".

## 7.6 Foco e Epicentro

O foco, também denominado hipocentro, de um sismo é o ponto no interior da terra onde se inicia a liberação de energia, na forma de ondas elásticas [34]. Dependendo da profundidade do foco (distância focal), os sismos podem ser classificados em rasos, intermediários ou profundos. Os rasos, ou normais, são aqueles com profundidades menores do que 70 km. Se o foco

está situado entre 70 e 300 km o sismo é classificado como intermediário. Profundidades focais maiores do que 300 km classificam o sismo como profundo; entretanto algumas vezes esse termo é aplicado a todos sismos com profundidade maior do que a normal. Cerca de 70% dos sismos são rasos. A frequência de ocorrência de sismos decresce rapidamente com a profundidade até 300 km. Abaixo dos 300 km não se tem uma correlação precisa entre a ocorrência de sismos e profundidade [39].

O epicentro de um sismo é a projeção vertical do foco sobre a superfície terrestre. Na ausência de dados instrumentais, o epicentro tem sido localizado com base nos danos observados. Entretanto, atualmente os locais de epicentros são estimados a partir dos tempos relativos de chegada das componentes de ondas sísmicas, nos vários instrumentos de uma rede sismográfica.

Os procedimentos para localização tanto do epicentro como do foco não são precisos; isto deve-se ao fato das limitações no número de estações de registro confiáveis, nas interpretações geológicas das estruturas da crosta terrestre e no conhecimento das velocidades de propagação local de ondas sísmicas. Os sismos são costumeiramente localizados por meio da latitude e longitude epicentral e pela profundidade do foco. É importante observar que o ponto representativo do foco não indica, necessariamente, o centro da energia total liberada pelo sismo; ele indica somente o ponto inicial de liberação de energia.

Na Figura 38, onde são indicados o foco e o epicentro de sismos, é feita uma comparação entre sismos de focos profundos e rasos.

## 7.7 A Medida dos Sismos

A questão da "força" de diferentes sismos foi uma das primeiras que se apresentou. Na falta de instrumentos para medir a energia colossal desprendida do próprio foco, contentaram-se os especialistas no ramo, em fazer uma classificação dos tremores de terra segundo sua "intensidade", isto é, segundo os efeitos observados na superfície e em determinado local. A primeira escala internacionalmente utilizada foi a do itália no Giuseppe Mercalli, fundamentada unicamente nos estragos observados, classificando os sismos em doze graus [40].

Para que se possa fazer uma comparação das grandezas de sismos, por todo o globo, é necessário que se tenha uma medida que não dependa da densidade populacional, dos tipos de construção bem como de reações humanas. Uma escala estritamente quantitativa aplicável a sismos, tanto em regiões habitadas como não habitadas, teve a sua origem no Japão, em 1931, e foi desenvolvida por Richter, em 1935, na Califórnia. De acordo com essa nova escala os abalos sísmicos passaram a não mais serem classificados por sua intensidade, observável num determinado lugar, mas sim pela quantidade de energia liberada, ou seja, por sua "magnitude". Esse método surgiu em decorrência dos problemas de publicação da lista de sismos registrados em 1932, na Califórnia. Para não dar a impressão de que se tratava, em cada caso, de sismos destruidores e perigosos e para não alarmar o público, era preciso fazer uma distinção entre pequenos e grandes abalos sísmicos; resolveu-se, por isso, classificá-los

segundo a sua potência [40]. A escala tradicional de Mercalli , que descrevia os tremores de terra de acordo com sua intensidade, ou seja, segundo o grau de estragos num determinado ponto , não parecia satisfatória, porque vários sismos ocorriam em regiões não habitadas, onde não era possível avaliar os danos . Procurou-se outros critérios de comparação e Richter propôs esse novo método de magnitude, com base em sismogramas obtidos em cada abalo, por diferentes estações sismológicas.

#### 7.7.1 Magnitude

Como foi dito anteriormente o cálculo da magnitude de um sismo é feita com base em registros instrumentais. O procedimento para o cálculo da magnitude é feito com base nas amplitudes de ondas sísmicas registradas por um sismógrafo. A magnitude é uma medida da grandeza de um sismo, a qual é obtida tomando-se o logaritmo, na base 10, da maior amplitude do movimento do terreno registrada durante a ação das ondas sísmicas e fazendo-se as devidas correções padrão quanto à distância ao epicentro.

Atualmente, no processo de classificação de sismos , normalmente são utilizados três tipos de magnitudes:

Magnitude Local - baseada na amplitude máxima registrada num instrumento padrão, independentemente do tipo de onda responsável por essa amplitude máxima;

Magnitude de Ondas de Volume - baseada na amplitude de um determinado tipo de onda de volume presente num sismograma;

Magnitude de Ondas Superficiais - baseada na amplitude de ondas sísmicas de período longo contidas num sismograma.

Cada uma dessas magnitudes é obtida a partir de um instrumento bem calibrado, de algum conhecimento das características das rochas através das quais as ondas sísmicas tem que se propagar, e das condições locais da estação instrumental.

a) Magnitude Local (ML)

Richter definiu a magnitude local de um sismo como o logaritmo, na base dez, da amplitude máxima (em milésimo de milímetro) das ondas sísmicas presentes num sismograma registrado num sismógrafo padrão (sismógrafo "Wood-Anderson"), assentado em terreno firme, situado a uma distância de 100 km do epicentro do sismo. Entretanto, nessa definição não é especificado nenhum tipo específico de onda sísmica a ser considerado; a única condição é que a onda escolhida, de volume ou superficial, seja aquela que apresente a amplitude máxima.

Em algumas publicações encontra-se a definição de Richter expressa através da seguinte equação:

$$ML = \log_{10} (A/A_0) \quad (\text{Eq. 39})$$

onde A é a amplitude máxima mencionada e  $A_0$  é uma amplitude de

referência (assumida igual a 1  $\mu$ m a uma distância de 100 km do epicentro). Na prática, são utilizadas tabelas empíricas para corrigir o valor de magnitude, quando se tiver uma distância epicentral diferente de 100 km e diferentes condições locais de terreno na estação sismográfica de registro.

A magnitude não é uma medida precisa, isto porque os instrumentos nunca estão localizados a 100 km do epicentro, o que requer a interpolação e extrapolação de registros reais para a determinação da magnitude de um sismo. Portanto, nessa determinação, além da incerteza, soma-se o fato da interpretação individual de quem faz a medida [26]. Como exemplo, pode-se citar a magnitude do sismo de Caracas - 1967, a qual foi estimada entre 5,7 e 6,5. Apesar dessas incertezas, a magnitude local, também conhecida como magnitude Richter, é uma medida útil da quantidade de energia liberada por um sismo [26].

A referência [41] chama a atenção para o fato de que não há limitação, nem inferior e nem superior para a escala de magnitudes. As maiores magnitudes, até então registradas, estão em torno de 8,0 ou mais. Baseando-se nas magnitudes de sismos observados no passado, os sismologistas acreditam que a magnitude máxima de sismos esteja limitada a 9 [26].

Os abalos sísmicos de magnitude 1 são detectados somente por instrumentos muito sensíveis. Já os de magnitude 2 são perceptíveis à pessoas colocadas perto do epicentro, encontrando-se, assim, em condições favoráveis para observação do evento. De acordo com a referência [40], a partir da magnitude 4,5 já se pode esperar que os sismos venham a produzir danos.

A partir da equação (39) pode-se demonstrar que a um aumento de um grau na magnitude, ter-se-á um aumento de dez vezes no valor da amplitude A registrada. Além disso, Richter demonstrou que para sismos de focos rasos, na Califórnia, a magnitude ML está relacionada à energia E (em ergs) liberada por um sismo, através da seguinte equação:

$$\log_{10}E = 1,5 ML + 11,4 \quad (\text{Eq. 40})$$

Portanto, a energia associada com um sismo aumenta de um fator maior do que 10 a cada acréscimo de uma unidade no valor da magnitude [26].

A Figura 39 apresenta, como exemplo, um nomograma típico para cálculo da Magnitude ML de um sismo (Magnitude Richter). O seguinte procedimento deverá ser usado para calcular essa magnitude:

- obter a distância ao foco, fazendo-se uso do intervalo de tempo de chegada das ondas S e P ( $S - P = 24$  segundos);

- medir a amplitude máxima registrada no sismograma (23 milímetros);

- unir os valores de distância ao foco e de amplitude máxima por meio de uma linha reta;

- a intercessão dessa reta com a escala central de magnitudes dará o valor desejado de magnitude. No exemplo da Figura 39, a magnitude do referido sismo é  $ML = 5,0$ .

## b) Magnitudes de Onda Volume e de Onda Superficial

Atualmente, os observatórios sísmicos estão utilizando duas outras escalas de magnitude, diferentes da escala original de Richter. A razão para isso, é que os sismos de foco profundo apresentam sismogramas muito diferentes daqueles sismos que possuem foco raso, mesmo no caso em que a quantidade total de energia liberada em cada evento seja a mesma. Os sismos de foco profundo, em particular, apresentam somente trens de ondas superficiais pequenos, ou mesmo insignificantes. É, portanto, desejável, quando se estiver lidando com todos os sismos globais, estar-se em condições de calcular uma magnitude uniforme que não dependa da presença ou ausência de ondas superficiais.

Os outros dois tipos de magnitude são: a magnitude de ondas de volume,  $m_b$ , e a magnitude de ondas superficiais,  $M_s$ . Nenhuma das magnitudes  $m_b$  ou  $M_s$  é a magnitude Richter; entretanto cada uma tem a sua parcela de importância no processo de descrição da grandeza de um sismo.

### b.1) Magnitude de Ondas de Volume, $m_b$

Tem se tornado rotina na área de sismologia a utilização da amplitude das ondas de volume. Particularmente, tem-se feito uso da amplitude das ondas P, as quais não são afetadas pela profundidade focal do sismo. Não existe uma correspondência direta entre  $m_b$  e ML; uma relação aproximada é dada pela equação:

$$ML = 1,59 m_b - 3,97 \quad (\text{Eq. 41})$$

### b.2) Magnitude de Ondas Superficiais, $M_s$

No caso de sismos de foco raso, encontra-se também presente um trem de ondas superficiais. É prática comum, medir-se a maior amplitude do trem de ondas superficiais que tenha um período próximo a 20 segundos. A partir dessa amplitude obtém-se a magnitude de onda superficial,  $M_s$ .

### c) Considerações Sobre Magnitudes

Embora a magnitude proporcione um meio conveniente para a classificação de sismos, ela tem as suas limitações. A magnitude não dá uma medida precisa da grandeza de um sismo. A imprecisão é devida a não uniformidade da crosta terrestre, a possíveis efeitos de orientação de falhas, relativamente às estações sismográficas, e às incertezas nas correções quanto às condições locais do terreno onde se situa a estação sismográfica. Por outro lado, a magnitude de um sismo não é um bom indicador da aceleração de pico do terreno. A explicação para isso é que a magnitude Richter, por exemplo, é uma medida das amplitudes dos movimentos de baixa frequência a 100 km do epicentro, ao passo que as acelerações de pico estão relacionadas a movimentos de alta frequência medidos num determinado local [34].

#### 7.7.2 Intensidade

Além da magnitude de um sismo, a qual descreve a grandeza do evento sísmico como um todo, necessita-se de uma outra

medida que caracterize os efeitos danosos do movimento do terreno, provocados por um sismo, num determinado local. Para isso, na era pré-instrumental da sismologia, foi introduzida a escala de intensidade, a qual descreve de modo qualitativo os efeitos de um sismo, num determinado local, através dos danos sofridos pelas estruturas construídas pelo homem, do distúrbio físico observado na superfície do terreno e das reações humanas e dos animais à ação do abalo sísmico. A vantagem dessa escala é que pode dispor-se de alguma informação sobre sismos que ocorrem em regiões onde não haja instrumentos sísmicos; estas informações servem de base para uma comparação entre os sismos atuais e os eventos sísmicos históricos, para os quais não se disponha de nenhum registro instrumental [41].

Enquanto um determinado sismo pode ter somente uma magnitude, ele pode apresentar várias intensidades. A intensidade é mais alta perto do epicentro e decresce, gradualmente, a partir do aumento da distância ao epicentro [42].

Nos Estados Unidos a escala padrão de intensidade é a Escala de Mercalli Modificada, de 1931 [41]. A Tabela 4 apresenta uma versão resumida dessa escala, a qual serve para ilustrar as idéias básicas que orientam tais tipos de escalas. Para enfatizar a natureza qualitativa das escalas de intensidade, e para desencorajar o uso dos números em expressões matemáticas, é costumeiro utilizar números romanos para expressar os diferentes graus dessas escalas [41]. A Figura 40 apresenta uma equivalência aproximada entre a Escala de Mercalli Modificada e as escalas similares atualmente utilizadas no Japão, no sul da Europa

e na União Soviética. A Figura 41 é apresentada com o intuito de mostrar a escala Rossi-Forel, a qual é freqüentemente citada na literatura antiga.

A Figura 42 apresenta, como exemplo, um nomograma para determinação de um dos valores de intensidade epicentral  $I_0$ , magnitude ML ou profundidade focal h, uma vez conhecidos dois dos outros valores. A escala da esquerda tem duas entradas, dependendo se o sismo é de foco profundo ou de foco normal. Nesse nomograma os valores de intensidade são representados em algarismos arábicos. Infelizmente não se pode afirmar qual a escala de intensidade que foi utilizada como base para a confecção do referido nomograma, apresentado como ilustração.

#### a) Curvas Isossistas

As intensidades sísmicas de um determinado sismo, observadas em vários locais podem ser representadas graficamente num mapa [23]. Uma vez determinados os valores de intensidade em diferentes locais, são traçadas várias curvas, denominadas curvas isossistas, as quais separam regiões caracterizadas por diferentes intensidades ou grupos de intensidades. Esses mapas, denominados mapas de isossistas ou mapas de intensidades, refletem a atenuação do efeito sísmico em função da distância à fonte sísmica, e a extensão da área em que o sismo foi sentido. As formas e dimensões das isossistas podem ser influenciadas pelas características tectônicas da área, indicando direções predominantes, ao longo das quais as ondas sísmicas são transmitidas, e o modo pelo qual os sismos são originados [34]. A Fi

gura 43 apresenta um mapa de intensidade sísmica do sismo de Parkfield, na Califórnia, em 1966.

#### b) Considerações Sobre o Uso da Escala de Intensidade

As escalas de intensidade são relevantes naquelas áreas onde não existem registros de sismos SM, particularmente onde a interpretação sísmica da área só é possível através de informações históricas. Face a isso, freqüentemente, para utilização em projeto, existem certas correlações entre a intensidade de Mercalli Modificada e certos parâmetros quantitativos da severidade do abalo do terreno, como por exemplo as acelerações de pico. Entretanto, é falha a utilização da intensidade através dessas correlações para a determinação do valor da intensidade sísmica para uma determinada área. Em primeiro lugar, a reação humana à ação de um sismo depende de fatores tais como a experiência anterior da pessoa e seu próprio comportamento emocional com relação a movimentos vibratórios do terreno. Em segundo lugar, o dano estrutural não representa um dado básico uniforme para determinação de intensidade; isto é devido às diferenças existentes nas práticas de projeto e construção de várias regiões. Assim, seria particularmente difícil comparar intensidades obtidas de sismos em áreas subdesenvolvidas, com aquelas provenientes de sismos em regiões desenvolvidas. Por último, vem o parâmetro utilizado para descrição da intensidade: aos sismos que ocorrem em áreas pouco habitadas tem sido atribuídas intensidades com base em deslocamentos permanentes do terreno ou ruptura de taludes os quais por si próprios, não fornecem uma caracterização confiável do dano provocado por sismos.

Por essas razões, é necessário que se tenha o devido cuidado quando se fizer uso da intensidade para estimar os movimentos do terreno num determinado local [34].

## 7.8 Parâmetros Diretamente Relacionados a Sismos SM

A melhor representação do movimento vibratório do terreno é obtida através do histórico de aceleração do terreno. Esta curva fornece um registro completo do abalo sísmico do terreno, no local em que o instrumento de registro está instalado. Entretanto, quando se quer comparar, quantitativamente, diferentes registros sísmicos ou correlacionar movimentos registrados do terreno, com possíveis danos estruturais, freqüentemente são utilizados parâmetros mais simples em lugar do histórico do movimento. Alguns dos parâmetros mais comumente usados são: valores de pico de aceleração, velocidade ou deslocamento; espectro de resposta; intensidade do espectro; valor eficaz da aceleração; fator de intensidade; e duração da fase mais intensa de um sismo SM.

### 7.8.1 Valores de Pico de Aceleração, Velocidade e Deslocamento

A aceleração de pico do terreno é, atualmente, a medida da força do abalo sísmico do terreno que mais se utiliza. Além disso, a maioria dos dados, relativamente escassos, com re

lação a movimentos sísmicos ocorridos no passado, é fornecida em termos de acelerações de pico. Entretanto, a utilização desse parâmetro para representar o registro de um sismo tem as suas limitações. Em primeiro lugar, a aceleração de pico está estritamente relacionada às forças máximas aplicadas a sistemas de alta frequência; entretanto isso não ocorre para a maioria dos sistemas estruturais que se encontra na prática, os quais são caracterizados, tipicamente, por frequências baixa a intermediária. Além disso, por si só, a aceleração de pico nem leva a boas correlações entre as forças relativas de diferentes registros sísmicos e nem leva em consideração a duração ou o conteúdo de frequência do movimento do terreno [34].

A força do abalo sísmico do terreno pode ser, também, representada por meio dos valores de pico de velocidade ou deslocamento. Esses valores parecem ter um limite superior mais bem definido do que o de aceleração. Além disso, os valores de pico de deslocamento e velocidade fornecem uma melhor estimativa das forças laterais efetivas, aplicadas por sismos a estruturas de frequências baixa a intermediária. Desses dois valores, a velocidade de pico é geralmente a preferida. Entretanto, ambos estão sujeitos a erros provenientes da integração numérica dos históricos de aceleração; semelhantemente à aceleração de pico, os dois últimos parâmetros discutidos não levam também em consideração a duração ou o conteúdo de frequência do movimento vibratório do terreno.

As Figuras 44(b) e 44(c) apresentam exemplos típicos de históricos de velocidade e deslocamento obtidos a partir do histórico de aceleração por meio de integração. Na Figura 45

estão indicados os valores de pico de aceleração, velocidade e deslocamento correspondentes a um determinado registro sísmico. Os valores de pico de velocidade e deslocamento foram obtidos a partir dos históricos calculados por integração. A partir dessas duas figuras citadas pode-se observar que os tempos em que ocorrem os valores de pico não são coincidentes.

### 7.8.2 Espectro de Resposta do Terreno

Esse conceito já foi introduzido no item 4.2, onde foram analisados os parâmetros espectrais. Entretanto será lembrado esse conceito, através de uma definição mais concisa. O espectro de resposta é definido como um gráfico no qual se tem as respostas máximas de vários osciladores, em função dos fatores de amortecimento e das frequências naturais (caracterizadoras desses osciladores), quando submetidos a um determinado movimento sísmico. A característica especial desses osciladores é que eles tenham somente um grau de liberdade e que sejam rigidamente conectados à superfície, que define o nível em que se deseja o espectro de resposta, e na qual é aplicada a excitação sísmica. Assim, no caso de se desejar o espectro de resposta do terreno, a citada superfície corresponderá ao nível do terreno onde vai ser aplicado o histórico de aceleração do terreno [43].

Apesar de ter sido, no parágrafo anterior, denominado de espectro de resposta do terreno, na realidade ele é um espectro de resposta estrutural. Assim, a informação contida num registro do movimento sísmico do terreno pode ser examinada atra

vés de um espectro de resposta estrutural. Este conceito é especialmente utilizado visando a área de engenharia sísmica, uma vez que ele combina as características importantes da excitação do terreno (amplitude, conteúdo de frequência e duração do abalo) e os valores de amortecimento e frequência natural envolvidos no cálculo da resposta. A partir do espectro de resposta o engenheiro projetista pode, rapidamente, avaliar como estruturas de diferentes períodos (ou frequências) irão responder a um determinado movimento vibratório do terreno [34].

Os espectros de resposta são usados nas práticas de projeto sísmico porque eles tem a propriedade de revelar os efeitos do movimento sísmico do terreno sobre a resposta de uma estrutura simples. Além disso, eles podem ser usados para estimar respostas máximas de estruturas mais complexas; entretanto, nesses casos será necessário a utilização de métodos aproximados para combinar respostas modais. Uma vantagem adicional é que na elaboração do espectro de resposta é incluído o conteúdo de frequência do movimento.

Uma desvantagem dos espectros de resposta é que eles, por si sós, não fornecem uma única medida numérica das forças relativas de diferentes registros sísmicos do terreno. Para contornar esse problema Housner introduziu o conceito de intensidade do espectro o qual é discutido no próximo subitem.

### 7.8.3 Intensidade do Espectro de Resposta

Na sua forma original, como foi concebida por Housner, esse parâmetro é definido como a área sob a curva de pseudo-velocidade espectral de um determinado registro, entre os períodos 0,1 e 2,5 segundos. Essa faixa de períodos corresponde aos períodos de vibração estrutural da maioria das estruturas que se encontra na prática. Assim, a definição de Housner pode ser expressa pela seguinte integral:

$$SI(\xi) = \int_{0,1}^{2,5} Sv(\xi, T) dT \quad (\text{Eq. 42})$$

Uma vez que o espectro de resposta indica as deformações máximas para estruturas de todos os períodos, a integral do espectro de resposta, abrangendo uma faixa conveniente de períodos, é provavelmente uma melhor medida global da intensidade do movimento do terreno. Como indicado na equação (42), este novo parâmetro pode ser avaliado para qualquer fator de amortecimento estrutural desejado [27]. A Figura 46 ilustra o parâmetro em questão.

A referência [26] chama a atenção para o fato de que a intensidade espectral de Housner é um parâmetro cuja finalidade seria medir a intensidade de um sismo, num determinado ponto e numa dada direção; ou seja, no local e na direção em que as acelerações do terreno foram registradas. A principal vantagem da intensidade do espectro de resposta é que ela correlaciona a força dos movimentos sísmicos do terreno com a resposta de

um oscilador, numa faixa de períodos comum a muitas estruturas [34]. Entretanto, este parâmetro não fornece informações a respeito da duração do abalo sísmico. Deve ser lembrado ainda que o conceito de intensidade de espectro está intimamente ligado aos efeitos de sismos sobre estruturas no regime elástico [23]. As intensidades de espectro para os espectros de amortecimento igual a 20% tem sido intimamente correlacionada às acelerações eficazes (RMS) de um certo número de registros sísmicos, embora este valor de amortecimento não seja representativo das estruturas que se tem na prática [34]. A Tabela 5 apresenta alguns valores típicos de Intensidade do Espectro de Resposta calculados por Housner.

#### 7.8.4 Valor Eficaz da Aceleração

O termo em inglês "Root Mean Square (RMS) Acceleration" foi traduzido como Valor Eficaz (VE) da Aceleração. A aceleração - VE de um registro sísmico é definida como:

$$VE = \left[ \frac{1}{td} \int_0^{td} \ddot{y}_g^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (\text{Eq. 43})$$

onde  $\ddot{y}_g(t)$  é aceleração no tempo  $t$  do registro sísmico de duração total  $td$ .

A principal vantagem da Aceleração - VE, como medida da severidade do abalo sísmico do terreno, é que ela pode ser

facilmente calculada e aplicada à análise de resposta sísmica, tanto determinística como não determinística [34].

#### 7.8.5 Fator de Intensidade

Segundo a referência [34], Arias propôs o uso de um parâmetro que está intimamente relacionado com o valor eficaz da aceleração. Arias propôs um parâmetro, denominado fator de intensidade, o qual é definido pela seguinte equação:

$$I = \frac{\pi}{2g} \int_0^t \ddot{y}_g(t)^2 dt \quad (\text{Eq. 44})$$

onde "g" é a aceleração da gravidade. Arias mostrou que a equação (44) corresponde a energia total armazenada, no final da atuação de um sismo, numa família de osciladores lineares, não amortecidos ou moderadamente amortecidos, de frequência variável. Este parâmetro é quase que independente do amortecimento estrutural, numa faixa ampla de valores de amortecimento.

#### 7.8.6 Duração da Fase Mais Intensa de Um Sismo SM

É comum os acelerogramas de sismos SM apresentarem uma fase principal de movimentos fortes indo de 12 a 25 segundos, seguida de uma fase secundária de movimentos menos intensos e que decresce gradualmente com o decorrer do tempo. A excitação máxima de uma estrutura com amortecimento é, em geral,

determinada pela fase forte; assim, é costume usar somente a fase de movimentos mais intensos para calcular a resposta de estruturas [44]. Daqui para frente, a duração da fase mais intensa de um sismo SM será referida como duração de sismo SM.

A duração do sismo SM tem sido, algumas vezes, reconhecida como um parâmetro importante que pode ter efeitos significativos sobre o dano causado por movimentos sísmicos do terreno. Este parâmetro está diretamente relacionado à energia liberada por um sismo [34]. Estudos anteriores tem mostrado que a duração do sismo SM depende de parâmetros tais como: magnitude, distância do local à fonte sísmica, condições de solo local\*, intensidade de Mercalli Modificada, e frequências de ondas sísmicas [34]. A maior dificuldade nos estudos relativos a duração de sismos SM resulta do fato de não se ter, até agora, uma maneira óbvia de como se definir duração, de modo a ter uma utilização que satisfaça a todas áreas de interesse [45]. Por exemplo, para cálculos de resposta estrutural seria ideal desenvolver uma definição de duração, que fosse dada em função da frequência. Um outro fato importante que deve ser considerado, ao se definir a duração de sismo SM, é a questão sobre quais partes do registro sísmico deveriam ser incluídas na estimativa final da duração [45]. Não há, ainda, um consenso geral sobre uma definição unificada de duração de abalo sísmico SM. Quando se proceder a comparação e avaliação dos vários valores de duração de sismos SM, dever-se-á ter sempre em mente as possíveis diferenças existentes na definição desse parâmetro [34]. As definições mais conhecidas para duração de sismo SM são aquelas de Bolt e de Trifunac e Brady. Essas duas definições são apresentadas no

parágrafo seguinte.

Bolt definiu uma "duração-intervalo" ("bracketed duration"), a qual corresponde ao intervalo de tempo entre o primeiro e o último valor de amplitude, do movimento sísmico, que se iguala a uma determinada amplitude de referência. A Figura 47 ilustra o significado dessa definição. Um outro autor, Page, adotou uma definição similar àquela de Bolt e usou a aceleração de 0,05g como a amplitude de referência. Já Trifunac e Brady definiram a duração em termos do parâmetro  $S(t')$ .

$$S(t') = \int_0^{t'} f^2(t) dt \quad (\text{Eq. 45})$$

onde  $f(t)$  representa o histórico de aceleração, velocidade, ou deslocamento do movimento do terreno, podendo  $t'$  ser, do ponto de vista matemático, finito ou infinito. Os autores desprezam os primeiros e últimos 5% valores das amplitudes de  $S(t')$ ; a duração é, então, definida como o intervalo de tempo que delimita os 90% das amplitudes restantes [45]. A Figura 48 apresenta esclarecimentos a respeito dessa definição.

A importância da duração de sismos SM é ratificada num estudo feito por Housner dos acelerogramas registrados em Parkfield - 1966, e em El Centro - 1940. Como mostrado na Figura 49, o registro de Parkfield apresenta um valor muito maior, tanto de aceleração de pico como de intensidade de espectro do que o registro de El Centro. Entretanto, apesar disso, o sismo de El Centro causou danos consideravelmente maiores às estruturas na área. Este paradoxo, de acordo com Housner, foi resolvido

levando-se em consideração as diferenças no valor da duração de sismos SM dos dois registros; o registro de Parkfield tinha uma duração de 1 segundo, ao passo que o registro de El Centro ti nha 15 segundos. A partir deste fato e ocorrências similares , Housner concluiu que as excitações sísmicas com movimentos for tes, tendo curta duração, não provocam tanto dano, como se po deria esperar se tomasse como base as acelerações de pico ou in tensidades de espectros [34].

## 8. CURVAS EMPÍRICAS DESENVOLVIDAS A PARTIR DE INFORMAÇÕES SÍSMICAS ANTERIORES

A determinação do movimento sísmico de projeto para uma instalação nuclear envolve, em vários estágios, a utilização de curvas empíricas desenvolvidas a partir de registros sísmicos anteriores. Tais curvas podem auxiliar na estimativa de acelerações de pico e de durações de possíveis abalos sísmicos no local de uma instalação nuclear. Além disso, elas podem dar orientações sobre o tipo de movimento de subsuperfície, aplicado na rocha, que deverá ser utilizado no processo de análise de resposta do local [34].

Chama-se a atenção para o fato de que as curvas empíricas encontradas na literatura refletem condições típicas dos locais onde os parâmetros foram registrados e que elas são baseadas num número limitado de registros sísmicos disponíveis. Além disso, essas curvas envolvem correlações de intensidade, ou magnitude, com distâncias à falha capaz. É importante ressaltar esse último fato porque ainda não se tem um conhecimento preciso do interrelacionamento existente entre esses parâmetros e as formas características dos movimentos vibratórios do terreno. Portanto, as curvas empíricas devem ser cuidadosamente interpretadas antes de serem utilizadas [34].

Nos subitens seguintes são apresentados, resumidamente, alguns dos mais importantes relacionamentos empíricos utilizados para estimar as características sísmicas do movimento do terreno. Serão abordadas somente as correlações pertinentes a

valores de pico de aceleração, velocidade e deslocamento e a duração de sismos SM. As formas espectrais obtidas empiricamente e usadas para descrever o conteúdo de frequência dos movimentos sísmicos são também características importantes; elas serão discutidas, posteriormente, no capítulo 10.

## 8.1 Valores de Pico dos Movimentos Superficiais do Terreno

Na bibliografia sísmica dispõe-se de um grande número de correlações empíricas dos valores de pico dos movimentos superficiais do terreno com intensidade, magnitude e distância. A maioria dessas correlações foram feitas em termos das acelerações horizontais de pico; poucos são os estudos com relação aos valores de pico de velocidade e deslocamento. Ainda são poucos os dados disponíveis sobre movimentos verticais do terreno, de modo que na prática os métodos de projeto se baseiam numa aceleração vertical de pico, a qual é assumida como sendo uma fração da aceleração horizontal de pico do terreno. Normalmente, esta fração é tomada igual a dois terços [34].

### 8.1.1 Correlações de Resposta de Pico do Terreno com Intensidade

Normalmente, no projeto de instalações nucleares, são utilizadas correlações entre intensidades MM e certas medidas quantitativas da severidade do movimento do terreno; a ace

leração horizontal de pico é a medida mais comumente usada . A Figura 50 apresenta várias das correlações entre aceleração horizontal e intensidade MM. A dispersão relativa a essas correlações indica, claramente, as incertezas associadas com o parâmetro intensidade para efeito de utilização em projeto.

Dos vários estudos que levaram às correlações indicadas na Figura 50, talvez o de Trifunac e Brady [46] seja o mais abrangente. Nesse estudo, baseado em 187 grupos de registros de sismos SM, da região oeste dos Estados Unidos, foram considerados os valores, tanto horizontal como vertical, de acelerações, velocidades e deslocamentos. Além disso, os vários registros sísmicos considerados foram classificados de acordo com as condições locais do terreno da estação acelerográfica. Esses registros, assim classificados, foram usados para desenvolver as correlações entre resposta de pico do terreno e intensidade MM para cada condição local de terreno. A Figura 51 mostra correlações médias entre resposta do terreno e intensidade MM. Além disso, os autores mencionados, desenvolveram faixas de dispersão para cada correlação, as quais deverão ser consideradas , caso se deseje aplicar tais resultados para efeito de projeto . De acordo com os dados de Trifunac e Brady, observaram-se as seguintes tendências gerais: para uma dada intensidade MM, a resposta horizontal de pico excede a resposta vertical de pico ; acelerações de pico registradas em rocha firme foram maiores do que aquelas registradas em solos tipo aluvião; apenas em alguns casos os solos apresentaram velocidades de pico mais altas; os deslocamentos de pico, registrados em solos tipo aluvião, foram maiores do que aqueles correspondentes às outras condições

de locais consideradas.

### 8.1.2 Correlações de Resposta de Pico do Terreno com Magnitude e Distância

Os dados sobre sismos SM têm sido utilizados para relacionar os movimentos de pico do terreno à magnitude de sismos e à distância do local à fonte sísmica. Essas correlações têm sido amplamente utilizadas nos projetos sísmicos. A seguir são apresentados, sucintamente, exemplos de tais correlações.

As Figuras 52 e 53 apresentam correlações típicas de aceleração horizontal de pico com as condições gerais de locais. A Figura 52(a), desenvolvida por Housner, mostra as correlações entre valores limites superiores de aceleração de pico, magnitude e distância à falha capaz. Entretanto, atualmente é discutida a utilização dessas curvas, uma vez que o valor máximo de aceleração de 0,5 g para um sismo de magnitude 8 já foi superado no sismo de San Fernando, em 1971. A Figura 52(b), desenvolvida por Esteva, apresenta correlações entre aceleração horizontal de pico, magnitude e distância focal. O sismo de San Fernando teve um importante impacto sobre esses tipos de correlações porque, nesse evento, além de terem sido registrados altos valores de aceleração de pico, não obtidos anteriormente, foi obtido um grande número de dados. As Figuras 52(c) e (d) mostram correlações que foram desenvolvidas a partir da ocorrência desse evento. Na Figura 53, desenvolvida a partir dos estudos de Trifunac e Brady, são mostradas as comparações de diversas correla

ções entre aceleração horizontal de pico e distância, para sismos de magnitude de 6,5 a 6,6.

A Figura 54 apresenta exemplos de correlações entre acelerações horizontais de pico (registradas em afloramentos rochosos), magnitudes e distâncias à falhas capazes. Uma vez que os movimentos sísmicos de rocha de subsuperfície são, tipicamente, usados como sendo os movimentos de excitação na análise de resposta do local, eles têm que ser estimados a partir de estudos geológicos e sismológicos da região. Na falta de registros sísmicos em rocha de subsuperfície, os registros em afloramentos rochosos são, freqüentemente, utilizados para estimar as acelerações de pico e as características gerais dos movimentos de excitação mencionados. Esta estimativa pode ser feita através de dados empíricos, baseados nos valores observados de atenuação de aceleração para os movimentos em afloramentos rochosos. A Figura 54 (a) é utilizada para se definir o valor da aceleração dos movimentos sísmicos, em rocha, num determinado local. A Figura 54 (b) mostra a dispersão que existe na correlação entre aceleração e distância à falha responsável pela geração do sismo; essa dispersão reflete a influência dos diferentes mecanismos de geração de sismos, de condições geológicas e de caminhos de propagação das ondas sísmicas.

Conforme visto anteriormente, os valores horizontais de pico de velocidade e de deslocamento fornecem uma melhor medida das forças sísmicas laterais sobre estruturas de freqüências baixa a intermediária, do que os valores de pico de aceleração horizontal. São poucas as correlações que envolvem veloci

dades e deslocamentos. A Figura 55(a) apresenta um exemplo típico de correlação baseado na estimativa do limite superior de velocidades horizontais. Já a Figura 55(b) mostra correlações de velocidade de pico com magnitude e distância focal.

Trifunac e Brady fizeram um estudo a respeito das correlações entre valores de pico (tanto horizontal como vertical) de aceleração, velocidade e deslocamento, magnitude, distância e condições locais. Este estudo foi baseado em avaliações estatísticas de 187 grupos de registros de sismos SM em campo livre. Desse estudo, os autores concluíram que:

1) Para distâncias maiores do que cerca de 30 km, todas as amplitudes (aceleração, velocidade e deslocamento) variam, aproximadamente, com o inverso do quadrado da distância epicentral;

2) Os valores de pico de sismos SM não crescem linearmente com a magnitude do sismo;

3) Para sismos de magnitudes pequena e intermediária, as acelerações de pico, médias, para locais em rocha firme, são maiores do que aquelas registradas em solos tipo aluvião. Para magnitudes maiores do que 6, as acelerações de pico, registradas nos três tipos de locais investigados (rocha firme, rocha intermediária e aluvião), são aproximadamente iguais. Entretanto, para magnitudes maiores do que 6, em locais com solo tipo aluvião, os valores de velocidade e deslocamento de pico parecem exibir amplitudes maiores.

## 8.2 Duração da Fase Mais Intensa de Sismo SM

No item 7.8.5, foram citadas algumas das definições desse parâmetro, bem como a importância do mesmo. A Figura 56 , apresenta correlações entre duração e magnitude em função das três mais conhecidas definições de duração de sismo SM. Uma comparação entre as curvas mostradas na Figura 56 mostra que os resultados de Housner são similares aos resultados de Bolt, adotando-se como 0,05 g a aceleração de referência; entretanto, a curva de Housner excede grandemente a curva de Bolt para o valor de aceleração de referência de 0,10 g. Os resultados de Trifunac e Brady são apresentados para locais em solo tipo aluvião e rocha firme, e distâncias epicentrais variando de 10 a 50 km. A duração para locais com solo tipo aluvião tendem a exceder os resultados de Housner e Bolt para magnitudes menores do que 6; porém, para magnitudes maiores, elas apresentam valores menores do que as curvas de Housner e a de Bolt correspondente a aceleração de 0,05 g. As curvas de Trifunac e Brady, para locais em rocha firme, são, de um modo geral, comparáveis às curvas de Bolt com aceleração de 0,10 g. Cada grupo de resultados indica uma relação direta entre duração e magnitude.

Na Figura 56 pode, ainda, ser analisada a influência da distância à fonte sísmica sobre a duração de sismo SM. Pode ser visto que, para uma determinada magnitude e uma dada condição local, da região oeste dos Estados Unidos, a duração aumenta com o aumento da distância à falha.

Trifunac e Brady correlacionaram, também, a duração

com intensidade MM e condições locais. A Figura 57 apresenta, resumidamente, as correlações médias obtidas. Os autores desse estudo chegaram à conclusão de que:

1) A duração de sismos SM tende a diminuir com o aumento da intensidade MM, independentemente da amplitude (aceleração, velocidade, deslocamento) considerada;

2) Para uma determinada intensidade MM, a duração média de sismos SM, para um local com solo tipo aluvião, é cerca do dobro da duração para um local em rocha firme;

3) Quando todos os dados são considerados, independentemente das condições locais, a duração média de sismos SM é maior para movimentos verticais do que para movimentos horizontais.

9. TÉCNICAS DISPONÍVEIS PARA OBTENÇÃO DO MOVIMENTO SÍSMICO PADRÃO DE CAMPO LIVRE PARA O LOCAL

De acordo com a referência [13], deverão ser determinados os efeitos dos sismos de referência, ao longo do perfil do terreno, em pontos específicos da região que será ocupada pelas fundações das estruturas de uma instalação nuclear. Nesses pontos, os efeitos dos sismos de referência deverão ser caracterizados pelos respectivos espectros de resposta correspondentes à aceleração horizontal máxima do terreno estabelecida para o local. A única exigência, na determinação dos referidos efeitos sísmicos, é que seja considerada a influência do solo local na transmissão dos movimentos sísmicos que chegam às formações rochosas subjacentes ao local. Não é feita nenhuma menção à consideração de efeitos de interação solo-estrutura. Assim, a determinação do movimento sísmico de projeto para o terreno deverá ser feita em condições de campo livre, ou seja, sem nenhuma edificação presente no local analisado.

Esse capítulo terá por finalidade apresentar as técnicas para obtenção dos efeitos dos sismos de referência nos níveis das fundações, nas condições de campo livre. De acordo com a referência [47], dispõe-se de duas metodologias para abordagem desse problema; uma independente do local e outra dependente do local.

Na metodologia independente do local procura-se utilizar curvas espectrais baseadas no tratamento estatístico de vários sismos, que reflitam diferentes condições de locais, ou

baseadas num determinado sismo padrão. A idéia básica é utili  
zar-se espectros de resposta que apresentem propriedades tais  
que não seja necessário levar em consideração a influência es  
pecífica do local analisado sobre a transmissão de ondas sísmi  
cas que chegam ao embasamento rochoso do local. Nessa metodo  
logia estão os procedimentos de Housner, de Newmark e Hall, e do  
Guia Regulatório 1.60.

A metodologia dependente do local pode ser subdividi  
da em duas outras; uma na qual são utilizados os registros de  
locais semelhantes, e outra na qual é feita uma avaliação anali  
tica da resposta específica do local às excitações sísmicas.

No decorrer da exposição dessas técnicas referir-se-á  
ao espectro de resposta obtido na superfície do terreno. Res  
alta-se, entretanto, que uma vez obtido o espectro de resposta  
no nível da superfície do terreno, é possível obter-se um espec  
tro de resposta, em nível de subsuperfície, por meio da utiliza  
ção de programas de computador. O programa SHAKE, por exemplo,  
é um através do qual os movimentos de subsuperfície são calcula  
dos por meio de procedimentos de deconvolução.

No item 9.1 é apresentada a metodologia independente  
do local. Já a metodologia dependente do local será apresentada,  
separadamente, nos itens 9.2 e 9.3.

#### 9.1 Metodologia Independente do Local

Nessa metodologia são utilizadas formas espectrais

padronizadas, desenvolvidas a partir de um conjunto de acelerogramas que representam uma variedade de condições sismológicas, geológicas e de solos locais. Estas formas espectrais podem ser ajustadas por um investigador experiente, de modo a levar em consideração as condições de locais específicos; entretanto, na literatura sísmica, em uso corrente, ainda não se dispõe de procedimentos sistematizados para fazer esses ajustes.

A abordagem do problema sísmico, através das curvas espectrais independentes do local, para obtenção do movimento vibratório de projeto é a que tem maior utilização. Housner , em 1959, foi quem primeiro introduziu o uso das curvas espectrais. Desde então, tem sido desenvolvidas outras curvas típicas. Na literatura sísmica, as curvas espectrais mais conhecidas são as de Housner, de Newmark e Hall e do Guia Regulatório 1.60, as quais serão apresentadas nos subitens subsequentes.

#### 9.1.1 Procedimentos de Housner

O modo mais simples de se definir os movimentos sísmicos previstos para o terreno, num determinado local, seria através da utilização do acelerograma de um sismo já ocorrido, e que tivesse magnitude e distância à fonte sísmica adequados ao local em estudo. Assim, é que o registro SM da componente NS do sismo de El Centro, mostrado na Figura 45(a), tem sido usado, em muitos casos, como representativo do movimento de um sismo de projeto, de magnitude 7,0, à uma distância epicentral de cerca de 7 km. A experiência tem mostrado, entretanto, que podem ha

ver diferenças drásticas, mesmo entre os registros de sismos tendo magnitudes e distâncias similares; além disso, as respostas estruturais produzidas por tais registros podem ser muito mais discrepantes do que os próprios registros sísmicos. Assim, o uso de um único acelerograma, como aquele mostrado na Figura 45(a), para definir um sismo de projeto daria margem a grande incerteza quanto ao significado da resposta por ele produzida. De acordo com a referência [27], um sismo "médio" seria uma solicitação de projeto muito mais significativa, e que, o meio mais efetivo de se descrever esse sismo médio seria através do seu espectro de resposta. O espectro de resposta desenvolvido por Housner, em 1959, é um exemplo típico de um espectro de resposta médio de um sismo.

O espectro de Housner foi construído com base nos quatro maiores sismos que tinham ocorrido, até então, no oeste dos Estados Unidos: os sismos de El Centro - 1934, El Centro - 1940, Olympia - 1949 e Taft - 1952. Os parâmetros básicos sobre a data, local do epicentro, e magnitude dos sismos, utilizados nos estudos de Housner, são apresentados na Tabela 8. De acordo com a referência [47], as magnitudes atribuídas a esses sismos variam de 6,5 a 7,7 e as distâncias do epicentro à estação de registro variam de 16 a 40 km. Os perfís de solos, nas estações de registro, não são bem definidos; entretanto, é aceito que as quatro estações de registro representam uma variedade de condições locais de terreno. Para cada um dos sismos estudados, Housner analisou duas componentes horizontais. Housner calculou, inicialmente, os espectros de resposta para duas componentes horizontais de cada sismo. As curvas resultantes foram então sub

metidas a processos de normalização, obtenção de valores médios e de curvas de ajuste a esses valores médios. O espectro de Housner foi inicialmente normalizado de modo que na região de período longo, a velocidade espectral não amortecida ( $\xi = 0\%$ ), fosse igual a 1 pé/s (0,32 m/s) [27]. A Figura 58(a) apresenta o espectro de Housner para velocidade espectral. Este espectro é aplicável aos sismos de grande magnitude à distâncias moderadas do epicentro [37]. Conforme mostrado na Figura 58(b), o espectro de Housner é acompanhado de fatores de escala\* correspondentes a cada sismo utilizado na confecção do espectro. A escala do "espectro médio de velocidade" é tal que as curvas não amortecidas ( $\xi = 0\%$ ) se ajustam com a curva média de espectro de velocidade correspondente às duas componentes do registro do sismo de El Centro - 1940. Comparar as Figuras 58(a), assumindo um fator de escala de 2,7, com a Figura 60(b).

Uma característica peculiar do espectro de Housner é que os fatores de escala, correspondentes às curvas normalizadas, são baseados na intensidade do espectro e não na aceleração de pico do terreno, a qual atualmente é a que está sendo mais utilizada. A resposta horizontal média, de qualquer um dos quatro maiores sismos considerados no estudo, pode ser obtida multiplicando-se as ordenadas do espectro de Housner pelos fatores de escala correspondentes a cada sismo. Esses fatores são apresentados na Figura 58(b).

Normalmente a excitação sísmica do local de uma instalação nuclear é definida em termos de acelerações de pico do terreno. Portanto, nem sempre é conveniente utilizar fatores de

escala, para espectros de resposta, com base em intensidades de espectro. Com base no comportamento das curvas espectrais de aceleração, mostradas na Figura 58(b), as quais convergem para a aceleração horizontal máxima do terreno, no período de vibração nulo<sup>(1)</sup>, chegou-se à conclusão de que o espectro pode ser multiplicado por um fator de mudança de escala igual ao quociente entre a aceleração de pico do terreno e a aceleração espectral correspondente ao período zero. No caso do espectro de aceleração de Housner, mostrado na Figura 58(b), a aceleração espectral no período zero é igual a 4 pés/s<sup>2</sup> (0,124 g). Adotando-se a aceleração horizontal máxima do terreno igual a 0,1 g e multiplicando-se todas as ordenadas do gráfico, apresentado na Figura 58(b), pelo fator de mudança de escala correspondente, obtém-se o espectro mostrado na Figura 58(c). Este novo espectro é apresentado num gráfico logarítmico especial. Estas novas curvas espectrais são muito úteis, quando se deseja obter os parâmetros fornecidos pelo gráfico, em função de outros valores diferentes de aceleração horizontal máxima do terreno. Como foi visto anteriormente, a aceleração de pico não é uma medida perfeita da severidade do movimento do terreno. A utilização de fatores de mudança de escala, em termos de aceleração, foi feita somente para efeito de comparações posteriores com espectros desenvolvidos por outros autores e que utilizam esse procedimento.

---

(1) - Ver definição de Aceleração de Período Zero no Apêndice A.

### 9.1.2 Procedimentos de Newmark e Hall

Newmark constatou que os espectros de resposta dos movimentos de sismos reais, geralmente exibiam faixas definidas de frequência, nas quais as respostas, em termos de aceleração, velocidade e deslocamento, cada uma dentro da sua faixa de frequência própria, apresentavam valores aproximadamente constantes. Posteriormente, Newmark e Hall descobriram que o espectro de resposta, dentro de certas faixas de frequência bem definidas, poderia ser relacionado aos valores de aceleração, velocidade e deslocamento de pico do terreno. Isto quer dizer o seguinte: numa certa faixa de frequência, na qual um determinado parâmetro (aceleração, velocidade ou deslocamento) pode ser considerado constante, a amplitude, correspondente ao parâmetro resposta analisado, pode ser obtida por uma simples multiplicação entre o valor de pico correspondente do terreno (aceleração, velocidade ou deslocamento) por um fator de amplificação conveniente. A Tabela 6 apresenta os fatores de amplificação utilizados por Newmark e Hall na formulação de suas curvas espectrais padronizadas. Esses fatores são dados em função do fator de amortecimento e do tipo de resposta analisado. Assim, para definir a curva espectral, para um determinado local, a partir dos valores de pico de aceleração, velocidade e deslocamento do terreno, dever-se-á utilizar os fatores de amplificação espectrais mostrados na Tabela 6. Na Figura 59(a) são esquematizados os procedimentos de Newmark e Hall para obtenção de seus espectros de resposta. Com exceção da região do espectro, em que os deslocamentos são constantes, os limites de frequência, das várias

regiões do espectro, são dadas como valores múltiplos de  $f_1$ , a qual é a frequência correspondente à interseção dos valores espectrais de pico de velocidade e de aceleração. Chama-se a atenção para o fato de que os estudos de Newmark e Hall foram desenvolvidos com base somente na componente NS do acelerograma do sismo de El Centro - 1940.

Ainda no mesmo estudo sobre movimentos do terreno, Newmark e Hall sugeriram a utilização de um "sismo padrão", nos casos onde não se dispusessem de informações específicas sobre o local. Esse sismo padrão teria valores de pico, representativos do movimento do terreno, aproximadamente 50% maiores do que aqueles medidos no sismo de El Centro - 1940. O sismo padrão teria os seguintes valores de pico: aceleração de 0,5 g, velocidade de 24 pol/s (61 cm/s) e deslocamento de 18 pol (45,7 cm). Para um determinado valor de aceleração do terreno, os valores máximos de velocidade e deslocamento do sismo equivalente seriam obtidos com base na proporcionalidade entre os parâmetros de pico do sismo padrão. Assim, para um valor de aceleração de pico do terreno igual a 0,1 g, o sismo equivalente, obtido com base no sismo padrão, teria uma velocidade máxima do terreno de 4,8 pol/s (12,2 cm/s) e um deslocamento de pico do terreno de 3,6 pol (9,1 cm). A Figura 59(b) mostra o espectro de resposta desenvolvido de acordo com os procedimentos de Newmark e Hall para o sismo equivalente com aceleração horizontal de pico igual a 0,1 g.

A referência [47] chama a atenção para o fato de que os valores do sismo padrão, quanto a aceleração, velocidade e deslocamento máximos do terreno, de acordo com os procedimentos

de Newmark e Hall, só deverão ser utilizados quando não se dispuser de informações específicas do local. Para esses casos, eles sugerem que sejam feitos ajustes nos seus fatores de amplificação espectral, tomando como base as condições gerais do local em estudo. Eles enfatizam, ainda, que as diferenças nos fatores de amplificação espectral para velocidades e acelerações entre locais em rocha e locais de solos com baixa resistência, podem ser da ordem de até dois [47]. Entretanto, não é indicado nenhum procedimento direto para fazer os ajustes mencionados.

Os estudos desenvolvidos por Newmark e Hall servem, também, como base para estimar os critérios básicos a serem seguidos na obtenção do espectro de resposta para o movimento vertical do terreno. Os espectros verticais são construídos, partindo-se da hipótese de que os movimentos verticais de pico são iguais a dois terços dos movimentos horizontais de pico quando os movimentos nas falhas (responsáveis pela geração de sismos) são horizontais, e iguais aos movimentos horizontais de pico quando o movimento, nas referidas falhas, envolvem grandes componentes verticais. Uma vez determinados os valores de pico do terreno, para o espectro vertical, faz-se uso dos mesmos fatores de amplificação espectral usados para o espectro horizontal. São utilizados também, nesse caso, os mesmos limites das faixas de frequência utilizadas no espectro horizontal.

### 9.1.3 Procedimentos do Guia Regulatório 1.60

Os procedimentos apresentados no Guia Regulatório 1.60

tem por objetivo a obtenção, também, de espectros de resposta de projeto. Esses espectros foram elaborados com base em dois estudos independentes, realizados por Newmark [48] e Blume [49], sobre as propriedades estatísticas de espectros de resposta de sismos importantes. A Tabela 7 apresenta uma relação das estações de registro desses sismos, bem como das componentes sísmicas, horizontais ou verticais, associadas com os eventos sísmicos utilizados por Newmark [48] e Blume [49]. Newmark [48] utilizou um total de 42 componentes de registros do movimento sísmico do terreno, 28 componentes horizontais e 14 verticais. Blume [49] utilizou somente informações a respeito dos movimentos horizontais do terreno, num total de 32 componentes. Na Tabela 7 são apresentadas, também, as acelerações de pico do terreno associadas com as componentes sísmicas, horizontais e verticais, utilizadas nos estudos mencionados. Na Tabela 8 são mostradas as condições locais do terreno onde os referidos eventos sísmicos foram registrados.

A partir dos estudos apresentados nas referências [48] e [49], Newmark et alii [28], com base no valor MSD, ou seja, o 84º percentil\* de uma distribuição lognormal, desenvolveram um procedimento unificado para a definição de espectros de resposta de projeto para instalações nucleares. As informações apresentadas no Guia Regulatório 1.60 são os resultados obtidos a partir da referência [28]; assim, essa referência deve ser consultada para maiores esclarecimentos com relação ao RG 1.60. A Tabela 7 foi obtida a partir da referência [28]. Conforme pode ser visto nessa tabela, as acelerações de pico do terreno, na direção vertical variam entre 0,016 e 0,718 g, ao passo que

na direção horizontal variam entre 0,036 e 1,25 g. Nas Figuras 61(a) e (c), obtidas também na referência [28], são mostrados espectros de resposta, horizontal e vertical, respectivamente, obtidos a partir dos acelerogramas normalizados em relação à aceleração horizontal máxima do terreno. Já nas Figuras 61(b) e (d) são mostrados os espectros normalizados com relação à velocidade horizontal máxima do terreno. Essas figuras servem para ilustrar a diferença que existe no valor do desvio padrão quando se normaliza os acelerogramas em função dos valores máximos de aceleração ou velocidade horizontal do terreno. O estudo apresentado na referência [28] concluiu pela utilização de fatores de amplificação, com base na aceleração, nas frequências de 2,5, 9 e 33 Hz e com base no deslocamento na frequência de 0,25 Hz.

As curvas espectrais do RG 1.60, utilizam, aproximadamente, os mesmos relacionamentos gerais de ajuste de escala utilizados nos espectros de Newmark e Hall; entretanto, conforme relacionado na Tabela 7, as curvas espectrais do RG 1.60 são baseadas num número bem maior de registros sísmicos do terreno.

O RG 1.60 apresenta espectros de resposta de projeto, tanto horizontais como verticais. Para definir o espectro de resposta horizontal, é necessário que se estabeleça primeiro os valores horizontais máximos de aceleração e deslocamento do terreno. A aceleração horizontal a ser utilizada é aquela que os estudos geológicos, sismológicos indicarem para o local em estudo. Já o deslocamento horizontal máximo do terreno é assumido como sendo diretamente proporcional à aceleração horizontal máxima do terreno. Para uma aceleração de pico de 1,0 g as

sume-se um deslocamento de pico de 36 pol (91,4 cm). A referência [47] chama a atenção para o fato de que esses valores são proporcionais aos valores utilizados por Newmark e Hall, para definição do sismo padrão; 18 pol (45,7 cm) para o deslocamento máximo do terreno e 0,5 g para a aceleração máxima do terreno. Em termos de frequência, os espectros de resposta são delimitados por quatro linhas retas, verticais, caracterizando frequências definidas. Essas linhas são referidas, como pontos de controle através das letras A, B, C e D. Os fatores de amplificação para construção do espectro de resposta são dados, também, em função do fator de amortecimento e de acordo com as quatro frequências dos pontos de controle. A Tabela 9 apresenta esses fatores de amplificação. A Figura 18 apresenta os espectros de resposta, horizontal e vertical, do RG 1.60. A Figura 62 apresenta um espectro de resposta horizontal construído de acordo com os procedimentos do Guia Regulatório 1.60, assumindo-se uma aceleração horizontal máxima do terreno igual a 0,1 g.

O espectro de resposta vertical é construído do mesmo modo que o espectro de resposta horizontal; entretanto, há uma diferença quanto a frequência que caracteriza o ponto de controle C e quanto aos fatores de amplificação. Na Tabela 9 pode-se observar essas diferenças. Chama-se a atenção para o fato de que os fatores de amplificação utilizados na construção do espectro de resposta vertical, são aplicados, também, aos valores

das componentes "horizontais" máximas de deslocamento e aceleração do terreno. Os fatores de amplificação vertical, mostrados na Tabela 9 foram estabelecidos de modo que o espectro de resposta vertical resultante, fosse igual a dois terços dos valores calculados para o espectro de resposta horizontal, para freqüências inferiores a 0,25 Hz. Na faixa de freqüências de 0,25 a 3,5 Hz, a relação entre as amplitudes espectrais vertical e horizontal varia de dois terços a um; já para freqüências entre 3,5 e 33 Hz, os espectros de resposta horizontal e vertical são idênticos. A Figura 63(a) mostra o espectro de resposta vertical correspondente à aceleração horizontal máxima do terreno de 0,1 g. Na Figura 63(b) é feita uma comparação entre os espectros de resposta horizontal e vertical para um fator de amortecimento de 5%.

#### 9.1.4 Comparação de Espectros

Na Figura 64 é feita uma comparação entre os espectros de resposta desenvolvidos por Housner, Newmark e Hall e aqueles obtidos a partir do RG 1.60. É evidente a pequena diferença entre os espectros desenvolvidos por Newmark e Hall e aqueles espectros produzidos de acordo com o RG 1.60; a existência dessa diferença é devida, principalmente, ao fato de que os espectros do RG 1.60 foram baseados num número de registros sísmicos bem maior do que aquele disponível quando Newmark e Hall desenvolveram seus espectros. Entretanto, conforme mostrado na Figura 64, o espectro de Housner difere substancialmente dos ou

tros dois; no parágrafo seguinte serão discutidas algumas das possíveis causas dessas diferenças.

As diferenças entre os espectros de Housner e os do RG 1.60 devem estar em grande parte relacionadas ao valor de probabilidade associado à cada procedimento. Os espectros de Housner representam uma média de espectros de registros de sismos SM; nesse caso as amplitudes espectrais não serão excedidas 50% das vezes. Já nos espectros de Newmark e Hall e do RG 1.60 as amplitudes espectrais não serão excedidas 84% das vezes, as sumindo-se que as acelerações horizontais máximas do terreno foram corretamente avaliadas. As diferenças entre os valores de probabilidade usados por Housner e no RG 1.60 podem ser atribuídas, em parte, às diferenças na metodologia básica de projeto em uso na época em que cada procedimento foi elaborado. Quando os espectros de Housner foram concebidos (fim dos anos 50) eram utilizadas metodologias de projeto com base no conceito das tensões admissíveis, sendo essas assumidas como sendo iguais a um terço da tensão de escoamento. Já a metodologia usual de projeto utilizada em conexão com as curvas espectrais do RG 1.60, normalmente é baseada no conceito dos estados limites últimos (particularmente com relação ao SSE). De acordo com essa última metodologia, permite-se que a estrutura escoe sob a ação de cargas 50% maiores do que aquelas utilizadas na prática segundo as tensões admissíveis. Talvez se os espectros de Housner tivessem sido desenvolvidos para utilização em conexão com os conceitos de resistência última, as suas amplitudes espectrais poderiam ter sido aumentadas em 50%; nesse caso elas estariam mais próximas daquelas do RG 1.60, principalmente na faixa de frequências

de 2 a 10 Hz, que é a faixa de maior interesse no projeto de uma instalação nuclear.

As diferenças entre os espectros do RG 1.60 podem ser atribuídas, também, a vários outros fatores, tais como: as diferenças nas técnicas para obtenção dos ajustes de espectro; o número de registros usados; faixas de magnitudes de sismos e de distâncias à falhas capazes. Como foi visto anteriormente, Housner usou oito registros de sismos com magnitudes variando de 6,5 a 7,7 e que os seus espectros são ajustados por meio de um fator baseado nas intensidades espectrais. As distâncias epicentrais dos registros utilizados por Housner variam de cerca de 16 a 40 km. Em contraposição, os espectros do RG 1.60 foram desenvolvidos a partir de uma amostra de registros de sismos SM a qual não somente é maior, como também representa uma faixa mais ampla de magnitudes e distâncias epicentrais. Além disso, o ajuste dos espectros desses registros é feito com base nos valores de pico de aceleração e deslocamento, em vez de intensidades espectrais.

Na Tabela 8 são apresentados os tipos de condições locais de terreno associados com as metodologias independentes do local. A classificação dos tipos de condições locais é aquela proposta por Seed et alii [50], a qual é apresentada na Tabela 8. Relativamente aos dados utilizados na elaboração dos espectros de resposta do RG 1.60, aproximadamente um quarto dos registros foram obtidos em locais em rocha; vários foram obtidos em locais com solos não coesivos profundos; os registros restantes foram obtidos em locais com solo rígido. Tanto Newmark

[48] como Blume [49], durante a realização de suas investigações independentes, que resultaram na elaboração do RG 1.60, levaram em consideração os efeitos de condições locais de solos ; o estudo de Newmark originou espectros, a partir dos quais pode-se constatar diferenças importantes entre movimentos sísmicos registrados em sedimentos e em rochas competentes, particularmente para freqüências inferiores a aproximadamente 3 Hz. Entretanto, no espectro de resposta de projeto recomendado por Newmark, e que é apresentado no RG 1.60, não é feita nenhuma distinção entre os vários perfis locais de solo; assim, o espectro de resposta do RG 1.60 representa o valor estatístico MSD no qual as condições superficiais de solo constituem uma variável da qual não se tem controle [47].

## 9.2 Técnicas de Registros de Locais Semelhantes

É claro que os dados disponíveis sobre registros de sismos SM fornecem uma orientação importante no processo de definição dos critérios sísmicos de movimento vibratório para instalações nucleares. Esses registros podem ser usados para compor espectros independentes do local, e que correspondam a uma ampla variedade de condições locais e geológicas. Entretanto, por meio de uma seleção cuidadosa, é possível, também, identificar um conjunto de espectros provenientes de registros obtidos em estações cujas características sismológicas, geológicas e de solo local representem, aproximadamente, aquelas condições do local proposto para a construção da instalação. Utilizando ,

então, os mesmos procedimentos que Newmark usou para obter as curvas espectrais do RG 1.60, poder-se-ia desenvolver um conjunto de espectros médios e MSD.

No processo de seleção de registros de locais semelhantes é necessário levar em consideração que os movimentos sísmicos do terreno são afetados por fatores relacionados ao mecanismo de geração de sismos, pelo caminho de propagação fonte-local, e pelas condições locais do terreno. A condição ideal seria aquela na qual os registros selecionados fossem tais que cada um desses fatores se assemelhasse, o melhor possível, àqueles fatores correspondentes do local da instalação nuclear e ao seu evento sísmico de projeto previsto. Entretanto, face à limitação de dados sobre registros de sismos SM, é necessário ser menos rígido com alguns desses requisitos de semelhança. É preciso portanto, que em primeiro lugar se definam os fatores específicos que poderiam ter os maiores efeitos sobre o abalo sísmico no local; a seguir seriam, então, selecionados os registros disponíveis que melhor representassem esses fatores.

Serão apresentados, nos subitens seguintes, alguns exemplos de aplicação de registros de locais semelhantes, e a variabilidade dos membros individuais de um grupo de registros de locais semelhantes.

### 9.2.1 Exemplos de Aplicação

Nesse subitem serão apresentados dois exemplos típicos

cos a respeito do assunto em questão: primeiro são indicados os procedimentos de Guzman e Jennings; a seguir são apresentadas as curvas espectrais de Seed, Ugas e Lysmer.

#### a) Metodologia de Guzman e Jennings

Na referência [51], Guzman e Jennings descrevem um procedimento para o desenvolvimento de espectros com base em registros de locais semelhantes. Eles recomendam que após terem sido determinadas as características geológicas e sismológicas de cada SSE postulado, seja selecionado um conjunto de registros de sismos SM que represente condições comparáveis de magnitude, distância, condições locais de solo e geologia, província tectônica e mecanismo de falha. A introdução adicional de acelerogramas continua até que "as condições nas quais eles tenham sido registrados não sejam mais representativas do SSE, ou até que os registros de um mesmo sismo, já incluídos, sejam o suficientemente representativos de modo que a inclusão de registros adicionais não seja mais significativa para a seleção do espectro de projeto". Uma vez selecionado este conjunto, são utilizadas as curvas empíricas de atenuação, já existentes, relacionando aceleração de pico, magnitude e distância, para se fazer o ajuste das amplitudes dos acelerogramas selecionados, de modo a melhor representar o SSE postulado. Essas curvas de atenuação não são usadas para prever acelerações de pico; elas são usadas para medir a severidade do abalo sísmico registrado, relativa àquela severidade esperada para as condições correspondentes ao

SSE. Os espectros desses registros, assim ajustados, são então colocados num gráfico e comparados com as curvas espectrais do RG 1.60. Com base nesta comparação "é selecionado um conjunto de espectros, adequadamente conservativo para o SSE".

#### b) Curvas Espectrais de Seed, Ugas e Lysmer

Seed et alii [51], apresentam um estudo sobre espectros dependentes do local, com base, especificamente, em condições locais. De um total de 104 registros sísmicos, Seed et alii formaram quatro grupos de registros sísmicos, cada grupo representando locais com características semelhantes. A classificação utilizada na caracterização da condição de terreno correspondente a cada grupo é aquela descrita na Tabela 8. Os grupos foram constituídos dos seguintes registros: 28 em rocha, 31 em solo rígido, 30 em solo não coesivo profundo e 15 em pacotes de solo de resistências baixa a média. Para cada um desses grupos, foram desenvolvidos espectros médios e MSD, correspondentes a um fator de amortecimento de 0,05 e normalizados para uma aceleração de período zero igual a 0,1 g.

Uma comparação entre os espectros médios e MSD, desenvolvidos por Seed et alii, indicam certas tendências que podem ser atribuídas à diferenças nas condições locais. Assim, uma análise dos referidos espectros indicaria, por exemplo, que na faixa de baixa frequência, os espectros de locais com solos de baixa a média resistência e de locais com solo profundo não coesivo teriam amplitudes maiores do que aquelas de locais em

rocha ou locais com solos rígidos; estas tendências são claramente evidentes na Figura 65 para frequências menores do que 2 a 3 Hz. Além disso, para frequências mais altas (acima de cerca de 6 Hz), os espectros de resposta de locais, em rocha e de locais com solo rígido, deveriam apresentar amplitudes maiores do que aquelas de espectros de condições locais mais profundas ou menos resistentes; essas tendências são, também, evidentes na Figura 65, embora elas sejam muito menos pronunciadas do que as tendências observadas na região de baixa frequência.

Também de interesse na Figura 65 são as comparações entre os espectros MSD dependentes do local e as curvas espectrais do RG 1.60, correspondentes a um fator de amortecimento de 5%. Essas comparações indicam que as diferenças entre os espectros dependentes do local e os do RG 1.60 são mais pronunciadas para frequências inferiores a 2 ou 3 Hz; menos importante, mas ainda dignos de observação, são as diferenças na região de frequências mais altas.

### 9.2.2 Variabilidade de Registros Individuais Num Mesmo Grupo de Registros

Como observado anteriormente, o grupo de registros de locais semelhantes é selecionado de modo a corresponder àquelas registros particulares que melhor representem as características sismológicas, geológicas e de condições locais de solo. Na prática, entretanto, somente certas combinações destas caracte

terísticas particulares de locais é que podem ser representadas num único registro; na realidade, as várias características apresentadas por um determinado registro sísmico de um grupo, irão de um modo ou de outro, diferir daquelas apresentadas por outro registro qualquer do mesmo grupo. Em consequência, as formas espectrais dos registros individuais diferirá, também, nas faixas de freqüência de interesse no projeto de instalações nucleares.

A Figura 66 é apresentada com o intuito de exemplificar as diferenças entre os espectros de registros individuais pertencentes a um mesmo grupo. No caso em questão, esse grupo é representativo de locais com solos profundos não coesivos. Essas diferenças podem ser atribuídas em parte às variações nas condições locais de solo, em locais distintos; entretanto, essas diferenças, provavelmente, estão mais diretamente ligadas às variações, no mecanismo de geração de sismos e ao caminho de propagação fonte-local, existente entre os vários registros.

Concluindo, pode-se dizer que quando do desenvolvimento de espectros representativos, de acordo com os procedimentos de locais semelhantes delineados neste item, é importante usar um grupo que contenha um número suficiente de registros de modo a permitir uma avaliação estatística significativa dos dados. Um grupo de tamanho insuficiente poderia fornecer resultados errôneos e as tendências não seriam inteiramente representativas das características do local da instalação nuclear. Além disso, tem-se que exercitar um julgamento cuidadoso quando da seleção dos registros individuais em cada grupo, de modo que toda a série de registros de locais semelhantes forneça uma represen

tação razoável do abalo sísmico do terreno no local.

### 9.3 Análise da Resposta do Local

É evidente que o uso de registros de locais semelhantes para desenvolver os espectros de movimento vibratório, em locais de instalações nucleares, irá definir movimentos do terreno muito mais representativos das condições sismológicas, geológicas e de solo local do que o uso dos procedimentos independentes do local. Entretanto, pode ser que não se encontre, na literatura sísmica de registros de sismos SM, dados que reflitam completamente as características do solo local, que se esteja avaliando, juntamente com as magnitudes e distância à falhas associadas aos eventos sísmicos de projeto para o local. Além disso, em muitos locais de registros de sismos SM, os dados que definem as condições de subsolo, são frequentemente limitados; portanto, em muitos casos esses registros não podem ser aplicados com confiança absoluta a um determinado local. Estas são as razões pelas quais a avaliação analítica da resposta do local assume papel relevante.

#### 9.3.1 Conceituação do Problema de Análise de Resposta do Local

A análise de resposta do local tem por finalidade a determinação das variações temporal e espacial, dos movimentos

sísmicos de campo livre do terreno no local. Em princípio, esses movimentos poderiam ser determinados a partir de um modelo amplo, como mostrado na Figura 67(a), o qual incluisse, a fonte sísmica, as condições geológicas ao longo do caminho de propagação fonte-local, bem como as condições locais de solo. Entretanto, com os conhecimentos de que se dispõe, até então, isso não é ainda possível. Atualmente, os efeitos do mecanismo da fonte sísmica, bem como da geologia ao longo do caminho de propagação fonte-local, são substituídos por um conjunto de ondas sísmicas ascendentes, oriundo das formações rochosas subjacentes. Esse modelo aproximado é esquematizado na Figura 67(b).

O problema esquematizado na Figura 67(b), com ondas genéricas ascendentes, ainda não tem uma boa formulação matemática. Soluções únicas para esse tipo de problema só poderão ser obtidas se forem introduzidas hipóteses restritivas quanto a geometria do local e a natureza do campo de ondas que provoca os movimentos sísmicos do terreno no local. Um exemplo típico dessa simplificação é apresentado na Figura 67(c).

O campo de ondas responsável pelos movimentos sísmicos do terreno, no local, pode ser constituído de várias componentes de ondas, como por exemplo: (1) ondas de volume, planas, propagando-se na vertical ou obliquamente em relação a vertical; (2) ondas superficiais propagando-se na horizontal; (3) outros tipos de ondas. Entretanto, até o momento os sismologistas não podem fornecer, com detalhes suficientes, qual a participação de cada uma das componentes do campo de ondas responsável pelo movimento sísmico do terreno no local. Assim, embora possa se

fazer uma análise para um campo de ondas arbitrário, na prática isto não é feito devido a falta de dados sobre as características do campo de ondas envolvido. Nessas condições, uma abordagem, típica do ponto de vista de engenharia, é fazer análises para casos extremos de possíveis campos de ondas. Por exemplo, poder-se-ia fazer a análise de um movimento representado somente por ondas Rayleigh, ou de um movimento representado totalmente por um conjunto de ondas de volume, e determinar a influência da especificação desses movimentos, assim definidos, sobre o resultado das análises. Se as diferenças são pequenas então é desnecessário uma especificação precisa das componentes do campo de ondas. Se as diferenças são grandes, então deverá ser feito um esforço adicional para se determinar, mesmo com pouca precisão, a participação relativa de cada uma das diferentes componentes do campo de ondas; por outro lado, poderá ser necessário, em alguns casos, fazer escolhas de determinadas componentes de ondas para serem utilizadas em partes específicas da análise de resposta do local. Portanto, é importante que se examine as características das diferentes componentes de ondas que podem contribuir para o movimento sísmico do terreno no local.

A grande maioria dos métodos para análise de resposta do local se baseia na hipótese de que as respostas principais, num pacote do solo, são causadas pela propagação ascendente de ondas cisalhantes, provenientes das formações rochosas subjacentes. Esta hipótese permite a utilização de modelos matemáticos unidimensionais simples, no caso de locais com solos constituídos de camadas com interfaces essencialmente horizontais.

Os procedimentos analíticos baseados nessa hipótese e incluem o comportamento não linear do solo tem levado, em alguns casos, a resultados que muito se aproximam daqueles observados no campo. Face a esses fatos, na área de engenharia sísmica, observa-se uma crescente utilização desses procedimentos para efeito de previsão de respostas sísmicas dentro do pacote de solo e das características dos movimentos na superfície do terreno.

Uma vez determinada qual a natureza das componentes de ondas responsáveis pelo movimento sísmico do terreno no local, o problema que se apresenta é como calcular os históricos de aceleração, ou espectros de resposta de aceleração, na superfície do embasamento rochoso. Se num determinado local, se dispusesse de registros sísmicos no nível do embasamento rochoso, esse problema estaria resolvido. Entretanto, esse não é o caso que se encontra na prática. O que se encontra na realidade, são registros obtidos em afloramentos rochosos ou na superfície de pacotes de solo. Em ambos os casos esses registros estão localizados num nível superior ao nível do embasamento rochoso. Alternativamente, pode dispor-se de registros sísmicos artificiais específicos para os tipos de formações rochosas envolvidas. Atualmente os históricos sísmicos de subsuperfície, atuantes no nível do embasamento rochoso, são assumidos como sendo:

- (1) os próprios registros sísmicos obtidos em afloramentos rochosos;
- (2) registros de sismos artificiais;
- (3) registros obtidos através de deconvolução de registros sísmicos de superfície obtidos em afloramentos rochosos ou em pacotes de solo.

De posse do movimento sísmico de subsuperfície o passo seguinte é elaborar-se um modelo matemático representativo do pacote de solo. A seguir esse modelo é excitado com os movimentos sísmicos de subsuperfície anteriormente obtidos.

Em resumo, a análise de resposta do local pode ser dividida em três etapas principais: (1) a seleção de um conjunto de movimentos sísmicos de subsuperfície, representativo das condições locais; (2) o desenvolvimento de um modelo matemático do pacote de solo; (3) a avaliação dos vários tipos de resultados obtidos a partir da análise. As etapas (1), (2) e (3) serão apresentadas, respectivamente, nos itens 9.3.2, 9.3.3 e 9.3.6. No item 9.3.4 será exemplificada a análise de resposta horizontal de um pacote de solo. No item 9.3.5 é feita uma apresentação resumida da análise de resposta por meio de elementos finitos.

### 9.3.2 Movimentos de Excitação em Subsuperfície

Os fatores que podem afetar o abalo sísmico do terreno num local incluem mecanismo de fonte, caminho de propagação fonte-local e condições de solo no local. Entretanto, ainda não se dispõe de condições de se considerar, diretamente, todos esses fatores nas aplicações de engenharia; na prática, somente os pacotes de solo, no local, é que recebem um tratamento em termos de modelo matemático. As várias complexidades associadas com o mecanismo de fonte e o caminho de propagação fonte-local são representados, exclusivamente, por um conjunto de movimentos de excitação aplicados ao modelo representativo do solo. Portanto,

não é demais enfatizar a importância de se ter um conjunto razoável de movimentos solicitantes de subsuperfície, uma vez que esses movimentos tem, freqüentemente, um forte efeito na resposta calculada para o local, próximo à superfície do terreno.

Os modelos matemáticos de pacotes de solo, tipicamente, vão da superfície do terreno até os materiais rochosos de subsuperfície. Os movimentos de excitação são aplicados, freqüentemente, na interface que separa esses materiais rochosos do pacote de solo subjacente. Na falta de registros de movimentos em rocha de subsuperfície, esses registros tem sido substituídos por:

(1) registros em afloramentos rochosos aplicados diretamente na rocha de sub-superfície;

(2) registros de sismos artificiais; e

(3) procedimentos de deconvolução nos quais se calculam os movimentos de rocha de subsuperfície a partir de movimentos de superfície, já existentes, registrados em afloramentos rochosos ou em pacotes de solo.

Dos vários métodos para obtenção do movimento de excitação, os procedimentos de deconvolução são os mais freqüentemente utilizados, principalmente em conexão com a análise unidimensional de movimentos horizontais devido a propagação vertical de ondas cisalhantes. De acordo com a descrição de Schnabel et alii [52], os movimentos superficiais usados como solicitação do modelo, nesses procedimentos, são ajustados de modo a corresponder aos valores de magnitude e distância aplicáveis ao

local em questão, fazendo-se uso de dados empíricos apropriados. O cálculo resultante, dos movimentos de subsuperfície, é realizado no domínio da frequência, utilizando-se as técnicas da Transformada de Fourier FFT. Schnabel et alii, chamam a atenção para o fato de que quando se faz uso dos procedimentos de deconvolução, pequenos erros, nos movimentos de superfície ou nas propriedades dos materiais de subsuperfície, tendem a ser amplificados. Além disso, os procedimentos específicos por eles descritos somente são válidos se os movimentos principais do terreno, no local, são causados pela propagação vertical de ondas cisalhantes. Portanto, é necessário um julgamento cuidadoso quando da definição dos parâmetros de entrada para tais cálculos, bem como quando da interpretação dos resultados.

Talvez a melhor orientação disponível sobre as características de movimentos de excitação em rocha de subsuperfície seja fornecida através da bibliografia sobre registros obtidos em afloramentos rochosos. Seed e Schnabel [53] investigaram a grande variabilidade apresentada por esses registros; nesse estudo eles utilizaram movimentos em rocha (calculados e registrados) provenientes do sismo de "San Fernando", para mostrar que as acelerações de pico em rocha, registradas a uma determinada distância da fonte sísmica, pode variar de um fator da ordem de 100% ou mais. Na realidade, foi mostrado que diferenças de acelerações de pico, dessa ordem de grandeza, podem ocorrer, inclusive, entre duas componentes horizontais de sismos registradas numa mesma estação. Embora não tenha sido especificamente investigado por Seed e Schnabel, espera-se, de acordo com a referência

[47], que as características de frequência dos registros em afloramentos rochosos, e a amplitude e conteúdo de frequência dos correspondentes movimentos subsuperficiais em rocha apresentem variações similares.

São várias as causas dessa grande variabilidade de registros de movimentos em rocha. Em primeiro lugar, vem o tipo de movimento ao longo da falha, o qual pode ser importante, principalmente onde o falhamento normal ou reverso está presente. Em segundo lugar, estão as estruturas geológicas locais, que podem influenciar sobremaneira as características de transmissão de ondas sísmicas que atingem a estação de registro. Uma terceira fonte de variabilidade de registros de movimentos em rocha está associada com as propriedades das rochas no local e ainda com a topografia local. Por exemplo, os estudos de movimento em rocha, registrados durante sismos japoneses, indicaram que as acelerações de pico são consideravelmente maiores em rochas localmente intemperizadas e fraturadas, do que em rocha sã (embasamento). Os efeitos potenciais da topografia local são ilustrados pelos estudos das altas acelerações registradas na barragem de Pacoima, durante o sismo de "San Fernando" - 1971.

As características materiais das próprias formações rochosas representam uma quarta possível causa de variações nas características de movimentos em rocha. Lysmer et alii [53] estudaram os efeitos que as propriedades materiais da rocha subjacente tem sobre a resposta superficial do terreno para vários tipos de pacotes de solo. A Figura 68 ilustra o resultado desse estudo. O estudo de Lysmer et alii mostrou que, para muitos dos casos considerados, as características do tremor super

ficial do terreno foram relativamente insensíveis às variações nas propriedades da rocha. Entretanto, em alguns casos as variações nas propriedades das rochas, resultaram em diferenças marcantes no espectro de resposta superficial do terreno, numa faixa de frequências importante para estruturas de instalações nucleares.

### 9.3.3 Modelagem do Pacote de Solo

Uma das observações importantes no processo de análise de resposta do terreno às solicitações sísmicas, diz respeito às propriedades de rigidez e de dissipação de energia do solo. Essas propriedades são traduzidas através do módulo de cisalhamento e do fator de amortecimento do solo. Conforme pode ser visto nas Figura 70 e 71, essas propriedades apresentam uma variação não linear em função das deformações cisalhantes. Na Figura 70, na ordenada, em vez do próprio módulo de cisalhamento absoluto, tem-se ele dividido pelo módulo de cisalhamento correspondente à deformação percentual cisalhante de  $10^{-4}$ . Essa é a forma na qual esses gráficos são, normalmente, apresentados. Assim, além de representar o modo como as ondas sísmicas são transmitidas até a superfície do terreno, o modelo matemático de um perfil de solo deve incluir, também, as propriedades dinâmicas dos materiais de subsuperfície que dependem da deformação.

A seguir, são apresentados alguns dos modelos que, normalmente, são utilizados para representar a dependência da defor

mação apresentada pelo solo: o modelo linear equivalente, o modelo bilinear e os modelos inelásticos.

#### a) Modelo Linear Equivalente

O modelo linear equivalente, traduzindo o comportamento cisalhante dos solos, é talvez o meio mais simples e o de maior utilização. Nesse modelo, o solo é representado como um material linear viscoelástico, cujas propriedades de rigidez e de dissipação de energia são introduzidas por meio de valores equivalentes de módulo de cisalhamento e de coeficiente de amortecimento viscoso. Cada um desses parâmetros pode variar com a profundidade da camada de solo e com o valor da deformação cisalhante atuante na camada. Como mostrado na Figura 72, o módulo de cisalhamento equivalente é tomado como sendo igual a inclinação da linha diagonal que une as extremidades da curva de histerese\*. Já o valor médio do coeficiente de amortecimento viscoso é assumido como sendo proporcional à área delimitada pela curva de histerese. As Figuras 70 e 71 apresentam exemplos típicos de curvas que traduzem o módulo de cisalhamento e o fator de amortecimento para cada tipo de solo. Essas curvas podem ser utilizadas para avaliar os parâmetros equivalentes mencionados, em função do valor da deformação.

O modelo equivalente é implementado através de um processo iterativo. O primeiro passo é estimar os valores do módulo de cisalhamento e do amortecimento para cada elemento representativo de solo no modelo. O sistema é, então, analisado usan

do-se essas propriedades; calculam-se, nesta etapa, os históricos de aceleração e de deformação por todo o pacote de solo. A partir desses históricos, são estimados, em cada elemento de solo as amplitudes efetivas de tensão-deformação; a seguir, curvas similares àquelas das Figuras 70 e 71 são consultadas de modo a saber se os valores do módulo de cisalhamento e de amortecimento são compatíveis com as deformações desenvolvidas. Se as propriedades do solo não são compatíveis, as referidas curvas são utilizadas de modo a se introduzir, na próxima iteração, valores corrigidos do módulo de cisalhamento e de amortecimento; o processo é então repetido até que se tenha obtido a convergência, a qual normalmente ocorre, segundo a referência [47], dentro de três ou cinco iterações. A resposta da última iteração é considerada como sendo representativa da resposta que traduz o comportamento dinâmico do pacote de solo.

O modelo linear equivalente tem a vantagem de proporcionar uma técnica simples e não muito cara para se fazer a análise de resposta do local. Até o momento, esses modelos tem sido desenvolvidos para representar somente o comportamento cisalhante dos solos. Portanto, eles estão voltados para a utilização com modelos unidimensionais de ondas cisalhantes, propagando-se verticalmente, nos quais o comportamento cisalhante é o principal responsável pela resposta do perfil do solo. De modo a representar efeitos mais complexos de propagação de ondas, o modelo linear equivalente descrito deverá ser implementado de modo a incluir o comportamento de solos sob ação de tensões normais, bem como tensões cisalhantes. Entretanto, os dados adequados de propriedades do solo, que serviriam de base para imple

mentação do modelo, ainda não se encontram disponíveis.

#### b) Modelo Bilinear

Este é um outro tipo de modelo utilizado para representar as propriedades dinâmicas de pacotes de solo. Nesse modelo as características reais de tensão-deformação do solo são representadas por meio de uma série de linhas retas interconectadas de modo a proporcionar uma melhor representação das propriedades reais do solo. A Figura 73(a) apresenta as propriedades real e idealizada do comportamento do solo. Nesse tipo de modelo, o amortecimento histerético é representado em separado. Assim, no modelo bilinear de massas discretas, desenvolvido por Parmalee et alii [53], são utilizados dois tipos de mecanismos de amortecimento (amortecedores), um representando o amortecimento histerético e outro representando a deformação lenta. Este modelo é mostrado na Figura 73(b).

Para que se utilize o modelo bilinear é necessário que as amplitudes máximas e mínimas, anteriormente experimentadas, tenham sido armazenadas; além disso, tem-se que fazer testes, em intervalos de tempo convenientemente selecionados, de modo que se possa determinar se o material está sendo submetido a processo de carregamento, descarregamento ou recarregamento. Esta representação é, obviamente, mais complexa e consome mais tempo do que o modelo linear equivalente. Além disso, Idriss e Seed [54] utilizaram os modelos linear equivalente e bilinear para analisar ondas cisalhantes propagando-se verticalmente

num pacote de solo arenoso; os resultados desses dois modelos in  
dicaram somente pequenas diferenças nos resultados obtidos nas  
análises de resposta de locais. Segundo as bibliografias consult  
tadas, para aplicações simples, similares àquelas de Idriss e  
Seed, parece que o modelo linear é preferido em relação ao bi  
linear. Entretanto, não se dispõe de comparações desse tipo par  
a casos de ondas sísmicas mais complexas.

### c) Modelos Inelásticos Baseados na Teoria da Plasticidade

Uma terceira classe de modelos foi desenvolvida a  
partir da teoria da plasticidade\* e de considerações teóricas  
com relação à estabilidade do modelo e unicidade dos estados de  
tensão-deformação. Nesses modelos, é possível representar cert  
as formas de comportamento, de solos e rocha, que tem sido obs  
ervadas experimentalmente; pode-se, ainda, nesses modelos, sim  
ular o comportamento dos materiais através do módulo de cisam  
ento e coeficiente de expansão volumétrica expressos em funç  
ão de tensão, deformação, histórico de tensões ou deformações,  
e pressão de confinamento. A aplicação maior desses modelos tem  
sido na área de estudos de efeitos de explosões nucleares, muit  
o embora eles tenham sido, também, utilizados para avaliação  
de efeitos sísmicos.

A vantagem principal desses modelos inelásticos é  
que eles possibilitam uma representação mais completa, e teoric  
amente correta, do comportamento físico de solos e rochas do

que os modelos linear equivalente e bilinear. A desvantagem principal dos modelos inelásticos é que a utilização dos mesmos, além de ser mais cara, consome mais tempo. Considerando-se esses fatores, os modelos inelásticos parecem ser particularmente mais adequados para estudos de pesquisa de outros aspectos de comportamento de solos sob carregamento sísmico [47]. Entretanto, eles já encontram menor aplicação na análise de resposta do local, visando a obtenção de movimentos vibratórios de projeto, uma vez que isto requer numerosos cálculos paramétricos.

#### 9.3.4 Análise da Resposta Horizontal do Pacote de Solo

Em muitos locais potenciais para a construção de instalações nucleares, o solo local pode ser representado como uma série de camadas horizontais e paralelas, estendendo-se em distâncias várias vezes maiores do que a profundidade total do pacote de solo e, sobrejacentes a um estrato horizontal (embasamento rochoso). Nessas condições, os movimentos horizontais do terreno no pacote de solo são devidos a ondas cisalhantes, verticalmente ascendentes, que se propagam das formações rochosas subjacentes. As camadas de solo podem, então, ser tratadas como semi-infinitas. Nesse caso pode-se utilizar um modelo unidimensional do pacote de solo, estendendo-se até a rocha, para prever a resposta horizontal do terreno. Para esses modelos simplificados é necessário que sejam definidos apenas a profundidade, o módulo de cisalhamento, o amortecimento e a densidade de cada camada. No cálculo de resposta de pacotes de solo, tem sido

utilizados dois tipos de modelos unidimensionais: os modelos contínuos e os modelos discretizados.

#### a) Modelos Contínuos

O modelo unidimensional contínuo, mostrado na Figura 74(a), foi utilizado por investigadores japoneses nos anos de 1930. Desde então, esse modelo tem sido melhorado por outros investigadores. Um exemplo de uma das aplicações de modelos contínuos é o programa SHAKE, o qual foi desenvolvido por Schnabel e Lysmer [59].

#### Programa SHAKE

A teoria do programa SHAKE é baseada na resposta horizontal, de um meio linear viscoelástico, associada com a propagação vertical de ondas cisalhantes. O meio consiste num sistema de N camadas horizontais, estendendo-se infinitamente na direção horizontal, e tendo como camada de fundo um semi-espaco também viscoelástico. Cada camada é assumida como sendo homogênea e isotrópica, e caracterizada pela espessura, densidade, módulo de cisalhamento e fator de amortecimento.

O programa SHAKE é baseado na solução contínua da equação de onda, adaptada para uso com movimentos transientes através da utilização da transformada de Fourier. As propriedades físicas do solo são representadas pelo modelo linear equivalente apresentado anteriormente. Os efeitos de não linearidade do módulo de cisalhamento e do amortecimento, são considera

dos por meio do uso de propriedades lineares equivalentes do solo, traduzidas através do uso do referido modelo. No programa é feito o uso de processo iterativo de modo que sejam obtidos os fatores de amortecimento e módulos de cisalhamento compatíveis com as deformações efetivas em cada camada de solo.

O programa SHAKE, por meio dos procedimentos de deconvolução, pode calcular movimentos de subsuperfície a partir de movimentos solicitantes aplicados na superfície do terreno; pode ainda, calcular respostas de locais causadas por movimentos solicitantes aplicados na interface solo-rocha. Os movimentos solicitantes aplicados na superfície do terreno podem ser aqueles registrados (ou extrapolados) em afloramentos rochosos ou em pacotes de solo. A análise dos resultados é feita no domínio da frequência, utilizando-se a transformada de Fourier para representar os movimentos de excitação, e a equação de onda unidimensional para calcular a função de transferência do pacote de solo. A resposta do local é obtida, então, a partir da transformada inversa de Fourier do produto da transformada de Fourier, do movimento de excitação, pela função de transferência (domínio da frequência) do pacote de solo. Este é o procedimento indireto apresentado no item 3.4.2. No programa SHAKE é utilizado o algoritmo da Transformada de Fourier Simplificada, o que permite facilitar as transformações no domínio do tempo para o domínio da frequência.

### b) Modelos Discretizados

No segundo tipo de modelos unidimensionais, o pacote de solo é representado como uma série de massas, arbitrariamente espaçadas, interconectadas por molas cisalhantes e amortecedores viscosos. Seed e Idriss [55] desenvolveram uma abordagem para este tipo de modelo, na qual as molas que interconectam massas adjacentes, tem rigidezes que são dependentes do espaçamento das massas e do módulo de cisalhamento da camada de solo. A dissipação de energia é representada como amortecimento de Rayleigh\* através de uma série de amortecedores de movimentos relativo e absoluto. Embora Seed e Idriss tenham utilizado o modelo equivalente, as molas e amortecedores tem propriedades dependentes de deformações as quais podem ser representadas por um modelo físico adequado qualquer. Uma vez definidas as características de rigidez e amortecimento para cada elemento de solo, podem ser obtidas as matrizes de massa, rigidez e amortecimento para todo o perfil do solo local. As equações matriciais resultantes do movimento podem ser resolvidas pelos procedimentos convencionais de análise dinâmica.

### c) Comparações dos Modelos Contínuo e Discretizado

Várias comparações de resultados, obtidos usando-se modelos contínuos e de massa discretizada, tem indicado que ambos os modelos são essencialmente equivalentes e igualmente aplicáveis na análise de resposta do local. Tanto o modelo contínuo como o modelo de massa discretizada, têm sido aplicados a

locais em que foram obtidos registros de sismos SM, sendo que os resultados obtidos estão em concordância com os dados registrados.

#### d) Recomendações Sobre a Utilização de Modelos

Quando da aplicação de técnicas unidimensionais, é necessário lembrar que os pacotes de solo podem apresentar características, algumas vezes, substancialmente diferentes do caso ideal de camadas e contornos horizontais; como resultado, a resposta desses pacotes de solo é, freqüentemente, muito mais complicada do que simples ondas cisalhantes propagando-se verticalmente. Apesar dessas complexidades, os modelos unidimensionais podem fornecer estimativas adequadas, para propósitos de engenharia, dos movimentos horizontais do terreno num local com contornos de camadas razoavelmente horizontais. Isto será obtido desde que, na modelagem e na interpretação dos resultados seja utilizado um procedimento criterioso e que se tenha sempre em mente as limitações inerentes à abordagem unidimensional. Nos dois parágrafos seguintes são relacionados as mais importantes dessas limitações.

Uma vez que nos modelos unidimensionais são consideradas somente ondas verticais, propagando-se verticalmente, os espectros de movimentos do terreno, computados a partir desses modelos, podem ser deficientes em algumas faixas de freqüência representativas de outros tipos de ondas que possam estar presentes. Por exemplo, no caso em que ondas superficiais de período longo possam ser importantes, o conteúdo de baixa freqüência

dos movimentos do terreno podem ser subestimados se forem usadas essas técnicas.

Os modelos unidimensionais do tipo descrito são adequados para calcular somente os movimentos horizontais do pacote de solo e não fornecem meios de se prever os movimentos verticais do solo. Tem sido sugerido o cálculo do movimento vertical através de um modelo unidimensional que considere a propagação vertical de ondas P; entretanto, esta abordagem ainda não atingiu o desenvolvimento necessário para utilização no campo prático. Como resultado, os movimentos verticais do solo tem que ser calculados usando técnicas de elementos finitos bidimensionais ou, podem ser estimados a partir de registros de locais semelhantes [47].

#### 9.3.5 Análise por Meio de Elementos Finitos

Esta técnica tem sido utilizada para calcular movimentos do terreno em locais sujeitos a ondas sísmicas mais complexas do que aquelas consideradas nos modelos anteriores. Nessa abordagem, o pacote de solo é idealizado como um conjunto de elementos bidimensionais, de formas triangular ou retangular, interconectados num número finito de pontos nodais, como mostrado na Figura 75. As propriedades físicas podem ser especificadas somente para cada elemento individual na malha de elementos finitos, de modo que possam ser acomodadas as variações na geometria e forma das camadas.

O comportamento do sistema de elementos finitos é

descrito atribuindo-se um campo de deslocamento a cada elemento; este campo de deslocamento normalmente, mas nem sempre, mantém compatibilidade de deformações na interface de elementos adjacentes. Com base nessa hipótese, e utilizando as propriedades físicas prescritas para cada elemento, é possível definir as equações de movimento para o sistema. Para resolver essas equações podem ser utilizadas as técnicas convencionais de modos normais, transformada de Fourier, ou integração ao longo do tempo. As tensões e deformações nos elementos podem ser facilmente obtidas a partir dos deslocamentos, velocidades e acelerações resultantes da solução dessas equações.

No método dos elementos finitos, as propriedades físicas necessárias à análise dependem do tipo de modelo físico utilizado no programa. Assim, se for utilizado um modelo linear equivalente, será necessário especificar a densidade, coeficiente de Poisson, e as propriedades dinâmicas (módulo de cisalhamento, coeficiente de amortecimento) para cada material abrangido pelo modelo. Se forem usados modelos não lineares, terão que ser especificados vários parâmetros que definam o módulo de expansão volumétrica e módulo de cisalhamento de cada material, em função da deformação, tensão ou histórico de deformações e pressão de confinamento.

O uso de modelos lineares equivalentes tem certas vantagens quando aplicados em conexão com a análise de elementos finitos bidimensionais. Um exemplo típico desse tipo de utilização de modelo é representado pelo programa LUSH, um programa de elementos finitos de larga aplicação e que usa um modelo

linear equivalente e técnica de solução similar àquela utilizada no programa SHAKE. Nesta aplicação de modelos lineares equivalentes, é necessário que sejam fornecidas somente as propriedades dinâmicas (módulo de cisalhamento e coeficiente de amortecimento). Até o momento, a capacidade do modelo em simular a transmissão de ondas P, bem como as ondas cisalhantes, é representada unicamente por meio do cálculo de um módulo de elasticidade, para cada elemento, e em cada iteração; são aplicadas a seguir as relações baseadas na teoria da elasticidade, usando-se o módulo de elasticidade e o módulo de cisalhamento para a iteração analisada.

#### 9.3.6 Resultados Obtidos a Partir da Análise de Resposta do Local

Uma das principais vantagens de se fazer a análise de resposta do local é que, pode-se facilmente obter, em qualquer ponto do perfil do terreno, os históricos de aceleração, velocidade, deslocamento, tensão e deformação. Nesses vários pontos podem ser calculados (no domínio da frequência) espectros de resposta, espectro de Fourier e curvas de amplificação espectral. No desenvolvimento dos critérios de movimento vibratório, os históricos de aceleração e espectros de resposta são os dados de maior importância, muito embora, outros tipos de resultados também sejam úteis em muitos casos.

O fato de poder-se, por meio da análise de resposta do local, obter a distribuição, em profundidade, do movimento

vibratório do solo, merece consideração especial. Isto porque nos padrões internacionais de projeto sísmico de estruturas de instalações nucleares é exigido que os movimentos sísmicos do terreno sejam especificados no nível enterrado das fundações . Tais estruturas estão freqüentemente à grandes profundidades no solo; nestas condições os movimentos do solo nos níveis das fundações podem diferir, substancialmente, daqueles na superfície do terreno. Em vista do pouco número de registros sísmicos, nas profundidades de interesse para o projeto de tais fundações, a análise de resposta do local se constitui numa ferramenta valiosa para estimativa dos movimentos sísmicos do terreno em níveis de subsuperfície.

Na avaliação dos resultados da análise de resposta do local devem ser lembradas as incertezas associadas com tal análise. É necessário, portanto, que sejam feitos estudos paramétricos adequados, para determinar a sensibilidade da resposta do local à incertezas tais como aquelas oriundas da definição de movimentos de subsuperfície e de propriedades do solo, principalmente à grandes profundidades. De modo a obter uma resposta mais representativa, que reflita um determinado nível de confiança, pode-se fazer uma análise estatística de um conjunto de resultados desses estudos. A utilização de um único cálculo ou um número limitado de cálculos sem uma avaliação estatística, não permitirá uma consideração adequada dessas incertezas.

## 10. PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DO MOVIMENTO SÍSMICO PADRÃO DE CAMPO LIVRE PARA O LOCAL

Neste capítulo são apresentados procedimentos que podem ser seguidos para a obtenção do movimento sísmico do terreno, num local destinado a construção de uma instalação nuclear. O procedimento apresentado visa a obtenção dos movimentos sísmicos de campo livre do terreno; isto quer dizer que não são considerados os efeitos de interação solo-estrutura. No item 10.1 é feita uma descrição sucinta dos procedimentos a serem seguidos. No item 10.2 é apresentado um exemplo típico de aplicação desses procedimentos. Esse exemplo, no qual procede-se a determinação da componente horizontal do movimento sísmico do terreno, no local, foi extraído da referência [47].

### 10.1 Descrição dos Procedimentos

Os procedimentos apresentados nesse item, seguem a orientação da referência [47], os quais são direcionados no sentido a satisfazer as exigências da NRC. Para a obtenção dos movimentos sísmicos do terreno, no local, são necessários vários estudos, inclusive, em nível regional. Os vários estudos necessários à obtenção dos referidos movimentos podem ser reunidos nas seguintes etapas:

- a) Estudos geológicos e sismológicos;
- b) Investigações de solo no local;

- c) Estudos de sensibilidade da resposta do local;
- d) Avaliação das formas de resposta do local;
- e) Seleção de registros de locais semelhantes;
- f) Avaliação e seleção do movimento sísmico padrão ,  
de campo livre, para o local.

A Tabela 10 apresenta, resumidamente, uma descrição do procedimento recomendado. Nessa tabela, para cada uma das etapas acima mencionadas, são indicados: os dados necessários, as informações obtidas e quais os passos a serem seguidos na realização de cada etapa. É claro, que as atividades a serem desenvolvidas em cada etapa deverão ser adaptadas, de acordo com o desenvolvimento tecnológico ocasionado pelo aumento do número de registros de sismos SM e pela melhoria nos procedimentos seguidos na análise da resposta do local.

Neste trabalho não foram descritas as informações básicas concernentes às etapas a e b. Nos capítulos precedentes foram fornecidos os dados básicos necessários à compreensão dos assuntos desenvolvidos nas etapas c a f.

Um ponto importante no procedimento descrito é a tomada de decisão sobre qual dos resultados deverá se constituir no dado de projeto sísmico. Ter-se-á que decidir-se sobre os resultados provenientes das seguintes alternativas: análise da resposta do local; registros de locais semelhantes; Guia Regulatório 1.60. A Tabela 11 fornece uma orientação geral sobre alguns fatores a serem considerados na tomada de tais decisões.

## 10.2 Exemplo de Aplicação dos Procedimentos

Para efeito de melhor compreensão, será apresentada somente a formulação da obtenção do espectro de resposta horizontal, na superfície do terreno, com um fator de amortecimento de 5%. Na realidade, os órgãos normalizadores internacionais exigem que, na especificação do movimento sísmico para o local de uma instalação nuclear, o espectro de resposta (vertical ou horizontal, na superfície do terreno ou no nível enterrado das fundações) seja dado em função de vários fatores de amortecimento. Entretanto, a idéia básica fornecida pelo exemplo em questão pode facilmente ser extrapolada para levar em consideração outros valores de fatores de amortecimento.

O terreno do local selecionado como exemplo consiste de um pacote de solo profundo, de natureza arenosa, onde as densidades e rigidezes do terreno aumentam gradualmente com a profundidade. Os estudos geológicos e sismológicos conduziram a um SSE (Sismo de Desligamento Seguro) representado por um evento sísmico de magnitude 6,5 localizado a 8 milhas (13 km) do local. As condições desse evento são similares às aquelas nas quais foram registrados sismos SM na estação 8244 de Orion ("Los Angeles"), durante o sismo de "San Fernando" - 1971. Assim, para o exemplo em questão os movimentos sísmicos do terreno, registrados em Orion, irão servir para controle do espectro de resposta que será obtido através do procedimento apresentado.

Nos itens seguintes serão desenvolvidos os conceitos relacionados com cada etapa específica.

### 10.2.1 Etapa A: Estudos Geológicos e Sismológicos

O local considerado neste exemplo está localizado na região sul da Califórnia e consiste de um pacote de aluvião sobrejacente a terraços e arenitos do Pleistoceno. Toda a região é sotoposta por arenitos e argilitos do Terciário e formações rochosas, antigas, dos tipos diorítico e granítica.

A região é sismicamente ativa e apresenta um certo número de falhas, dos tipos reversa e de rejeito direcional, que afetaram as formações rochosas mais recentes na área. As investigações sismológicas e geológicas da região indicaram que o SSE para o local em questão, é representado por um sismo de magnitude 6,5 localizado ao longo de um falhamento reverso que se estende em direção ao local. O centro de energia liberada ao longo do plano de falha foi considerado como estando a cerca de 8 milhas (13 km) do local. A intensidade de Mercalli Modificada no local, correspondente ao sismo em questão, foi estimada como estando entre VII e VIII.

Nesta etapa é necessária a utilização de dados empíricos, de modo que se possa estimar a grandeza dos movimentos sísmicos em afloramento rochoso próximo ao local, os quais servirão como dados básicos para definir, na etapa C, os movimentos solicitantes de subsuperfície para a análise de resposta do local. Com esse objetivo foram selecionadas as curvas empíricas desenvolvidas por Schnabel e Seed e aplicáveis ao local em estudo. Essas curvas, mostradas na Figura 76(a), foram elaboradas com base na bibliografia de registros de sismos SM em locais em

rocha, no oeste dos Estados Unidos, bem como no resultado de análises que utilizaram esses registros. Essas curvas indicam que os movimentos em afloramentos rochosos a 8 milhas (13 km) do centro de energia de um sismo de magnitude 6,5 teriam uma aceleração de pico de cerca de 0,35 g (343 cm/s<sup>2</sup>).

As primeiras estimativas da aceleração de pico do terreno podem ser obtidas a partir de dados empíricos desenvolvidos por Coulter et alii [56] e por Housner [57]. Os dados, desenvolvidos por Coulter et alii, correlacionam valores de aceleração máxima da superfície do terreno com intensidade de Mercalli Modificada, no local, para uma variedade de condições de solo. Para o exemplo em questão, o local apresenta condições médias de fundação; assim, a partir da Figura 76(b), chega-se a um valor de aceleração de pico, na superfície do terreno, de cerca de 0,25 g (245 cm/s<sup>2</sup>) para uma intensidade local entre VII e VIII. Housner desenvolveu uma série de curvas empíricas que relacionam aceleração máxima da superfície do terreno com magnitude e distância. Para um local situado a 8 milhas (13 km) do centro de energia de um sismo de magnitude 6,5, os dados de Housner, mostrados na Figura 76(a), indicam uma aceleração de pico, na superfície do terreno, de cerca de 0,30 g (294 cm/s<sup>2</sup>). Portanto, a partir de dados empíricos, a aceleração horizontal de pico, na superfície do terreno, foi estimada como estando entre 0,25 e 0,30 g.

### 10.2.2 Etapa B: Investigações de Solo no Local

O perfil geotécnico do terreno no local, mostrado na Figura 77, consiste de um pacote de solo, exibindo areia compacta na parte superior e areia com pedregulho na parte inferior; a partir de uma profundidade de 245 m, o perfil é prolongado através de rochas do tipo arenito e argilito. As velocidades de ondas cisalhantes no pacote de solo aumentam com a profundidade e atingem o valor máximo de 618 m/s nas vizinhanças da interface da base do pacote de solo com a rocha de embasamento. A rocha sob o pacote de solo tem uma velocidade de onda cisalhante de 855 m/s. As formas e contornos das camadas, nas vizinhanças do local podem ser consideradas como razoavelmente horizontais e de natureza uniforme.

Nesta etapa tem que ser estimados os valores das propriedades dinâmicas (módulo de cisalhamento, fator de amortecimento) para os vários materiais constituintes do terreno, propriedades essas que serão utilizadas na análise de resposta do local. Para esse exemplo foram utilizadas as curvas empíricas desenvolvidas por Seed e Idriss [58] que fornecem as propriedades dinâmicas, no caso de solos arenosos. Essas curvas são mostradas na Figura 79. Entretanto, no caso real de uma instalação nuclear, essas propriedades deverão ser estabelecidas a partir de ensaios, de campo e de laboratório, realizados com os materiais constituintes do solo.

Segundo a referência [47], acredita-se que as principais incertezas, nas propriedades de solo descritas, estejam

associadas com as rigidezes das areias, compacta e com pedregulho, que se estendem da profundidade de 75 a 245 m abaixo da superfície do terreno. Para considerar essas incertezas, na etapa C, normalmente são utilizados dois conjuntos de propriedades de solos nos estudos de sensibilidade da resposta do local. Esses conjuntos são obtidos a partir das propriedades médias dos solos; define-se uma faixa de variação em relação à curva que representa as propriedades médias dos solos. Na Figura 69 é apresentado um exemplo típico desses conjuntos; a curva superior representa o limite superior das propriedades do solo e a inferior representa o limite inferior. No exemplo apresentado, o limite inferior foi assumido como sendo representado por aquelas propriedades indicadas na Figura 77(a), enquanto que o limite superior foi assumido como um aumento de 50% no módulo de cisalhamento para areias (compacta e com pedregulho). Todas as outras propriedades foram assumidas como constantes.

### 10.2.3 Etapa C: Estudos de Sensibilidade da Resposta do Local

Como visto na Etapa B, as formas e contornos das camadas na vizinhança do local são razoavelmente horizontais e uniformes. Assim, pode-se partir para o estudo de sensibilidade da resposta horizontal do solo local, por meio de um modelo unidimensional, baseado na hipótese de ondas cisalhantes, propagando-se verticalmente, que leve em conta as propriedades dinâmicas do solo. Embora existam outros programas de computador que satisfaçam a esses requisitos, na referência [47], foi sele

cionado o programa SHAKE para a análise desse exemplo.

O procedimento utilizado para calcular as respostas superficiais do terreno, cuja seção transversal é mostrada na Figura 78, requer que sejam seguidos os quatro passos descritos a seguir:

1º Passo: Movimentos Originais em Afloramentos Rochosos

Selecionar um conjunto adequado de movimentos em afloramentos rochosos para ser usado no local em apreço. Cada um dos membros do conjunto deverá refletir sismos de magnitudes 6,5 cujos centros de liberação de energia estejam situados a 8 milhas (13 km) de distância.

2º Passo: Movimentos em Afloramentos Rochosos Extrapolados para o Local

Por meio dos dados de atenuação em rocha, mostrados na Figura 76(a), obter qual seria a amplitude (aceleração máxima) em afloramentos rochosos, nas imediações do local, correspondente a cada um dos membros do grupo de registros selecionados no primeiro passo.

### 3º Passo: Movimentos em Rocha de Subsuperfície

Aplicando as técnicas de deconvolução desenvolvidas por Schnabel et alii [52], calcular um conjunto de movimentos em rocha de subsuperfície, a partir do conjunto de movimentos em afloramentos rochosos extrapolados para o local (obtidos no segundo passo). Para o local em estudo, os movimentos de subsuperfície são assumidos como estando atuando numa profundidade de 245 m, ao longo da interface que separa a base do pacote de solo do material rochoso subjacente ao referido pacote. Esse mesmo material rochoso é assumido como fazendo parte do afloramento rochoso através do qual ocorre o processo de deconvolução.

### 4º Passo: Movimentos na Superfície do Terreno

Utilizar o conjunto de movimentos de subsuperfície, obtido no passo anterior, como dado de excitação para calcular a resposta de um modelo contínuo unidimensional do perfil do terreno. As propriedades dinâmicas (módulo de cisalhamento, fator de amortecimento) para o modelo em questão são dadas de acordo com as relações empíricas mostradas na Figura 79. O material rochoso, localizado abaixo do ponto de aplicação dos movimentos de excitação em subsuperfície, foi incluído também no modelo, de modo a representar os efeitos de amortecimento por radiação, bem como a deformabilidade desse material subjacente.

As principais variáveis a serem consideradas nos estudos de sensibilidade para o local em estudo são os movimentos em afloramentos rochosos e as propriedades do solo em subsuper

fície. As variações nas propriedades do solo em subsuperfície são representadas pelos limites, inferior e superior, de propriedades obtidas a partir das investigações de solo no local. O conjunto de movimentos em afloramentos rochosos, utilizado para esses estudos, é constituído de duas componentes de movimentos horizontais, registrados na barragem de Pacoima e em Castaic durante o sismo de "San Fernando" - 1971. Cada um desses acelerogramas foi registrado em rocha, ou em condições locais extremamente firmes e correspondem a falhamento reverso como mecanismo de fonte. Cada registro foi ajustado para uma aceleração de pico de 0,35 g, de modo a representar movimentos em rocha a 8 milhas (13 km) do centro de energia de um sismo de magnitude 6,5. Foram feitas algumas correções nos valores de aceleração de pico nos registros obtidos na barragem de Pacoima. A Figura 80 apresenta os espectros de resposta correspondentes ao conjunto de acelerogramas utilizados.

A Figura 80 pode ser utilizada para fornecer indicações sobre os efeitos das variações nos movimentos de subsuperfície, e nas propriedades de solo, sobre o espectro de resposta calculado para o terreno. A partir dessa figura, de acordo com a referência [47], chega-se as seguintes conclusões:

a) Os espectros de resposta da superfície do terreno são sensíveis ao conteúdo de frequência dos movimentos em afloramentos rochosos;

b) O espectro de resposta do terreno, quando comparado com o espectro de movimentos em afloramentos rochosos, tem amplificados as componentes do movimento de frequências mais bai

xas e atenuadas as componentes de frequências mais altas;

c) O uso dos limites inferior e superior das propriedades do solo não tem uma influência marcante sobre a forma geral dos espectros de resposta do terreno.

A Tabela 12 mostra o efeito das variações nos movimentos em afloramentos rochosos e propriedades do solo sobre as acelerações de pico na superfície do terreno. Esta tabela indica, ainda, que os limites superiores de propriedades do solo resultam em acelerações de pico com amplitudes, 8 a 25% maiores do que aquelas obtidas usando os limites inferiores de propriedades do solo. Além disso, para um determinado conjunto de propriedades do solo, os dados de Castaic resultam em acelerações de pico do terreno, levemente maiores do que aquelas correspondentes aos dados da Barragem de Pacoima. Ambos os registros de Castaic resultaram, aproximadamente, numa mesma aceleração calculada para o terreno, ao passo que a componente S74W na barragem de Pacoima produziu acelerações de pico maiores do que as da componente S16E. Para todos os casos, as acelerações de pico calculadas para o terreno foram menores do que a aceleração de 0,35 g correspondente aos movimentos solicitantes em afloramentos rochosos.

Para que se obtenha uma aceleração de pico representativa de condições médias para o local, é necessário que se faça uma avaliação estatística do conjunto de valores de acelerações de pico obtido. O resultado de uma análise estatística desse conjunto de dados indicou um valor médio de aceleração de pico

igual a 0,25 g e um valor MSD de aceleração de pico igual a 0,28 g. Esse resultado estatístico, obtido a partir dos dados analisados, será usado na Etapa D, juntamente com a primeira estimativa de aceleração de pico da Etapa A, para definir a aceleração padrão de pico para o local.

#### 10.2.4 Etapa D: Avaliação das Formas de Resposta do Local

Os estudos de sensibilidade feitos na Etapa C, tiveram por objetivo investigar os efeitos de variações nos movimentos em afloramentos rochosos, e propriedades do solo, sobre espectros de resposta e aceleração de pico calculados para o terreno. Observou-se que os espectros de resposta do terreno dependem mais do conteúdo de frequência dos movimentos em afloramentos rochosos, do que do tipo de propriedade limite do solo (inferior ou superior) utilizado na análise de resposta do local. As acelerações de pico do terreno foram influenciadas, moderadamente, pelo conjunto particular de propriedades do solo utilizado no modelo do local e pelos movimentos em afloramentos rochosos.

Nesta etapa, é necessário que seja fornecida a definição final da aceleração de pico do terreno para o local. Os dados empíricos, fornecidos na Etapa A, indicaram que as acelerações para o local se situam numa faixa de 0,25 a 0,30 g. Embora esses dados possam ser utilizados como uma orientação geral, acredita-se, segundo a referência [47], que as acelerações de pico, obtidas a partir da análise de resposta do local, sejam

as estimativas mais confiáveis para o local analisado. Em especial, para esse caso, foi selecionada, como a aceleração padrão para o local, uma aceleração de pico de 0,28 g, a qual corresponde ao conjunto MSD proveniente da análise de resposta do local. Esse valor de aceleração MSD é consistente com o uso do espectro MSD em comparações subsequentes, com os espectros do Guia Regulatório 1.60, que serão feitas na Etapa E.

Durante a Etapa D é necessário desenvolver, também, um espectro médio e um espectro MSD a partir dos resultados analíticos. O espectro MSD é usado para representar os resultados da análise de resposta do local na definição dos critérios para o local (a ser feita na Etapa F). O espectro MSD foi obtido a partir do conjunto de oito espectros de resposta (calculados na Etapa C) os quais são mostrados na Figura 80. Esses espectros correspondem a dois diferentes modelos do local (representados pelos limites inferior e superior de propriedades de solos), cada um analisado para quatro diferentes movimentos em afloramentos rochosos. Os espectros médio e MSD, calculados a partir desse conjunto, são mostrados na Figura 81. Observa-se que o espectro médio tem uma aceleração de período zero de 0,25 g (correspondendo à aceleração de pico indicada na Tabela 12), enquanto que o espectro MSD tem uma aceleração de período zero de 0,28 g, que corresponde à aceleração padrão de pico para o local.

#### 10.2.5 Etapa E: Seleção de Registros de Locais Semelhantes

Nessa etapa deve ser selecionado um conjunto de regis

tros de locais semelhantes para representar, tanto quanto possível, as características do local, a magnitude, distância e mecanismo de fonte do SSE. Para o local considerado nesse exemplo específico, não foi possível definir registros que representassem todas essas características. Entretanto, os efeitos das condições locais de solo foram considerados ser de particular importância nesse exemplo; assim, optou-se por um conjunto de 30 registros utilizado por Seed et alii [51] para representar a resposta de solos não coesivos profundos, como sendo representativo das condições de solo do exemplo apresentado. A seguir, procedeu-se a ajustagem desse conjunto, aos parâmetros sísmicos locais, de modo a obter dados consistentes com a aceleração padrão de pico, definida na Etapa D. Esse novo conjunto ajustado, foi escolhido como sendo o conjunto de registro de locais semelhantes para o local. Na Figura 81 são mostrados os espectros médio e MSD correspondentes a esse conjunto.

#### 10.2.6 Etapa F: Avaliação e Seleção do Movimento Sísmico Padrão de Campo Livre

Para se proceder à escolha final do movimento vibratório padrão de projeto, é necessário comparar, primeiro, os espectros obtidos a partir dos registros de locais semelhantes com aqueles da análise de resposta do local. Uma comparação entre os espectros médios e MSD, mostrados na Figura 81, indica que existe uma boa correlação entre os resultados da análise de resposta do local e os registros de locais semelhantes. Para frequên

cias maiores do que cerca de 4 Hz, os espectros de locais semelhantes tendem a exceder os espectros provenientes dos resultados da análise; já para frequências mais baixas os espectros dos dois conjuntos de resultados estão muito próximos.

A seguir os espectros MSD dependentes do local são comparados com as curvas espectrais, do Guia Regulatório 1.60, ajustadas para uma aceleração de período zero de 0,28 g. Esta comparação, mostrada na Figura 82(a), indica que os espectros do RG 1.60 excedem os espectros dependentes do local em frequências acima de cerca de 8 Hz, e situam-se abaixo dos espectros dependentes do local em frequências mais baixas. Na faixa de frequências, de principal interesse para o projeto de instalações nucleares (2 a 10 Hz), as diferenças entre os espectros dependentes do local e os do RG 1.60 são pequenas, mas ainda dignas de menção.

As diferenças são causadas pela variação nas condições de locais correspondentes aos registros usados no desenvolvimento das curvas espectrais do RG 1.60. Como foi mostrado na Tabela 8, menos da metade desses registros foram obtidos em locais com solo não coesivo profundo; os registros restantes foram registrados em locais em rocha ou em solo firme, cujas profundidades até a rocha de embasamento são consideravelmente menores do que a do local em estudo. Portanto, as curvas espectrais do RG 1.60 estão direcionadas para condições locais mais rígidas que, quando comparadas com espectros, representando solos profundos, tenderiam a mostrar componentes do movimento, de frequências mais altas, amplificadas, e componentes, de frequências mais baixas, reduzidas. Essas tendências gerais são eviden

tes na Figura 82(a). Além disso, a boa concordância observada entre os resultados dependentes do local, provenientes de dois estudos independentes (registros de locais semelhantes e resultados analíticos) sugerem, segundo a referência [47], que pode-se ter um grau razoável de confiança nesses espectros, para efeito de utilização dos mesmos no desenvolvimento dos critérios de movimento vibratório para a instalação. Assim, os resultados dependentes do local são considerados como sendo mais representativos do abalo sísmico para o local em questão ; o espectro padrão para o local é selecionado como sendo um espectro, constituído por trechos lineares, que melhor se ajusta ao espectro dependente do local. Esse espectro é mostrado, juntamente com as curvas espectrais do RG 1.60, na Figura 82(c) . Vê-se, que na faixa de frequências mais baixas, o espectro padrão excede o espectro do RG 1.60, ao passo que, na faixa de frequências mais altas, ele cai abaixo da curva espectral do RG 1.60. No exemplo em questão (pacote de solo de grande profundidade), o local apresenta características físicas que afetam o espectro de resposta superficial do terreno. Assim, as condições do local estudado não se enquadram naquelas condições gerais especificadas no RG 1.60. Nesse caso os resultados da análise de resposta do local preponderam sobre as curvas espectrais padronizadas do RG 1.60.

A seguir é feita uma comparação entre os resultados calculados com registros reais obtidos em condições similares . Como indicado anteriormente, as condições sob as quais os registros de Orion foram obtidos (durante o sismo de "San Fernando" ) são comparáveis àquelas do exemplo em questão; portan

to o espectro de Orion pode ser usado como um controle do padrão sísmico de excitação obtido nesse exemplo. Como mostrado na Figura 83(a), os espectros médios provenientes dos resultados dependentes do local se comparam razoavelmente bem, com os espectros de Orion. O espectro padrão para o local, o qual representa o valor estatístico MSD dos resultados dependentes do local, é conservativo quando comparado com os espectros de Orion. Isto pode ser constatado na Figura 83(b).

### 10.3 Considerações Finais

Das várias metodologias descritas nesse capítulo (métodos independentes do local, registros de locais semelhantes e análise de resposta do local), cada um tem certas vantagens que a torna apta para ser utilizada no desenvolvimento do movimento vibratório de projeto para um determinado local. Entretanto, na aplicação a um problema real, tem-se que ponderar essas vantagens com relação às limitações de cada um desses métodos. Deve-se ressaltar, também, que os resultados e tendências observadas a partir da aplicação dos métodos a um determinado local não devem, necessariamente, ser considerados como aplicáveis a outras condições de locais. Assim, embora nesse exemplo as curvas espectrais do RG 1.60 tenham sido consideradas menos aplicáveis do que os resultados da análise de resposta do local, para representar os movimentos do terreno no local estudado, elas podem ser mais representativas de abalos sísmicos em locais com pacotes de solo mais rígidos ou menos profundos.

## 11. CONCLUSÃO

Não se pretendeu com este trabalho fazer uma análise detalhada de todos os assuntos envolvidos na determinação do movimento sísmico padrão para o local de uma instalação nuclear. A idéia básica foi reunir num único documento as diversas informações necessárias à obtenção do referido movimento padrão.

As curvas empíricas, bem como os espectros de resposta citados foram obtidos a partir de sismos SM e refletem propriedades específicas dos locais ou regiões onde foram registrados, seja historicamente ou instrumentalmente. Assim, essas curvas e espectros não teriam aplicação direta às condições brasileiras. Entretanto, esses dados, na ausência de outros, podem auxiliar na estimativa dos parâmetros sísmicos do terreno necessários ao projeto de uma instalação nuclear.

Apesar do nível de sismicidade do Brasil ser relativamente baixo, quando comparado ao de regiões de grande atividade sísmica, a Comissão Nacional de Energia Nuclear exige que seja considerada a influência de efeitos sísmicos no projeto de instalações nucleares. Além disso, a ABNT está preparando uma norma que regulamenta as "Ações Sísmicas para Projeto de Instalações Nucleares". Assim, esse documento pode se constituir, também, numa fonte de consulta para os projetistas, ainda não familiarizados e que desejem atuar na área de engenharia sísmica.

ANEXO "A"

## DEFINIÇÕES E FORMAS ABREVIADAS

Nesse anexo são apresentadas formas abreviadas para expressões, cuja tradução para o português resultaria em expressões muito longas. Além disso, foram incluídas algumas definições necessárias à compreensão de algumas formas abreviadas, bem como outras definições suplementares.

FONTE SÍSMICA - o local onde ocorrem os movimentos, no interior da Terra, responsáveis pela geração de ondas sísmicas.

SISMO SM - um sismo de grandes proporções provocando movimentos fortes na superfície do terreno, próximo à fonte sísmica.

SISMÓGRAFO - instrumento para detecção e registro de movimentos sísmicos do terreno (deslocamento, velocidade, aceleração).

SISMOGRAMA - registro obtido num sismógrafo.

ACELERÓGRAFO - sismógrafo para detecção e registro de aceleração.

ACELERÓGRAFO SM - acelerógrafo para registro de sismos SM.

ACELEROGRAMA - registro obtido a partir de um acelerógrafo.

ACELEROGRAMA SM - acelerograma de sismo SM.

DURAÇÃO DE SISMO SM - Esta será a denominação dada à fase mais intensa de um sismo SM.

HISTÓRICO - variação de um determinado parâmetro com o tempo.

HISTÓRICO COMPATÍVEL - histórico cujo espectro de resposta coincide, em predeterminados pontos, com um dado espectro de resposta de projeto.

CONTEÚDO DE FREQUÊNCIA - o conteúdo de freqüência pode ser definido como o número de componentes harmônicos necessários para, no domínio da freqüência, representar com razoável fidelidade, um determinado histórico de vibrações, dado inicialmente em função do tempo.

VALOR DE PICO - por este termo entender-se-á o valor máximo de um determinado parâmetro. Assim, aceleração de pico significará o valor máximo de aceleração.

LOCAL - este termo referir-se-á, genericamente, ao posicionamento geográfico do lugar a ser ocupado pela instalação nuclear ou pelo instrumento de registro sísmico.

MATERIAL ROCHOSO - materiais constituintes do terreno, tendo velocidade de ondas cisalhantes da ordem de 763 m/s ou mais [34].

AFLORAMENTO ROCHOSO - rocha ou material rochoso exposto na su perfície do terreno.

EMBASAMENTO ROCHOSO - esta será a denominação dada ao próprio em basamento cristalino ou a materiais rochosos em subsuperfície.

PACOTE DE SOLO - este termo significará a camada de solo que se estende desde a superfície do terreno até o embasamento rochoso.

SOLO LOCAL - por este termo entender-se-á o pacote de solo no local em estudo.

ANÁLISE DE RESPOSTA DO LOCAL - por análise de resposta do local, entender-se-ão os cálculos analíticos necessários para levar em consideração as modificações das ondas sísmicas (provenientes do embasamento rochoso) causadas pelas condições geológico-es truturais e geotécnicas específicas do terreno local.

CONDIÇÕES LOCAIS - este termo refletirá as condições geotécnicas e geológicas do solo local quanto à transmissão de ondas sísmicas.

CAMPO LIVRE - este será o termo empregado para caracterizar o terreno sem a presença de estruturas construídas pelo homem. É o equivalente ao termo inglês "free field".

REGISTRO SÍSMICO - gráfico no qual se tem a variação da amplitude do movimento do terreno em função do tempo.

REGISTRO SÍSMICO DE CAMPO LIVRE - registro sísmico obtido num instrumento localizado em campo livre.

MOVIMENTO DE CAMPO LIVRE - movimento do terreno em campo livre.

CLASSIFICAÇÃO DE REGISTROS SÍSMICOS - o embasamento rochoso pode apresentar-se em condições de subsuperfície (subjacente a pacotes de solo) ou apresentar-se exposto na superfície, constituindo neste último caso o afloramento rochoso. Assim, em função do posicionamento do instrumento no terreno, os registros sísmicos podem ser classificados como:

- (a) registros em afloramentos rochosos;
- (b) registros em rocha de subsuperfície;
- (c) registros na superfície do solo (ou próximo da superfície do solo).

ELASTICIDADE - é a propriedade por meio da qual um material sólido muda sua forma e dimensões sob a ação de cargas aplicadas, mas recupera sua configuração original quando essas cargas são removidas.

LIMITE ELÁSTICO - a tensão máxima que um sólido pode resistir sem sofrer deformação permanente.

PLASTICIDADE - é a propriedade por meio da qual um material sólido sofre uma variação permanente, em forma ou dimensões, quando submetido a tensões superiores a uma tensão de referência, denominada limite de escoamento.

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA - variação permanente, em forma ou dimensões, sofrida por um material sólido, sem fratura, resultante da aplicação de tensões mantidas além do limite elástico.

LIMITE DE ESCOAMENTO - tensão num material sólido, a partir da qual ocorre deformação plástica.

HISTERESE MECÂNICA - é a propriedade que traduz a dependência da deformação de um material, não somente do valor instantâneo da deformação, mas também das tensões anteriores a que o material foi submetido. Assim, para um dado valor de tensão, a elongação do material é menor para tensões decrescentes do que para tensões crescentes. Quando a tensão aplicada a um material, que exibe esse tipo de comportamento, é removida, ele permanece com uma deformação residual.

ESPECTRO DE RESPOSTA - gráfico no qual são representadas as respostas máximas (deslocamento, velocidade, aceleração) de modelos idealizados, de um grau de liberdade, à excitações sísmicas.

ESPECTRO DE RESPOSTA DE PROJETO - espectro de resposta utilizado para finalidades de projeto.

FATOR DE ESCALA - fator de correção, utilizado nos espectros de resposta de projeto, para levar em consideração as características de um determinado sismo específico para o local.

ACELERAÇÃO DE PERÍODO ZERO - se uma estrutura possui frequência natural de vibração superior a 33 Hz, do ponto de vista de análise dinâmica, ela pode ser considerada como rígida. Isto significa que uma estrutura desse tipo sofrerá a mesma aceleração do terreno que lhe for imposta na base, independentemente do seu amortecimento, ou seja, da sua capacidade de dissipação de energia. O período zero é definido como sendo aquele correspondente à frequência de 33 Hz. Assim, uma estrutura de período zero sofrerá, no espectro de resposta, uma aceleração de período zero, a qual corresponde à aceleração máxima do terreno.

PROPRIEDADES DINÂMICAS DOS SOLOS - são aqui definidas como as propriedades do solo (módulo de cisalhamento e fator de amortecimento) que são funções das deformações sofridas pelo solo.

AMORTECIMENTO - propriedade que traduz a capacidade de um sistema em dissipar ou armazenar energia.

AMORTECIMENTO HISTERÉTICO - é o amortecimento de uma vibração devido a perda de energia através da histerese mecânica. Esse é um dos tipos de amortecimento utilizado para caracterizar as propriedades de dissipação de energia apresentada pelos solos.

AMORTECIMENTO DE RAYLEIGH - é o mecanismo de dissipação de energia, no caso de solos, onde o coeficiente de amortecimento é assumido como sendo proporcional aos valores discretizados de massa e rigidez do meio.

GRÁFICO LOGARÍTMICO ESPECIAL - é um gráfico, com quatro escalas logarítmicas, sendo a escala de frequências perpendicular à escala de velocidades e a escala de aceleração perpendicular a de deslocamento. O menor ângulo formado entre as escalas de deslocamento e aceleração, com escala de frequências é igual a  $45^\circ$ .

CENTRAL NUCLEAR - significará uma usina nuclear para produção de energia elétrica.

PARÂMETRO DISCRETIZADO - normalmente nos problemas reais trabalha-se com parâmetros contínuos. Esse, por exemplo, é o caso da massa de um sistema. Para efeito de análise dinâmica, o sistema contínuo apresentaria infinitos graus de liberdade, dando origem a um problema sem solução do ponto de vista prático. De modo a contornar esse problema, parte-se então para a análise de um modelo equivalente, com um número finito de graus de liberdade. No sistema real, são então escolhidos, convenientemente, alguns pontos chaves, aos quais são atribuídas massas concentradas, correspondentes à frações da massa total do sistema. Ao modelo equivalente, assim obtido, é denominado então, nesse caso, um modelo de massas discretizadas. Assim, nesse caso, a massa é considerada como sendo um parâmetro discretizado.

## ANEXO "B"

### CONCEITOS MATEMÁTICOS E ESTATÍSTICOS

#### 1. CONCEITOS ESTATÍSTICOS

Serão aqui definidos somente os parâmetros estatísticos, de interesse, que foram citados durante o desenvolvimento deste trabalho. No tratamento estatístico dos espectros de resposta sísmica, citados no texto, foram utilizados valores espectrais relacionados à média, percentil e ao desvio padrão. É também citada a distribuição de probabilidades lognormal, a qual foi utilizada na elaboração dos espectros de resposta utilizados pela Comissão de Regulamentação Nuclear dos Estados Unidos.

##### 1.1 Média

A média é um valor típico ou representativo de um conjunto de dados. Como esses valores típicos tendem a se localizar em um ponto central, dentro de um conjunto de dados, ordenados segundo suas grandezas, as médias são também denominadas medidas da tendência central [60].

O tipo de média citado neste trabalho foi a média aritmética, a qual é normalmente referida simplesmente como média .

A média de um conjunto de  $N$  valores reais discretos  $X_j$ , representada pela letra  $\bar{X}$ , é definida por:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} \quad (\text{Eq. 46})$$

Se os valores  $X_j$  ocorrerem  $f_j$  vezes, ou seja, ocorrerem com as freqüências  $f_j$ , a média será dada por:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^N f_j X_j}{\sum_{j=1}^N f_j} = \frac{\sum f_j X_j}{N} \quad (\text{Eq. 47})$$

onde  $N = \sum f_j$  é a freqüência total, isto é, o total do número de casos.

## 1.2 Percentil

Se um conjunto de dados é ordenado em ordem de grandeza, o valor médio (ou média aritmética dos dois valores médios) que divide o conjunto em duas partes iguais é denominado mediana. Por extensão desse conceito, pode-se pensar nos valores que dividem o conjunto de dados em 100 partes iguais. Esses valores representados por  $P_1, P_2, \dots, P_{99}$  denominam-se primeiro, segundo, ..., e nonagésimo percentis, respectivamente [60].

### 1.3 Desvio Padrão

O quanto os dados numéricos tendem a dispersar-se em torno de um valor médio chama-se variação ou dispersão dos dados. O desvio padrão é uma das várias medidas de dispersão existentes. O desvio padrão é definido como a raiz quadrada de um determinado quociente. Existem algumas diferenças quanto ao valor utilizado no quociente. Nesse trabalho o quociente será adotado como  $(N-1)$ , isto porque, segundo a referência [60], resulta numa melhor estimativa do desvio padrão da população da qual a amostra foi extraída. Assim, o desvio padrão, de um conjunto de  $N$  valores reais  $X_j$ , representado por  $S$  é definido por:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_j - \bar{X})^2}{N - 1}} = \sqrt{\frac{\sum N^2}{N-1}} \quad (\text{Eq. 48})$$

onde  $X$  representa o desvio de cada um dos valores  $X_j$  em relação à média  $\bar{X}$ .

Se os valores  $X_j$  ocorrerem com as freqüências  $f_j$ , o desvio padrão pode ser definido como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum f_j (X_j - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad (\text{Eq. 49})$$

#### 1.4 Valor MSD

As amplitudes dos espectros de resposta de projeto do Guia Regulatório 1.60, da NRC, representam o valor médio mais um desvio padrão, obtido a partir do tratamento estatístico de vários espectros de resposta. Para facilidade de referência no texto, o valor médio mais um desvio padrão será mencionado como valor MSD, onde as iniciais correspondem ao termo original em inglês ("Mean plus one Standard Deviation").

#### 1.5 Distribuição Lognormal

Para que se possa associar a um determinado evento (descrito através de uma variável  $x$  qualquer) um dado valor de probabilidade de ocorrência, é necessário que se conheça a função de probabilidades que rege o comportamento dessa variável.

De acordo com a referência [28], chegou-se à conclusão que a função de probabilidades para alguns parâmetros sísmicos (valores espectrais normalizados, fatores de amplificação) podem ser caracterizados como uma distribuição lognormal. Essa distribuição é analisada a partir do parágrafo seguinte.

Diz-se que uma variável  $x$  tem distribuição lognormal quando o logaritmo dessa variável tem uma distribuição normal. A função de distribuição de  $x$ , na forma reduzida é dada pela expressão:

$$F(x) = P(Z \leq z_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_0} e^{-z^2/2} dz \quad (\text{Eq. 50})$$

com

$$z_0 = \frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y} \quad (\text{Eq. 51})$$

onde  $\mu_y$  é o valor limite ou teórico da média da variável  $Y = \ln x$  e  $\sigma_y$  é o valor limite, ou teórico, do desvio padrão dessa mesma variável [61].

Com base nessa distribuição de probabilidades, a probabilidade de que a média não seja ultrapassada é de 50% e a probabilidade de que o valor MSD também não o seja é de 84,1%.

## 2. ANÁLISE DE FUNÇÕES POR MEIO DOS CONCEITOS DE FOURIER

Através da análise de Fourier, é possível transformar uma função, periódica ou transiente, do domínio do tempo para o domínio da frequência. É sabido que qualquer função pode ser representada como a soma de componentes harmônicos de frequências conhecidas. Essa soma é obtida através de séries trigonométricas. Cada função específica exigirá um determinado número de componentes harmônicos para compor a forma original da função. Através da análise de Fourier, mais especificamente através do espectro de Fourier, é possível caracterizar quais as frequências que são predominantes na composição da função original.

Para que uma função possa ser analisada pelo teorema de Fourier é preciso que ela satisfaça algumas restrições que são denominadas condições de Dirichlet. Entretanto, quase todas as funções conhecidas, que representam fenômenos naturais, obedecem a essas condições. Assim, a seguir, será apresentado, de forma resumida, a teoria envolvida na análise de Fourier, ficando implícita a obediência àquelas condições.

### 2.1 Séries de Fourier

No caso geral de uma função periódica, de período fundamental  $2T$ , o desenvolvimento em séries de Fourier para essa função é dado tanto pela equação (52) como pela equação (53). Na equação (52) a função é representada como uma superposição de harmônicos simples. Já na equação (53) é utilizado o conceito de

exponencial complexa.

As constantes  $a_0$ ,  $a_n$  e  $b_n$ , na equação (52) são denominadas coeficientes de Fourier. A constante  $c_n$ , na equação (53) também é um coeficiente de Fourier, só que na forma complexa. Observa-se que a integração, para efeito de obtenção dos coeficientes  $a_0$ ,  $a_n$ ,  $b_n$  ou  $c_n$ , é feita somente de  $-T$  a  $T$ .

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos\left(\frac{n\pi t}{T}\right) + b_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi t}{T}\right)] \quad (\text{Eq. 52})$$

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n e^{int} \quad (\text{Eq. 53})$$

A seguir são dadas as equações para cálculo dos coeficientes mencionados.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-T}^T f(t) dt \quad (\text{Eq. 54})$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \cos\left(\frac{n\pi t}{T}\right) dt \quad (\text{Eq. 55})$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi t}{T}\right) dt \quad (\text{Eq. 56})$$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) e^{-\left(\frac{in\pi t}{T}\right)} dt \quad (\text{Eq. 57})$$

Chama-se a atenção para o fato de que a série de Fourier, dada pela equação (52) ou (53), representará exatamente a função  $f(t)$  somente quando for incluído, no somatório, um número infinito de termos.

## 2.2 Análise Espectral de Funções Transientes

Se na equação (52) faz-se  $n/t = w$ , obtém-se a seguinte equação para expressar uma função periódica de período  $2T$ , em termos da série de Fourier:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nwt) + b_n \operatorname{sen}(nwt)] \quad (\text{Eq. 58})$$

Nesse caso,  $f(t)$  passa a ser representada pela soma de senóides e cossenóides, cujas freqüências são múltiplos inteiros da freqüência da função  $f(t)$ . A freqüência  $w = \pi/T$  é chamada de freqüência fundamental e seus múltiplos inteiros são denominados freqüências harmônicas. Com essa mesma mudança de variável, o coeficiente de Fourier, na forma complexa, assume a seguinte forma:

$$C_n = \frac{w}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) e^{-inwt} dt \quad (\text{Eq. 59})$$

O coeficiente  $C_n$  pode ser relacionado a  $a_n$  e  $b_n$  em função do sinal de  $n$ . Assim, para  $n < 0$ ,  $C_n$  é dado por (60) ; para  $n > 0$ ,  $C_n$  é dado por (61), e para  $n = 0$ ,  $C_n$  é igual a  $a_0$ .

$$C_n = \frac{1}{2} (a_n + ib_n) \quad (\text{Eq. 60})$$

$$C_n = \frac{1}{2} (a_n - ib_n) \quad (\text{Eq. 61})$$

Tanto para a equação (60) como para a (61) o módulo de  $C_n$  é dado por:

$$|C_n| = \frac{1}{2} \sqrt{a_n^2(w) + b_n^2(w)} \quad (\text{Eq. 62})$$

no caso em que  $n = 0$ , ter-se-á:

$$|C_n| = |a_0(w)| \quad (\text{Eq. 63})$$

Para caracterização como uma variável complexa, além do módulo do coeficiente  $C_n$ , é necessário fornecer o ângulo que posiciona o raio unitário, o qual é dado pela equação (64).

$$\phi(w) = \text{tg}^{-1} \left( - \frac{b_n(w)}{a_n(w)} \right) + 2\pi n, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{Eq. 64})$$

A partir da equação (62), observa-se que o coeficiente  $C_n$  é função da frequência. Assim, ao se colocar num gráfico o módulo de  $C_n$  em função da frequência, obter-se-á um determinado número de amplitudes posicionadas, eqüidistantemente, de um valor  $\pi/T$ . Essas amplitudes, igualmente espaçadas são denominadas linhas espectrais. Quando  $T$  tende para o infinito, o espaçamento entre as linhas espectrais,  $\pi/T$ , tende para zero. Como um caso limite, o espectro de uma função (de somente um período) infinitamente longa, é uma função contínua, o passo que o espectro de uma função periódica é definido em frequências discretas, o qual é normalmente denominado de espectro de linha.

### 2.3 Integral de Fourier

As séries de Fourier constituem uma ferramenta poderosa para o estudo de vários problemas que envolvem funções periódicas. Como, naturalmente, muitos problemas práticos não envolvem funções periódicas, é desejável ampliar o método das séries de Fourier, de modo a incluir as funções não periódicas. Essa ampliação é feita através do seguinte artifício: considera-se uma função periódica de período  $2T$  e faz-se  $T$  aproximar-se do infinito, o que faz com que a função resultante não seja mais periódica. Prosseguindo-se com artifícios matemáticos, que não serão aqui mencionados, chega-se à seguinte expressão para a representação de uma função através da integral de Fourier.

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} dw \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) \cos[w(t-\lambda)] d\lambda \quad (\text{Eq. 65})$$

## 2.4 Transformada de Fourier

A integral de Fourier dada pela equação (65) pode ser rearranjada, obtendo-se a seguinte equação:

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [a(w)\cos wt + b(w) \text{ sen } wt] dw \quad (\text{Eq. 66})$$

onde:

$$a(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) \cos (w\lambda) d\lambda \quad (\text{Eq. 67})$$

$$b(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) \text{sen } (w\lambda) d\lambda \quad (\text{Eq. 68})$$

As funções  $a(w)$  e  $b(w)$  são as definições formais de transformada cosseno e transformada seno, respectivamente. In troduzindo uma nova função  $\phi(w)$  definida por (69)

$$\phi(w) = \text{tg}^{-1} \left( -\frac{b(w)}{a(w)} \right), \quad \phi(-w) = -\phi(w) \quad (\text{Eq. 69})$$

e utilizando-se a fórmula de Euler obtem-se a nova expressão pa ra a equação (66):

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{a^2(w) + b^2(w)} \cdot e^{i[wt + \phi(w)]} dw \quad (\text{Eq. 70})$$

ou

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w) e^{iwt} dw \quad (\text{Eq. 71})$$

onde

$$F(w) = \sqrt{a^2(w) + b^2(w)} \cdot e^{-i\phi(w)} \quad (\text{Eq. 72})$$

A função  $F(w)$  é conhecida como transformada de Fourier da função  $f(t)$ , onde a amplitude de  $F(w)$  e o argumento  $\phi(w)$  são dados, respectivamente, pelas equações (73) e (74).

$$|F(w)| = \sqrt{a^2(w) + b^2(w)} \quad (\text{Eq. 73})$$

$$\phi(w) = \text{tg}^{-1} \left[ -\frac{b(w)}{a(w)} \right] + 2n\pi, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{Eq. 74})$$

Além disso, a variável complexa  $F(w)$  pode ser expressa

como:

$$F(w) = a(w) - ib(w) \quad (\text{Eq. 75})$$

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos wt \, dt - i \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin wt \, dt \quad (\text{Eq. 76})$$

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-iwt} \, dt \quad (\text{Eq. 77})$$

**ANEXO "C"**

**TABELAS**

Tabela 1 - Relação dos Sismos Brasileiros de Maior Magnitude Já Registrados [1]

| DATA       | EPICENTRO     | MAGNITUDES* |       | LOCALIZAÇÃO               |
|------------|---------------|-------------|-------|---------------------------|
|            |               | $M_S$       | $m_b$ |                           |
| 28.06.1939 | 27,5°S 48,5°W | 5,5         | (5,4) | Litoral de Santa Catarina |
| 31.01.1955 | 12,5°S 57,4°W | 6,6         | (5,9) | Noroeste de Mato Grosso   |
| 01.03.1955 | 19,9°S 36,7°W | 6,0         | (5,6) | Atlântico (Cabo São Tomé) |
| 13.02.1964 | 18,0°S 56,7°W | 5,5         | (5,4) | Oeste de Mato Grosso      |
| 15.08.1965 | 2,7°S 60,2°W  | 5,0         | (5,1) | Roraima-Guiana            |
| 24.10.1972 | 21,8°S 40,3°W | (4,5)       | 4,9   | Litoral do Espírito Santo |

Obs.: \* -  $M_S$  = Magnitude de onda superficial (Richter),  $m_b$  = magnitude de onda P. Os valores de magnitude entre parenteses não são calculados, mas convertidos pela fórmula  $M_S = 2,08 m_b - 5,65$  [123].

Tabela 2 - Sismos que Produziram as Maiores Acelerações do Terreno nos EUA [23]

| Data e Local                                                  | Distância horizontal à falha que sofreu deslocamento (milhas) | Magnitude | Componete      | Aceleração máxima (% g) |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------|----------------|-------------------------|
| 1. 27/junho/1966<br>Parkfield, California                     | 200 pés                                                       | 5,6       | N65°E<br>S25°E | 50<br>-                 |
| 2. 18/maio/1940<br>El Centro, California                      | 4                                                             | 7,0       | N-S<br>E-W     | 33<br>23                |
| 3. 13/abril/1949<br>Olympia, Washington                       | 10                                                            | 7,1       | S80°W<br>S10°E | 31<br>18                |
| 4. 30/dezembro/1934<br>El Centro, California                  | 35                                                            | 6,5       | N-S<br>E-W     | 13<br>12                |
| 5. 30/junho/1941<br>Santa Barbara, California                 | 10                                                            | 5,9       | S45°E<br>N45°E | 24<br>23                |
| 6. 09/março/1949<br>Hollister, California                     | 10                                                            | 5,3       | S01°W<br>N89°W | 23<br>11                |
| 7. 10/março/1933<br>Vernon, California                        | 10                                                            | 6,3       | S82°E<br>N08°E | 19<br>13                |
| 8. 21/julho/1952<br>Taft, California                          | 25                                                            | 7,7       | S69°E<br>N21°E | 18<br>17                |
| 9. 29/abril/1965<br>Olympia, Washington                       | 35                                                            | 6,5       | S04°E<br>S86°W | 18<br>18                |
| 10. 31/outubro/1935<br>Helena, Montana                        | 5                                                             | 6,0       | E-W<br>N-S     | 16<br>14                |
| 11. 11/setembro/1938<br>Ferndale, California                  | 25                                                            | 5,5       | N45°E<br>S45°E | 8,2<br>16               |
| 12. 03/outubro/1941<br>Ferndale, California                   | 20                                                            | 6,4       | N45°E<br>S45°E | 13<br>12                |
| 13. 22/março/1957<br>San Francisco, Golden Gate Park          | 8                                                             | 5,3       | S80°E<br>N10°E | 13<br>9,5               |
| 14. 02/outubro/1933<br>Vernon, California                     | 20                                                            | 5,3       | S82°E<br>N08°E | 12<br>8,5               |
| 15. 22/março/1957<br>San Francisco, State Building            | 10                                                            | 5,3       | S09°E<br>S81°W | 10<br>6                 |
| 16. 13/abril/1949<br>Seattle, Washington                      | 35                                                            | 7,1       | N88°W<br>S02°W | 7,5<br>5,8              |
| 17. 09/fevereiro/1941<br>Ferndale, California                 | 60                                                            | 6,6       | N45°E<br>S45°E | 7,5<br>4                |
| 18. 02/outubro/1933<br>Los Angeles Survey Terminal            | 15                                                            | 5,3       | N39°E<br>N51°W | 6,5<br>6                |
| 19. 10/maio/1933<br>Los Angeles Subway Terminal               | 15                                                            | 6,25      | N51°W<br>N39°E | 6,5<br>4                |
| 20. 22/março/1957<br>San Francisco, Alexander Building        | 11                                                            | 5,3       | N81°E<br>N09°W | 5<br>5                  |
| 21. 22/março/1957<br>San Francisco, Southern Pacific Building | 12                                                            | 5,3       | N45°E<br>N45°W | 5<br>4                  |
| 22. 22/março/1957<br>Oakland, California                      | 17                                                            | 5,3       | N26°E<br>S64°E | 5<br>4                  |

**Tabela 3 - Exemplo de Classificação de Estruturas de Centrais Nucleares [72]**

| <b>ESTRUTURA</b>                               | <b>CLASSE DE SEGURANÇA</b>  | <b>CATEGORIA SÍSMICA</b> |
|------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Edifício do Reator                             | 2                           | I                        |
| Edifício Auxiliar do Reator                    | 2                           | I                        |
| Edifício de Manuseio do Combustível            | 3                           | I                        |
| Edifício do Gerador Diesel                     | 3                           | I                        |
| Edifício de Controle                           | 3                           | I                        |
| Edifício de Tratamento de Rejeitos Radioativos | 3                           | I                        |
| Edifício da Turbina                            | Não Relacionada a Segurança | Não Sísmica              |

Tabela 4 - Descrição dos Efeitos Correspondentes aos Graus da Escala de Mercalli Modificada [4]

| ESCALA DE INTENSIDADES DE SISMOS - MERCALLI MODIFICADA                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Aceleração do terreno (a) |        |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------|-------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | cm/sec <sup>2</sup>       | g      |       |
| I - Sismo sentido apenas por poucas pessoas, em circunstâncias especialmente favoráveis.                                                                                                                                                                                                                                                                       |                           |        |       |
| II - Sentido só por poucas pessoas repousando, principalmente em andares altos de prédios. Objetos delicados suspensos podem oscilar.                                                                                                                                                                                                                          | 2                         | 0,005g |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 3                         |        |       |
| III - Sentido nitidamente dentro de casa, especialmente em andares altos. em hora muitas pessoas não o reconhecem como sismo. Automóveis parados podem oscilar. Vibrações parecidas com passagem de caminhões. Duração estendida.                                                                                                                              | 4                         |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 5                         |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 6                         |        |       |
| IV - Durante o dia é sentido dentro de casa por muitos, e fora de casa por poucos. De noite alguns acordam. Movimentos em janelas pratos e paredes podem cair sons. Sensação de caminhão pesado atingindo o prédio. Automóveis parados oscilam nitidamente.                                                                                                    | 7                         |        | 0,01g |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 8                         |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 9                         |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 10                        |        |       |
| V - Sentido por quase todos, muitos acordam. Alguns pratos, janelas etc. , quebram, assim como gesso e cal. Objetos instáveis caem. Perturbações em árvores, postes e outros objetos altos. Relógios de pendulo podem parar.                                                                                                                                   | 20                        |        | 0,05g |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 30                        |        |       |
| VI - Sentido por todos, muitos correm para a rua. Alguma mobília pesada movimenta-se. Restos de gesso e reboco caídos, e chaminés danificadas. Danos ligeiros.                                                                                                                                                                                                 | 40                        |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 50                        |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 60                        |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 70                        |        |       |
| VII - Todos correm para a rua. Danos desprezíveis em prédios bem construídos, moderados em prédios comuns e consideráveis em estruturas mal projetadas e construídas. Algumas chaminés quebradas. Sentido por pessoas conduzindo automóveis.                                                                                                                   | 80                        | 0,1g   |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 90                        |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 100                       |        |       |
| VIII - Danos ligeiros em estruturas bem projetadas, consideráveis em prédios comuns, com colapso parcial, e grandes em estruturas mal construídas. Redes movimentam-se dos quadros. Quedas de chaminés, monumentos, colunas etc. Mobílias caem. Ejeção de pequenas quantidade de areia e lama. Mudanças na água de poços. Perturba pessoas guiando automóveis. | 200                       | 0,5g   |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 300                       |        |       |
| IX - Considerável dano em estruturas especialmente projetadas, algumas saindo do prumo. Grandes danos em prédios bem construídos com colapso parcial. Alguns prédios saem das fundações. Fraturas abundantes no solo. Fratura de tubos enterrados.                                                                                                             | 400                       |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 500                       |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 600                       |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 700                       |        |       |
| X - Algumas estruturas de madeira, bem construídas, são destruídas. Maioria das construções de alvenaria são destruídas com as fundações. Terreno muito fissurado, trilhos tortos, escorregamentos de taludes e de encostas de rios. Areia e lama movimentam-se. Água invade margens dos rios.                                                                 | 800                       |        | 1g    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 900                       |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1000                      |        |       |
| XI - Muito poucas estruturas de alvenaria resistem. Pontes destruídas, largas fendas no terreno, tubulações subterrâneas completamente desmanteladas. Escorregamentos em taludes de solo brando. Trilhos deformados consideravelmente.                                                                                                                         | 2000                      |        | 2g    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 3000                      | 3g     |       |
| XII - Dano total. Ondas observadas sobre a superfície do terreno. Linhas de visada e de nível distorcidas. Objetos lançados no ar.                                                                                                                                                                                                                             | 4000                      | 4g     |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 5000                      | 5g     |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 6000                      | 6g     |       |

Tabela 5 - Intensidade do Espectro de Resposta de Sismos Instrumentalmente Registrados [37]

| Nº  | DATA E LOCAL***                              | r<br>(km) | h<br>(km) | MAGNITUDE | COMPONENTE     | SI <sub>0</sub> | SI <sub>0</sub><br>(média) | SI <sub>0,2</sub><br>(média) | a, % g     |
|-----|----------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|------------|
| 01  | 18.05.1940<br>El Centro, Calif.              | 48        | 24        | 6,7       | N-S<br>E-W     | 8,94<br>7,77    | 8.35                       | 2,71                         | 33<br>23   |
| 02  | 30.12.1934<br>El Centro, Calif.              | 56        | 24        | 6,5       | N-S<br>E-W     | 5,93<br>5,83    | 5.88                       | 2,09                         | 26<br>20   |
| 03  | 13.04.1949<br>Olympia, Wash.                 | 72        | 72        | 7,1       | S80°W<br>S10°E | 6,05<br>5,59    | 5.82                       | 2,21                         | 31<br>18   |
| 04. | 21.07.1952*<br>Taft, Calif.                  | 64        | 24        | 7,7       | S69°E<br>N21°E | 4,84<br>4,53    | 4.69                       | 1,91                         | 18<br>17   |
| 05. | 10.03.1933<br>Vernon, Calif.                 | 45        | 24        | 6,3       | S82°E<br>N08°E | 4,9<br>4,35     | 4.62                       | 1,70                         | 19<br>13   |
| 06. | 30.06.1941<br>Santa Barbara, Calif.          | 24        | 31        | 5,9       | S45°E<br>N45°E | 3,43<br>3,15    | 3.29                       | 1,80                         | 24<br>23   |
| 07. | 03.10.1941<br>Ferndale, Calif.               | 80        | 24        | 6,4       | N45°E<br>S45°E | 3,2<br>2,78     | 2.99                       | 1,41                         | 13<br>12   |
| 08. | 10.05.1933<br>Los Angeles Subway<br>Terminal | 53        | 24        | 6,25      | N51°W<br>N39°E | 3,21<br>2,67    | 2.94                       | 0,82                         | 6,5<br>4   |
| 09. | 13.04.1949**<br>Seattle, Wash.               | 88        | 72        | 7,1       | N88°W<br>S02°W | 2,81<br>2,46    | 2.63                       | 1,10                         | 7,5<br>5,8 |
| 10. | 09.03.1949<br>Hollister, Calif.              | 16        | 24        | 5,3       | S01°W<br>N89°W | 2,44<br>2,29    | 2.36                       | 1,27                         | 23<br>11   |
| 11. | 31.10.1935<br>Helena, Mont.                  | 24        | 40        | 6,0       | E-W<br>N-S     | 2,49<br>1,16    | 1.82                       | 1,02                         | 16<br>14   |
| 12. | 11.09.1938<br>Ferndale, Calif.               | 56        | 16        | 5,5       | N45°E<br>S45°E | 1,64<br>1,27    | 1.45                       | 0,64                         | 8,2<br>16  |
| 13. | 02.10.1933<br>Vernon, Calif.                 | 27        | 24        | 5,3       | S82°E<br>N08°E | 1,65<br>0,99    | 1.32                       | 0,69                         | 12<br>8,5  |

continua ...

Continuação da Tabela 5 ...

|     |                                          |     |    |     |       |      |      |      |     |
|-----|------------------------------------------|-----|----|-----|-------|------|------|------|-----|
| 14. | 09.02.1941                               | 121 | 24 | 6,6 | N45°E | 1,31 | 1,10 | 0,40 | 7,5 |
|     | Ferndale, Calif.                         |     |    |     | S45°E | 0,88 |      |      | 4   |
| 15. | 02.10.1933                               | 35  | 24 | 5,3 | N39°E | 1,14 | 0,96 | 0,45 | 6,5 |
|     | Los Angeles Survey Terminal              |     |    |     | N51°W | 0,78 |      |      | 6   |
| 16. | 22.03.1957                               | 13  | 11 | 5,3 | S80°E | 1,04 | 0,84 | 0,49 | 13  |
|     | San Francisco, Golden Gate Park          |     |    |     | N10°E | 0,64 |      |      | 9,5 |
| 17. | 22.03.1957                               | 16  | 11 | 5,3 | S09°E | 1,29 | 1,12 | 0,58 | 10  |
|     | San Francisco, State Building            |     |    |     | S81°W | 0,95 |      |      | 6   |
| 18. | 22.03.1957                               | 17  | 11 | 5,3 | N81°E | 0,50 | 0,48 | 0,28 | 5   |
|     | San Francisco, Alexander Building        |     |    |     | N09°W | 0,45 |      |      | 5   |
| 19. | 22.03.1957                               | 18  | 11 | 5,3 | N45°E | 1,32 | 1,22 | 0,48 | 5   |
|     | San Francisco. Southern Pacific Building |     |    |     | N45°W | 1,12 |      |      | 46  |
| 20. | 22.03.1957                               | 28  | 11 | 5,3 | N26°E | 0,46 | 0,38 | 0,20 | 5   |
|     | Oakland, Calif.                          |     |    |     | S64°E | 0,29 |      |      | 4   |

Obs.:

- \* - Deslocamento da falha principalmente na vertical.
- \*\* - Registros obtidos em condições de fundações não usuais.

- h - Profundidade focal.
- r - Distância entre o local de registro e o epicentro.
- a - Aceleração de pico do terreno.

Tabela 6 - Fatores de Amplificação do Espectro Recomendados por Newmark e Hall [47]

| FATOR DE AMORTECIMENTO | FATOR DE AMPLIFICAÇÃO |            |            |
|------------------------|-----------------------|------------|------------|
|                        | DESLOCAMENTO          | VELOCIDADE | ACELERAÇÃO |
| 0                      | 2,5                   | 4,0        | 6,4        |
| 0,5                    | 2,2                   | 3,6        | 5,8        |
| 1                      | 2,0                   | 3,2        | 5,2        |
| 2                      | 1,8                   | 2,8        | 4,3        |
| 5                      | 1,4                   | 1,9        | 2,6        |
| 7                      | 1,2                   | 1,5        | 1,9        |
| 10                     | 1,1                   | 1,3        | 1,5        |
| 20                     | 1,0                   | 1,1        | 1,2        |

Tabela 7 - Relação dos Acelerogramas que Serviram de Base para  
Obtenção dos Espectros de Resposta do RG 1.60 [28]

| SISMO                | ANO  | ESTAÇÃO DE REGISTRO           | COMPONENTES (a)                                      | ACELERAÇÃO DE PICO DO TERRENO (g) |
|----------------------|------|-------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| El Centro (b,c)      | 1940 | El Centro, Calif.             | NS<br>EW<br>Vertical                                 | 0,33<br>0,22<br>0,28              |
| El Centro (b)        | 1934 | El Centro, Calif.             | NS<br>EW                                             | 0,26<br>0,18                      |
| Kern Country(b)      | 1952 | Taft, Calif.                  | N21 <sup>o</sup> E<br>S69 <sup>o</sup> E             | 0,18<br>0,16                      |
| Olympia(b)           | 1949 | Olympia, Wash.                | N4 <sup>o</sup> W<br>S86 <sup>o</sup> W              | 0,19<br>0,31                      |
| Helena (b)           | 1935 | Helena, Mont.                 | NS<br>EW                                             | 0,13<br>0,16                      |
| San Francisco (b, c) | 1957 | Golden Gate Park, Calif.      | N10 <sup>o</sup> E<br>N80 <sup>o</sup> W<br>Vertical | 0,11<br>0,13<br>0,051             |
| Parkfield(b)         | 1966 | Cholame-Shandon No. 2, Calif. | N65 <sup>o</sup> E<br>S25 <sup>o</sup> W             | 0,51<br>Não Registrada            |
| Parkfield(b)         | 1966 | Cholame-Shandon No. 5, Calif. | N5 <sup>o</sup> W<br>N85 <sup>o</sup> E              | 0,40<br>0,47                      |
| Tokachi-Oki(b)       | 1968 | Hachinohe, Japan              | NS<br>EW                                             | 0,19<br>0,23                      |
| Lima (b)             | 1966 | Lima, Peru                    | N8 <sup>o</sup> E<br>N82 <sup>o</sup> W              | 0,42<br>0,27                      |
| San Fernando (b, c)  | 1971 | Castaic, ORR, Calif.          | N21 <sup>o</sup> E<br>N69 <sup>o</sup> E<br>Vertical | 0,34<br>0,29<br>0,18              |
| San Fernando (b, c)  | 1971 | Bank of California, Calif.    | N11 <sup>o</sup> E<br>N79 <sup>o</sup> W<br>Vertical | 0,23<br>0,14<br>0,108             |
| San Fernando(b)      | 1971 | Universal-Sheraton Calif.     | NS<br>EW                                             | 0,18<br>0,13                      |
| San Fernando (b, c)  | 1971 | V.N. Holiday Inn, Calif.      | NS<br>EW<br>Vertical                                 | 0,28<br>0,15<br>0,177             |
| Eureka (b,c)         | 1954 | Eureka, Calif.                | N79 <sup>o</sup> E<br>N11 <sup>o</sup> W<br>Vertical | 0,26<br>0,18<br>0,11              |

continua ...

Continuação da Tabela 7 ...

|                 |      |                                       |                                                      |                         |
|-----------------|------|---------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------|
| Olympia (b)     | 1965 | Olympia, Wash.                        | S4 <sup>o</sup> E<br>S86 <sup>o</sup> W              | 0,20<br>0,16            |
| Parkfield(b)    | 1966 | Temblor, Calif. (*)                   | N65 <sup>o</sup> W<br>N25 <sup>o</sup> E             | 0,28<br>0,33            |
| El Centro(c)    | 1956 | El Centro, Calif.                     | NS<br>EW<br>Vertical                                 | 0,036<br>0,055<br>0,016 |
| El Centro(c)    | 1968 | El Centro, Calif.                     | NS<br>EW<br>Vertical                                 | 0,142<br>0,058<br>0,036 |
| Kern Country(c) | 1952 | Hollywood Storage<br>Basement, Calif. | NS<br>EW<br>Vertical                                 | 0,059<br>0,046<br>0,023 |
| Kern Country(c) | 1952 | Hollywood Storage<br>PE Lot, Calif.   | NS<br>EW<br>Vertical                                 | 0,063<br>0,043<br>0,023 |
| San Fernando(c) | 1971 | Pacoima Dam, Calif.                   | S74 <sup>o</sup> W<br>S16 <sup>o</sup> E<br>Vertical | 1,250<br>1,241<br>0,718 |
| Ferndale (c)    | 1951 | Ferndale, Calif.                      | N46 <sup>o</sup> W<br>S44 <sup>o</sup> W<br>Vertical | 0,120<br>0,123<br>0,032 |
| Ferndale (c)    | 1954 | Ferndale, Calif.                      | N46 <sup>o</sup> W<br>N44 <sup>o</sup> E<br>Vertical | 0,209<br>0,166<br>0,045 |
| Hollister(c)    | 1961 | Hollister, Calif.                     | S01 <sup>o</sup> W<br>N89 <sup>o</sup> W<br>Vertical | 0,076<br>0,189<br>0,056 |

Obs.:

- (a) - As componentes verticais foram utilizadas somente nos estudos da referência [48].
- (b) - Dado utilizado na referência [49].
- (c) - Dado utilizado na referência [48].
- \* - Deste registro só foi utilizada uma componente.

Tabela 8 - Dados Básicos para Obtenção dos Espectros de Resposta Independentes do Local [47]

| DADOS SOBRE OS SISMOS        |      |           |                                     | NÚMERO DE COMPONENTES CONSIDERADAS NA OBTENÇÃO DO ESPECTRO |                                              |                                 | CARACTERÍSTICAS ESTIMADAS PARA AS CONDIÇÕES LOCAIS, DE ACORDO COM [51] |                              |                            |      |
|------------------------------|------|-----------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------|------|
| LOCALIZAÇÃO DO EPICENTRO (f) | DATA | MAGNITUDE | ESTAÇÃO DE REGISTRO (f)             | HOUSNER <sup>a</sup><br>[70]                               | NEWMARK-HALL <sup>b</sup><br>[71]            | GUIA REGULATÓRIO 1.60 (c), [15] |                                                                        | PROFUNDIDADE ATÉ A ROCHA (m) | CLASSIFICAÇÃO DO LOCAL (d) |      |
|                              |      |           |                                     |                                                            |                                              | NEWMARK<br>[48]                 | BLUME<br>[49]                                                          |                              |                            |      |
| Lower, Calif.                | 1934 | 6,5       | El Centro                           | 2                                                          | Correlações feitas por Garcia e Roesset [72] |                                 | 2                                                                      | 32                           | (2)                        |      |
| Helena                       | 1935 | 6,0       | Helena                              | 2                                                          |                                              |                                 |                                                                        | 2                            | 0                          | (1)  |
| Imperial Valley              | 1940 | 6,3       | El Centro                           | 2                                                          |                                              |                                 | 3                                                                      | 2                            | >120                       | (3)e |
| Western Wash.                | 1949 | 7,1       | Olympia                             | 2                                                          |                                              |                                 |                                                                        | 2                            | 134                        | (3)  |
| Northwest Calif.             | 1951 | 5,8       | Ferndale                            |                                                            |                                              |                                 | 3                                                                      |                              | 160                        | (3)  |
| Kern County                  | 1952 | 7,7       | Taft                                | 2                                                          |                                              |                                 |                                                                        | 2                            | 0                          | (1)  |
|                              |      |           | Hollywood Storage Building Basement |                                                            |                                              |                                 |                                                                        |                              |                            |      |
|                              |      |           | Storage Lot                         |                                                            |                                              |                                 | 3                                                                      |                              | 64                         | (2)  |
|                              |      |           | Storage Lot                         |                                                            |                                              |                                 | 3                                                                      |                              | 64                         | (2)  |
| Eureka                       | 1945 | 6,6       | Eureka                              |                                                            |                                              |                                 | 3                                                                      | 2                            | 160                        | (3)  |
|                              |      |           | Ferndale                            |                                                            |                                              | 3                               |                                                                        | 160                          | (3)                        |      |
| El Alamo, Baja Calif.        | 1956 | 6,3       | El Centro                           |                                                            |                                              | 3                               |                                                                        | >120                         | (3)e                       |      |
| Daly City                    | 1957 | 5,3       | Golden Gate Park                    |                                                            |                                              | 3                               | 2                                                                      | 0                            | (1)                        |      |
| Hollister                    | 1961 | 5,6       | Hollister                           |                                                            |                                              | 3                               |                                                                        | -                            | -                          |      |
| Puget Sound                  | 1965 | 6,5       | Olympia                             |                                                            |                                              |                                 | 2                                                                      | 134                          | (3)                        |      |
| Parkfield                    | 1966 | 5,6       | Temblor                             |                                                            |                                              |                                 | 1                                                                      | 0                            | (1)                        |      |
|                              |      |           | Cholame-Shandon (N92)               |                                                            |                                              |                                 | 2                                                                      | 48                           | (2)                        |      |
|                              |      |           | Cholame-Shandon (N95)               |                                                            |                                              |                                 | 2                                                                      | 32                           | (2)                        |      |
| Peru                         | 1966 | 7,5       | Lima                                |                                                            |                                              |                                 | 2                                                                      | -                            | -                          |      |

continua ...

Continuação da Tabela 8 ...

|              |      |     |                |  |  |   |   |        |      |
|--------------|------|-----|----------------|--|--|---|---|--------|------|
| Borrogo Mt   | 1968 | 6,5 | El Centro      |  |  | 3 |   | >120   | (3)e |
| Japan        | 1968 | 7,8 | Tikachi-Oki    |  |  |   | 2 | Grande | (3)  |
| San Fernando | 1971 | 6,5 | Pacoima Dam    |  |  | 3 |   | 0      | (1)  |
|              |      |     | Orion          |  |  | 3 | 2 | 256    | (3)  |
|              |      |     | Castaic        |  |  | 3 | 2 | 19     | (2)  |
|              |      |     | Bank of Calif. |  |  | 3 | 2 | 22     | (2)  |
|              |      |     | Sheraton Univ. |  |  |   | 2 |        | (3)  |

Obs.:

- a - Obtido com base na média dos espectros de somente duas componentes horizontais de cada sismo.
- b - Garcia e Roesset [125], mostraram a estreita correlação existente entre os espectros de Newmark-Hall e a envoltória dos espectros dos movimentos horizontais correspondentes aos sismos de El Centro (1940), Helena (1935), Taft (1952), Olympia (1949) e Golden Gate (1957).
- c - Espectros obtidos a partir do valor MSD dos espectros das componentes indicadas. Foram desenvolvidas, separadamente, curvas espectrais para movimentos horizontais e verticais.
- d - Classificação de condições locais de acordo com Seed et alii [51]. (1) Rocha; (2) Rígida - Solo firme com profundidade menor do que 46 m; (3) não coesivo profundo - pacote de solo arenoso com espessura maior do que 763 m; (4) Fraco a Médio - pacote de solo consistindo de argila, de consistências média a mole, associadas com camadas de areia e cascalho.
- e - O local da estação acelerográfica de El Centro foi classificado por Seed et alii [125] como tendo solo rígido. Entretanto, sondagens subsequentes indicaram que o local apresenta solo do tipo não coesivo profundo.

Tabela 9 - Fatores de Amplificação dos Espectros de Resposta do RG 1.60 [47]

Espectro de Resposta Horizontal

| FATOR DE AMORTECIMENTO | FATORES DE AMPLIFICAÇÃO CORRESPONDENTES AOS PONTOS DE CONTROLE |         |           |               |
|------------------------|----------------------------------------------------------------|---------|-----------|---------------|
|                        | ACELERAÇÃO                                                     |         |           | DESLOCAMENTO* |
|                        | A (33Hz)                                                       | B (9Hz) | C (2,5Hz) | D (0,25Hz)    |
| 0,5                    | 1,0                                                            | 4,96    | 5,95      | 3,20          |
| 2,0                    | 1,0                                                            | 3,54    | 4,25      | 2,50          |
| 5,0                    | 1,0                                                            | 2,61    | 3,13      | 2,05          |
| 7,0                    | 1,0                                                            | 2,27    | 2,72      | 1,88          |
| 10,0                   | 1,0                                                            | 1,90    | 2,28      | 1,70          |

Espectro de Resposta Vertical

| FATOR DE AMORTECIMENTO | FATORES DE AMPLIFICAÇÃO CORRESPONDENTES AOS PONTOS DE CONTROLE |         |           |               |
|------------------------|----------------------------------------------------------------|---------|-----------|---------------|
|                        | ACELERAÇÃO                                                     |         |           | DESLOCAMENTO* |
|                        | A (33Hz)                                                       | B (9Hz) | C (3,5Hz) | D (0,25Hz)    |
| 0,5                    | 1,0                                                            | 4,96    | 5,67      | 2,13          |
| 2,0                    | 1,00                                                           | 3,54    | 4,05      | 1,67          |
| 5,0                    | 1,0                                                            | 2,61    | 2,98      | 1,37          |
| 7,0                    | 1,00                                                           | 2,27    | 2,59      | 1,25          |
| 10,0                   | 1,0                                                            | 1,90    | 2,17      | 1,13          |

\* - O deslocamento máximo do terreno é dado por  $D_{MAX} = \frac{36}{(1g)} (k.g)$  onde k.g é a aceleração horizontal máxima do terreno para o local em estudo.

**Tabela 10 - Descrição do Procedimento Recomendado para Obtenção do Movimento Sísmico Padrão de Campo Livre para o Local de Uma Instalação Nuclear [47]**

| ETAPAS                                           | DADOS NECESSÁRIOS                               | INFORMAÇÕES OBTIDAS                                                                                                                                                       | PROCEDIMENTOS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a. Estudos Geológicos e Sismológicos             | Informações apresentadas na referência [13]     | Definição da geologia e tectônica, em nível regional, e dos sismos mais importantes para o local                                                                          | <p><b>Estudos Geológicos:</b> Requerem a determinação da fisiografia, litologia, estratigrafia, geologia estrutural e história geológica da área; é necessário, ainda, a identificação de falhas capazes e províncias tectônicas.</p> <p><b>Estudos Sismológicos:</b> Incluem a definição dos sismos mais importantes (datas de ocorrência, magnitudes, intensidades, correlações com falhas capazes ou províncias tectônicas, relações de atenuação) e identificação de dados empíricos sobre movimentos sísmicos do terreno.</p>                                                                                                                                                 |
| b. Investigações de solo no Local                | Informações apresentadas na referência [125]    | Propriedades estáticas e dinâmicas de solos e rochas do local                                                                                                             | <p><b>Investigações de Campo:</b> Consistem de trincheiras, sondagens de reconhecimento e investigações geofísicas para estabelecer os tipos básicos de solo, espessura de camadas, densidades, velocidade de ondas de volume, condições do lençol subterrâneo, e profundidades até o embasamento rochoso.</p> <p><b>Testes de Laboratório:</b> Submeter amostras de solo e rocha a testes de modo a estabelecer as propriedades necessárias à análise de resposta do local (variação do módulo de cisalhamento e fator de amortecimento com a deformação, etc.).</p>                                                                                                              |
| c. Estudos de Sensibilidade da Resposta do Local | Dados das Etapas "a" e "b"                      | Caracterização dos limites do terreno para efeito da análise de resposta do local. Identificação dos parâmetros que apresentam maior influência sobre a resposta do local | Inicialmente, seleciona-se um modelo adequado para o local; a seguir são identificados os parâmetros que possam ser importantes em relação à resposta do local (por exemplo: profundidade do embasamento rochoso em subsuperfície). São feitas várias análises de resposta do local para que sejam determinados os efeitos desses parâmetros.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| d. Avaliação das Formas de Respostas do Local    | Resultados dos Cálculos realizados na Etapa "c" | Definição da aceleração de pico padrão para o local. Obtenção de espectros MSD <sup>a</sup> representando os resultados da análise de resposta do local                   | São avaliados os resultados obtidos na Etapa "c". São identificados conjuntos de espectros e acelerações de pico obtidos a partir da análise de resposta do local (resultantes de variações em parâmetros que foram selecionados como tendo os maiores efeitos sobre a resposta do local). Esses conjuntos são analisados estatisticamente, visando obter os valores MSD de aceleração de pico e dos espectros de resposta. A aceleração de pico MSD é comparada com os valores empíricos (da Etapa "a") de modo a definir a aceleração de pico padrão para o local. Os espectros MSD são utilizados na Etapa "f" como dado auxiliar na definição do espectro padrão para o local. |

Continua ...

Continuação da Tabela 10 ...

|                                                                                                            |                                                                     |                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>e. Seleção de Registros de Locais Semelhantes</p>                                                       | <p>Dados das Etapas "a", "b" e "d"</p>                              | <p>Obtenção de Espectros MSD representando os registros de locais semelhantes</p>                                                          | <p>Examinam-se os registros de sísmos SM, disponíveis na literatura sísmica e seleciona-se um conjunto de registros cujas condições geológicas, sismológicas e de solo local mais se aproximem daquelas condições identificadas para o local, nas Etapas "a" e "b". Os espectros desses registros são então ajustados de acordo com a aceleração de pico para o local, obtida na Etapa "d". A seguir obtêm-se os espectros MSD, desses espectros ajustados. Os espectros MSD são utilizados na Etapa "f" como de auxílio na definição do espectro padrão para o local.</p>                                                                                                                                        |
| <p>f. Comparações com os espectros do RG 1.60 e Seleção Final do Movimento Sísmico Padrão para o Local</p> | <p>Guia Regulatório 1.60 [15] e Resultados das Etapas "d" e "e"</p> | <p>Seleção do espectro padrão final para o local.<br/><br/>Obtenção dos históricos sísmicos correspondentes do terreno (se necessário)</p> | <p>São comparados os seguintes espectros MSD: (1) Aqueles representativos dos resultados da análise de resposta do local (Etapa "d"); (2) Aqueles obtidos a partir dos registros de locais semelhantes ajustados para o local (Etapa "e"); e (3) Aqueles do RG 1.60, ajustados de acordo com a aceleração de pico padrão para o local. A partir dessa comparação e de uma análise sobre que resultados realmente se aplicam ao local, desenvolve-se o espectro padrão para o local.<br/><br/>Caso necessário podem ser desenhados históricos sísmicos correspondentes ao espectro padrão, seja a partir da própria análise de resposta do local ou por meio da geração de históricos artificiais compatíveis.</p> |

Obs.:

- \* - De acordo com a referência [47] o valor MSD foi escolhido de modo a fornecer valores consistentes com os espectros do RG 1.60. É dito ainda que o valor MSD permite levar em consideração as incertezas associadas com as técnicas usadas para estimar os movimentos sísmicos do terreno, e ao mesmo tempo proporciona fatores de segurança razoáveis para efeito de projeto.

Tabela 11 - Fatores a Serem Considerados na Avaliação Final do Movimento Sísmico Padrão, de Campo Livre para o Local de Uma Instalação Nuclear [47]

| RESULTADOS                                      | QUESTÕES BÁSICAS                                                                                                                          | CONSIDERAÇÕES NA AVALIAÇÃO DO MOVIMENTO SÍSMICO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Análise de Resposta do Local (Etapas "c" e "d") | Adequabilidade do modelo matemático                                                                                                       | Na avaliação da aplicabilidade dos resultados analíticos a um determinado local, dever-se-á considerar os tipos de ondas sísmicas que possam exercer uma influência predominante sobre o abalo do terreno e que tipos de ondas que podem ser incluídas no modelo matemático. O quanto o modelo realmente representa as ondas julgadas significativas para o local, deverá influenciar o peso atribuído aos cálculos no processo de seleção do movimento padrão para o local.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                 | Sensibilidade dos resultados à propriedades do solo e aos movimentos de excitação em subsuperfície                                        | No cálculo dos resultados da análise de resposta do local, o engenheiro tem que determinar a sensibilidade relativa desses resultados a variações razoáveis nos parâmetros representativos das propriedades do solo e nos movimentos de excitação em subsuperfície. Isto deverá servir como uma orientação nos seguintes pontos: (1) no planejamento de cálculos adicionais que sirvam para investigar, posteriormente, a sensibilidade dos movimentos do terreno a quaisquer parâmetros particularmente importantes; (2) na definição do conjunto de resultados da análise a ser usado na seleção final do movimento sísmico padrão para o local (Etapa "f").                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Registros de Locais Semelhantes (Etapa "e")     | Condições sísmológicas, geológicas e de solo local de registros de locais semelhantes correlacionadas com as condições do local em estudo | Há vários parâmetros relacionados com o mecanismo de geração de sismos, com o caminho de propagação local-fonte sísmica, e com as propriedades do solo local que podem afetar o abalo sísmico do terreno no local. Quase sempre não é possível selecionar registros de locais semelhantes que se enquadrem nas condições ideais quanto a similaridade de todos esses parâmetros; assim, tem-se que selecionar registros cujos parâmetros se enquadrem com aqueles julgados mais importantes para o local em estudo. O quanto cada um desses parâmetros se correlacione ou não com aqueles do local da instalação nuclear deverá ditar o peso que esses registros apresentem no processo de seleção do movimento padrão.                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                                 | Disponibilidade de registros adequados                                                                                                    | Para certas condições de locais, poderão ser escassos os registros de locais semelhantes. O número de elementos do conjunto de registros de locais semelhantes deverá ser suficiente para fornecer uma avaliação estatística significativa das formas de resposta do local.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Espectros do RG 1.60 (Etapa "f")                | Condições sísmológicas, geológicas e do terreno no local correlacionadas com as condições padrão do RG 1.60                               | As curvas espectrais do RG 1.60, embora possam ser adequadas para uma ampla faixa de condições de locais, podem não refletir os efeitos de condições não usuais sobre os movimentos sísmicos do terreno no local. Como exemplo de condições não usuais que podem não estar refletidas nas curvas espectrais do RG 1.60, pode-se citar: (1) local com solo de baixa resistência intercalado com camadas resistentes e fráguas; (2) local com pacote de solo de grande espessura; (3) locais muito próximo a uma falha responsável pela geração de sismos.<br><br>Para essas ou outras condições típicas, os espectros do RG 1.60 podem não ser representativos do abalo sísmico do terreno em faixas de frequência importantes para a definição do movimento sísmico padrão para o local. Assim, na seleção do movimento sísmico padrão, o engenheiro terá que fazer um julgamento cuidadoso para saber se o local em estudo se enquadra nas condições padrão do RG 1.60 ou se serão necessárias considerações dependentes do local. |

Tabela 12 - Acelerações de Pico do Terreno Obtidas a Partir da Análise de Resposta do Local  
(Exemplo de Aplicação) [47]

| PROPRIEDADES DO SOLO UTILIZADAS NA ANÁLISE | REGISTROS UTILIZADOS COMO REPRESENTATIVOS DE REGISTROS EM AFLORAMENTOS ROCHOSOS PARA EFEITO DE CÁLCULO DOS MOVIMENTOS DE EXCITAÇÃO EM SUBSUPERFÍCIE |                                                          |                                                          | ACELERAÇÃO DE PICO DO TERRENO CALCULADA (g) |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                            | ESTAÇÃO DE REGISTRO                                                                                                                                 | CONDIÇÕES LOCAIS REAIS DO TERRENO NA ESTAÇÃO DE REGISTRO | COMPONENTE AJUSTADA PARA UMA ACELERAÇÃO MÁXIMA DE 0,35 g |                                             |
| Limite Superior                            | Barragem de Pacoima                                                                                                                                 | Rocha                                                    | S16E                                                     | 0,240                                       |
|                                            |                                                                                                                                                     |                                                          | S74W                                                     | 0,269                                       |
|                                            | Castaic                                                                                                                                             | Rígida                                                   | N21E                                                     | 0,284                                       |
|                                            |                                                                                                                                                     |                                                          | N69E                                                     | 0,283                                       |
| Limite Inferior                            | Barragem de Pacoima                                                                                                                                 | Rocha                                                    | S16E                                                     | 0,196                                       |
|                                            |                                                                                                                                                     |                                                          | S74W                                                     | 0,249                                       |
|                                            | Castaic                                                                                                                                             | Rígida                                                   | N21E                                                     | 0,250                                       |
|                                            |                                                                                                                                                     |                                                          | N69E                                                     | 0,243                                       |

Obs.: A partir das informações da última coluna obtém-se os seguintes resultados estatísticos:

(1) Média das Acelerações de Pico do Terreno = 0,252 g; (2) Valor MSD das Acelerações de Pico do Terreno = 0,280 g.

ANEXO "D"

FIGURAS

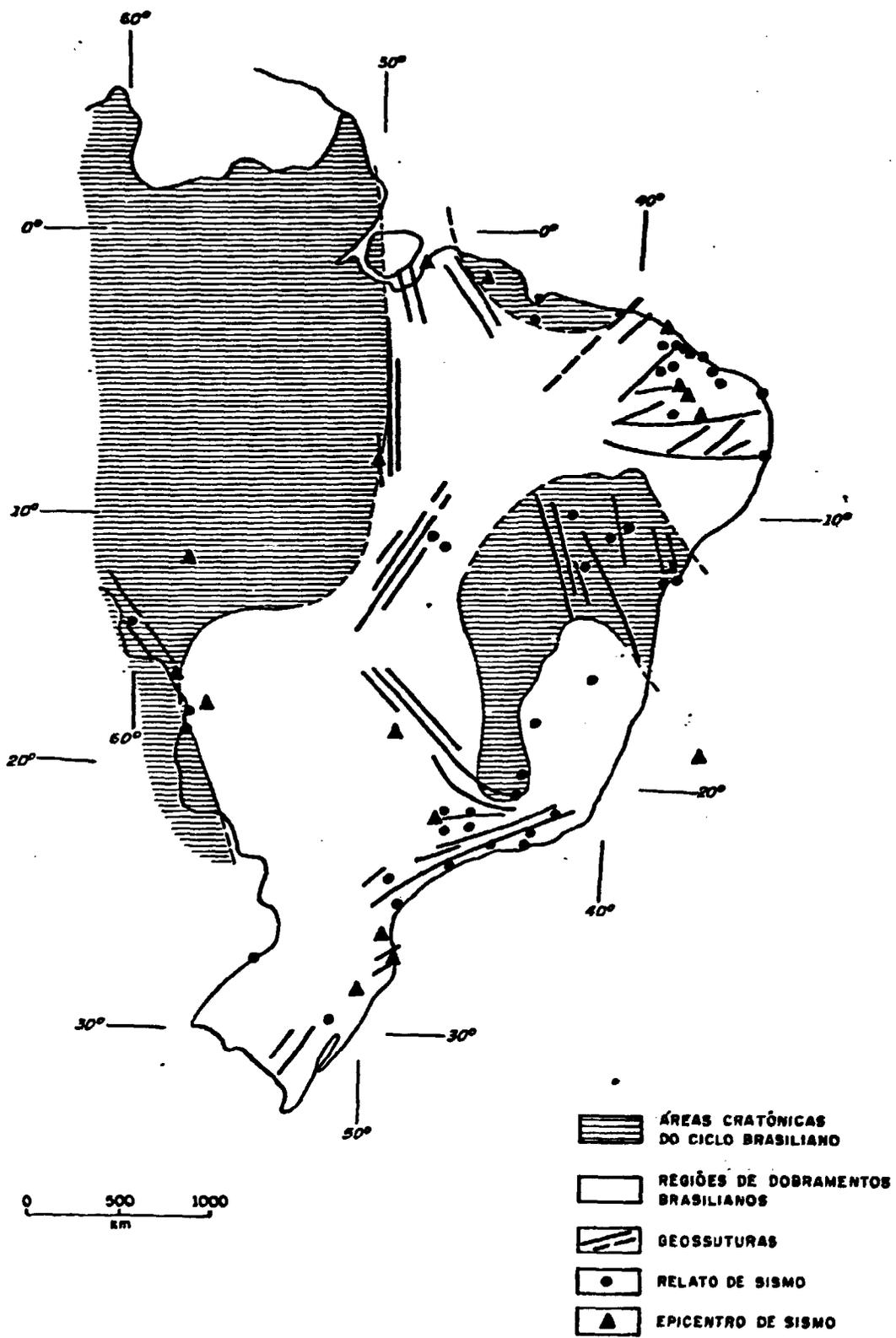
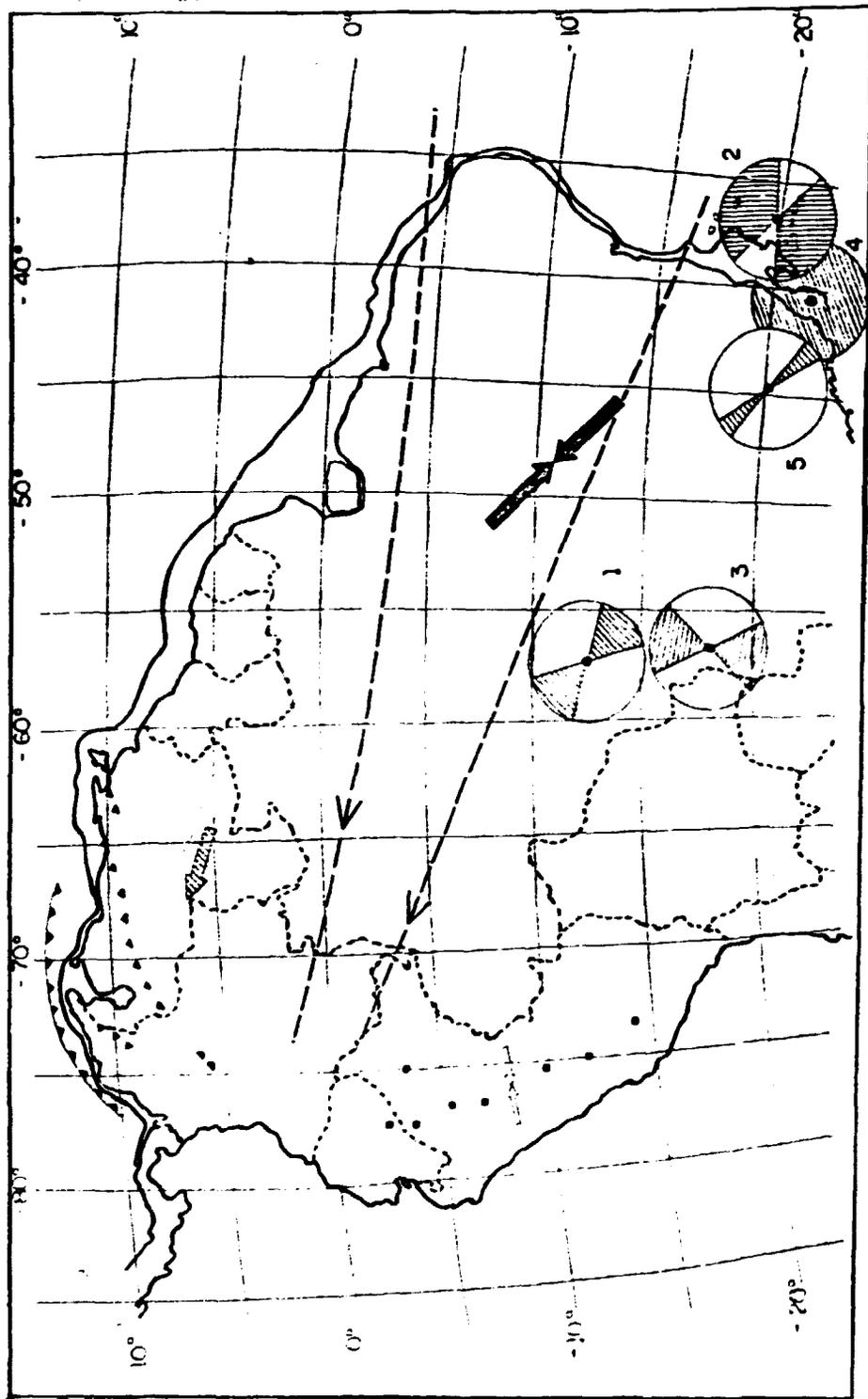
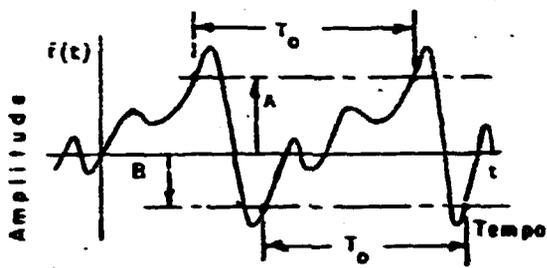


Fig.1 - EPICENTRO E LOCAIS DE RELATO DE SISMOS NO BRASIL ; (9)

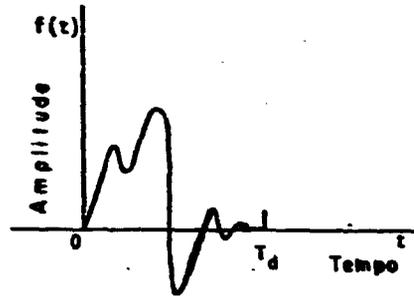


| Evento<br>Nº | Data                       | h<br>min s | Lat.<br>(S) | Long.<br>(O) | Profundidade epi-<br>central (km) | $M_b$ |
|--------------|----------------------------|------------|-------------|--------------|-----------------------------------|-------|
| 1            | 31.01.1955                 | 05 03 02,0 | 12,5        | 57,4         | Normal                            | 6,75  |
| 2            | 01.03.1955                 | 01 46 13,0 | 19,9        | 36,7         | Normal                            | 6,5   |
| 3            | 13.02.1964                 | 11 21 46,8 | 18,1        | 56,8         | 33                                | 5,3   |
| 4            | 24.10.1972                 | 15 36 32,5 | 21,7        | 40,5         | 10                                | 4,8   |
| 5            | Vários Simões<br>1975-1976 |            | 20,2        | 44,7         | 01                                | <3,5  |

Fig. 2 - LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS EVENTOS SÍSMICOS NO BRASIL; (1)



(a) EXCITAÇÃO PERMANENTE



(b) EXCITAÇÃO TRANSIENTE

Fig. 3 - TIPOS DE EXCITAÇÃO ; (21)

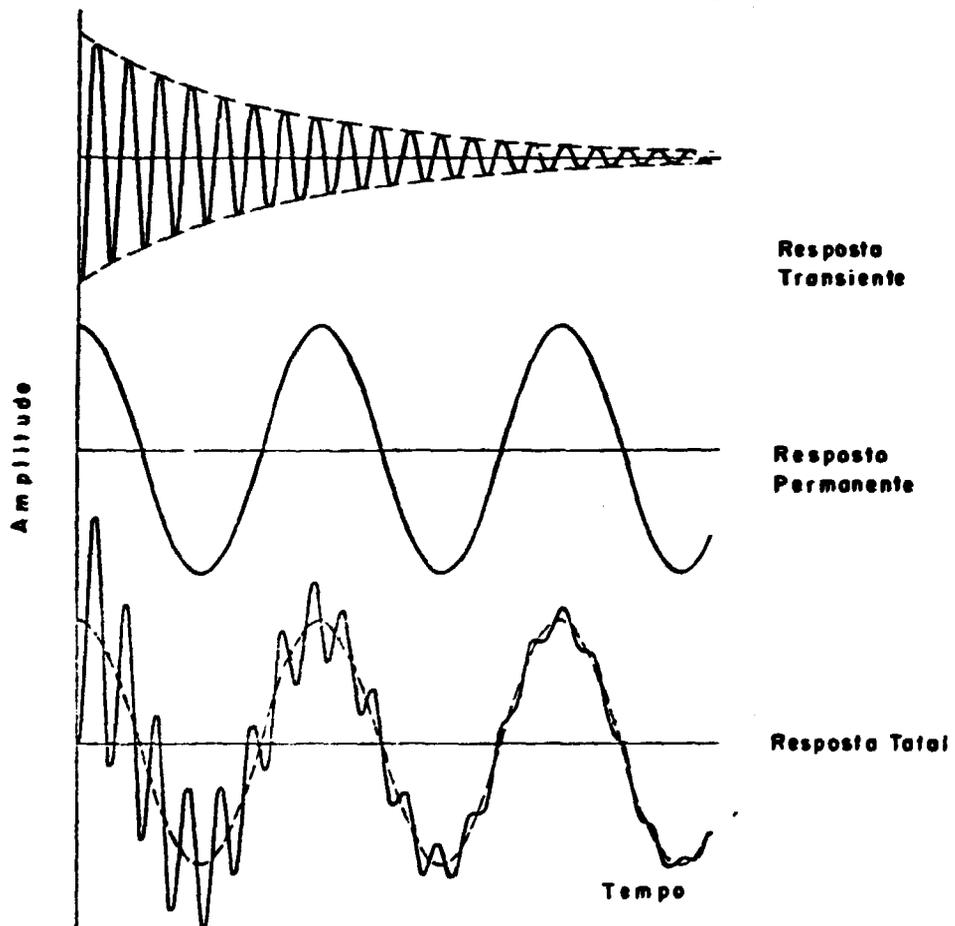
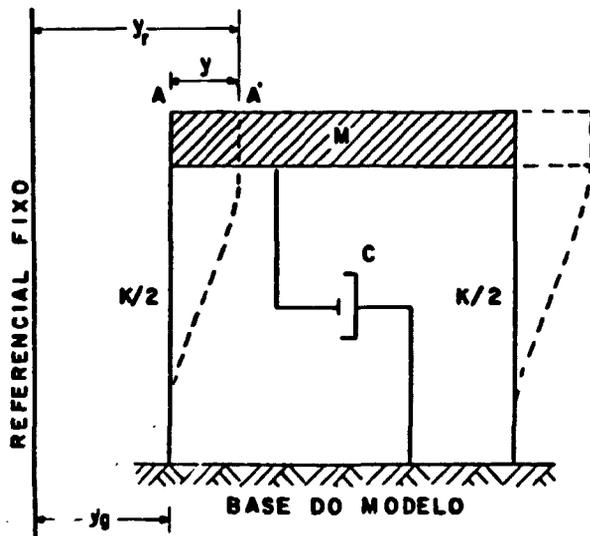
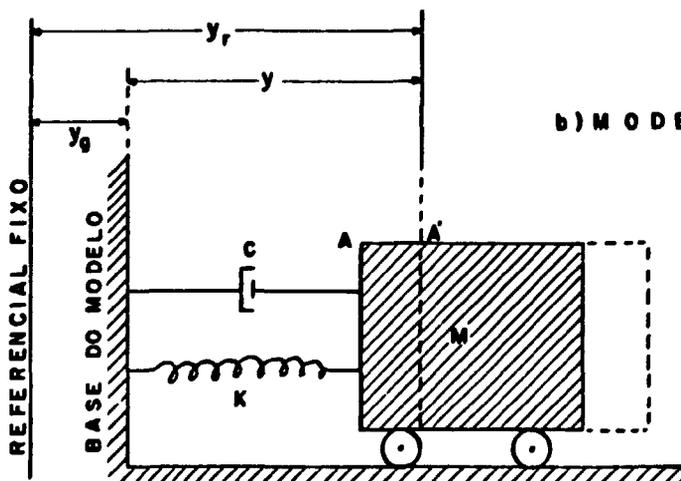


Fig. 4 - RESPOSTA DE SISTEMAS LINEARES AMORTECIDOS SOB AÇÃO DE EXCITAÇÃO PERMANENTE (SENOIDAL) ; (32).



a) MODELO TIPO  
PÓRTICO SIMPLES

$y_r$  - Deslocamento Total da Massa.  
 $y$  - Deslocamento Relativo da Massa.  
 $y_g$  - Deslocamento Absoluto do Base  
 $c$  - Coeficiente de Amortecimento  
 $K$  - Constante de Mola



b) MODELO MASSA - MOLA

Fig. 5 - EXEMPLOS TÍPICOS DE SISTEMAS AMORTECIDOS COM UM GRAU DE LIBERDADE.

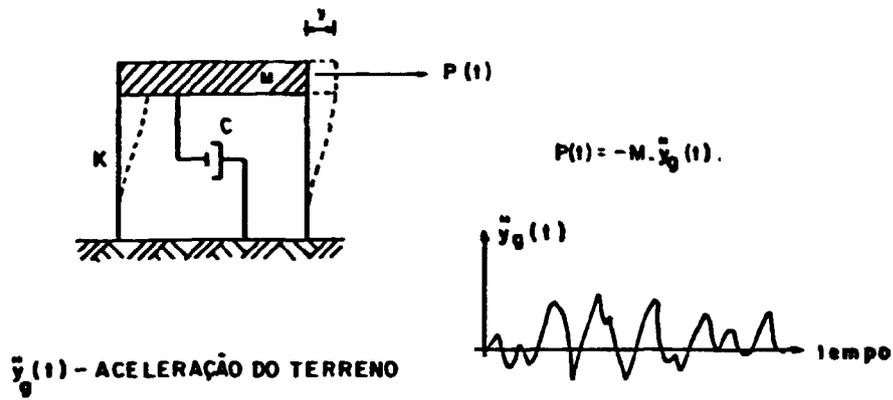


Fig. 6 - ABORDAGEM DO PROBLEMA DE EXCITAÇÃO SÍSMICA

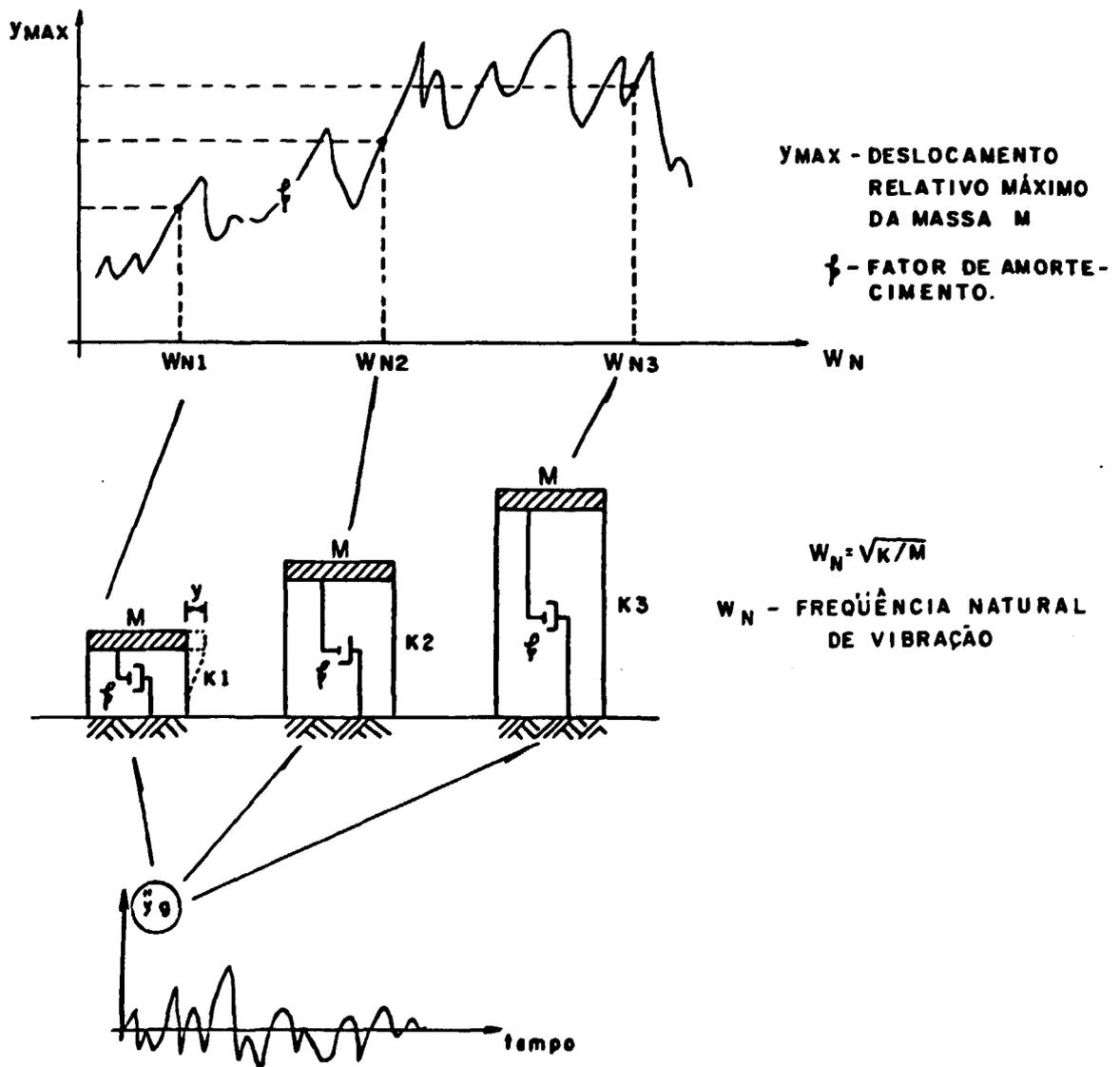


Fig. 7 - EXEMPLO TÍPICO DE CONSTRUÇÃO DE UM ESPECTRO DE RESPOSTA.

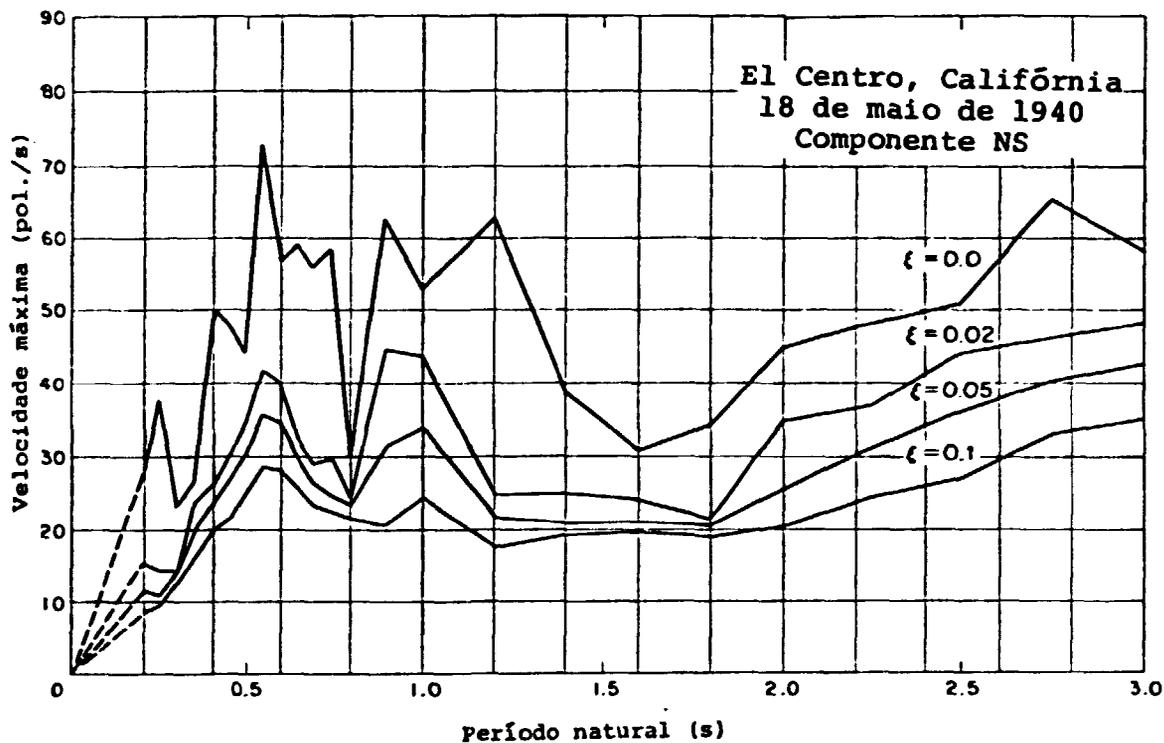


Fig. 8 - ESPECTRO DE RESPOSTA - VELOCIDADE DA COMPONENTE NS DO SISMO DE EL CENTRO - 1940 ; (62)

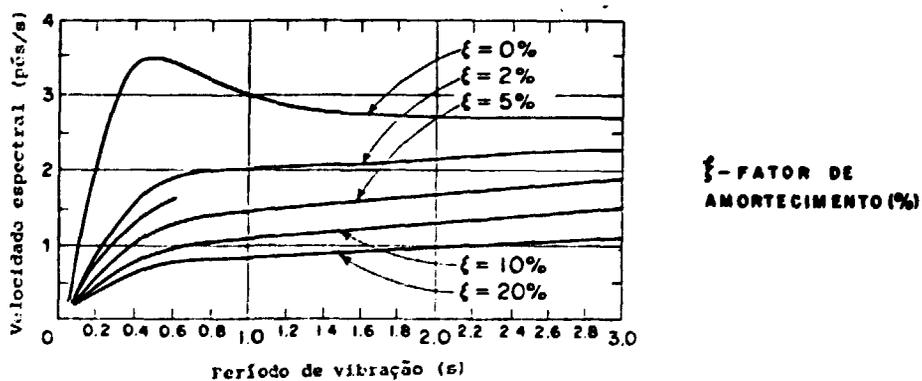
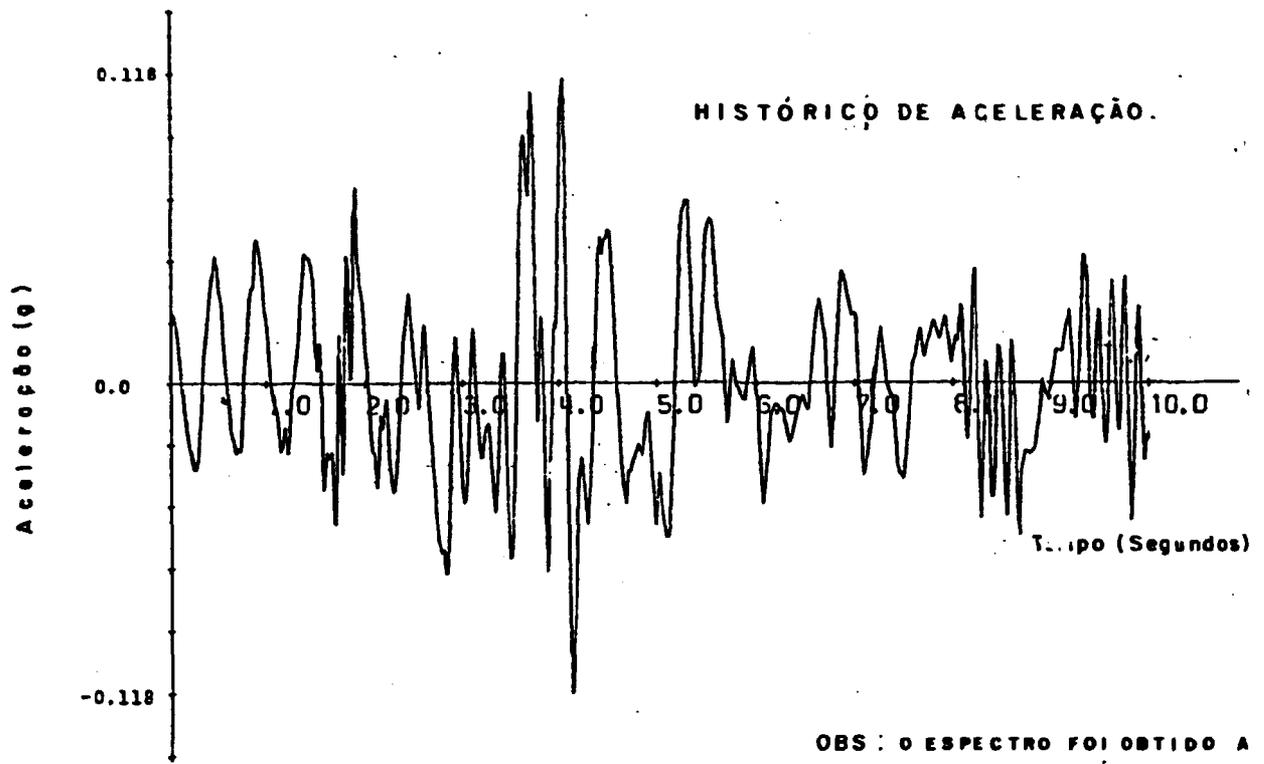


Fig. 9 - ESPECTRO DE RESPOSTA MÉDIO - VELOCIDADE DO SISMO DE EL CENTRO; (62)



OBS : O ESPECTRO FOI OBTIDO A PARTIR DO HISTÓRICO DE ACELERAÇÃO MOSTRADO ACIMA.

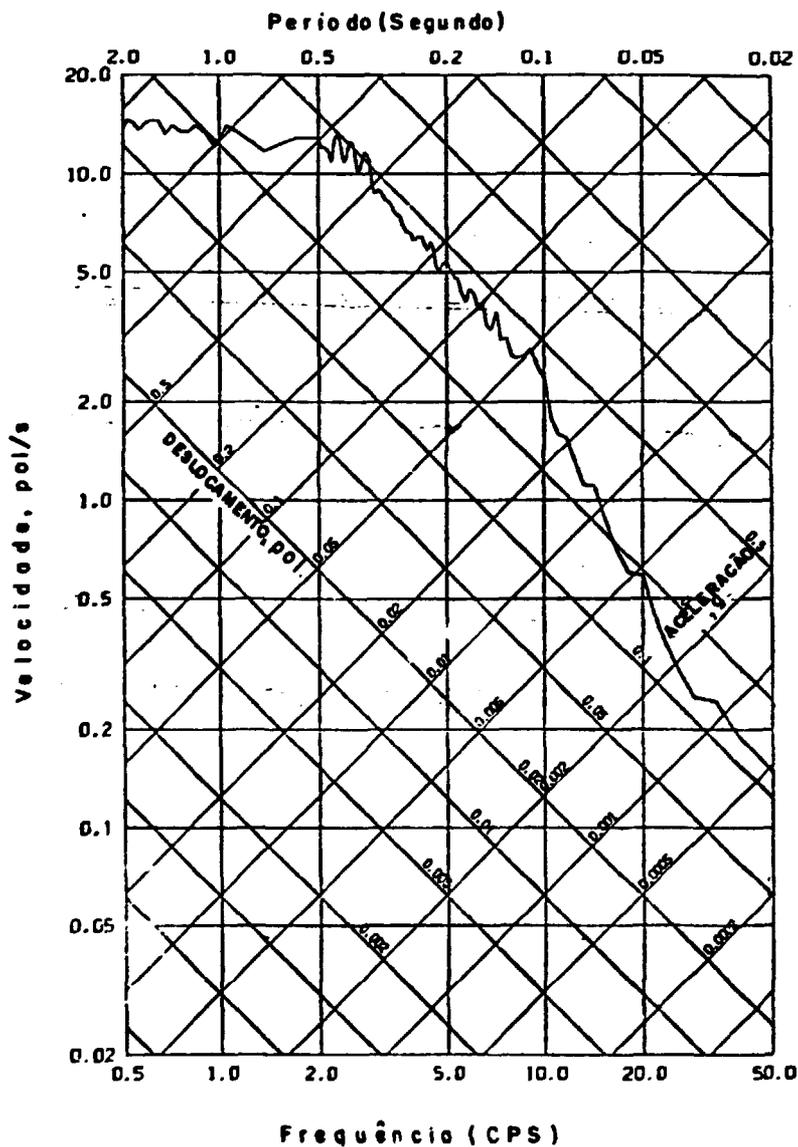
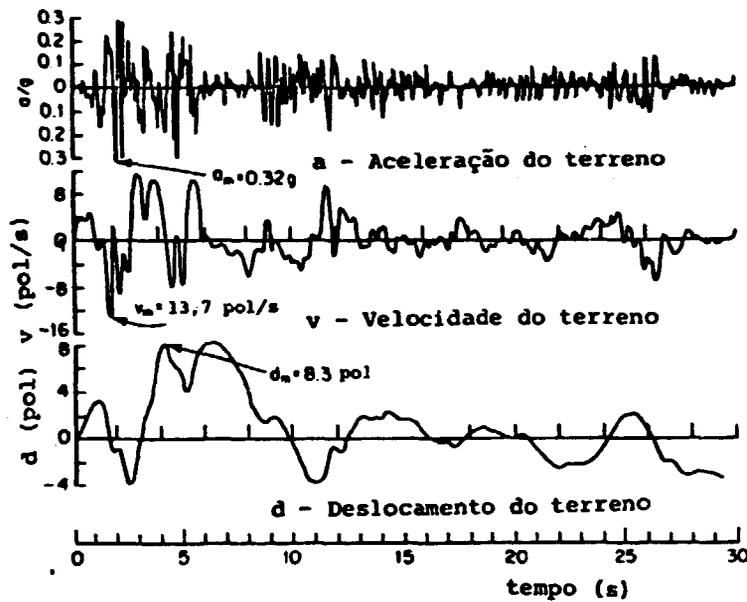
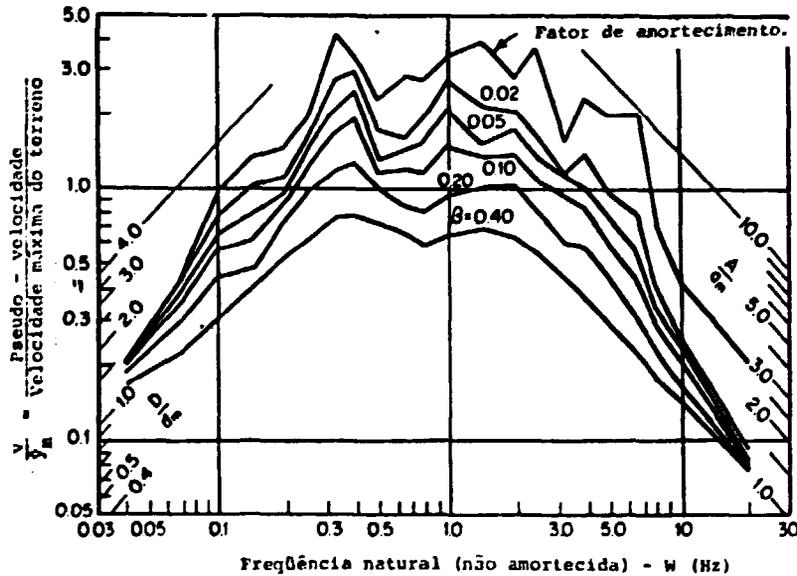


Fig. 10 - ESPECTRO DE RESPOSTA NO GRÁFICO LOGARITMICO ESPECIAL (63)



(a) Componente NS do Sismo de El Centro (18 de maio de 1940)



(b) Espectro de Resposta para Sistemas Elásticos Submetidos a Ação do Sismo de El Centro.

Fig. 11 - ESPECTRO DE RESPOSTA (ELÁSTICO) PARA O SISMO DE EL CENTRO - 1940; (24)

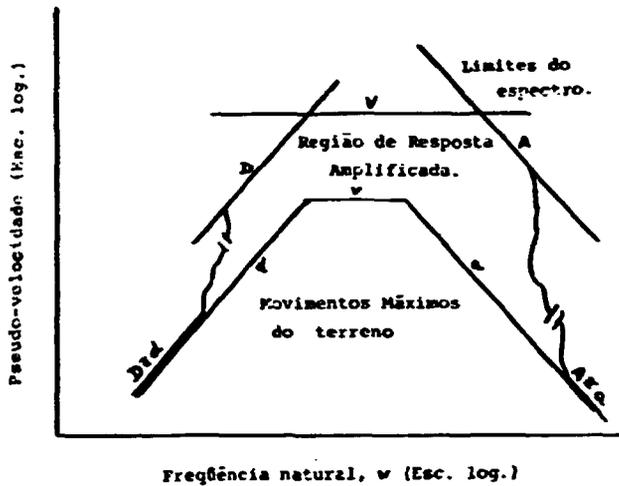
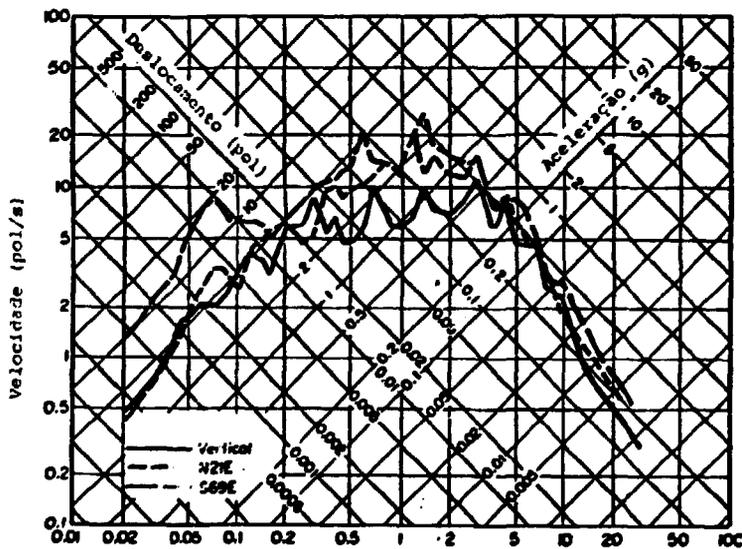
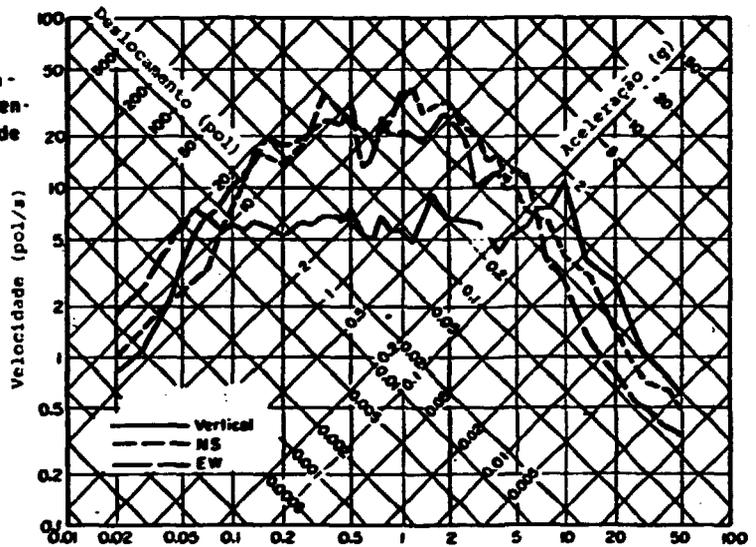


Fig. 12 - LIMITES DO ESPECTRO DE RESPOSTA COMPARADOS COM OS MOVIMENTOS MÁXIMOS DO TERRENO; (23)

(a) Espectros de Resposta Correspondentes a Cada um dos Componentes do Sismo de El Centro (18 de Maio de 1940)

Fator de Amortecimento = 2%



(b) Espectros de Resposta Correspondentes a Cada um dos Componentes do Sismo de Toffi (21 de Julho de 1952)

Fator de Amortecimento = 2%

Fig 13 - COMPARAÇÃO ENTRE ESPECTROS DE RESPOSTA HORIZONTAL E VERTICAL; (64)

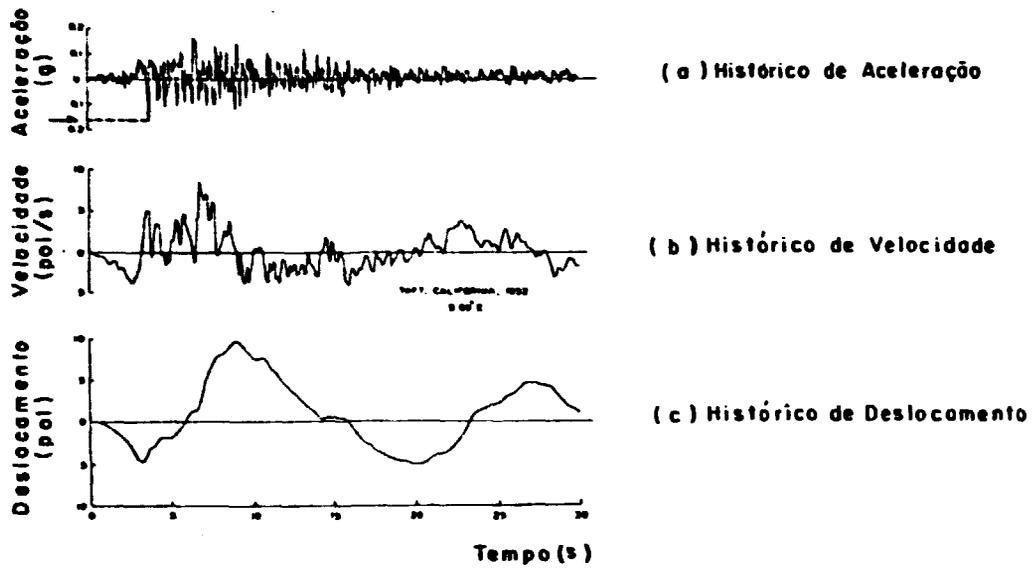


Fig. 14 - SISMOGRAMAS DO SISMO DE TAFT-1952.; (23)

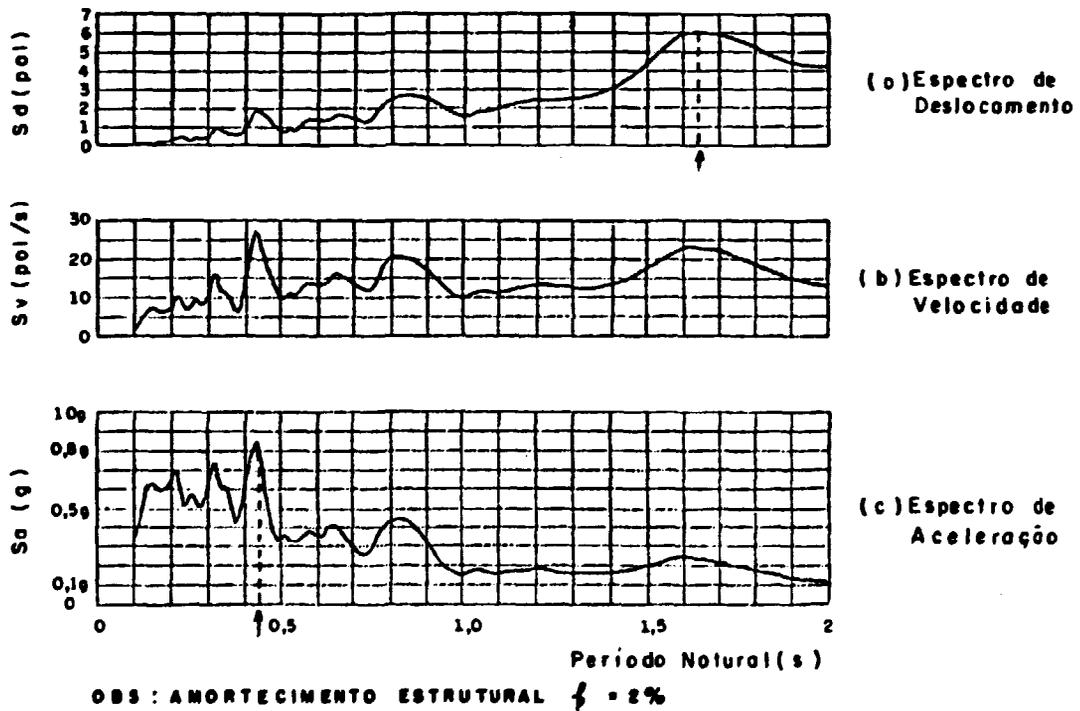
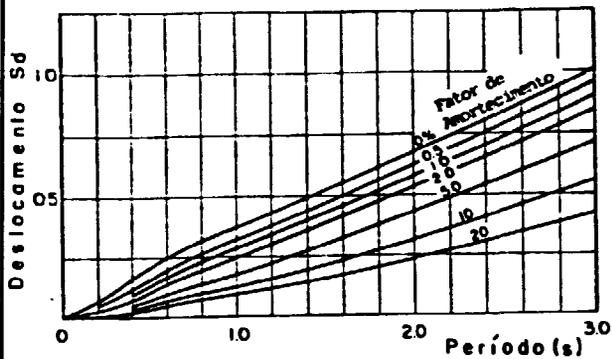
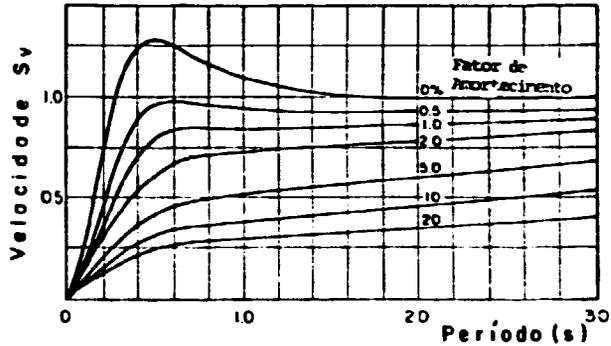


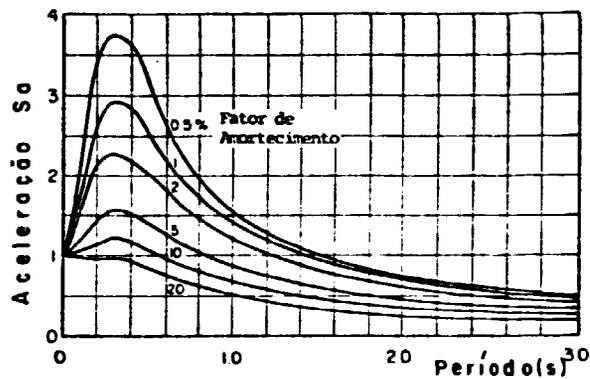
Fig. 15 - ESPECTROS DE RESPOSTA DE DESLOCAMENTO, VELOCIDADE E ACELERAÇÃO PARA O SISMO DE TAFT-1952.; (26)



(a) Espectro de Resposta Médio - Deslocamento  $S_d$  em Função do Período e Amortecimento.



(b) Espectro de Resposta Médio - Velocidade  $S_v$  em Função do Período e Amortecimento.



(c) Espectro de Resposta Médio - Aceleração  $S_a$  em Função do Período e Amortecimento.

(d) Espectro de Resposta Médio no Gráfico Logarítmico Especial.

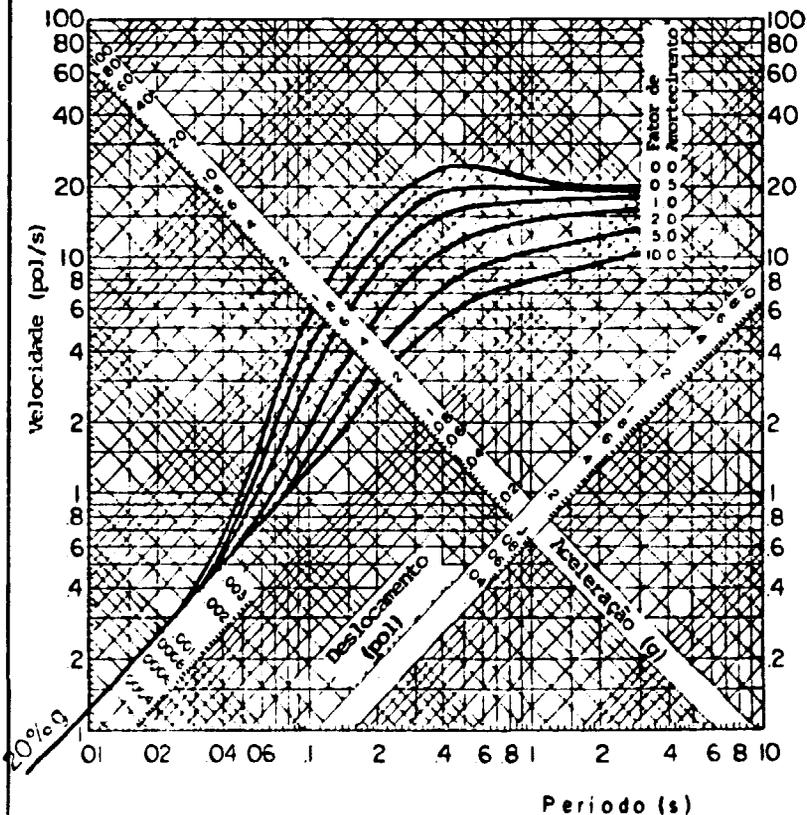
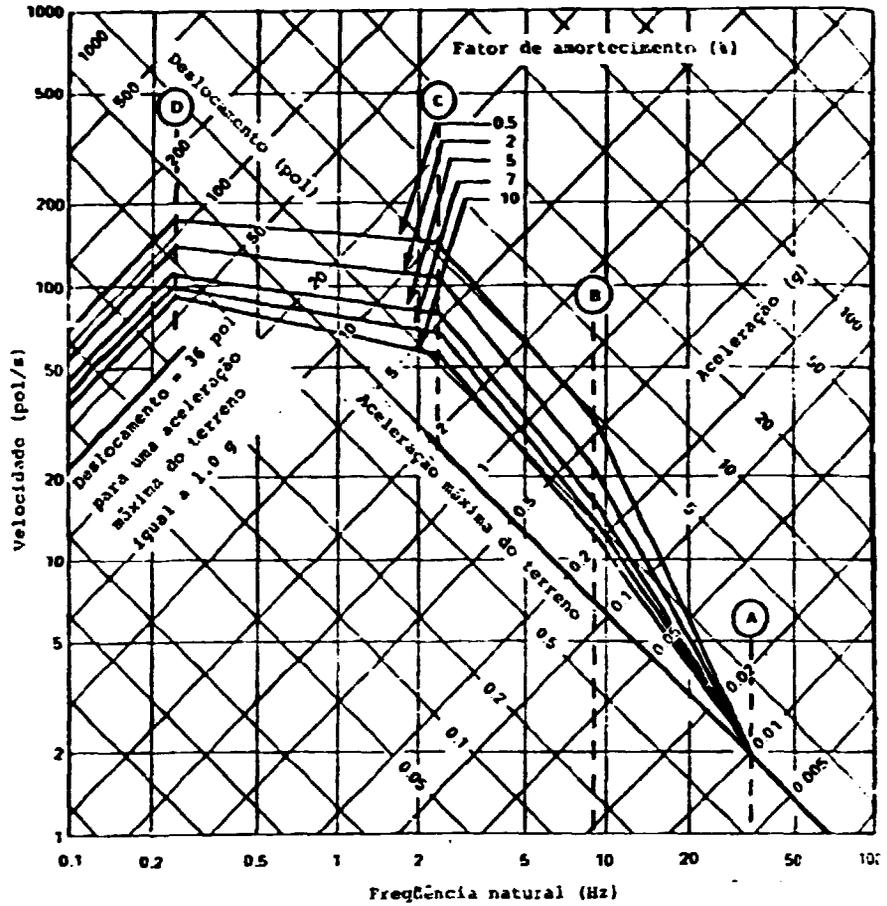


Fig 16 - ESPECTROS DE RESPOSTA MÉDIOS; (23)

(a) ESPECTRO DE RESPOSTA HORIZONTAL

FREQÜÊNCIAS (HZ)

- Ⓓ = 0,25
- Ⓒ = 2,5
- Ⓑ = 9
- Ⓐ = 33



(b) ESPECTRO DE RESPOSTA VERTICAL

FREQÜÊNCIAS

- Ⓓ = 0,25
- Ⓒ = 3,5
- Ⓑ = 9
- Ⓐ = 33

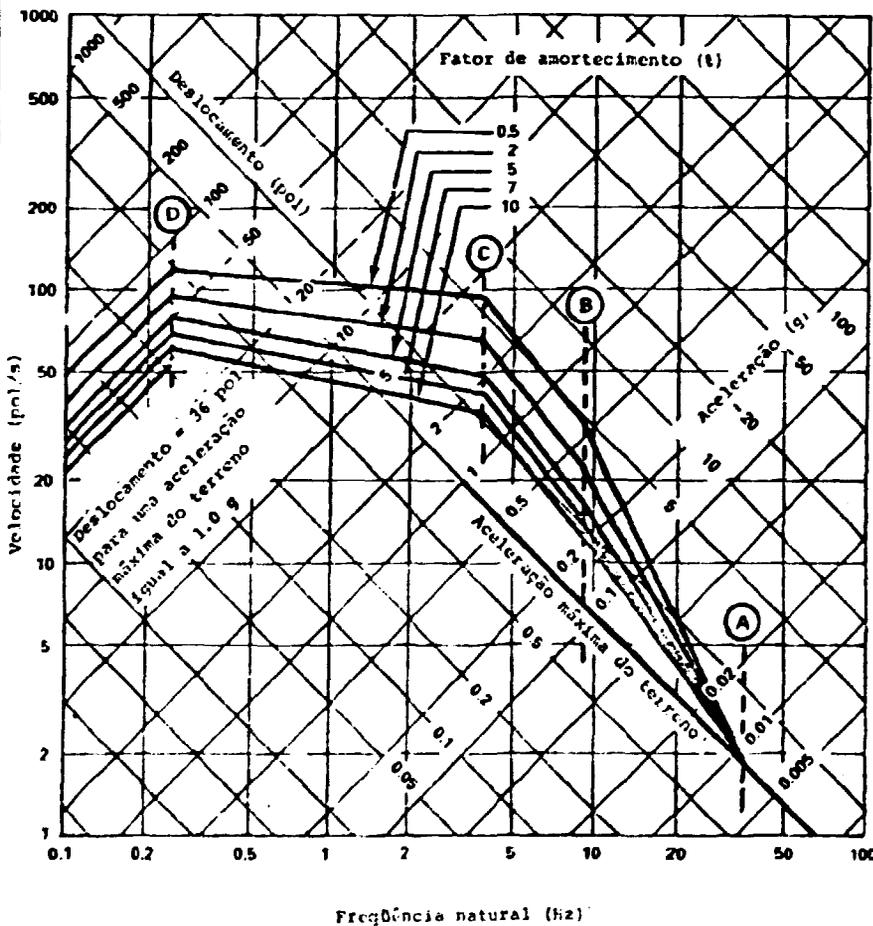


Fig. 17 - ESPECTROS DE RESPOSTA DE PROJETO DO RG 1.60 ; (65)

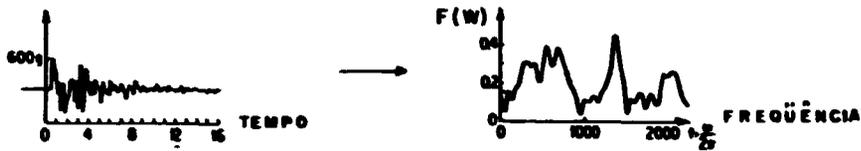
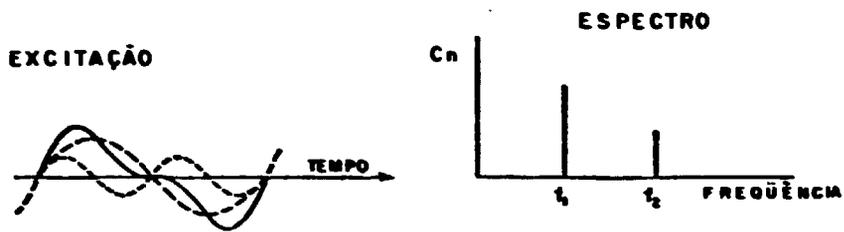


Fig. 18 - ESPECTROS DE FOURIER PARA FUNÇÕES PERIÓDICA E TRANSIENTE; (24)

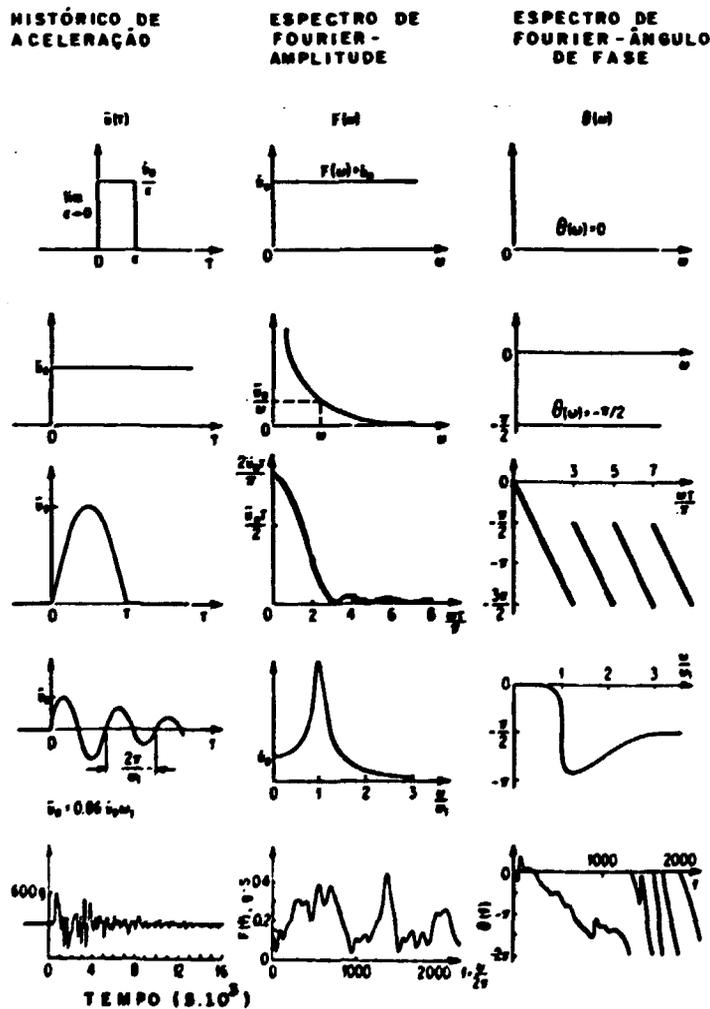
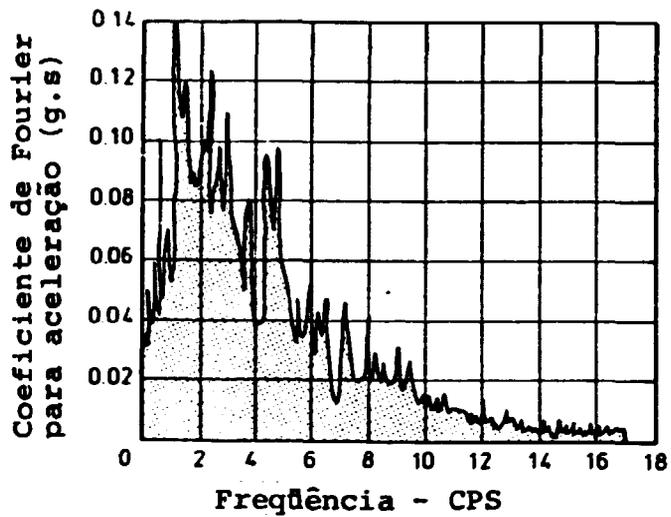
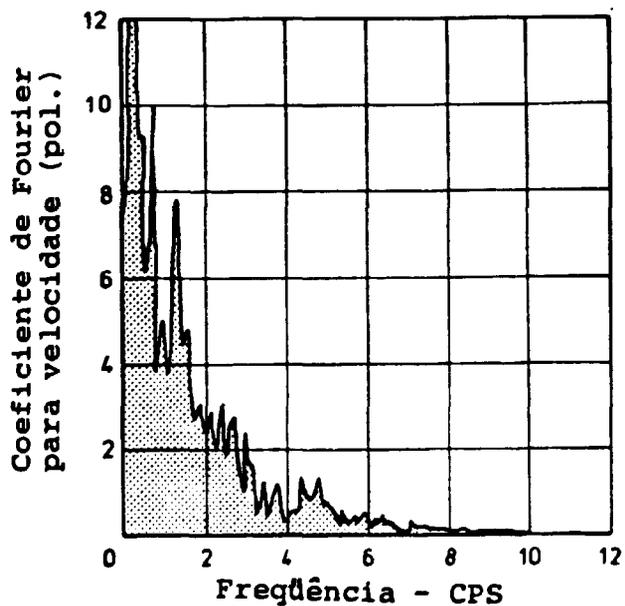


Fig. 19 - ESPECTROS DE FOURIER - AMPLITUDE E FASE; (24)



(a) ESPECTRO DE ACELERAÇÃO DE FOURIER PARA O SISMO DE TAFT, CALIFÓRNIA - 1965; (25)



(b) ESPECTRO DE VELOCIDADE DE FOURIER PARA O SISMO DE TAFT, CALIFÓRNIA - 1965

Fig 20 - ESPECTROS DE FOURIER - AMPLITUDE PARA O SISMO TAFT - 1965 (25)

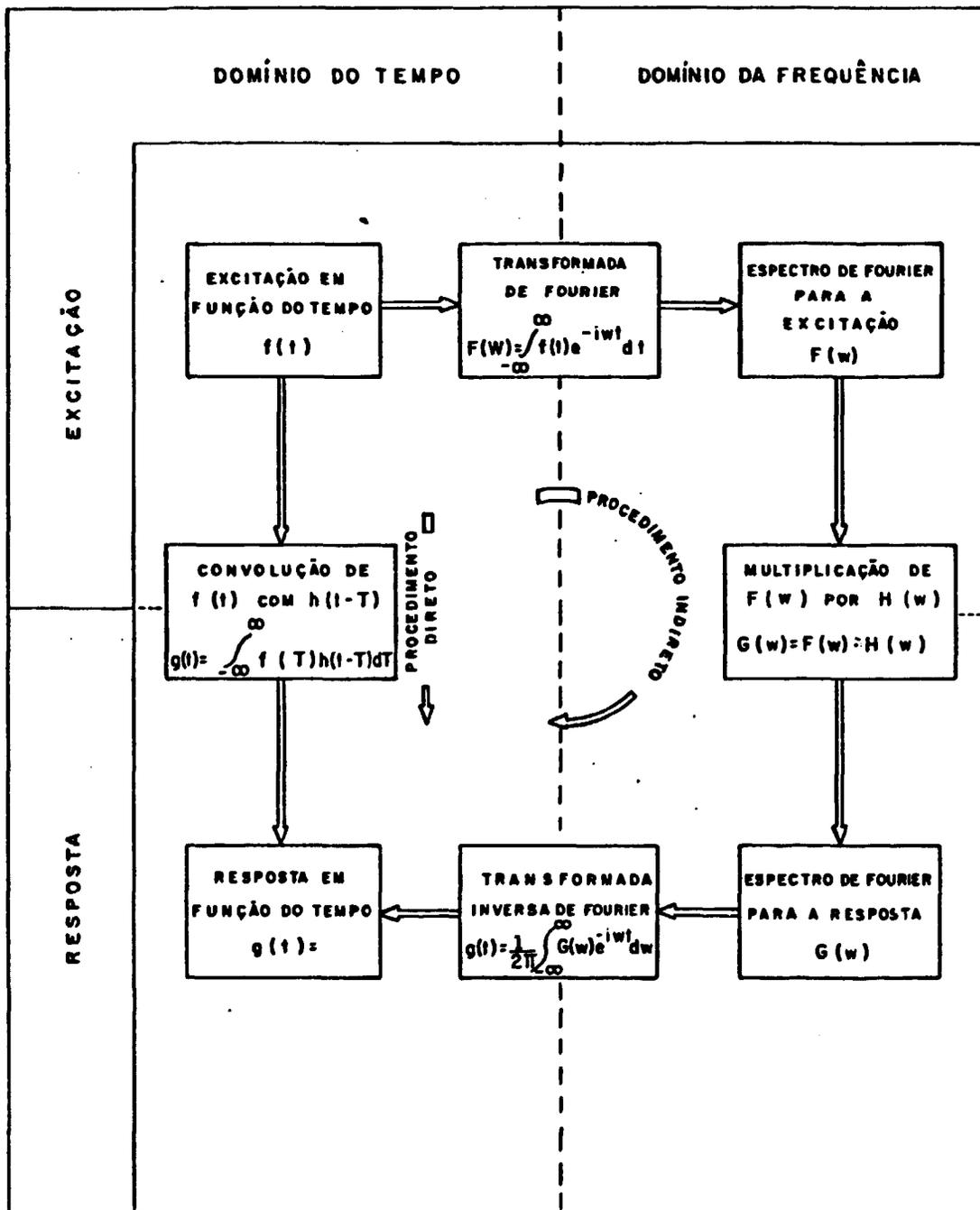
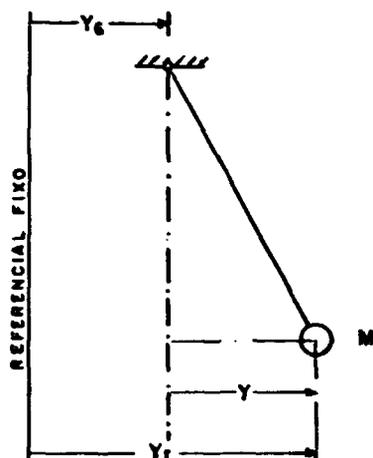


FIG. 21 - ALTERNATIVAS PARA CÁLCULO DA RESPOSTA DE UM SISTEMA LINEAR A UMA EXCITAÇÃO ARBITRÁRIA.



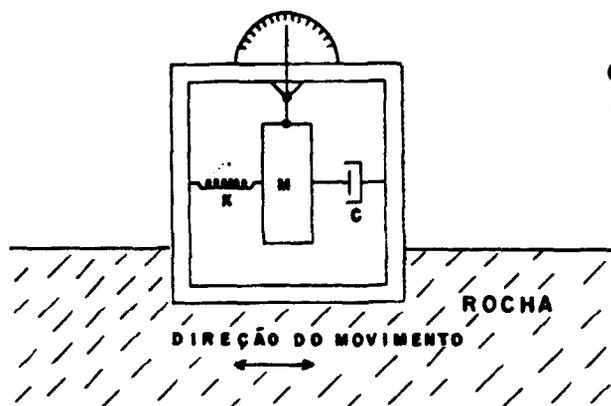
$Y_B$  - DESLOCAMENTO DO PONTO DE APOIO DO PÊNULO.

$Y$  - DESLOCAMENTO RELATIVO DA MASSA DO PÊNULO.

$Y_T$  - DESLOCAMENTO ABSOLUTO DA MASSA DO PÊNULO.

OBS : Como Exemplo de Simulação do Amortecimento do Pêndulo Pode-se Citar: a Imersão da Massa num Líquido ou num Campo Magnético; nesse Último Caso a Massa Deverá ter Propriedades Magnéticas.

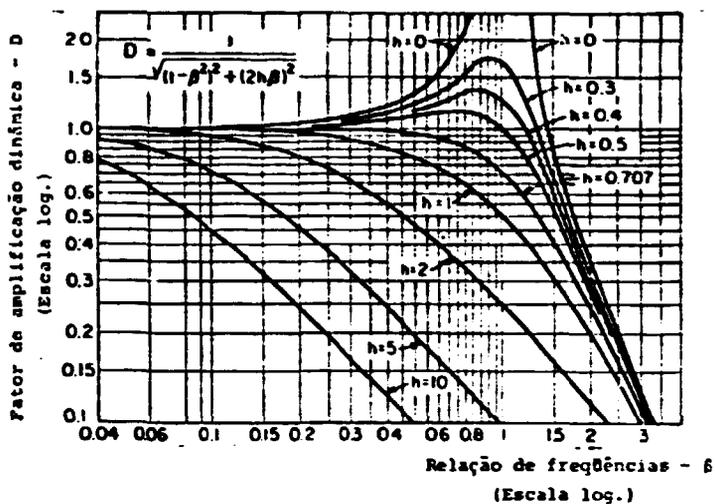
a) EXEMPLO DE PÊNULO VERTICAL



O Movimento Absoluto da Massa é Igual ao Movimento da Rocha mais o Movimento Relativo da Massa.

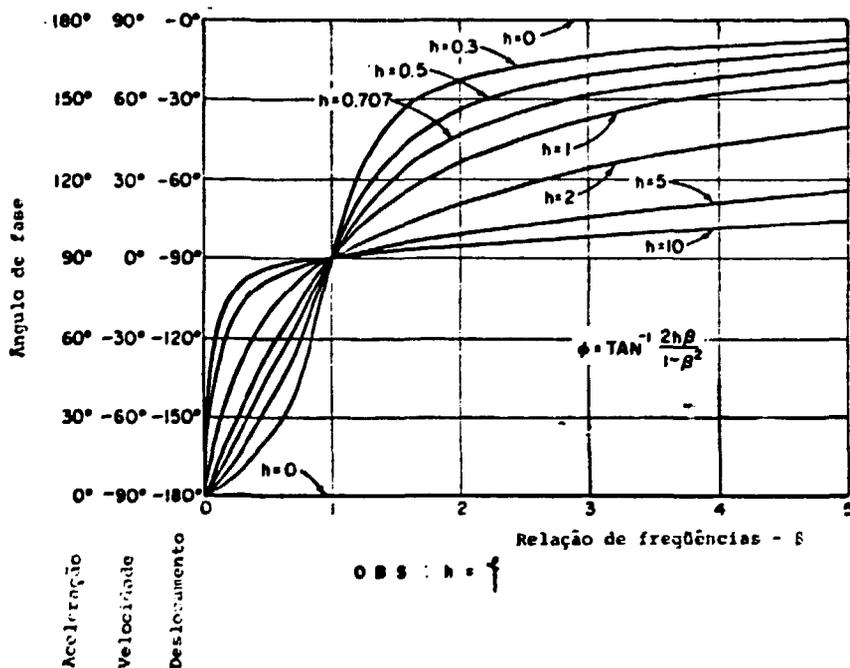
d) ESQUEMA DE UM SISMÔMETRO (27)

Fig.22 - PÊNULO E ESQUEMA TÍPICO DE UM SISMÔMETRO;



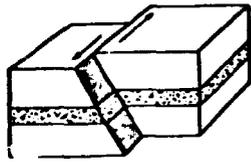
OBS:  
 $h = \frac{f}{f_n}$  = Fator de Amortecimento

Fig. 23 - FATOR DE AMPLIFICAÇÃO EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO DE FREQUÊNCIAS E DO FATOR DE AMORTECIMENTO ; (31)

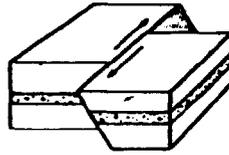


$h = \frac{f}{f_n}$  = Fator de Amortecimento.

Fig. 24 - ÂNGULO DE FASE EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO DE FREQUÊNCIAS E DO FATOR DE AMORTECIMENTO ; (31)

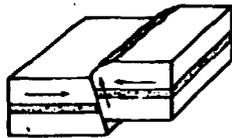


MOVIMENTO LATERAL PARA  
A ESQUERDA

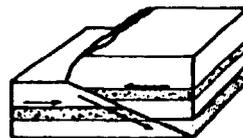


MOVIMENTO LATERAL  
PARA A DIREITA

(a) FALHA DE REJEITO DIRECIONAL

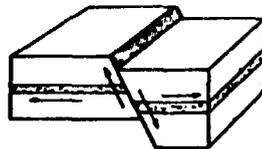


FALHA DE GRANDE  
ÂNGULO DE MERGULHO

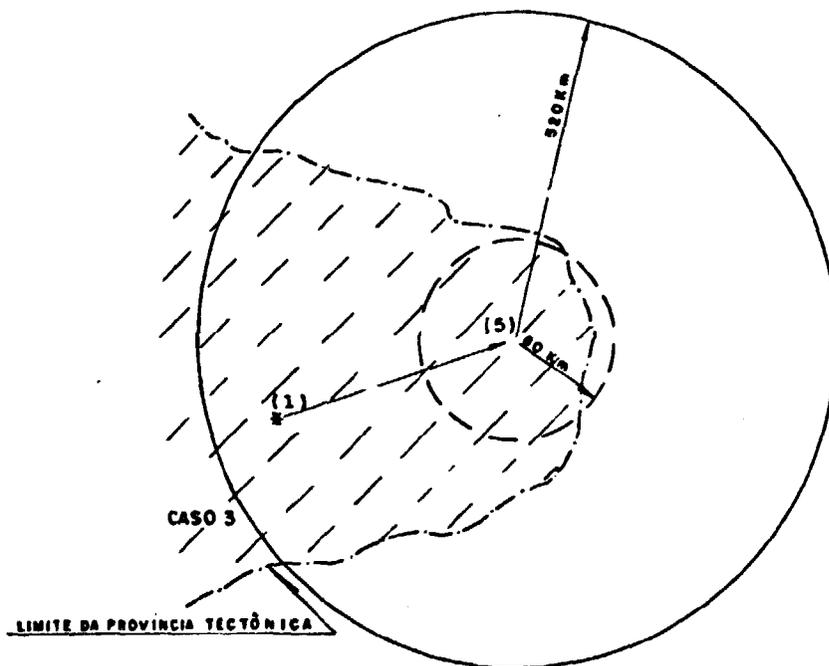
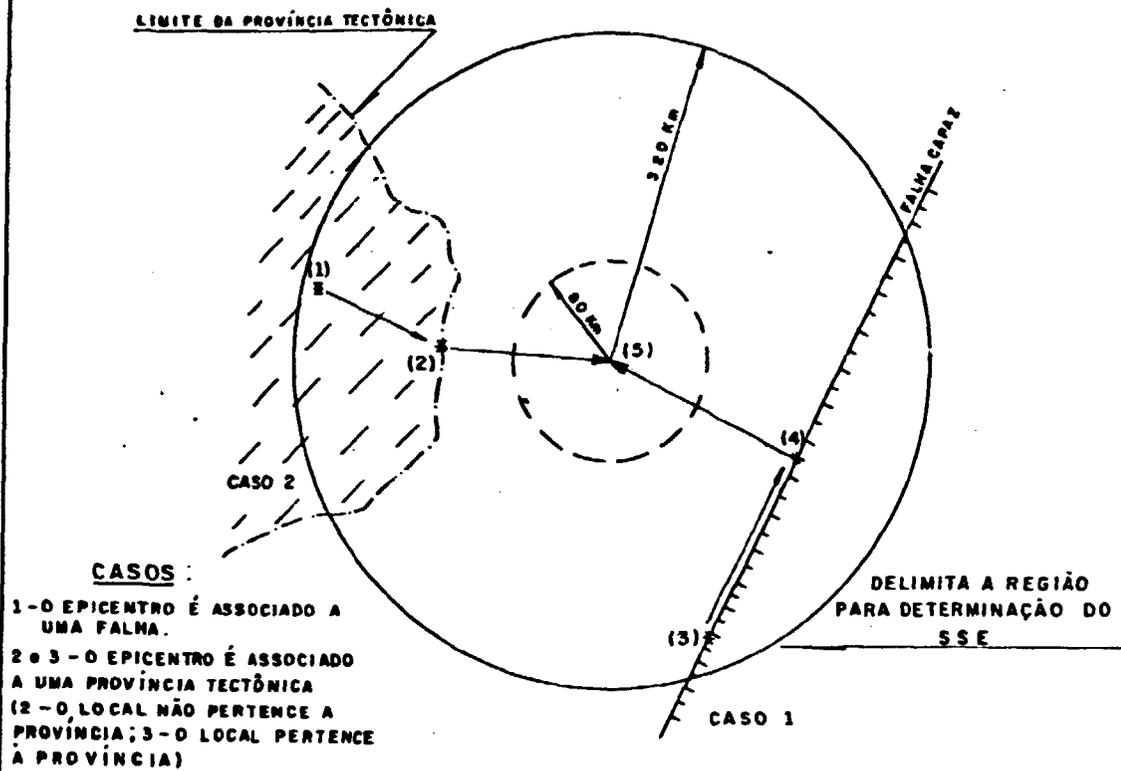


FALHA DE PEQUENO  
ÂNGULO DE MERGULHO

(b) FALHA INVERSA OU DE ACAVALAMENTO

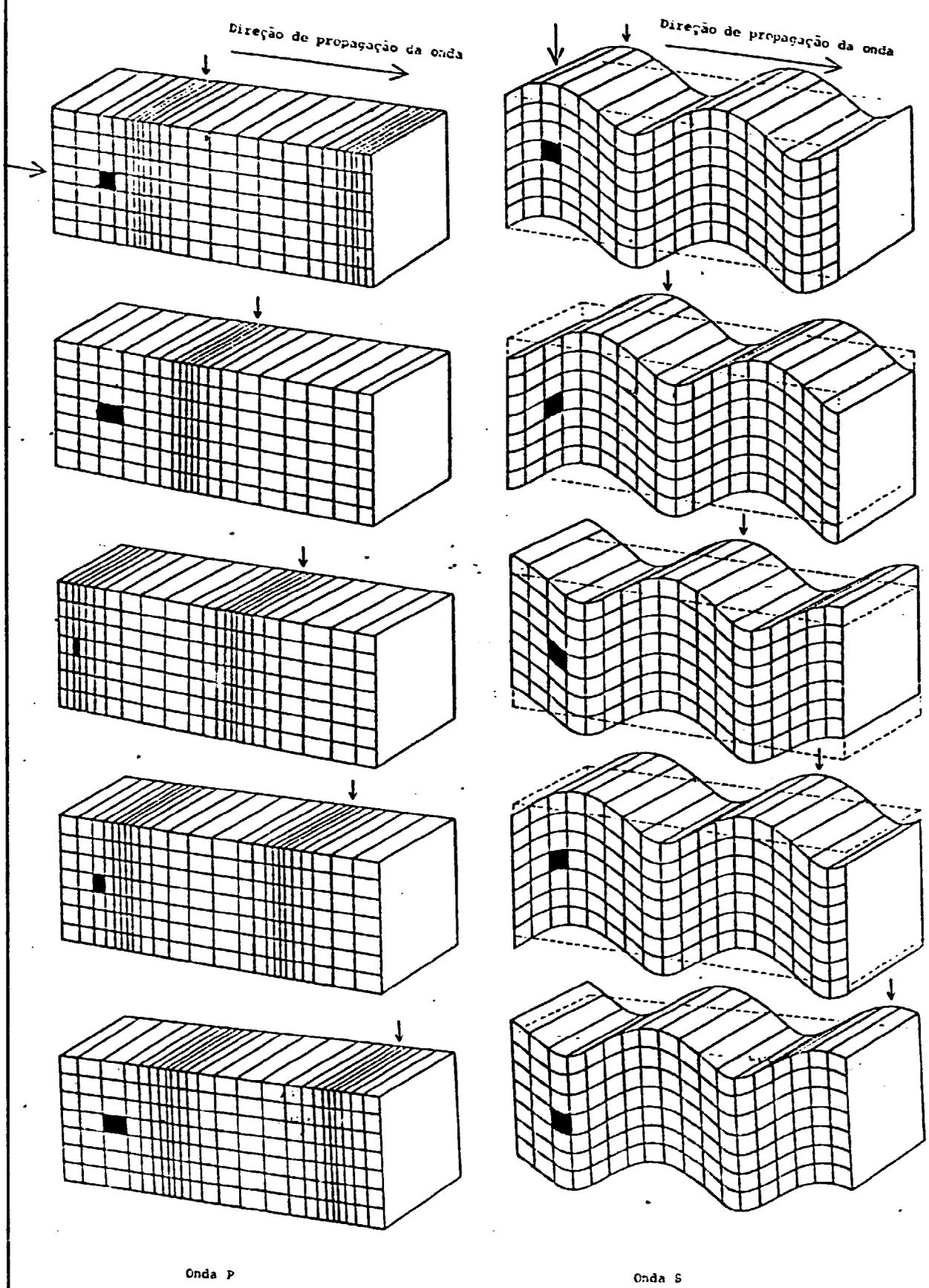


(c) FALHA NORMAL



**OBS: (1) e (3) - EPICENTROS ORIGINAIS**  
**(2) e (4) - EPICENTROS TRANSFERIDOS PARA OS PONTOS DA PROVÍNCIA E FALHA CAPAZ, RESPECTIVAMENTE, MAIS PRÓXIMOS DO LOCAL.**  
**(5) EFEITO DO SISMO TRANSFERIDO PARA O LOCAL.**

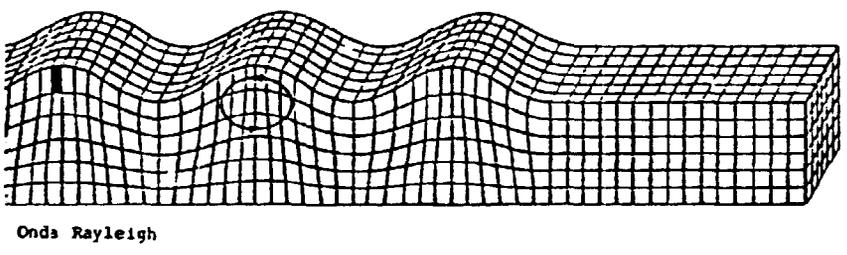
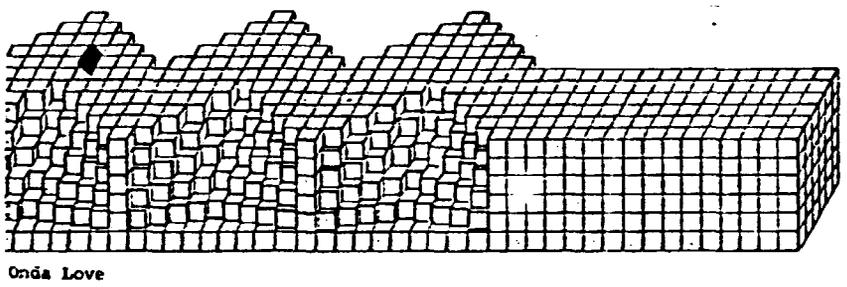
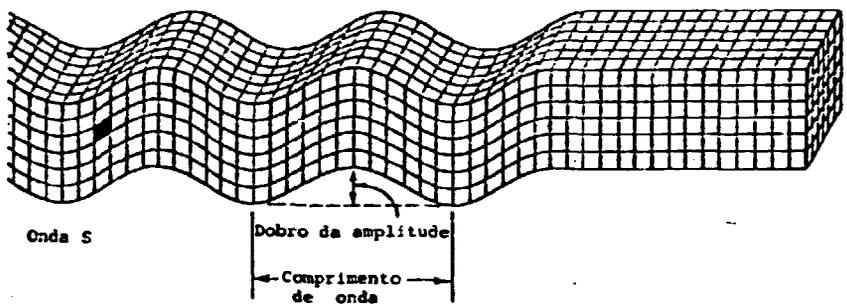
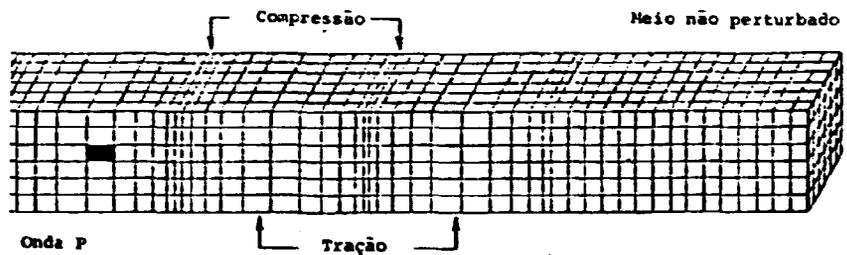
**Fig.26 - PROCEDIMENTOS PARA TRANSFERÊNCIA DOS EFEITOS DOS SISMOS DE REFERÊNCIA PARA O LOCAL; [66]**



Onda P

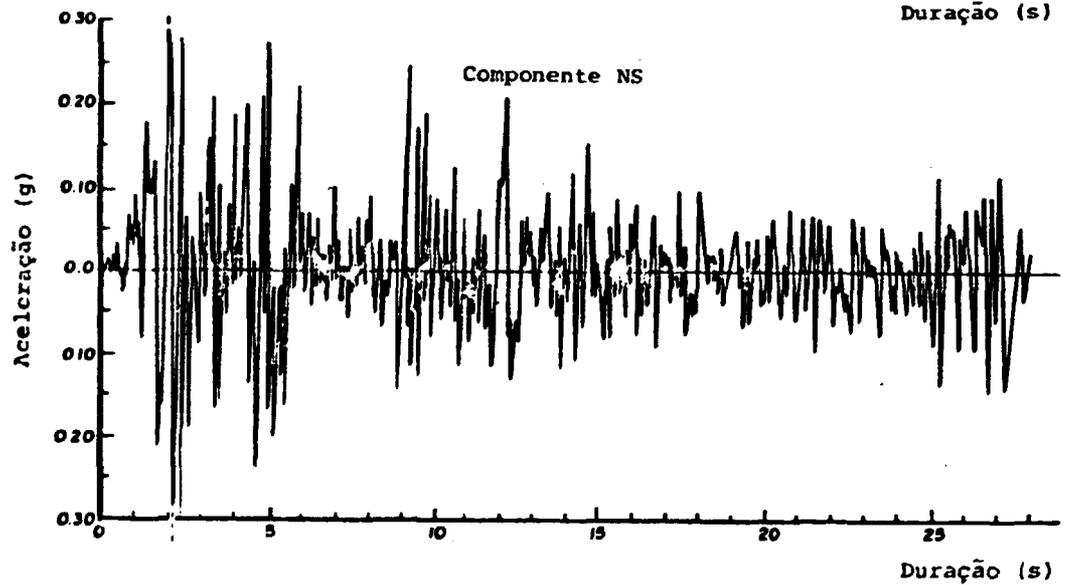
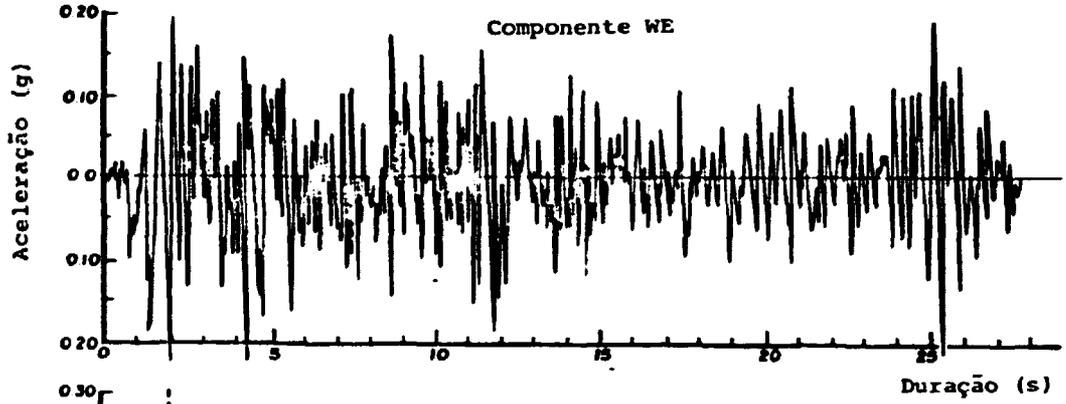
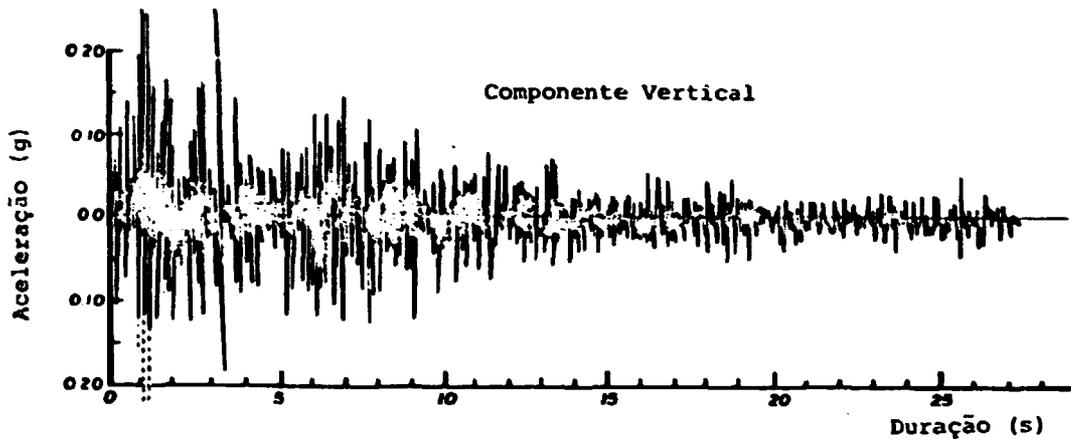
Onda S

Fig.27 -MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS DE UM MEIO DURANTE A PASSAGEM DAS ONDAS P ou S;(66)



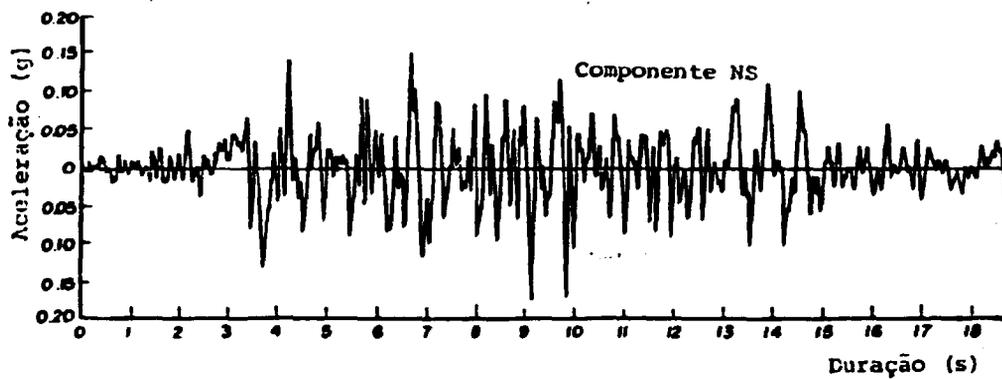
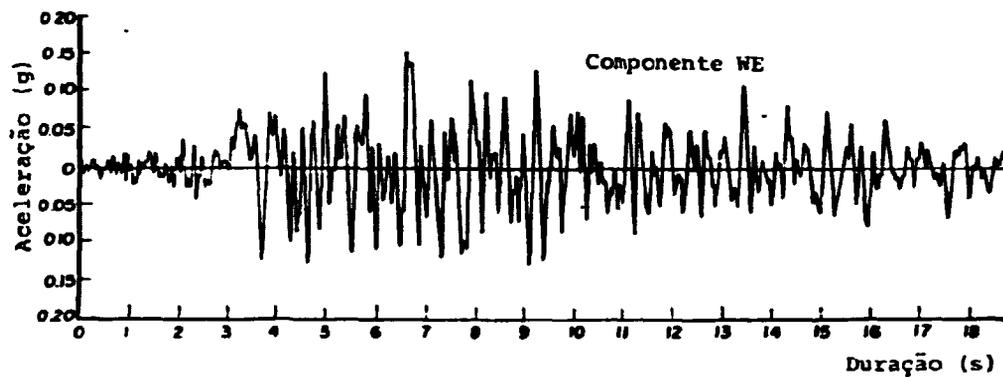
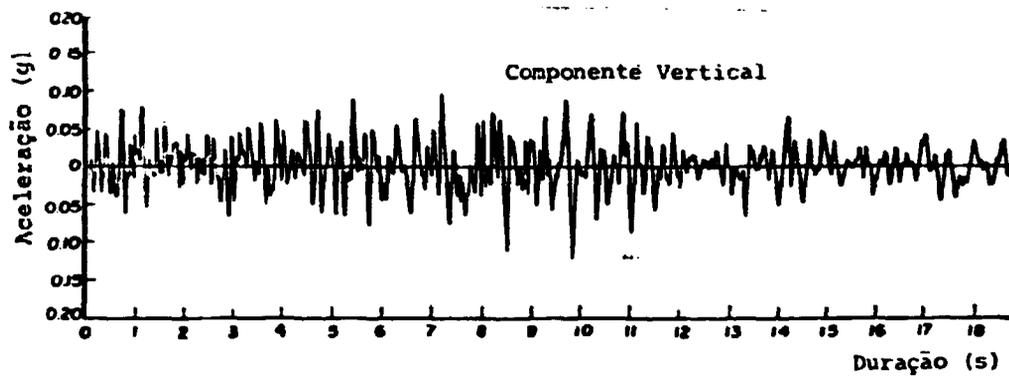
Direção de propagação da onda

Fig 28 - ILUSTRAÇÃO SOBRE AS FORMAS DO MOVIMENTO DO TERRENO, PRÓXIMO À SUPERFÍCIE, DURANTE A PASSAGEM DE ONDAS SÍSMICAS; (66)



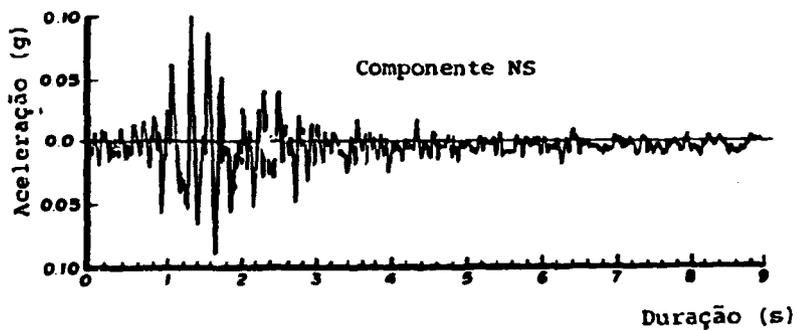
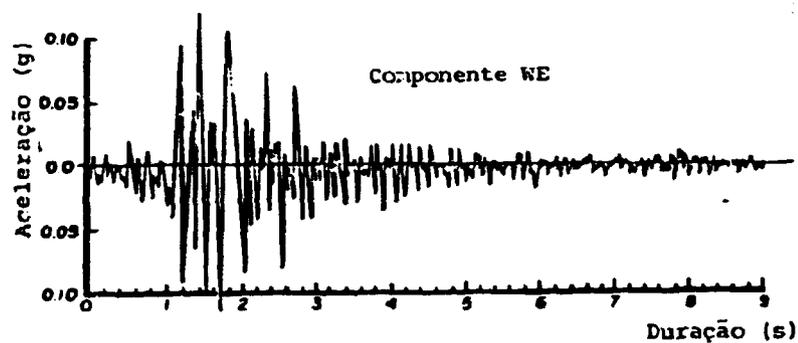
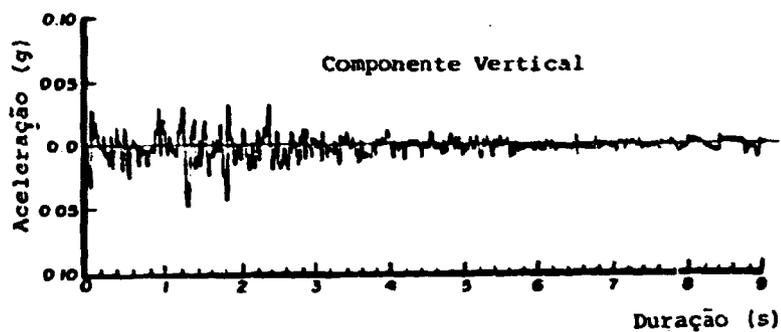
OBS: MAGNITUDE RICHTER 7

Fig. 29 - ACELEROGRAMAS DO SISMO DE EL CENTRO - 1940, OBTIDOS APROXIMADAMENTE 48,27 km DO EPICENTRO; (37)



OBS : MAGNITUDE RICHTER = 7,7

Fig 30 - ACELEROGRAMAS DO SISMO DE TAFT - 1952, OBTIDOS A APROXIMADAMENTE 48,27 km do EPICENTRO ; (37)



Obs: Magnitude Richter = 5,3

Fig. 31 - ACELEROGRAMAS DO SISMO DE SAN FRANCISCO - 1957, OBTIDOS A APROXIMADAMENTE 11,263 km; (37)

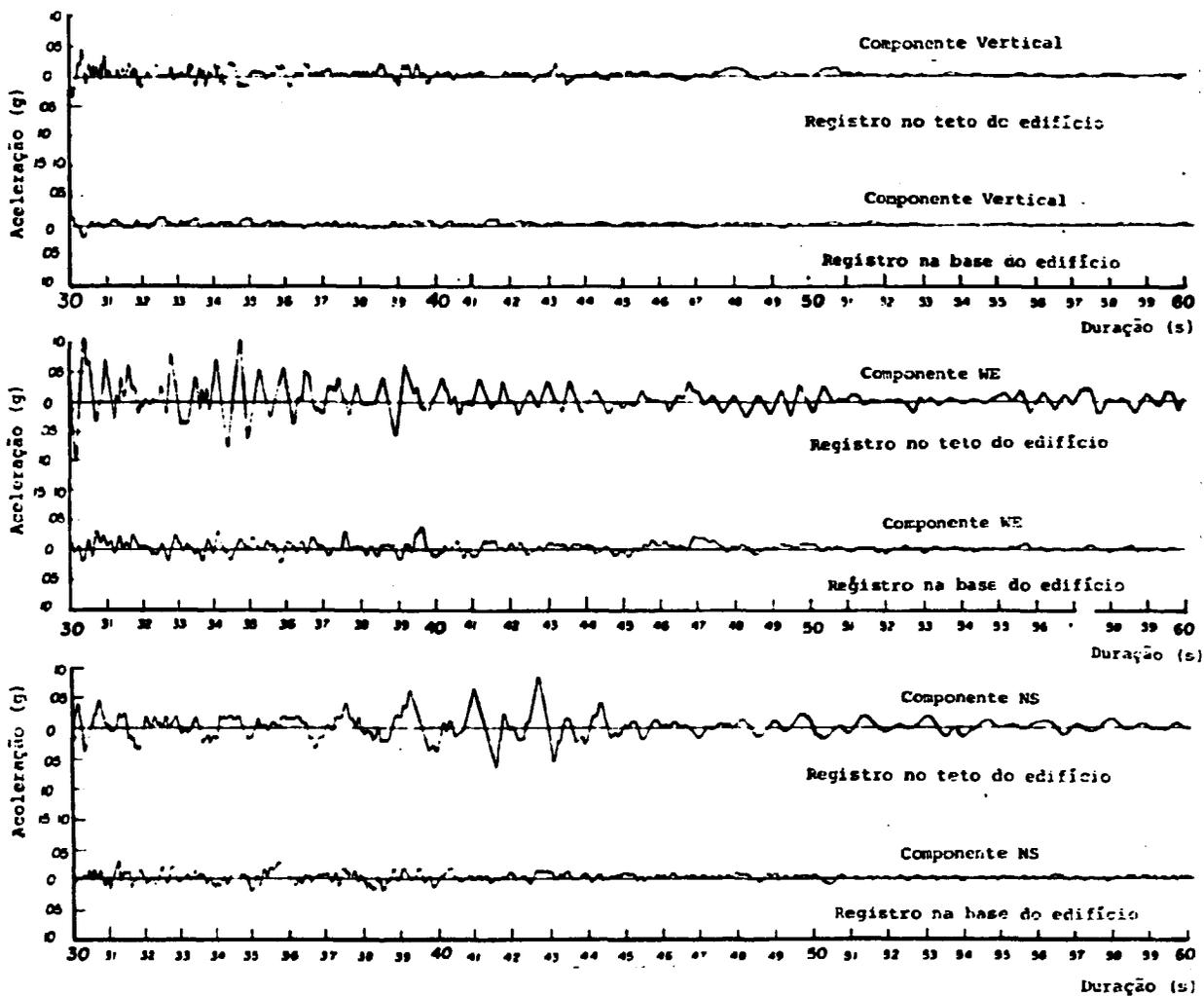


Fig. 32 - ACELEROGRAMAS DO SISMO DE TAFT-1952, OBTIDOS A APROXIMADAMENTE 112,63 km do EPICENTRO; (37)

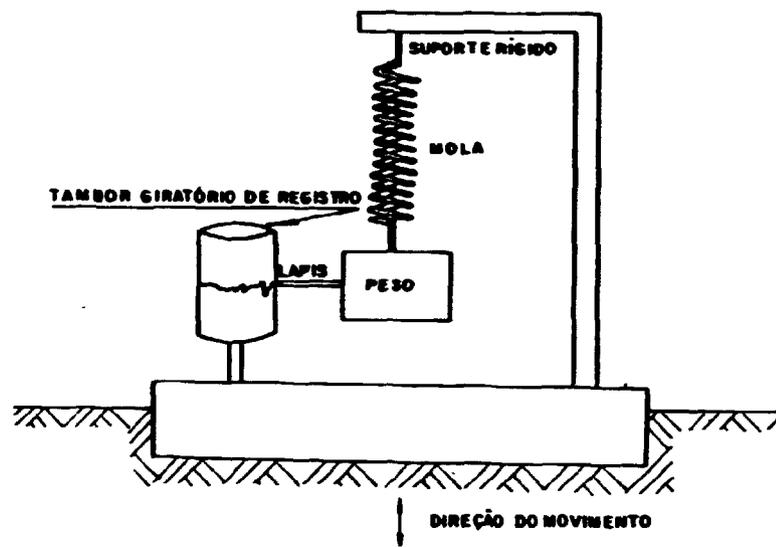


Fig. 33-ESQUEMA DE SISMÓGRAFO PARA REGISTRO DA COMPONENTE VERTICAL DE ONDAS SÍSMICAS; (38)

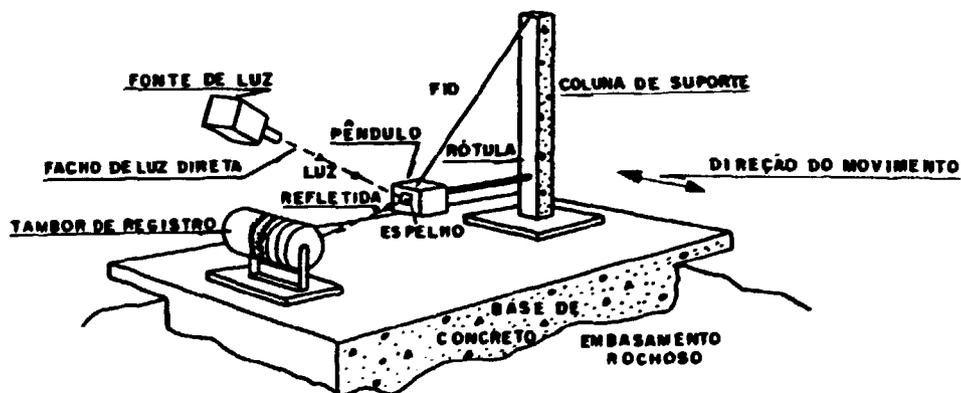
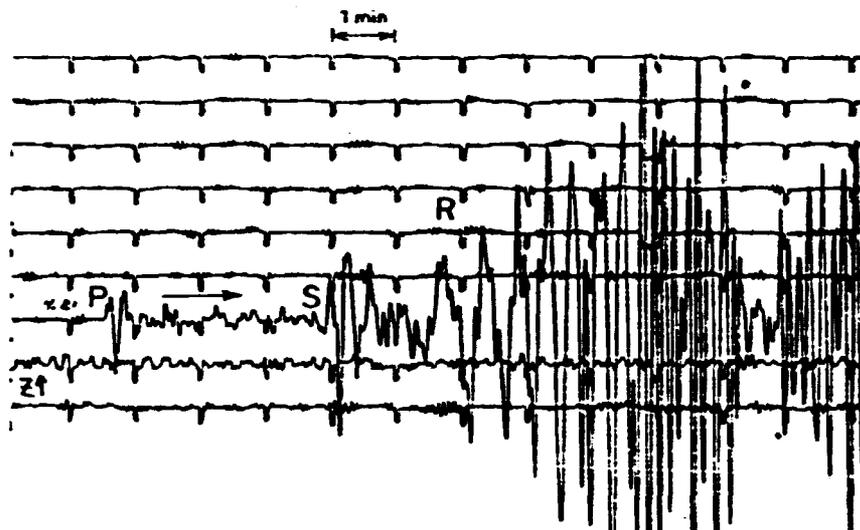


Fig. 34 - ESQUEMA DE SISMÓGRAFO PARA REGISTRO DA COMPONENTE HORIZONTAL DE ONDAS SÍSMICAS; (42)



Obs - Registrado em Uppsala, na Suécia

P - PRIMÁRIA  
S - SECUNDÁRIA  
R - RAYLEIGH

Fig.35 - COMPONENTE VERTICAL DO SISMO DE SKOPJE - 1963; (67)

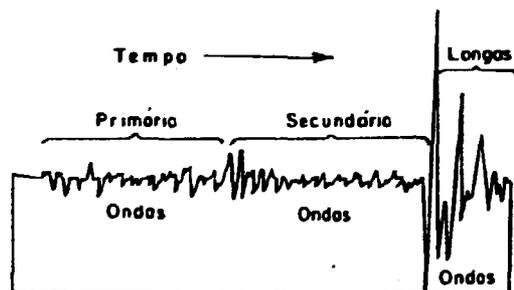
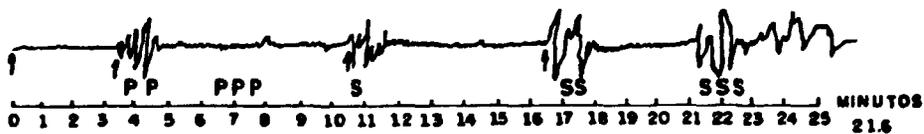
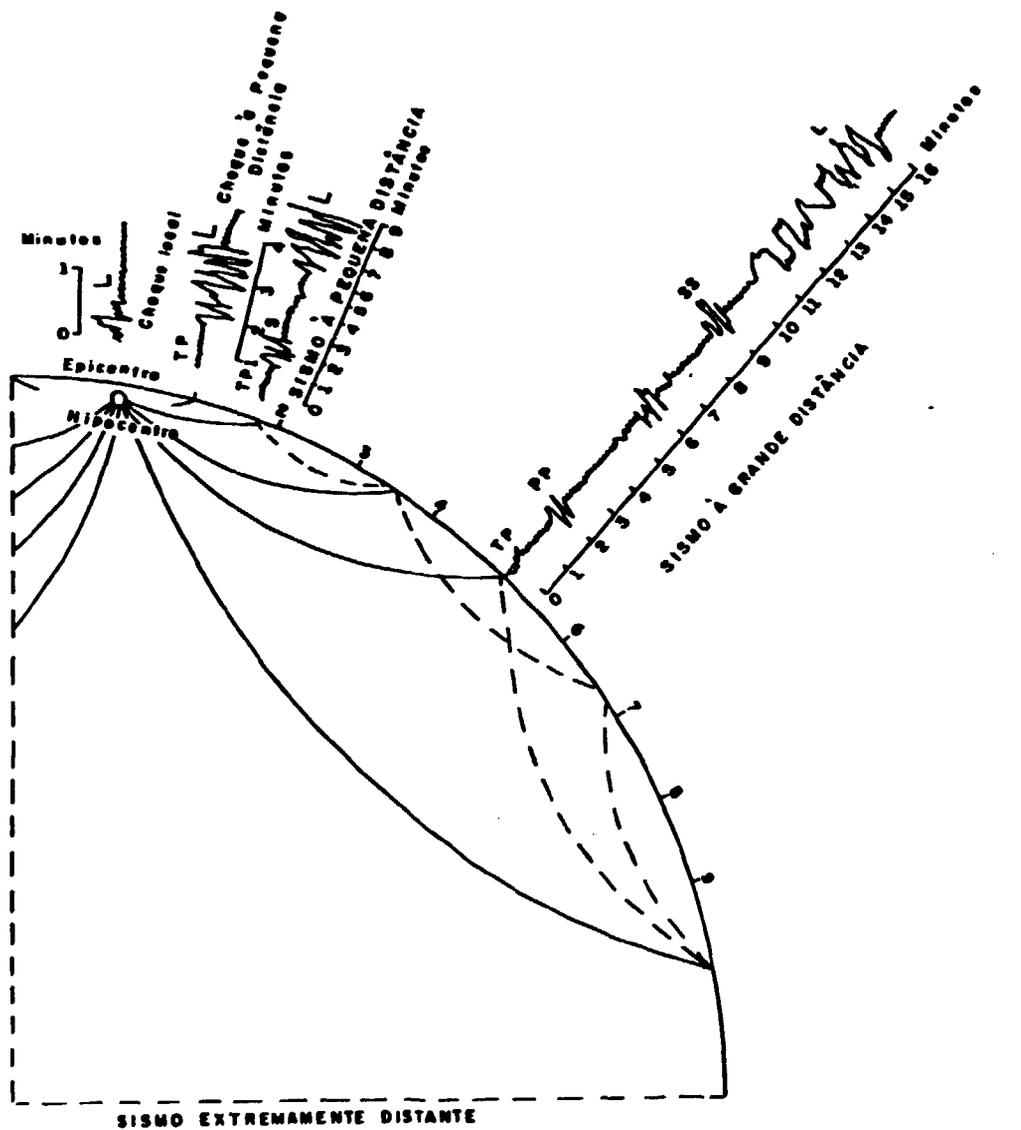
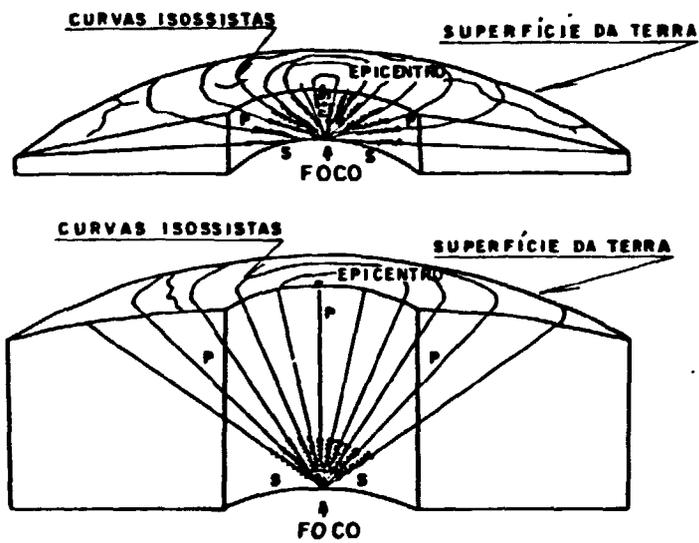


Fig.36 - SISMOGRAMA TÍPICO MOSTRANDO AS ONDAS P, S e LONGAS; (38)



OBS : P - ONDAS PRIMÁRIAS  
 S - ONDAS SECUNDÁRIAS  
 L - ONDAS LONGAS ( RAYLEIGH, LOVE )

Fig. 37 - ESQUEMA DA DIFERENÇA DO TEMPO DE CHEGADA DE ONDAS SÍSMICAS EM DIFERENTES ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS; (38)



OBS: P - ONDA PRIMÁRIA  
 S - ONDA SECUNDÁRIA

Fig.38 - COMPARAÇÃO ENTRE SISMOS DE FOCOS PROFUNDO E RASO ; (38)

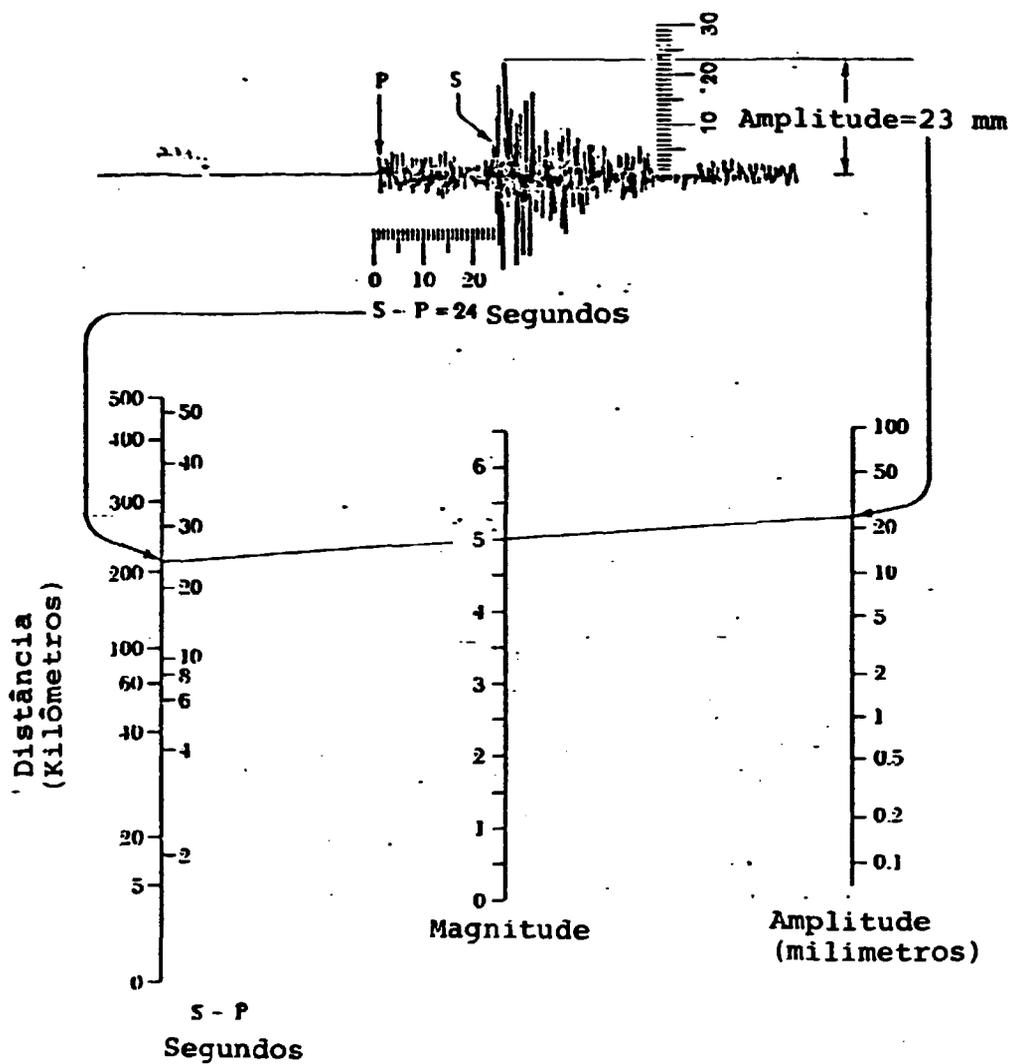


Fig. 39 - NOMOGRAMA PARA CÁLCULO DA MAGNITUDE LOCAL ( $M_L$ ); (66)

**ESCALA JMA**  
(Japanese Meteorological Agency)

**ESCALA DE MERCALLI-SEBERG**  
(Versão de Sieberg da Escala Original de Mercalli)

**ESCALA MSK**  
(Medvedev, Sponheuer Kornik)

**ESCALA DE MERCALLI MODIFICADA**

|                           |                            |                                         |                                   |
|---------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|
|                           | II                         | I                                       | I                                 |
| I                         | III                        | II                                      | II                                |
|                           | IV                         | III                                     | III                               |
| II                        | V                          | IV                                      | IV                                |
| III                       | VI                         | V                                       | V                                 |
| IV                        | VII                        | VI                                      | VI                                |
| V                         | VIII                       | VII                                     | VII                               |
|                           | IX                         | VIII                                    | VIII                              |
|                           | X                          | IX                                      | IX                                |
| VI                        | XI                         | X                                       | X                                 |
|                           | XII                        | XI                                      | XII                               |
| VII                       |                            | XII                                     | XIII                              |
| <b>OKAMOTO</b><br>(1.973) | <b>AMBRASEYS</b><br>(1974) | <b>MEDVEDEV AND SPONHEUER</b><br>(1969) | <b>WOOD AND NEUMANN</b><br>(1931) |

Fig. 40 - COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE AS VÁRIAS ESCALAS DE INTENSIDADE SÍSMICA PROPOSTAS; (86)

|     |   |    |     |     |    |    |     |      |    |   |    |     |
|-----|---|----|-----|-----|----|----|-----|------|----|---|----|-----|
| (a) | I | II | III | IV  | V  | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| (b) | I | II | III | IV  | V  | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| (c) | 0 | I  | II  | III | IV | V  | VI  | VII  |    |   |    |     |
| (d) | I | II | III | IV  | V  | VI | VII | VIII | IX | X | —  |     |

**OBSERVAÇÕES :**

(a) ESCALA DE MERCALLI MODIFICADA

(b) ESCALA MKS (MEDVEDEV, KARNIK E SPONHEUER)

(c) ESCALA JMA ("JAPANESE METEOROLOGICAL AGENCY")

(d) ESCALA ROSSI-FOREL.

**Fig. 41 - EQUIVALÊNCIA GRÁFICA ENTRE A ESCALA ROSSI-FOREL E OUTRAS ESCALAS DE INTENSIDADE; [41]**

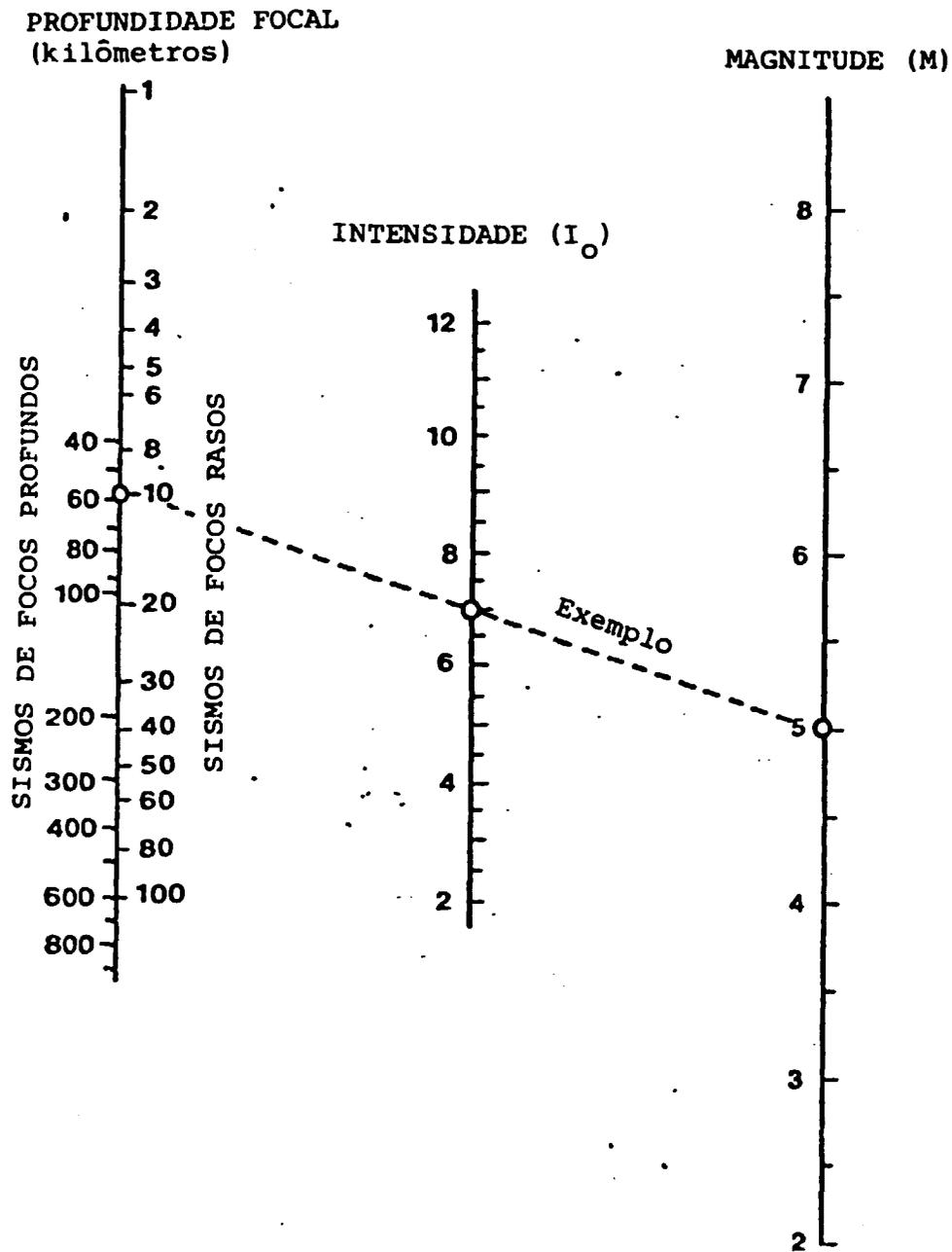


Fig. 42 — NOMOGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DE UM DOS VALORES DE INTENSIDADE, MAGNITUDE OU PROFUNDIDADE LOCAL; (66)

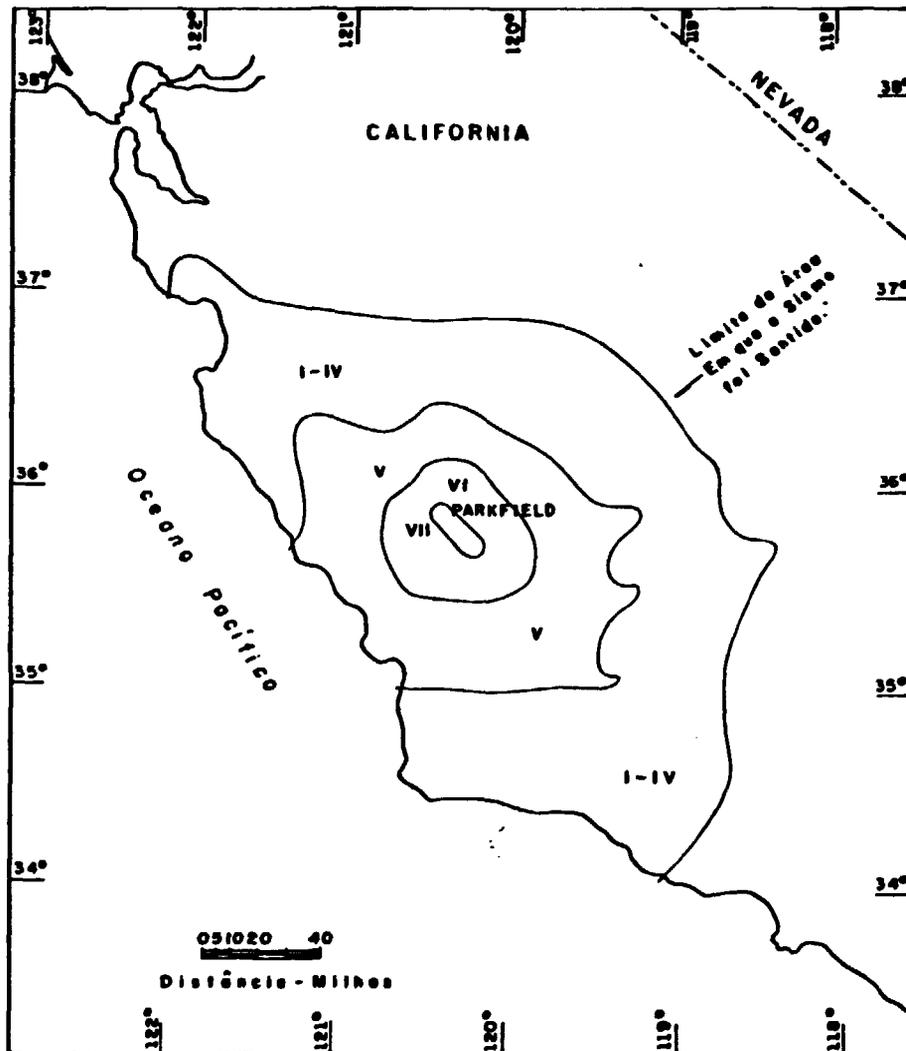
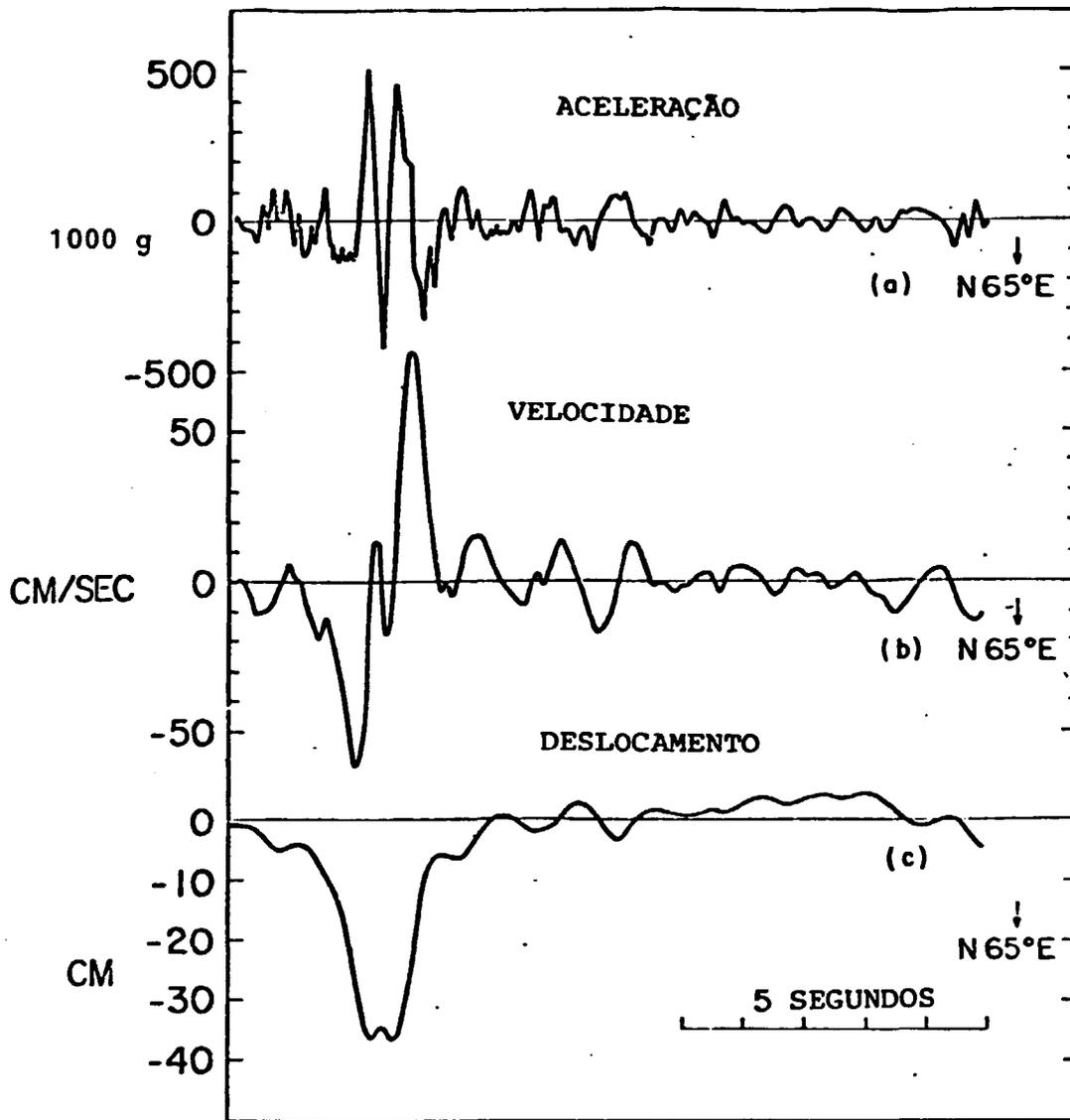


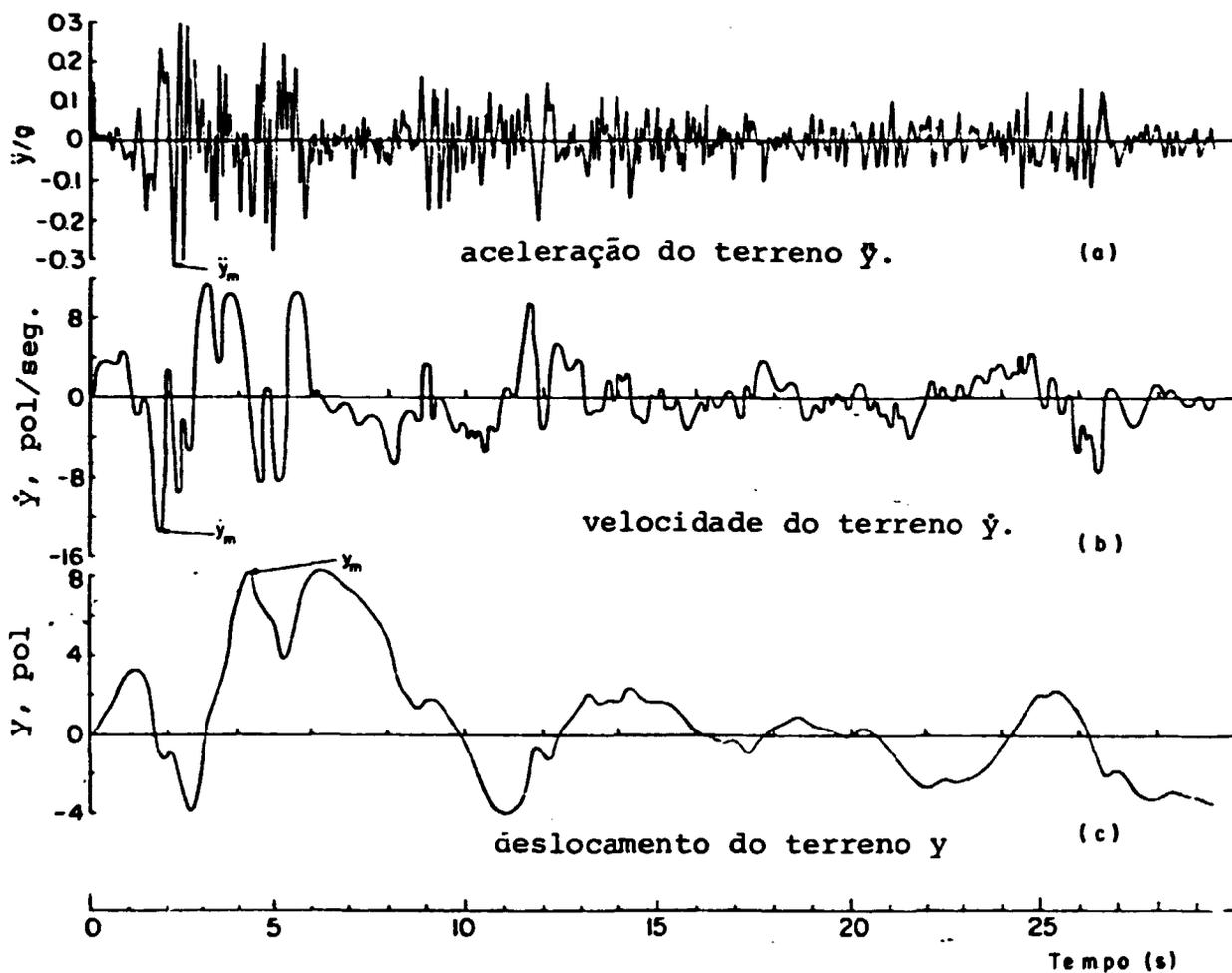
Fig. 43 - CURVAS ISOSSÍSTAS DO CHOQUE PRINCIPAL DO SISMO DE PARKFIELD,  
( 27 DE JUNHO DE 1966 ) ; (26)



OBS : a) Histórico de Aceleração Registrado.

(b) e (c) Históricos de Velocidade e Deslocamento, Respectivamente, Obtidos por Integração.

Fig. 44 - HISTÓRICOS DO MOVIMENTO DO TERRENO PARA O SISMO DE PARKFIELD (26/06/1966); (26)



$$\ddot{Y}_m = 0,32 \text{ g} = 313,6 \text{ cm/seg}^2 = a_m$$

$$\dot{Y}_m = 13,7 \text{ pol/seg} = 34,8 \text{ cm/seg} = v_m$$

$$Y_m = 8,3 \text{ pol} = 21,1 \text{ cm} = d_m$$

OBS : Na Figura estão indicados os valores de Pico de Aceleração  $a_m$ , de Velocidade  $v_m$  e de Deslocamento  $d_m$

Fig. 45 - VALORES DE PICO DO TERRENO CORRESPONDENTES A COMPONENTE NS DO SISMO DE EL CENTRO - 1940; (23)

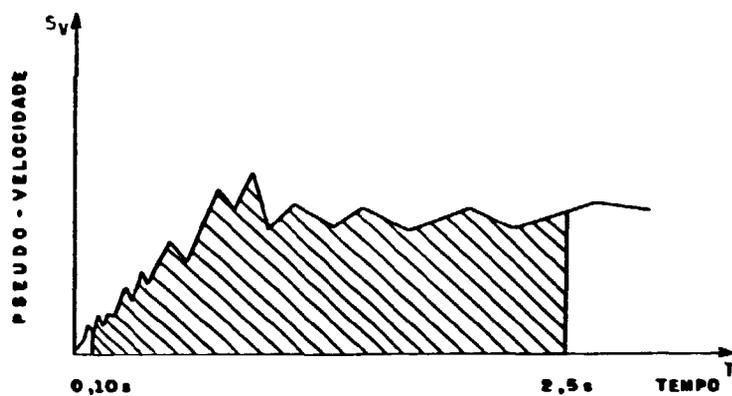


Fig. 46 - DEFINIÇÃO DA INTENSIDADE ESPECTRAL DE HOUSNER; (26)

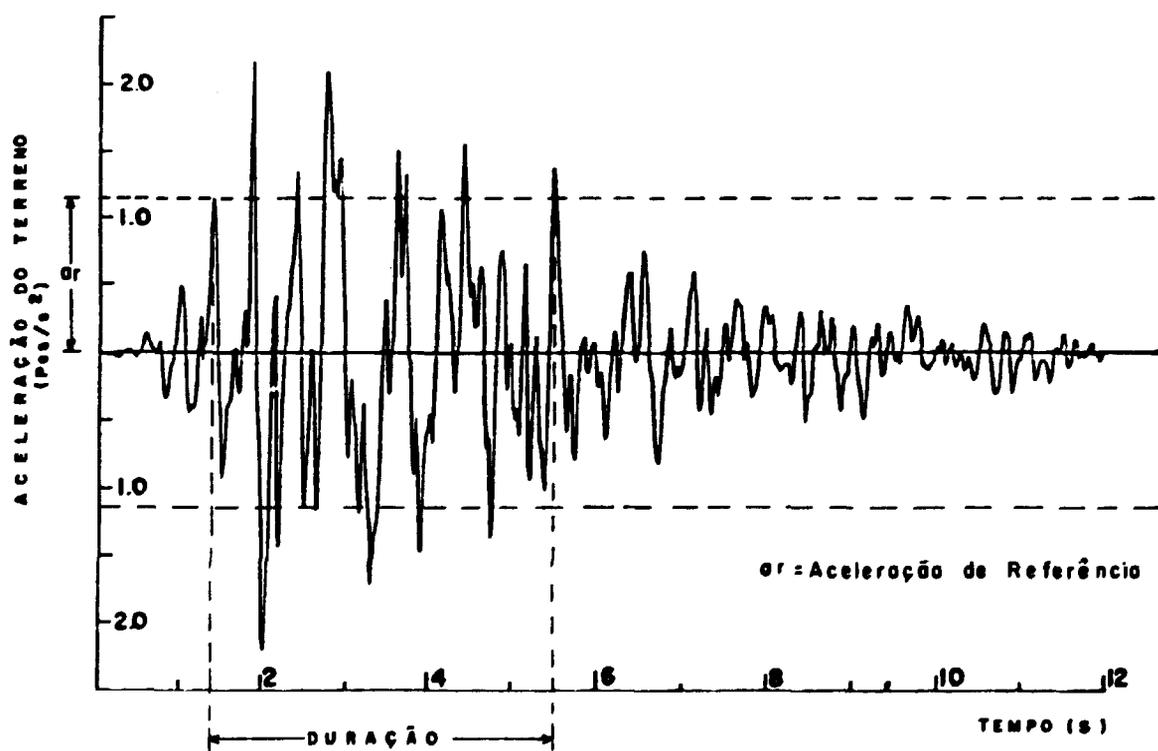


Fig. 47 - DEFINIÇÃO DE BOLT PARA DURAÇÃO DA FASE MAIS INTENSA DE UM SISMO SM

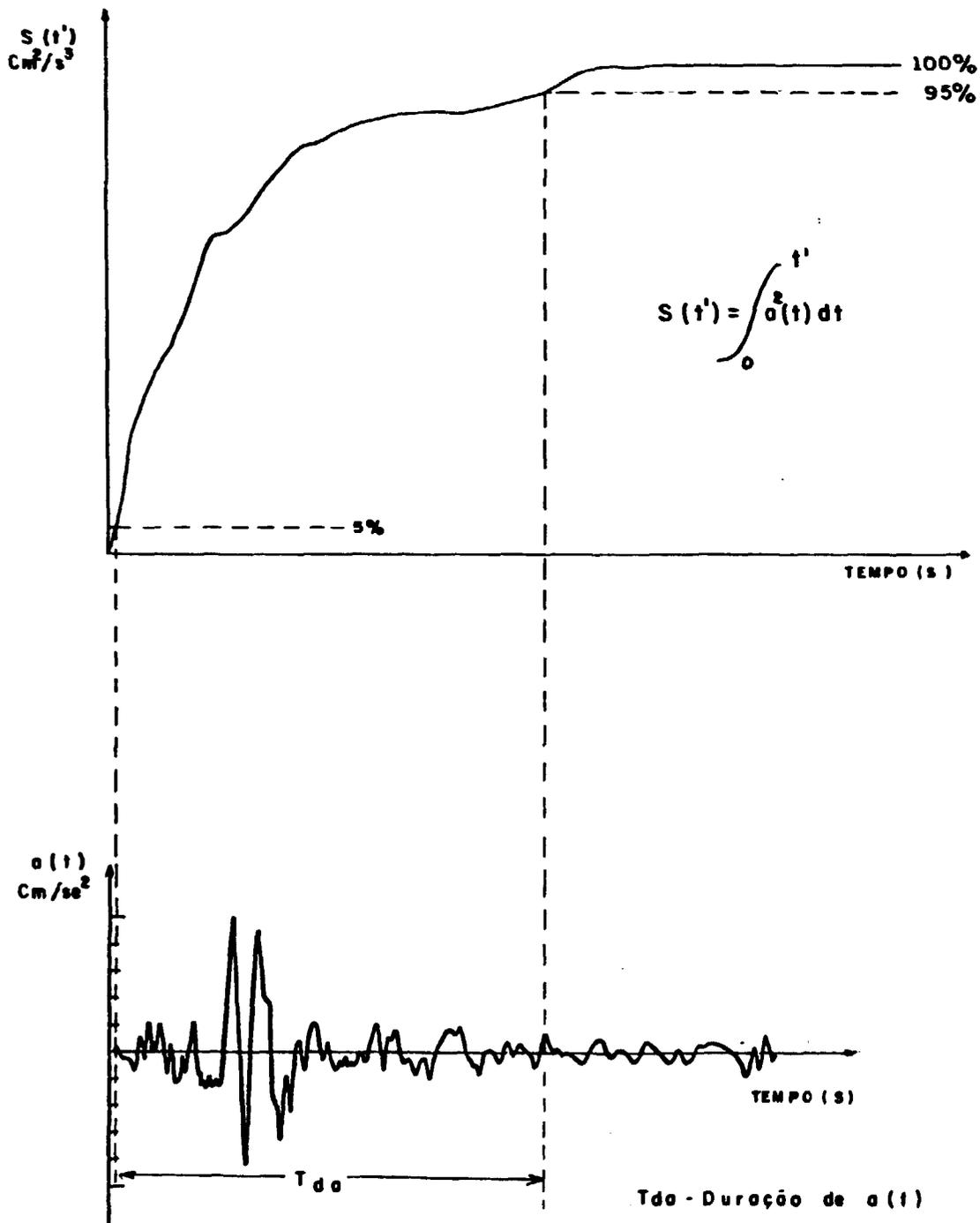


Fig. 48 - DEFINIÇÃO DA FASE MAIS INTENSA DE UM SISMO SM DE ACORDO COM TRIFUNAC E BRADY.

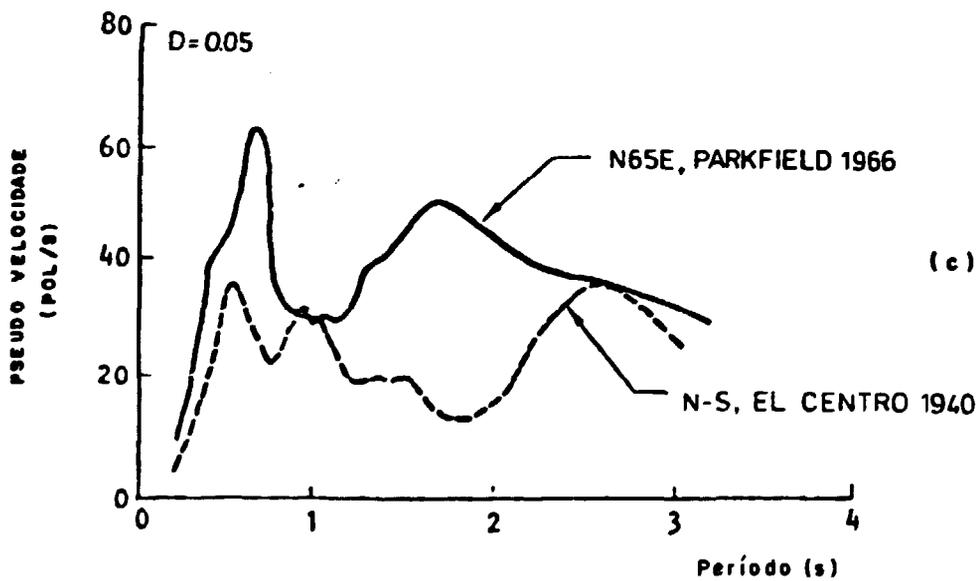
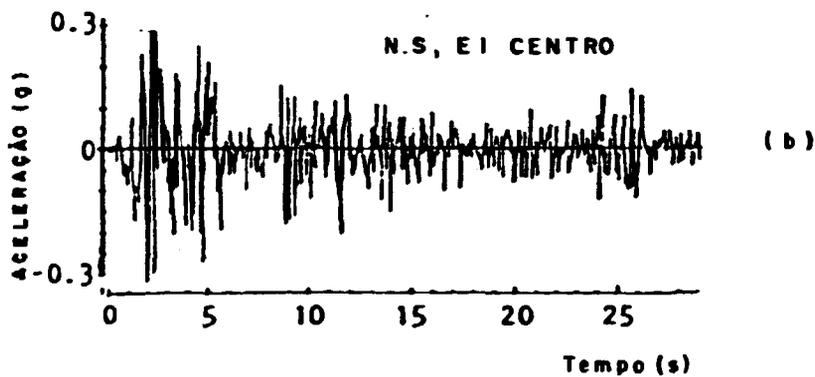
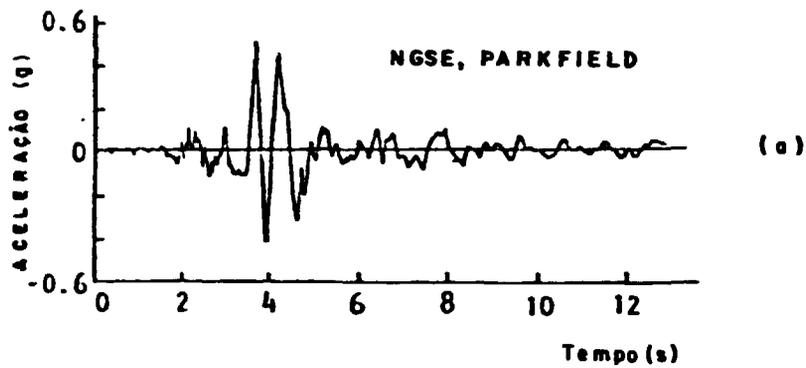


Fig. 49 - RESPOSTAS TÍPICAS AOS SISMOS DE PARKFIELD-1966 e EI CENTRO-1940; (68)

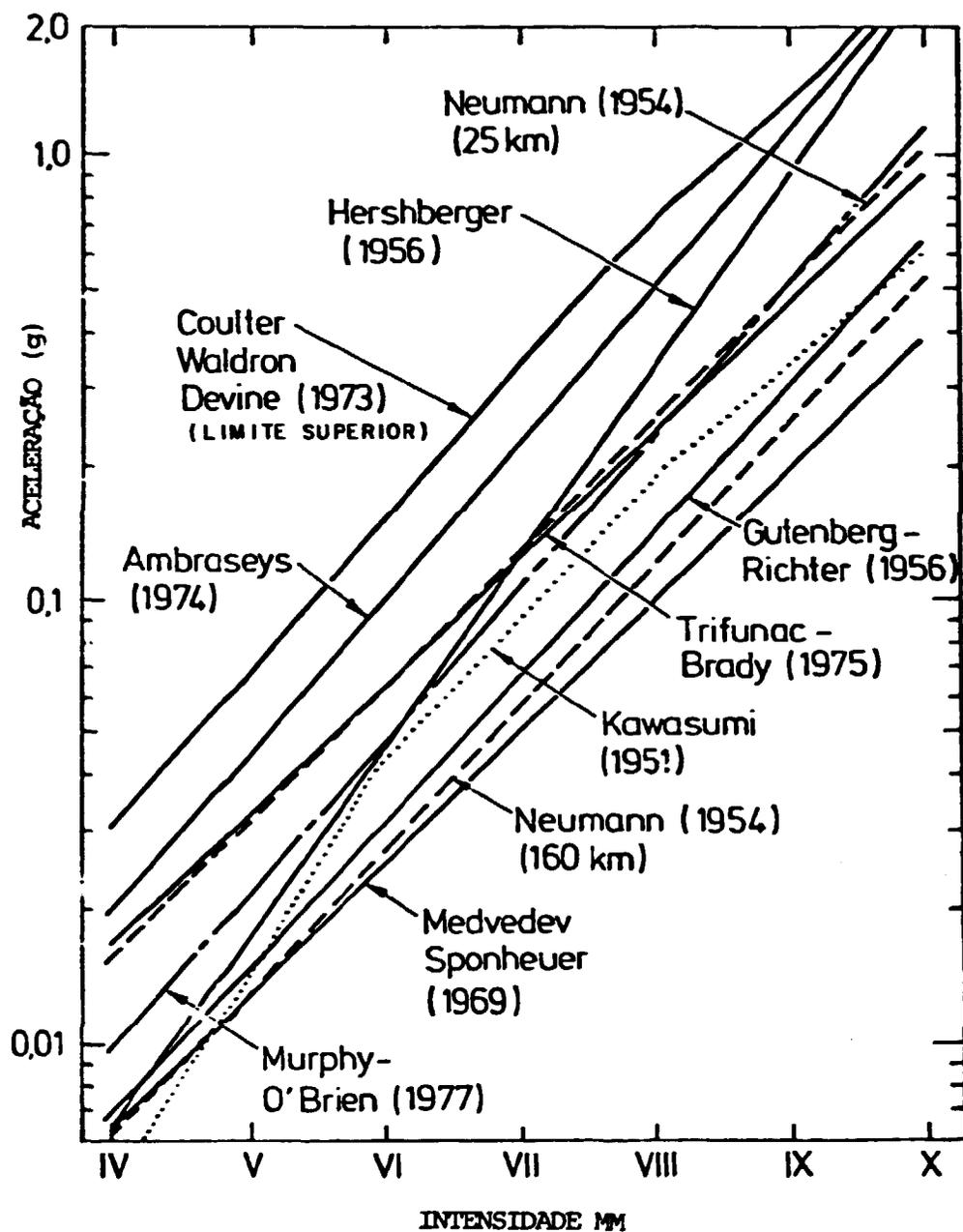
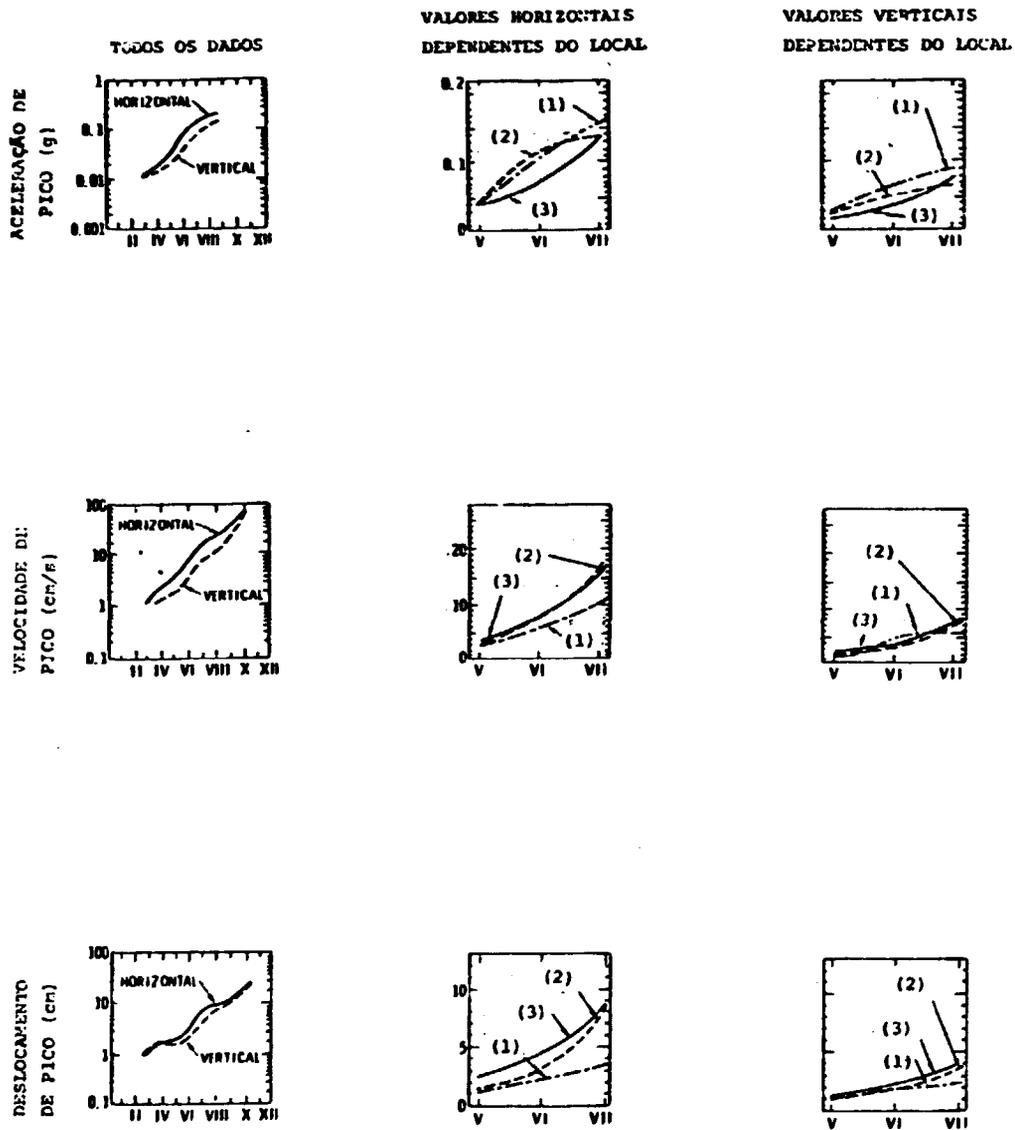


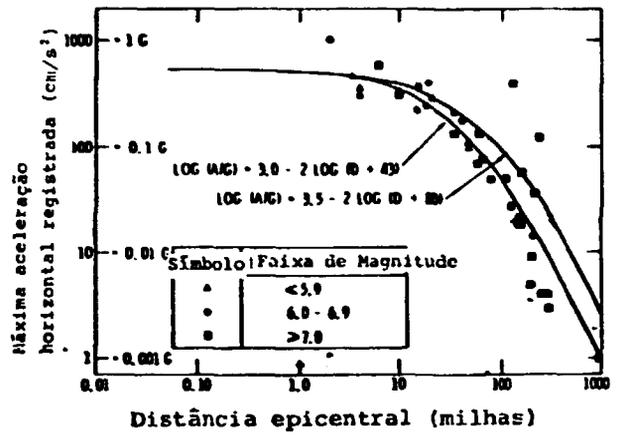
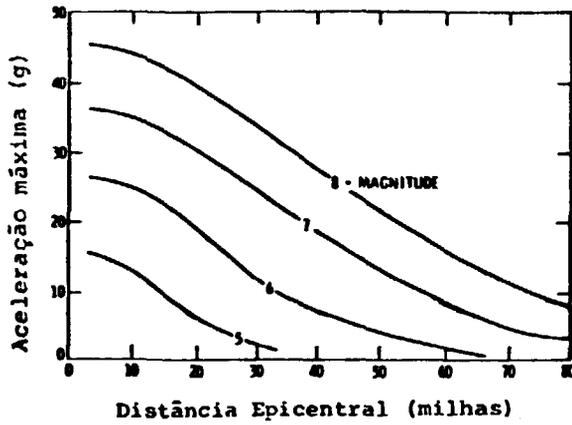
Fig.50 - CORRELAÇÕES ENTRE ACELERAÇÃO HORIZONTAL MÁXIMA DO TERRENO E INTENSIDADE MM; (68)



OBS : ESCALAS HORIZONTAIS : INTENSIDADE MM

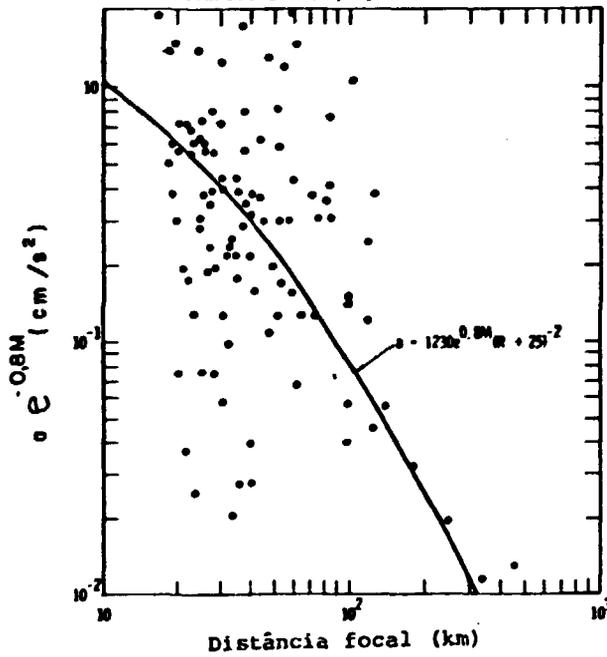
- (1) - ROCHA Sã ("HARD ROCK")
- (2) - ROCHA POUCA ALTERADA ("INTERMEDIATE ROCK")
- (3) - ALUVIÃO

Fig. 51 - CORRELAÇÕES MÉDIAS ENTRE RESPOSTAS DO TERRENO E INTENSIDADE MM; (34)



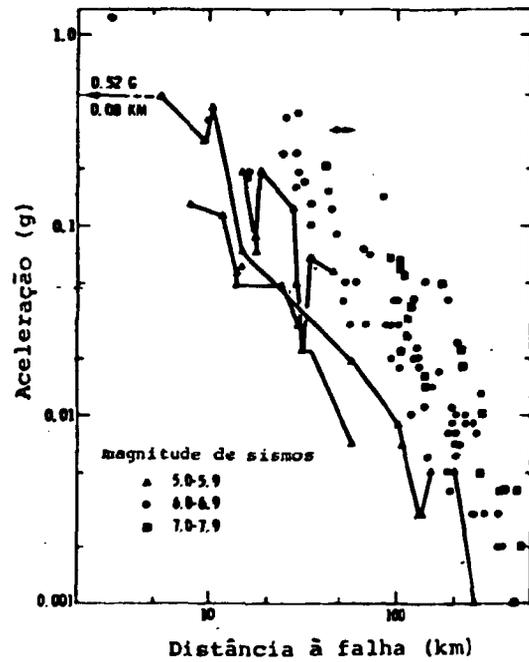
a) HOUSNER

a - Aceleração horizontal de pico (cm/s<sup>2</sup>)  
M - Magnitude  
R - Distância focal (km)



b) ESTEVA

c) CLOUD



d) PAGE ET AL II

Fig. 52 - CORRELAÇÃO ENTRE ACELERAÇÃO HORIZONTAL DE PICO, MAGNITUDE E DISTÂNCIA ; [34]

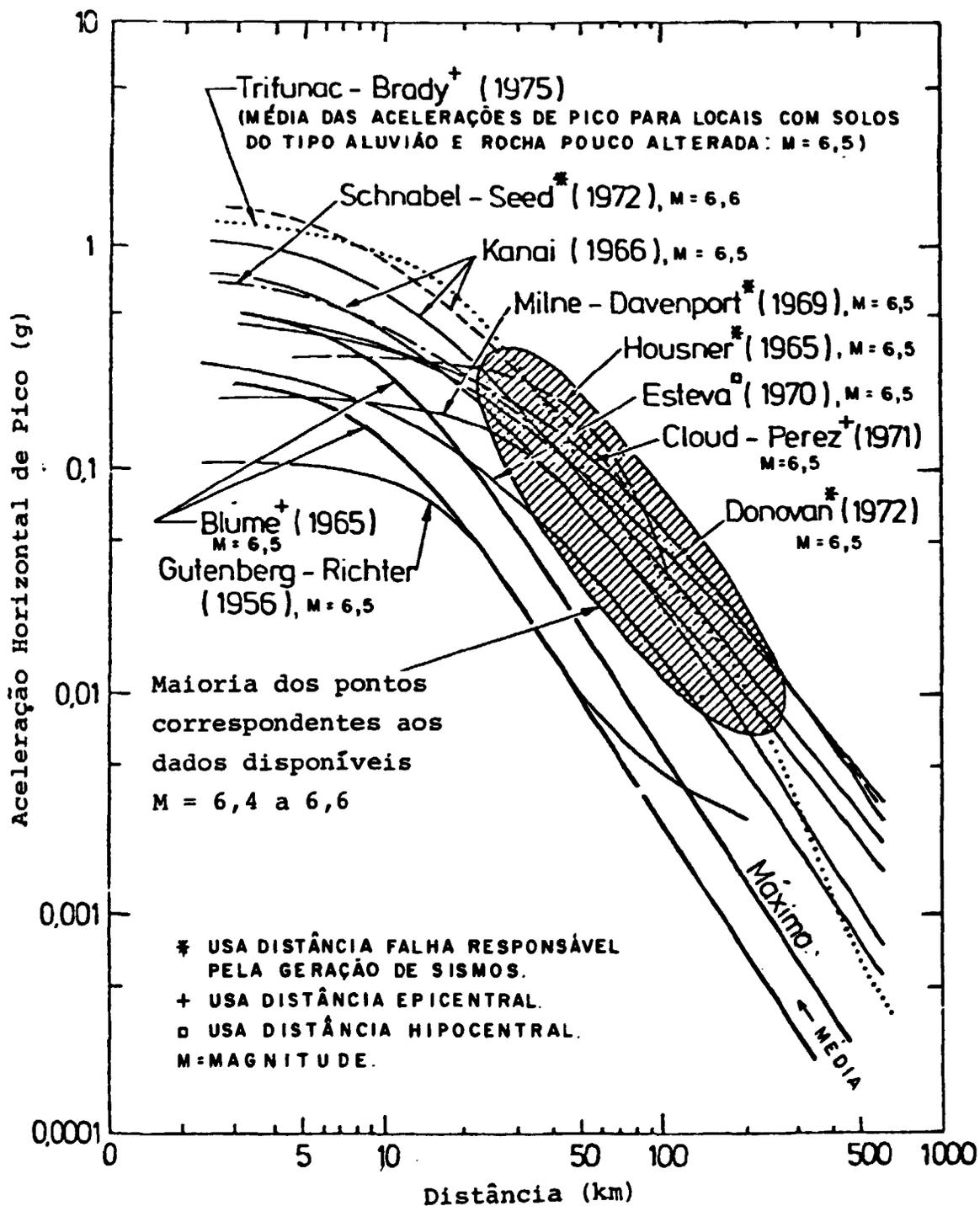
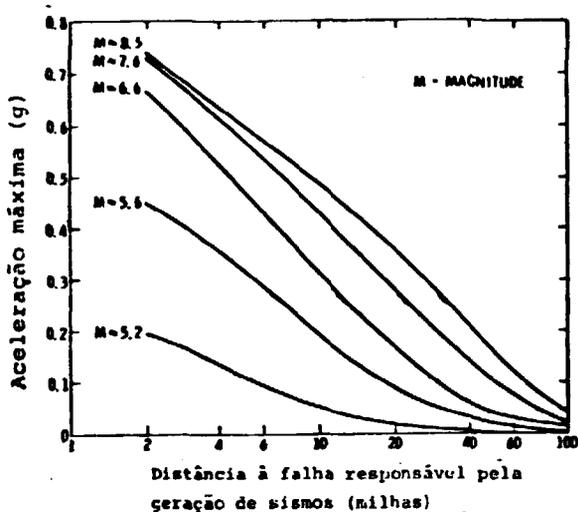
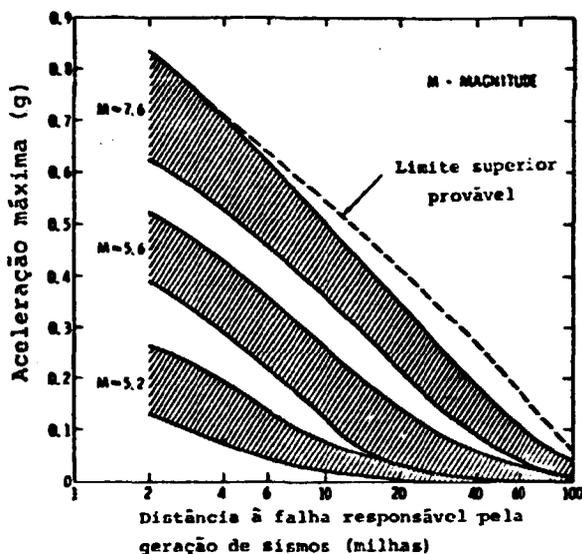


FIG. 53 - COMPARAÇÃO DE CORRELAÇÕES ENTRE ACELERAÇÃO HORIZONTAL DE PICO E DISTÂNCIA PARA SISMOS DE MAGNITUDES DE 6,5 e 6,6 ; (68)

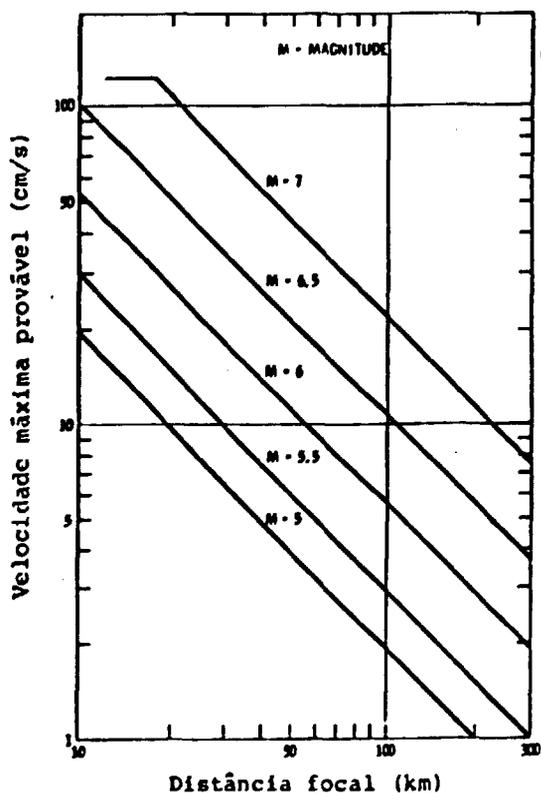


a) VALORES MÉDIOS

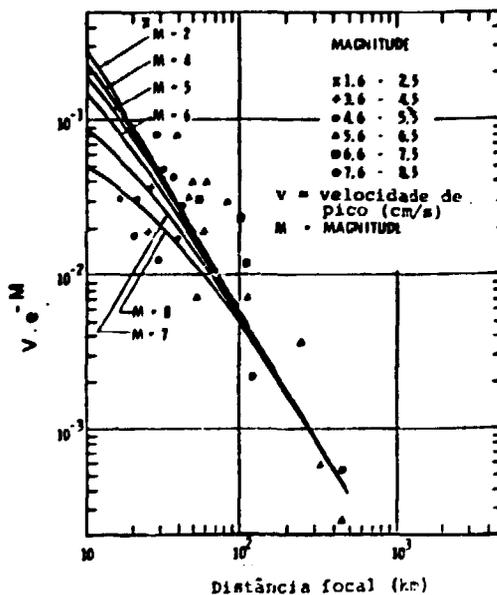


b) FAIXA DE VALORES

Fig.54 - CORRELAÇÕES DE ACELERAÇÃO HORIZONTAL DE PICO EM ROCHA COM MAGNITUDE E DISTÂNCIA; [34]

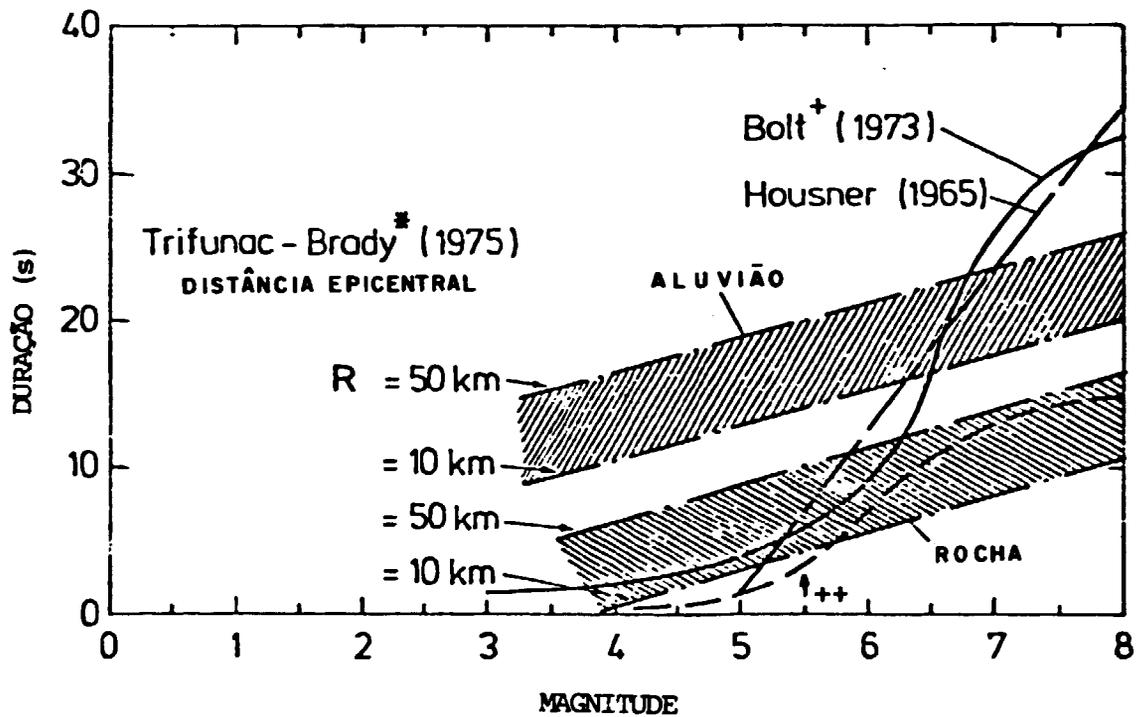


a) Correlação de Ambrosey



b) Correlação de Estevo

Fig.55 - CORRELAÇÕES ENTRE VELOCIDADE HORIZONTAL DE PICO, MAGNITUDE E DISTÂNCIA; [34]

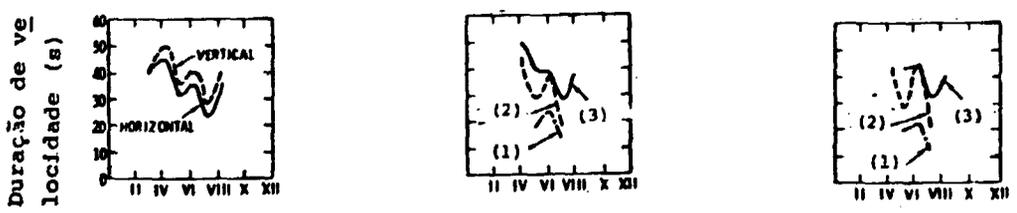


OBS: \* - Valores Médios Para as Acelerações Horizontais.  
 + - Aceleração de Referência > 0,05g.  
 ++ - Aceleração de Referência > 0,10g.

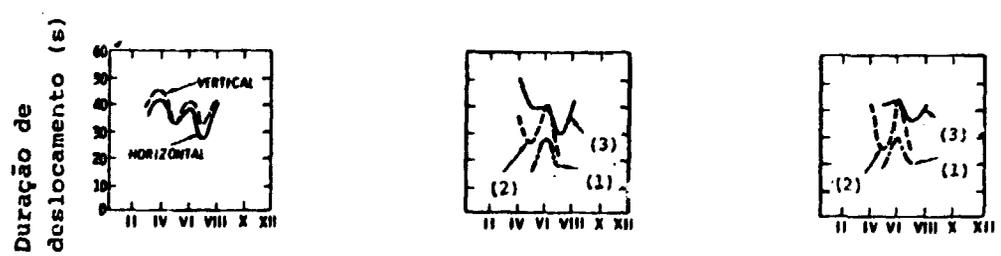
Fig. 56 - DURAÇÃO DE ACELERAÇÃO HORIZONTAL DE SISMOS SM EM FUNÇÃO DE MAGNITUDE E DISTÂNCIA ; (68)



a) DURAÇÃO DE ACELERAÇÃO



b) DURAÇÃO DE VELOCIDADE

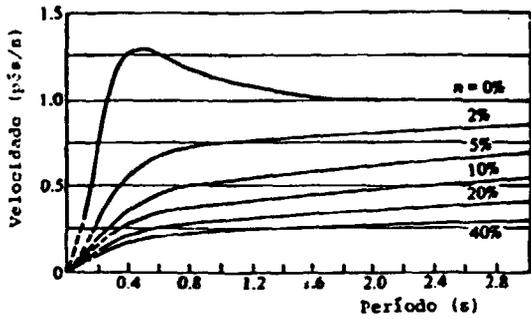


c) DURAÇÃO DE DESLOCAMENTO

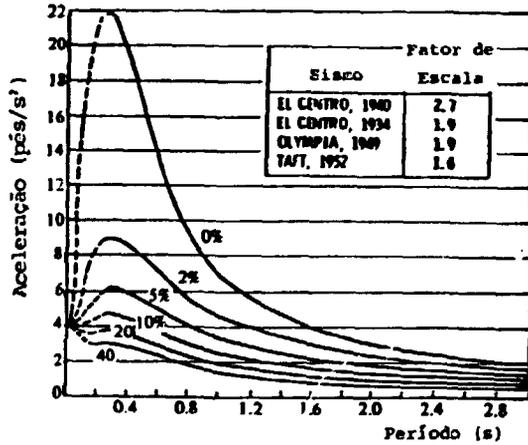
Obs. (1) ROCHA Sã ("HARD ROCK").  
 (2) ROCHA POUCA ALTERADA ("INTERMEDIATE ROCK").  
 (3) ALUVIÃO.

ESCALAS HORIZONTAIS: INTENSIDADE DE MM.

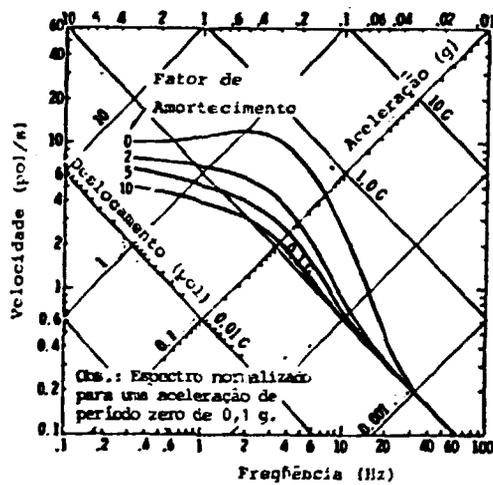
Fig. 57 - CORRELAÇÕES MÉDIAS DE DURAÇÃO COM INTENSIDADE LOCAL  
 FEITAS POR TRIFUNAC E BRADY; (34).



a) ESPECTRO DE VELOCIDADE; (27)

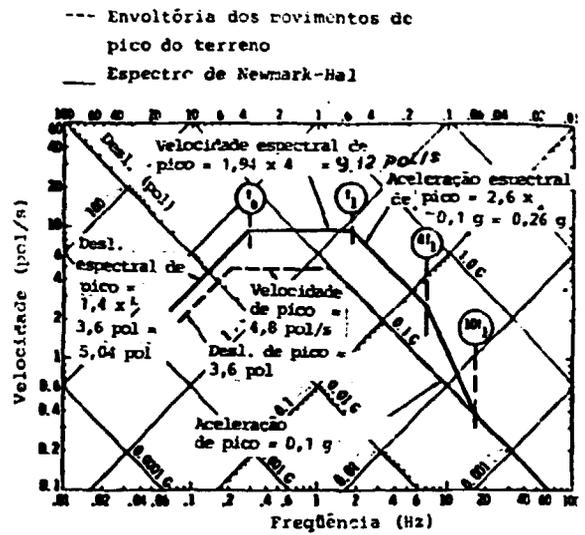


b) ESPECTRO DE ACELERAÇÃO; (47), (27)



c) ESPECTRO NO GRÁFICO LOGARÍTMICO ESPECIAL; (47)

Fig. 58 - CURVAS ESPECTRAIS DE HOUSNER

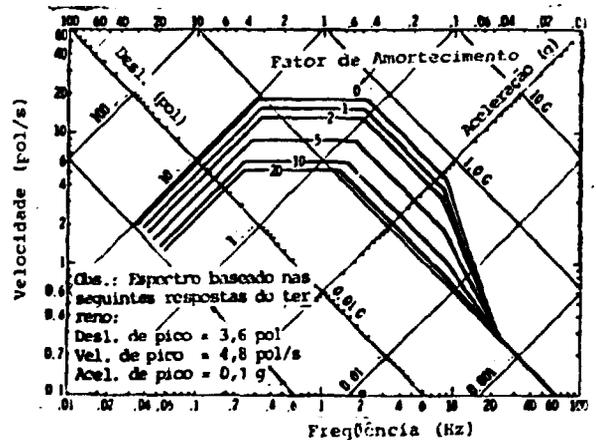


Os fatores de amplificação (fator de amortecimento de 5%) para deslocamento, velocidade e aceleração são, respectivamente, 1,4, 1,9 e 2,6.

$f_1$  - Frequência correspondente a interseção velocidade x aceleração.

$f_2$  - Frequência correspondente a interseção deslocamento x velocidade.

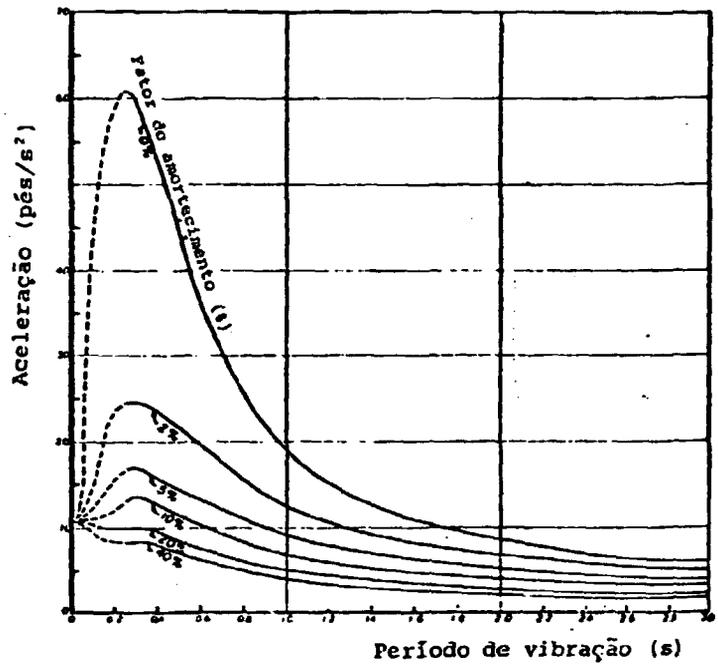
a) CONSTRUÇÃO DO ESPECTRO PARA UM FATOR DE AMORTECIMENTO DE 5%.



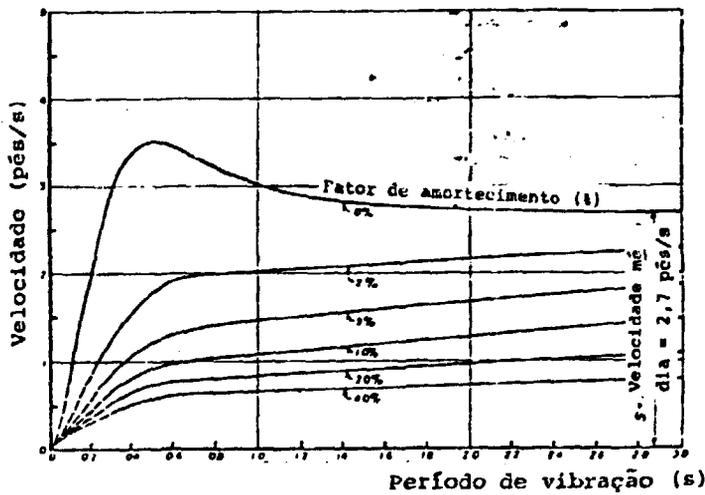
b) ESPECTRO DE RESPOSTA PARA VÁRIOS FATORES DE AMORTECIMENTO

Fig. 59 - CURVAS ESPECTRAIS DE NEWMARK E HALL. (47)

(a) Espectro de Aceleração



(b) Espectro de Velocidade



(c) Espectro de Deslocamento

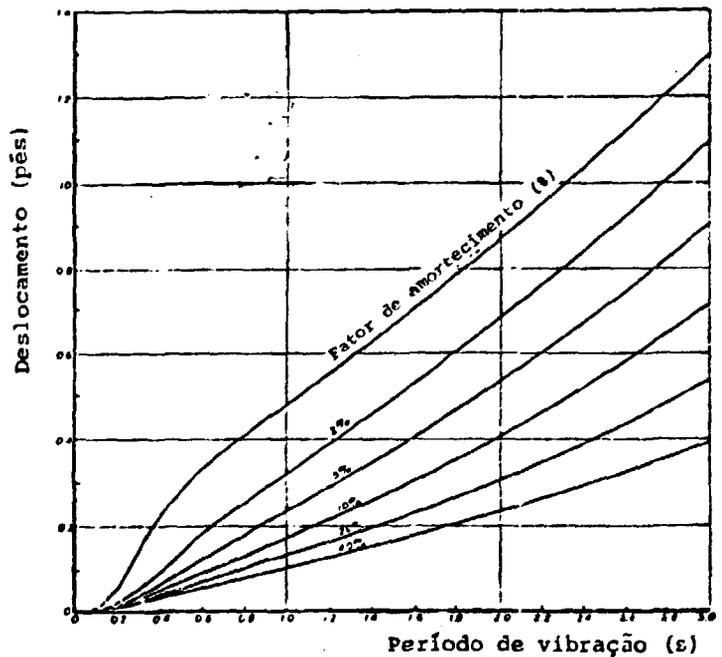
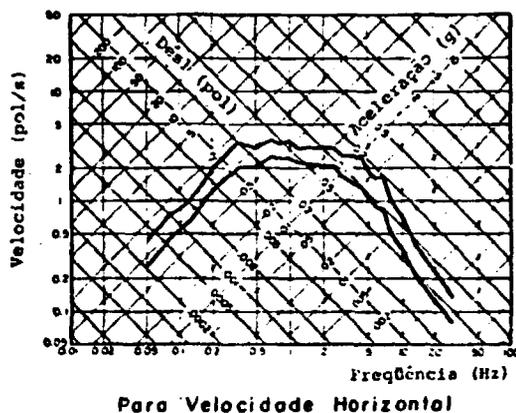
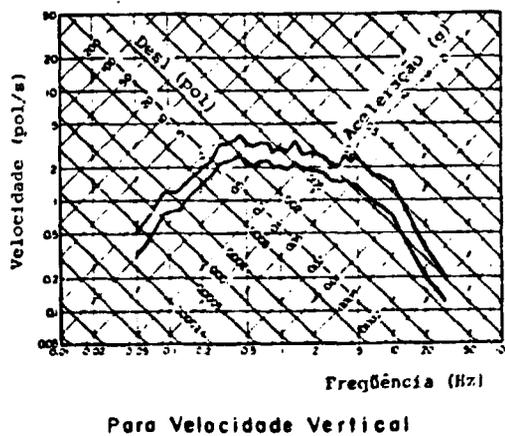
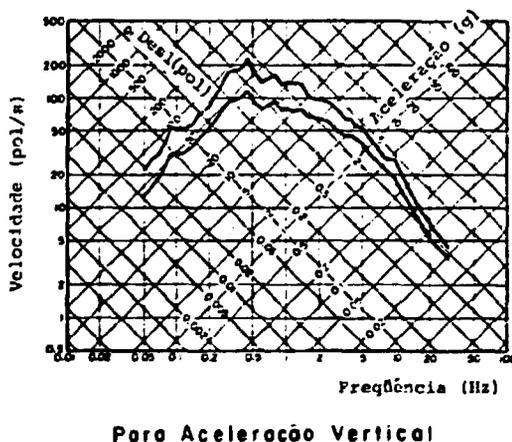


Fig. 60 - CURVAS ESPECTRAIS MÉDIAS DO SISMO DE EL CENTRO - 1940; (37)



a) Espectros Normalizados em Função das Componentes Horizontais.



b) Espectros Normalizados em Função das Componentes Verticais.

OBS: Todos os Espectros Foram Calculados Para um Fator de Amortecimento de 2%.

Fig. 61 - ESPECTROS MÉDIOS E MSD DESENVOLVIDOS POR NEWMARK ET ALII; (28)

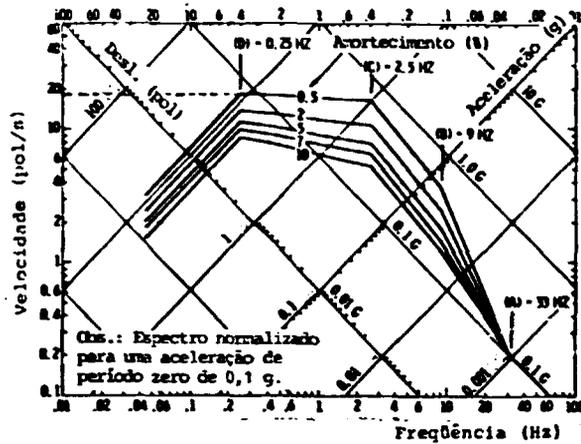
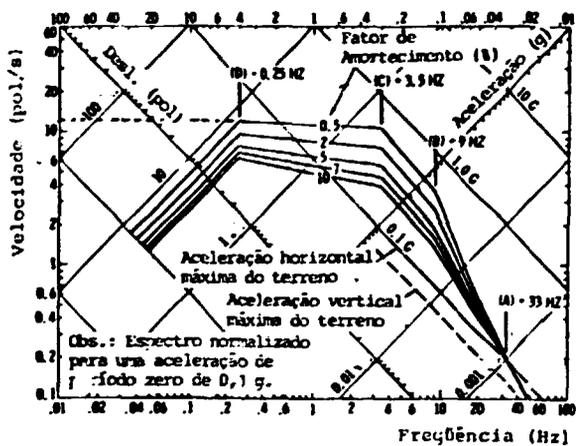
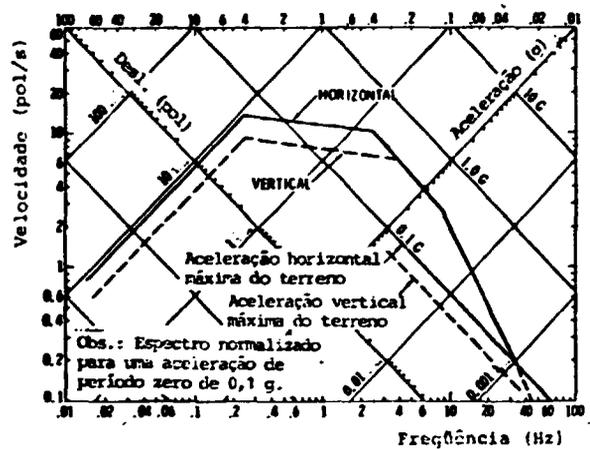


Fig. 62 - ESPECTRO DE RESPOSTA HORIZONTAL DO RG.1.60 ; (47)



a) Curvas Espectrais.



b) Comparação com as Curvas do Espectro Vertical.

Fig. 63 - ESPECTRO DE RESPOSTA VERTICAL DO RG.1.60 ; (47)

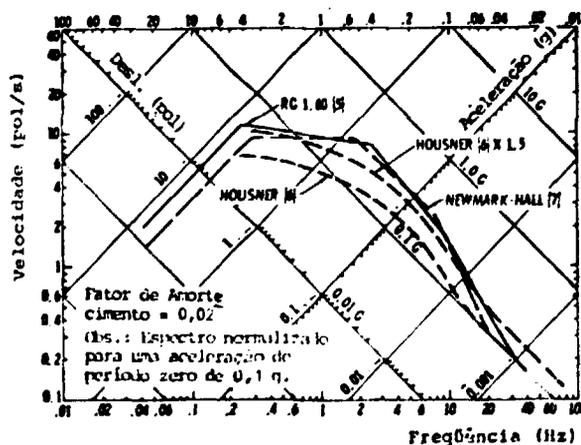
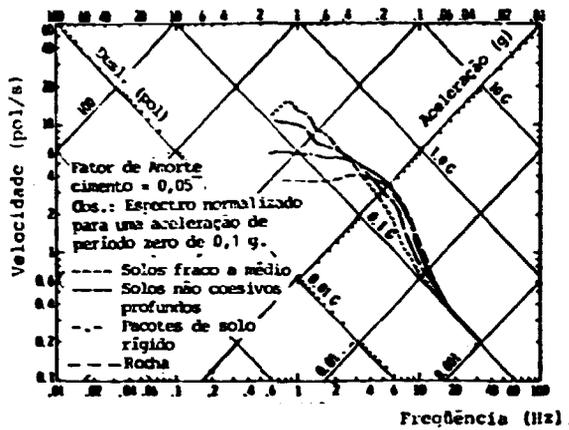
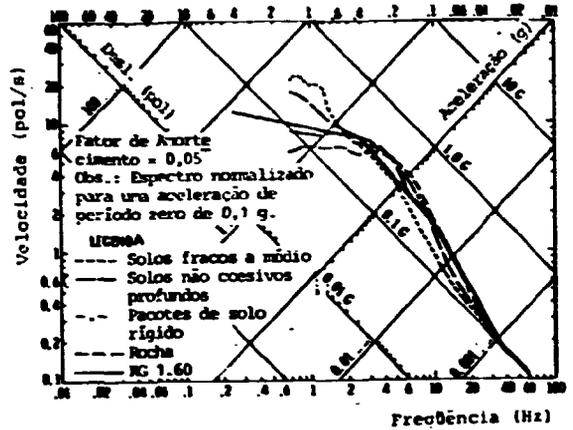


Fig. 64 - COMPARAÇÃO DE ESPECTROS DE RESPOSTA INDEPENDENTES DO LOCAL; (47)

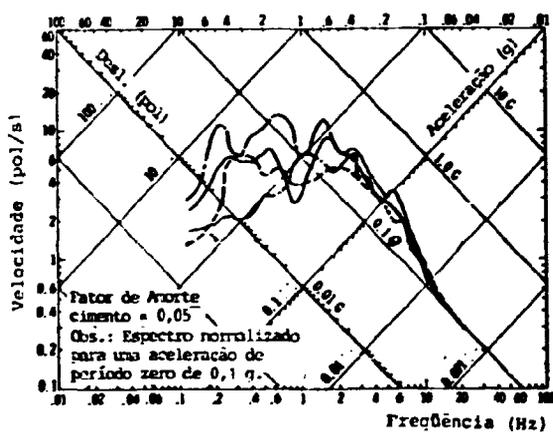


a) Médio dos Espectros.

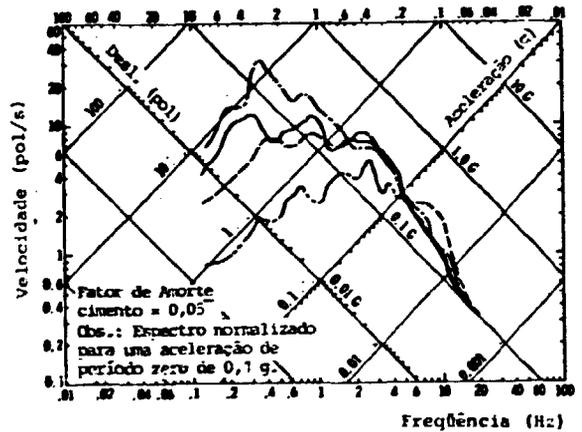


b) Curvas Espectrais de Seed, Ugas e Lysmer.

Fig. 65 - CURVAS ESPECTRAIS DE SEED, UGAS E LYSMER ; (47)



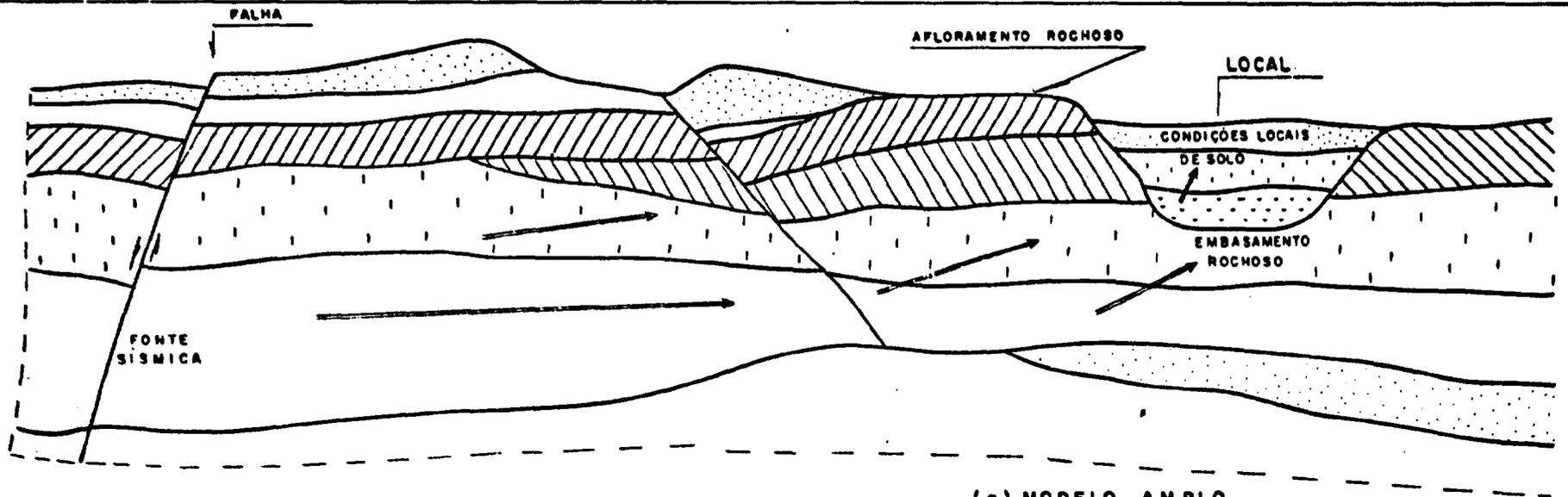
a) Componentes com os maiores Acelerações de Pico.



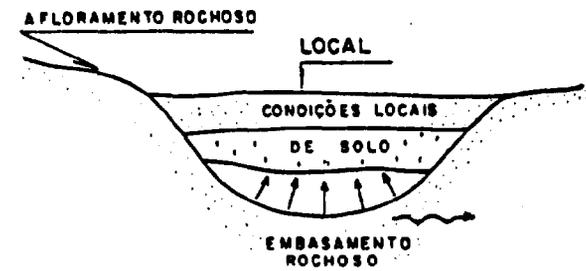
b) Componentes com as menores Acelerações de Pico

| Estação e ano        | Magnitude Richter | Distância Epicentral (km) | Acelerações Horizontais de Pico |                              |
|----------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------------|
|                      |                   |                           | Maior aceleração de pico (g)    | Menor aceleração de pico (g) |
| - Eureka, 1954       | 6,5               | 32                        | 0,257 (N79E)                    | 0,167 (S11E)                 |
| - Br. Cr., 1972      | 6,5               | 13                        | 0,255 (NS)                      | 0,134 (EW)                   |
| - - - Ferndale, 1951 | 5,8               | 32                        | 0,110 (N46W)                    | 0,110 (S44 W)                |
| Olympia, 1949        | 7,1               | 16                        | 0,280 (N86E)                    | 0,160 (N04W)                 |

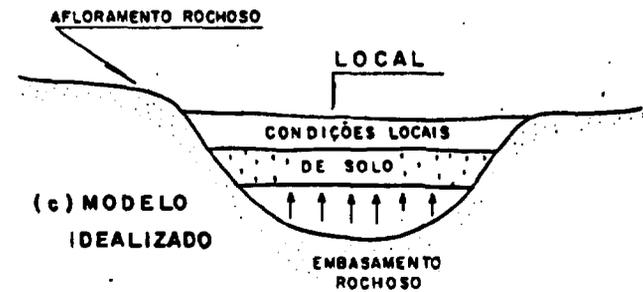
Fig. 66 - COMPARAÇÃO DE CURVAS ESPECTRAIS DE LOCAIS COM SOLOS PROFUNDOS ; (47)



(a) MODELO AMPLO



(b) MODELO REDUZIDO AO LOCAL



(c) MODELO IDEALIZADO

Fig. 67 - MODELOS AMPLO E SIMPLIFICADO RELATIVOS A ANÁLISE DE RESPOSTA DO LOCAL

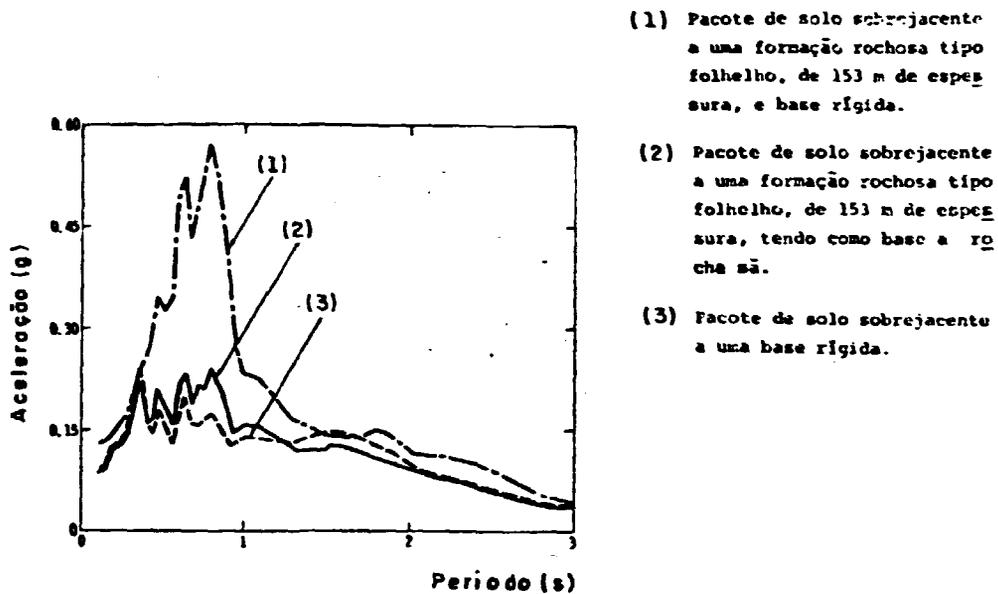


Fig. 68 - INFLUÊNCIA DO EMBASAMENTO ROCHOSO SOBRE O ESPECTRO DE RESPOSTA SUPERFICIAL DO TERRENO; (47)

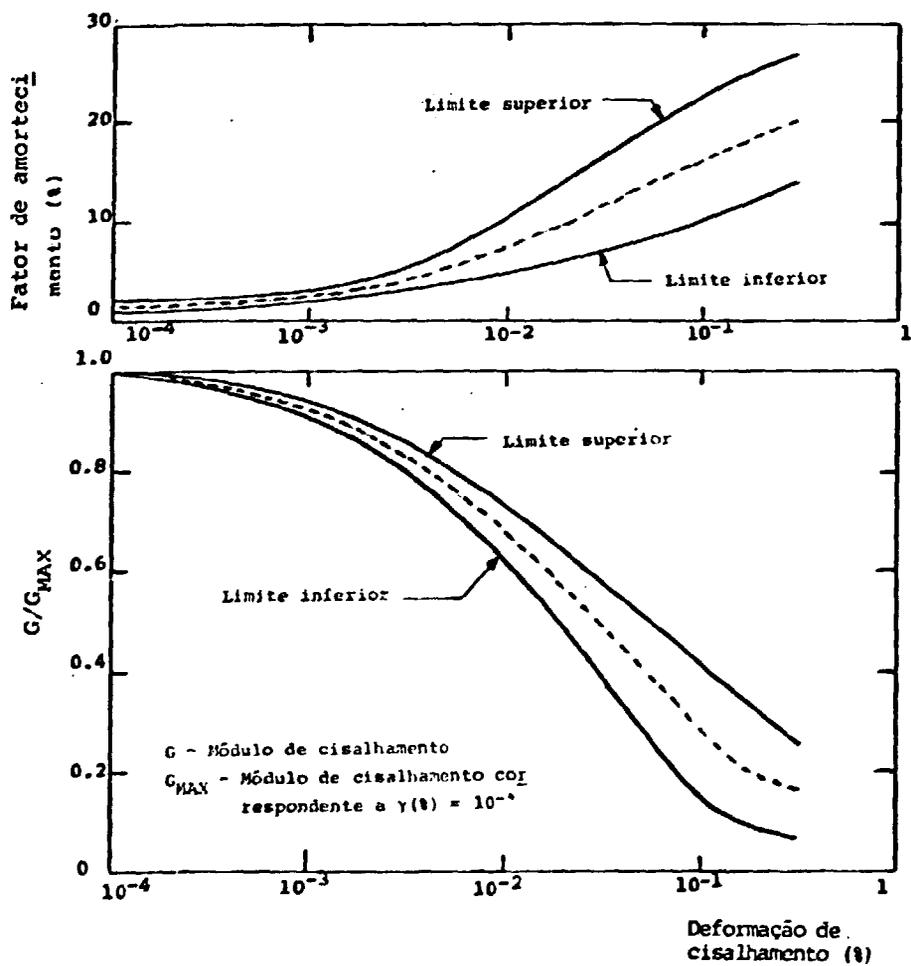


Fig. 69 - PROPRIEDADES LIMITES - FATOR DE AMORTECIMENTO E MÓDULO DE CISALHAMENTO DE SOLOS; (47)

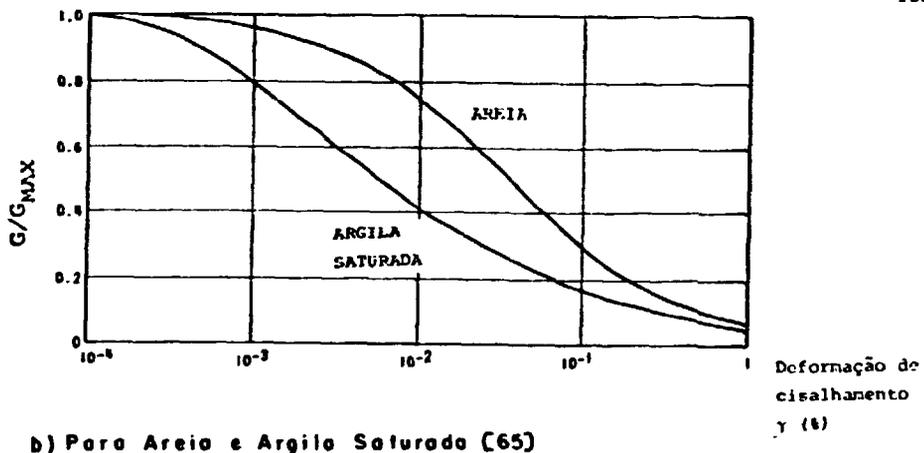
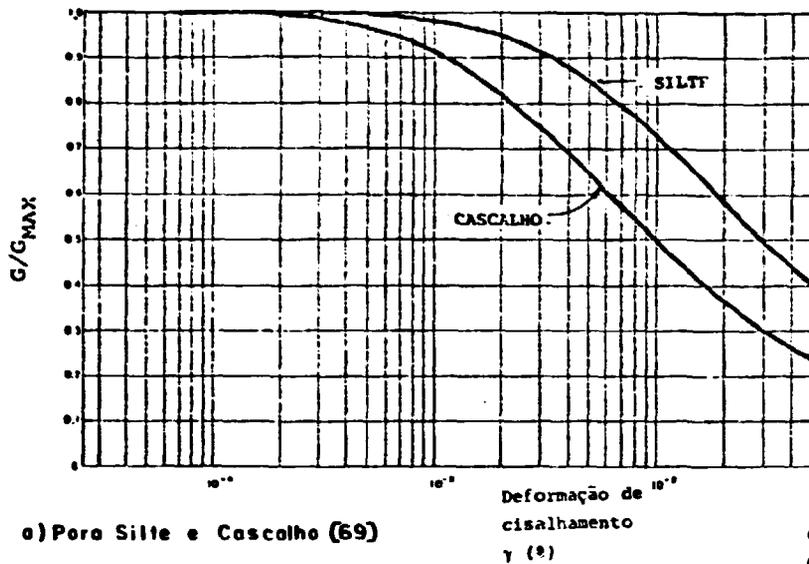
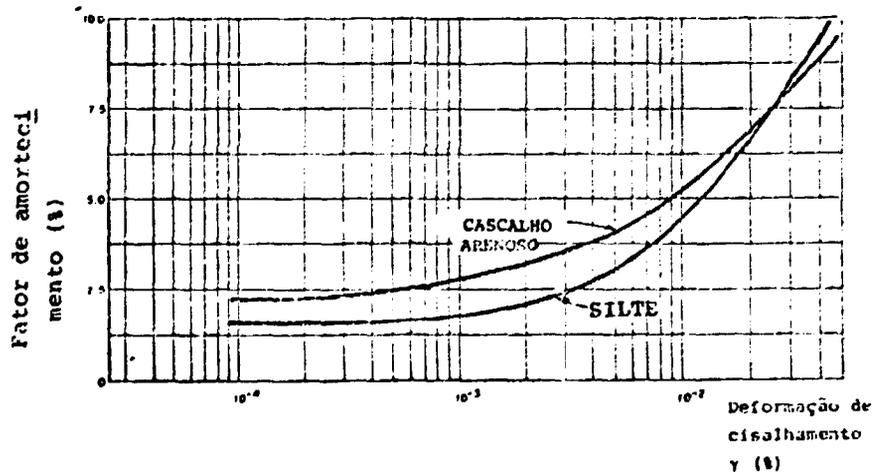
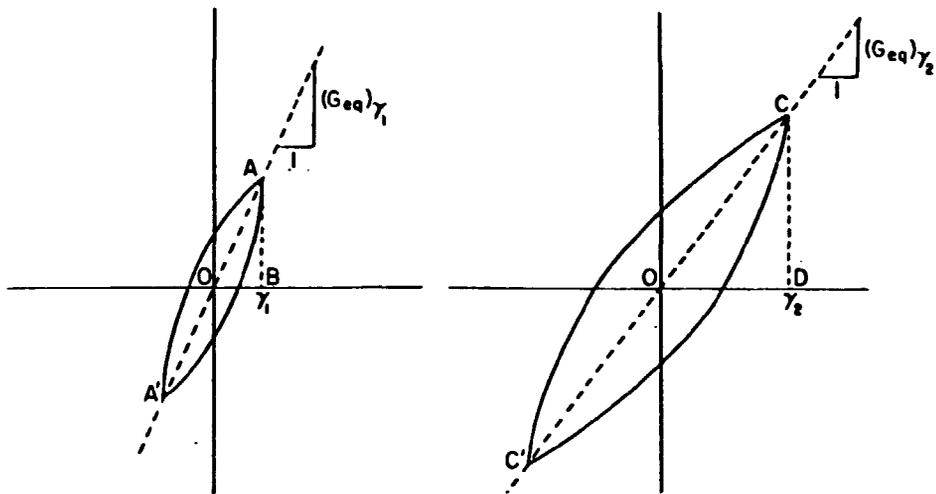


Fig. 70 - VARIAÇÃO DO MÓDULO DE CISALHAMENTO COM A DEFORMAÇÃO DE CISALHAMENTO PARA SOLOS TÍPICOS.



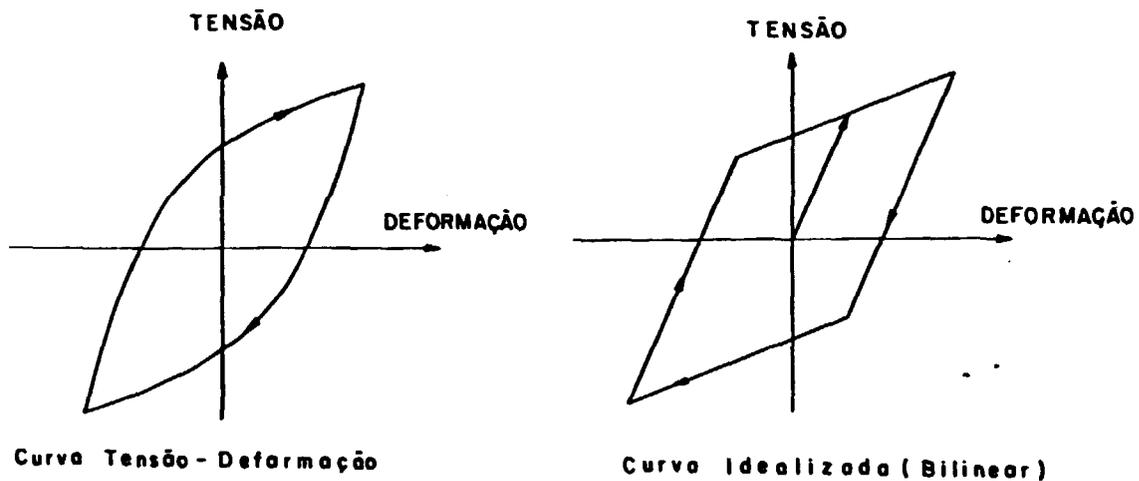


$$(\lambda_{eq})_1 = \frac{ACH}{4 \pi AOB}$$

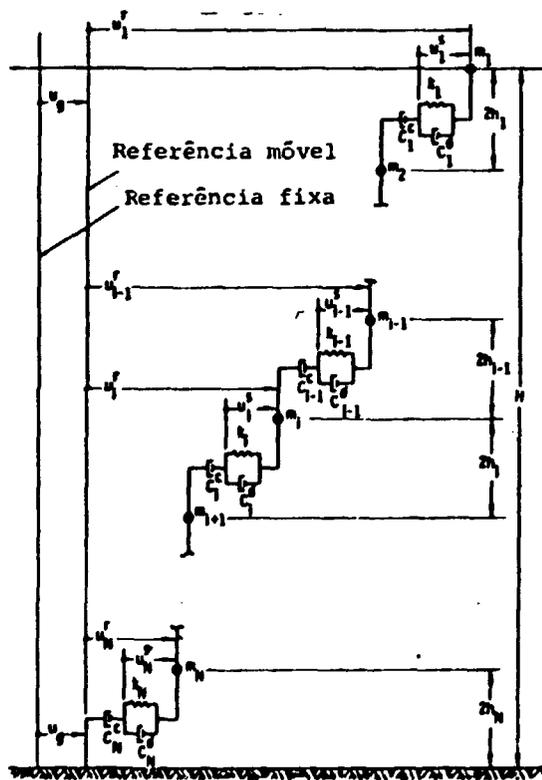
$$(\lambda_{eq})_2 = \frac{ACH}{4 \pi A OCD}$$

ACH - Área do Curvo de Histerese.  
 AOB - Área de OAB  
 A OCD - Área de OCD

Fig. 72 - PARÂMETROS LINEARES EQUIVALENTES PARA SOLOS COM COMPORTAMENTO HISTERÉTICO NÃO LINEAR; (70)

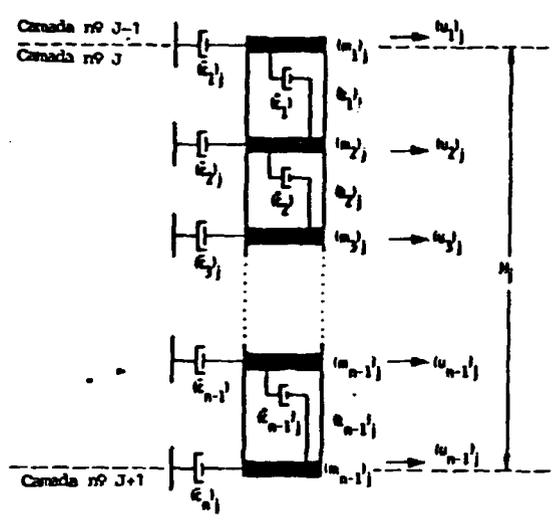
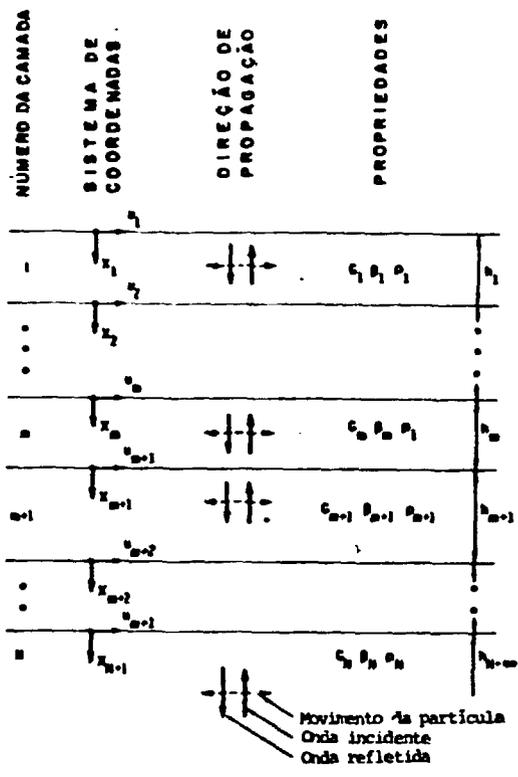


(a) IDEALIZAÇÃO DA CURVA TENSÃO - DEFORMAÇÃO; (70)



(b) EXEMPLO DE APLICAÇÃO DAS PROPRIEDADES BILINEARES DO SOLO; (47)

Fig. 73 - REPRESENTAÇÃO BILINEAR DAS PROPRIEDADES DO SOLO



a) Modelo Contínuo

b) Modelo de Massas Discretas

Fig. 74 - MODELOS UNIDIMENSIONAIS PARA ANÁLISE DE RESPOSTA HORIZONTAL DE LOCAIS COM CAMADAS HORIZONTAIS ; (47)

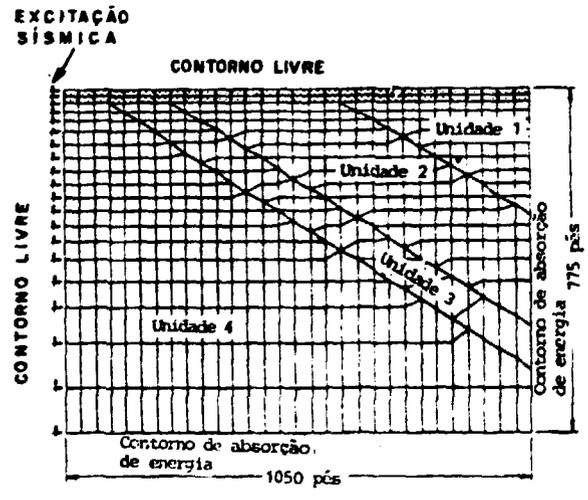
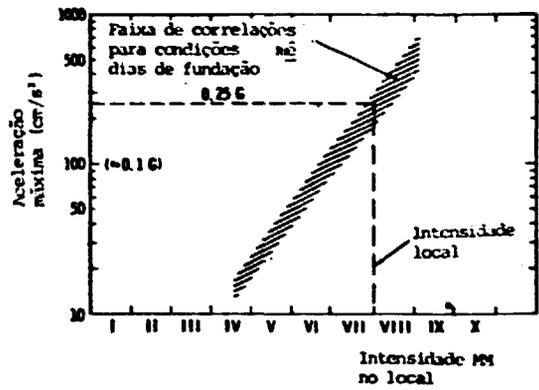
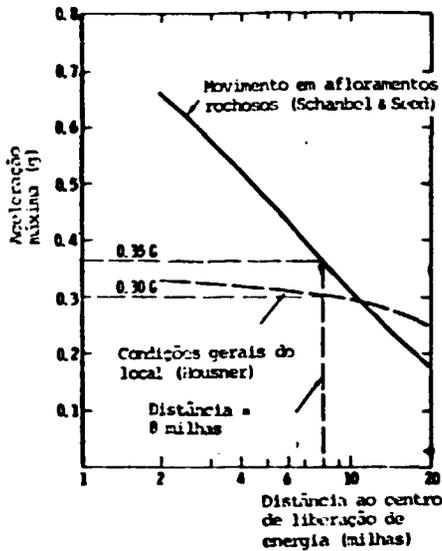


Fig. 75 - MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA LOCAIS COM FORMAÇÕES ROCHOSAS INCLINADAS ; (47)



o) Curvas de Atenuação para um Sismo de Magnitude 6.5

b) Aceleração Intensidade (Coulter et Alii)

Fig. 76 - DADOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DAS ACELERAÇÕES DE PICO - EXEMPLO DE APLICAÇÃO; (47)

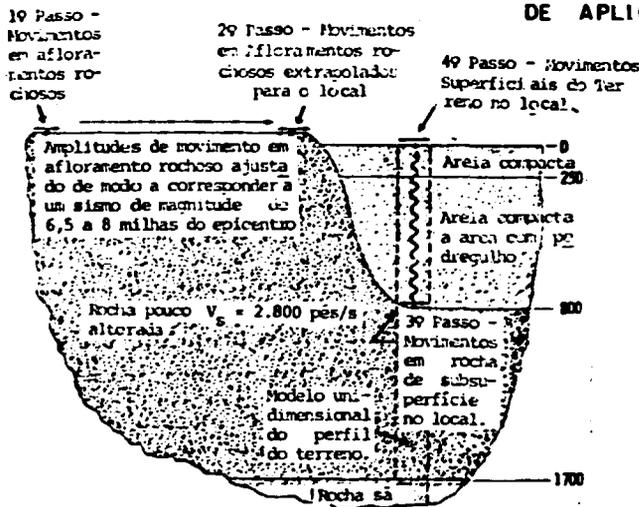
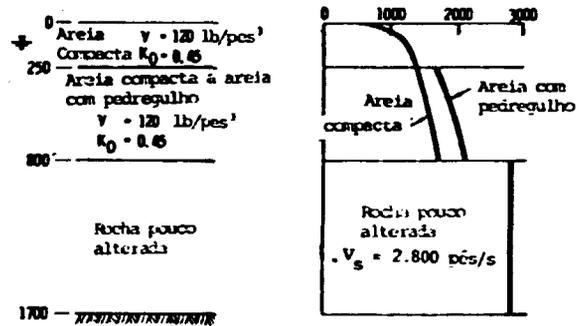


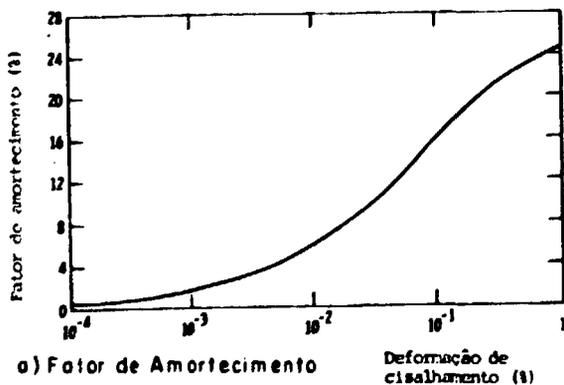
Fig. 78 - PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DE RESPOSTA DO LOCAL - EXEMPLO DE APLICAÇÃO; (47)



a) Perfil do Solo

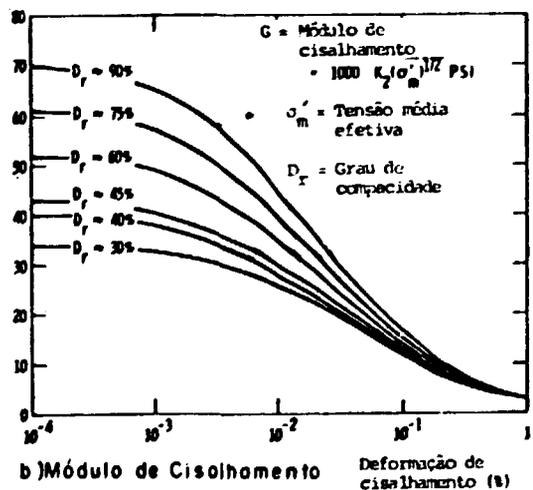
b) Velocidade de Ondas Cisalhantes.

Fig. 77 - DESCRIÇÃO DO PERFIL GEOTÉCNICO DO TERRENO - EXEMPLO DE APLICAÇÃO; (47)



a) Fator de Amortecimento

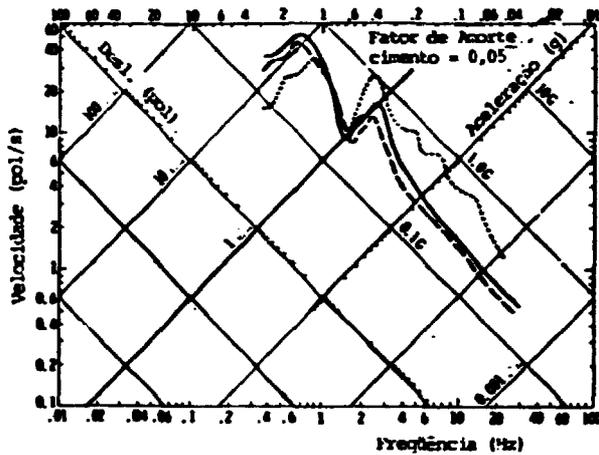
Deformação de cisalhamento (%)



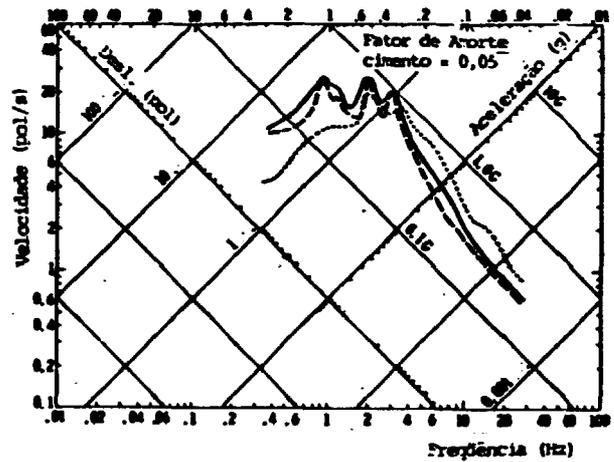
b) Módulo de Cisalhamento

Deformação de cisalhamento (%)

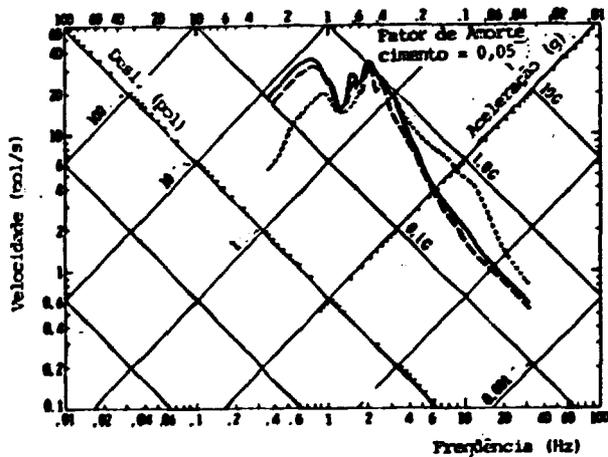
Fig. 79 - PROPRIEDADES DINÂMICAS DO SOLO - EXEMPLO DE APLICAÇÃO; (47)



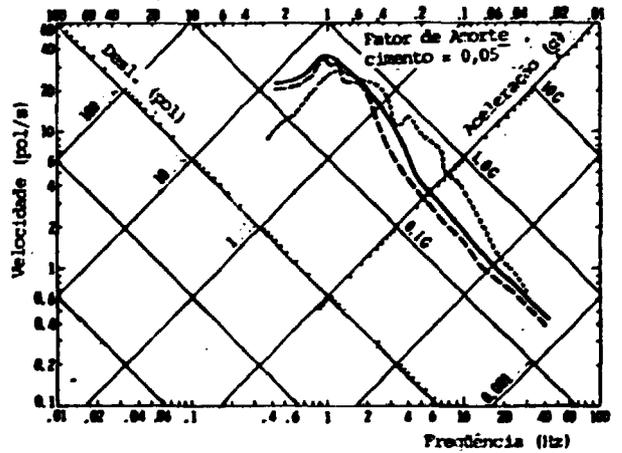
a) Componente S16E do Sismo da Barragem de Pacoima.



b) Componente N21E do Sismo de Castaic.



c) Componente S74W do Sismo da Barragem de Pacoima.

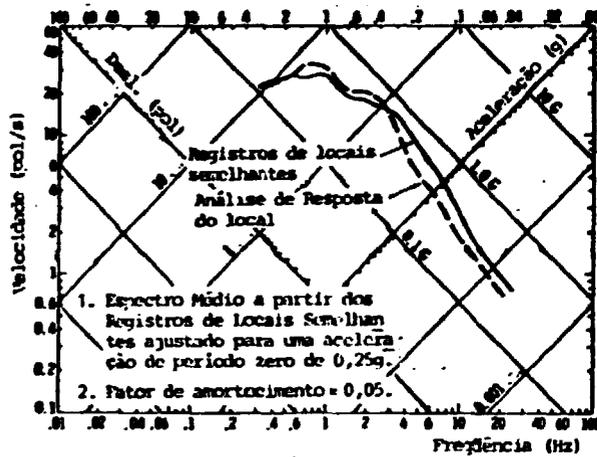


d) Componente N69W do Sismo de Castaic.

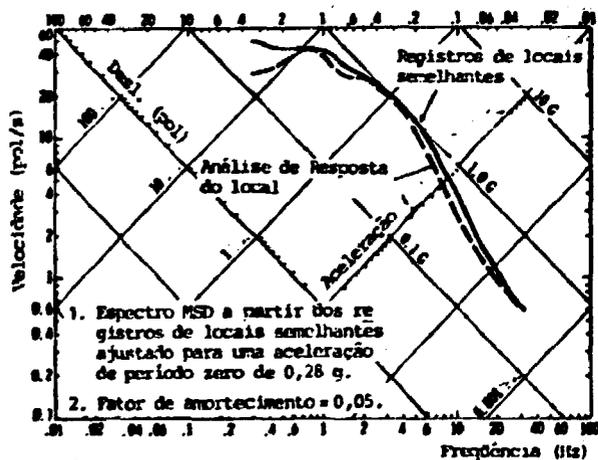
Obs: Espectros Calculados a partir da Excitação Obtida em Afloramento Rochoso.

- Calculado com base no limite superior das propriedades do solo
- - - Calculado com base no limite inferior das propriedades do solo
- ..... Calculado a partir dos registros em afloramentos rochosos

Fig. 80 - ESPECTROS DE RESPOSTA OBTIDOS DOS ESTUDOS DE SENSIBILIDADE DA RESPOSTA DO LOCAL ; (47)



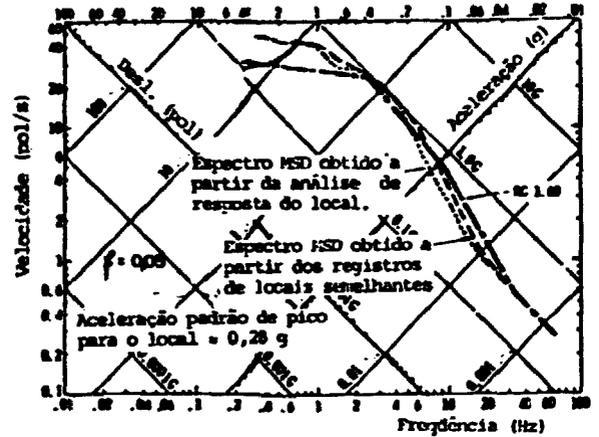
a) Espectros Médios



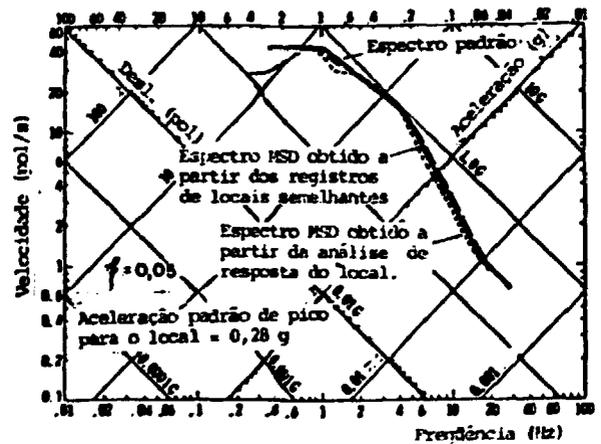
b) Espectros MSD

Fig. 81 - COMPARAÇÃO ENTRE ESPECTROS DE REGISTROS DE LOCAIS SEMELHANTES E DA ANÁLISE DE RESPOSTA DO LOCAL; (47)

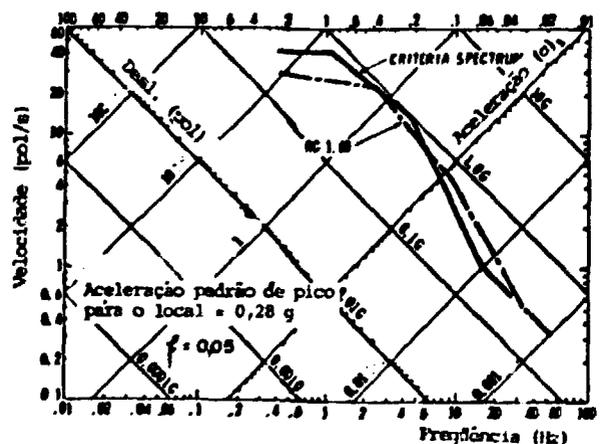
Obs:  $\zeta$  = Fator de Amortecimento.



a) Comparação dos Espectros dependentes do Local e do RG 160

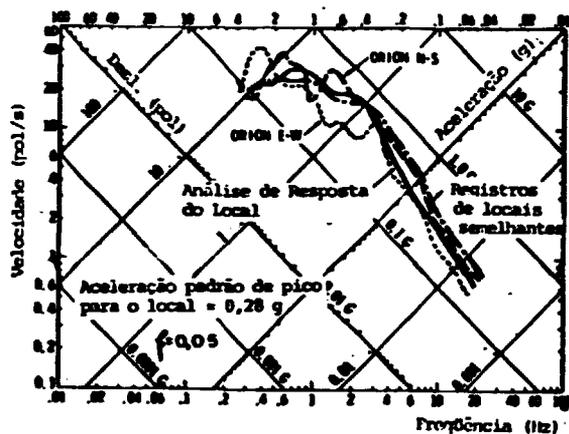


b) Obtenção do Espectro Padrão



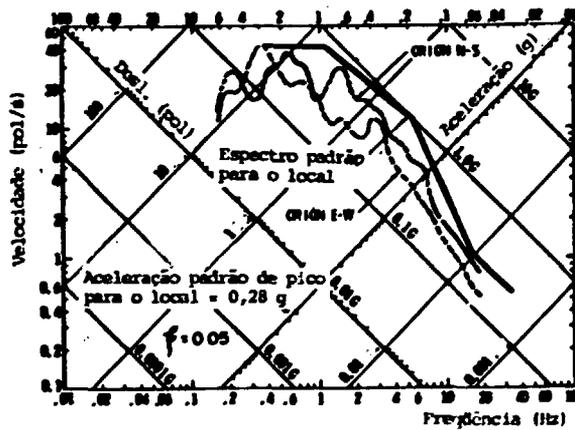
c) Comparação do Espectro Padrão com o Espectro do RG 160

Fig. 82 - ESPECTRO DE PADRÃO PARA O LOCAL - EXEMPLO DE APLICAÇÃO; (47)



a) Espectros MSD dependentes do Local.

b) Espectro Padrão Para o Local do Exemplo Analizado.



Obs: f: Fator de Amortecimento.

Fig. 83 - COMPARAÇÃO DE ESPECTROS: RESULTADOS DO EXEMPLO DE APLICAÇÃO E REGISTROS SÍSMICOS DE ORION; [47]

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BERROCAL, J. et alii. Regionalização sísmica do Brasil. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico da USP, 1979.
- [2] BARROS, J.G.C. Síntese da atualidade sísmológica no Brasil. SICEG (Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos), Ouro Preto, (12): 115-45, 1972.
- [3] MOTA, J.I.S. Vulcões e sismos no mundo e no Brasil - Coincidência entre as zonas sísmicas e a existência de vulcões. Revista Brasileira de Geografia, 28 (3): 251-9, julho/setembro 1966.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA .  
I Mesa Redonda sobre Risco Sísmico, São Paulo, 1980.
- [5] —. Simpósio sobre Sismicidade Natural e Induzida ,  
São Paulo, 1979.
- [6] GAMA, C.D. da et alii. Sismologia de Barragens .  
Construção Pesada, 9 (96): 53-75, Jan/1979.
- [7] FÚLFARO, V.J. & PONÇANO, W.L. Distribuição de sismos no Brasil e sua relação com o arcabouço tectônico : uma proposta de regionalização. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXIX, Ouro Preto, 1976. Anais do..., Belo Horizonte, SBEG, 1976.
- [8] HABERLEHNER, H. Análise sismotectônica do Brasil e notas explicativas sobre o mapa sismotectônico do Brasil e regiões correlacionadas. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 2, São Paulo, 1978. Anais do ..., São Paulo, IPT, 1978. v.1, p. 297-329.
- [9] HASUI, Y. & PONÇANO, W.L. Geossuturas e sismicidade no Brasil. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 2, São Paulo, 1978. Anais do ..., São Paulo, IPT, 1978. v. 1, p. 331-8.
- [10] HASUI, Y. et alii. Os falhamentos e a sismicidade natural da região das serras da Mantiqueira e do Mar. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 2 , São Paulo, 1978. Anais do ..., São Paulo, IPT, 1978. v. 1, p. 353-7.
- [11] MENDIGUREN, J.A. & RICHTER, F. On the origin of compressional interplate stresses in South America. Phys. Earth. Plan. Int. 16: 318-26, 1978.

- [12] EUA. Nuclear Regulatory Commission. General design criteria for nuclear power plants. In: —. Code of Federal Regulations. Title 10. Energy. Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 1981. pt. 50, app. A, p. 395-403.
- [13] EUA. Nuclear Regulatory Commission. Seismic and geologic siting criteria for nuclear power plants. In: —. Code of Federal Regulations. Title 10. Energy. Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 1981. pt. 100, app. A, p. 646-654.
- [14] EUA. Nuclear Regulatory Commission. Office of Standards Development. Standard format and content of safety analysis reports for nuclear power plants. Washington, D.C., November, 1978 (REG./GUIDE 1.70).
- [15] EUA. Nuclear Regulatory Commission. Office of Standards Development. Design response spectra for seismic design of nuclear power plants. Washington, D.C., December, 1973 (REG./GUIDE 1.60).
- [16] EUA. Atomic Energy Commission. Directorate of Regulatory Standards. Damping values for seismic design of nuclear power plants. Washington, D.C., October, 1973 (REG./GUIDE 1.61).
- [17] EUA. Nuclear Regulatory Commission. Office of Standards Development. Combining modal responses and spatial components in seismic response analysis. Washington, D.C., February, 1976 (REG./GUIDE 1.92).
- [18] EUA. Atomic Energy Commission. Directorate of Regulatory Standards. Instrumentation for earthquakes. Washington, D.C., April, 1974 (REG./GUIDE 1.12).
- [19] EUA. Nuclear Regulatory Commission. Office of Standard Development. Seismic design classification. Washington, D.C., September, 1978 (REG./GUIDE 1.29).
- [20] EUA. Nuclear Regulatory Commission. Office of Standard Development. General site suitability criteria for nuclear power stations. Washington, D.C., November, 1975 (REG./GUIDE 4.7).
- [21] Mc CONNEL, K.G. Notes on vibration frequency analysis. Westport Connecticut Society for Experimental Stress Analysis, s.d..
- [22] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Definitions of Terms and Symbols Relating to Soil and Rock Mechanics. In: Annual book of ASTM standards. Philadelphia, Pa, 1981. pt. 19 (ASTM-D-653-80).

- [23] WIEGEL, R.L. Earthquake Engineering, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1970.
- [24] HARRIS, C.M. & CREDE, C.E. Shock and vibration handbook. New York, N.Y., McGraw Hill, 1966.
- [25] CHERRY, S. Design input for seismic analysis. In : SOLNES, J. ed. Engineering seismology and earthquake engineering. Leiden, Noordhoff, 1974, p. 151-62 (Applied Sciences, Series E, n° 3).
- [26] HANSEN, R.J. Seismic design for nuclear power plants. Cambridge, Massachusetts, M.I.T. Press, 1970.
- [27] CLOUGH, R.W. & PENZIEN, J. Dynamics of structures . Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, 1975.
- [28] . NEWMARK, N.M. et alii. Seismic design spectra for nuclear power plants. Journal of the Power Division, 99 (PO2): 287-303, Nov. 1973.
- [29] OLIVER, B.M. & CAGE, J.M. ed. Electronic measurements and instrumentation. Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha , 1971.
- [30] MCGRAW-HILL encyclopedia of science and technology . New York, N.Y., Mc-Graw-Hill, 1960. v. 5, 7.
- [31] GOODRICH. G.D. Acceleration measurement. In: CONSIDINE, D.M. Handbook of applied instrumentation. New York, McGraw-Hill, 1964. p. 5.22-5.67.
- [32] DEN HARTOG, J.P. Mechanical vibrations. New York , McGraw-Hill, 1956.
- [33] LAPEDES, D.N. ed. McGraw-Hill encyclopedia of the geological sciences. New York, McGraw-Hill, 1978.
- [34] WERNER, S.D. Engineering characteristics of earthquake ground motions. Nuclear Engineering and Design, 36 (3): 367-95, Mar. 1976.
- [35] KIRILLOV, A.P. The main problems involved in the earthquake resistance of nuclear power stations . In: CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN FOR EARTHQUAKE ENVIRONMENTS. London, 7-9 Nov., 1978. Proceedings..., London, The Institution of Mechanical Engineers , 1978. p. 11-25.
- [36] VINCK, W. & MAURER, H.A. Measures taken in the member countries of the european communities for anti-seismic design compared to actual US practice. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, 4., San Francisco, USA, 15-19 August, 1977. Proceedings ..., Amsterdam, North-Holland Publishing, 1977. v.k(1), Session 1/2 , p. 1-9.

- [37] EUA. Atomic Energy Commission. Division of Technical Information. Nuclear reactors and earthquakes. Washington, D.C. 1963 (TID-7024).
- [38] LOCZY, L. & LADEIRA, E.A. Geologia estrutural e introdução a geotectônica. São Paulo, Edgard Blücher, 1976.
- [39] FISCHER, J.A. Earthquake engineering. Dames & Moore Engineering Bulletin, Los Angeles, (23): 1-14, Fev., 1963.
- [40] GROUEFF, S. O enigma da Terra. Tradução de M. Tati. Rio de Janeiro, Primor, 1976.
- [41] HUDSON, D.E. Destructive earthquake ground motions. In: IWAN, W. D. ed. Applied mechanics in earthquake engineering. New York, ASME, 1974, p. 1-34.
- [42] IACOPI, R. Earthquake country. Merlo Park, California, Lane Books, 1976.
- [43] JAY, F. IEEE standard dictionary of electrical and electronics terms. New York, IEEE, 1977.
- [44] HOUSNER, G.W. et alii. Generation of artificial earthquakes. JOURNAL OF THE ENGINEERING MECHANICS DIVISION, Proceedings of the ASCE, 90 (EM1): 113-50, 1964.
- [45] TRIFUNAC, M.D. & BRADY, A.G. A study on the duration of strong earthquake ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America, 65 (3): 581-626, June, 1975.
- [46] TRIFUNAC, M.D. & BRADY, A.G. On the correlation of seismic intensity scales with peaks of recorded strong ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America, 65 (1), Feb. 1975.
- [47] WERNER, S.D. Procedures for developing vibratory ground motion criteria at nuclear plant sites. Nuclear Engineering and Design, 36(3): 411-41, Mar. 1976.
- [48] N.M. NEWMARK CONSULTING ENGINEERING SERVICES. A study of vertical and horizontal earthquake spectra. Washington, D.C., Government Printing Office, 1973, (WASH-1255).
- [49] J.A. BLUME & ASSOCIATES. Recommendations for shape of earthquake response spectra. Washington, D.C., Government Printing Office, 1973 (WASH-1254).
-

- [50] GUZMAN, R.A. & JENNINGS, P.C. Determination of design spectra for nuclear power plants. In: NATIONAL STRUCTURAL ENGINEERING CONFERENCE. New Orleans, Louisiana, Apr. 1975. Proceedings..., New York, N.Y., 1975.
- [51] SEED, H.B. et alii. Site dependent spectra for earthquake resistant design. Berkley, California University. Earthquake Engineering Research Center, 1974 (EERC-74-12).
- [52] SCHNABEL, P. et alii. Modifications of seismograph records for effects of local soil conditions. Bull. Seismol. Soc. Amer. 62 (6), Dec. 1972.
- [53] LYSMER, J. et alii. Influence of baserock characteristic on ground response. Bull. Seismol. Soc. Amer. 61 (5), Oct. 1971.
- [54] IDRIS, J.M. & SEED, H.B. Seismic response of horizontal soil layers. J. Soil Mech. Found. Div. Amer. Soc. Civ. Eng. 94 (SM4), July, 1971.
- [55] SEED, H.B. & IDRIS, I.M. Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes. J. Soil Mech. Found. Div. Amer. Soc. Civ. Eng., 95 (SM1), Jan., 1969.
- [56] COULTER, H.W. et alii. Seismic and geologic siting considerations for nuclear facilities. In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 5, Rome, 1973. Proceedings ..., s.n.t.
- [57] HOUSNER, G.W. Intensity of ground shaking near the causative fault. In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 3. Auckland and Wellington, New Zealand, 1965. Proceedings ..., s.n.t..
- [58] SEED, H.B. & IDRIS, I.M. Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. Berkley, California University, Earthquake Engineering Research Center, 1970 (EERC-70-10).
- [59] SCHNABELL, B. et alii. SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Berkley, California University, Earthquake Engineering Research Center, December, 1972 (EERC 72-12).
- [60] SPIEGEL, M.R. Estatística. Tradução de P. Consentino. São Paulo, McGraw-Hill, 1975.
- [61] HOEL, P.G. Estatística Elementar. Tradução de A.L.B. Costa. Rio de Janeiro, Fundo de Cultura, 1961.

- [62] SCANLAN, R.H. et alii. On response spectra in seismic design of nuclear power plants. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIBRATION IN NUCLEAR PLANT. Keswick, UK, 9-12, May, 1978. Proceedings ..., London. The British Nuclear Energy Society, 1978. v. 2, p. 957-67.
- [63] SINGH, A.K. et alii. Influence of closely spaced modes in response spectrum method of analysis. In: SPECIALTY CONFERENCE ON STRUCTURAL DESIGN OF NUCLEAR PLANT FACILITIES. Chicago, Illinois, 17-18 Dec., 1973. Proceedings ..., New York, N.Y., American Society of Civil Engineers, 1974. v.2, p. 479-95.
- [64] NEWMARK, N.M. Earthquake response analysis of reactor structures. Nuclear Engineering and Design, 20, 303-22, 1972.
- [65] De PINERES, O.G. Site engineering information for nuclear projects. In: SPECIALTY CONFERENCE ON STRUCTURAL DESIGN OF NUCLEAR PLANT FACILITIES, 2. New Orleans, Louisiana, 8-10, Dec., 1975. Proceedings ..., New York, N.Y., American Society of Civil Engineers, 1975. v. I-A, p. 377-426.
- [66] SEMINÁRIO SOBRE ASPECTOS GEOLÓGICOS DE LOCALIZAÇÃO DE REATORES NUCLEARES. Rio de Janeiro, 16-24 abr. 1979. Rio de Janeiro, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 1979.
- [67] AL-SADI, H.N. Seismic exploration technique and processing. Stuttgart, Birkhäuser, 1980.
- [68] HOSSER, D. et alii. Methodenuntersuchungen zur erdbebensicheren Auslegung von Kernkraftwerken ; Abschlussbericht. Bonn, Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1979 (BMFT-RS-308).
- [69] IQBAL, M.A. & GOODLING, E.C. Seismic design of buried piping. In: SPECIALTY CONFERENCE ON STRUCTURAL DESIGN OF NUCLEAR PLANT FACILITIES. New Orleans, Louisiana, 8-10, Dec. 1975. Proceedings ..., New York, N.Y., ASCE, 1975. v. 1-a, p. 142-68.
- [70] SEED, H.B. & LISMER, J. Applications of finite element analysis in soil dynamics. In: DESAI, C.S. ed. Applications of the finite element method in geotechnical engineering. Vicksburg, Mississippi, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1972. v.3, p. 885-912.
-

- [71] CHEN, P.C. et alii. Soil-structure interaction of buried structures. In: SPECIALTY CONFERENCE ON STRUCTURAL DESIGN OF NUCLEAR PLANT FACILITIES, 2.1, New Orleans, Louisiana, 8-10, December, 1975. Proceedings .... New York, N.Y., ASCE, 1975. v. I-B, p. 1032-57.
- [72] CHENG, R.C. Considerations on the layout of seismic category I structures in a nuclear power plant. In: SPECIALTY CONFERENCE ON STRUCTURAL DESIGN OF NUCLEAR PLANT FACILITIES. New Orleans, Louisiana, 8-10, December, 1975. Proceedings ..., New York, N.Y., ASCE, 1975. v. I-B, p. 1127-34.
- [73] WIGHT, L.H. Site response calculations for nuclear power plants. In: SPECIALTY CONFERENCE ON STRUCTURAL DESIGN OF NUCLEAR PLANT FACILITIES, 2. New Orleans, Louisiana, 8-10, Dec., 1975. Proceedings..., New York, N.Y., ASCE, 1975. v. I-B, p. 1059-74.
- [74] STOYKOVICH, M. Damping associated with foundation-structure interaction in seismic analysis of nuclear power plants. In: SPECIALTY CONFERENCE ON STRUCTURAL DESIGN OF NUCLEAR PLANT FACILITIES, 2. New Orleans, Louisiana, 8-10, Dec., 1975. Proceedings..., New York, N.Y., ASCE, 1975. v. I-B, p. 961-88.
- [75] OGUNTALA, A. Effect of seismic foundation characteristics on site response analysis. In: SPECIALTY CONFERENCE ON STRUCTURAL DESIGN OF NUCLEAR PLANT FACILITIES. New Orleans, Louisiana, 8-10, Dec., 1975. Proceedings ..., New York, N.Y., ASCE, 1975. v. I-A, p. 867-84.
- [76] CHEN, P.C. et alii. Soil-structure interaction of buried structures. In: SPECIALTY CONFERENCE ON STRUCTURAL DESIGN OF NUCLEAR PLANT FACILITIES, 2. New Orleans, Louisiana, 8-10, Dec., 1975. Proceedings ..., New York, N.Y., ASCE, 1975. v. I-B, p. 1032-58.
- [77] CHOU, C.K. et alii. Major structural response methods used in the seismic safety margins research program. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, 5. Berlin, 13-17, Aug. 1979. Transactions ..., Amsterdam, North-Holland Publishing, 1979. v. k(a), Session 3/7, p. 1-8.
- [78] FISCHER, E.G. Seismic qualification of systems, structures, equipment and components. Nuclear Engineering and Design 46; 151-167, 1978.
-

- [79] SHUKLA, D.K. et alii. Safe shutdown earthquake loading: deterministic and probabilistic evaluations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, 3, London, UK, 1-5, Sept., 1975. Proceedings ..., Amsterdam, North-Holland Publishing, 1975. v. 4, part K(1/3), p. 1-11.
- [80] HISADA, T. et alii. Philosophy and practice of the aseismic design of nuclear power plants - summary of the guidelines in Japan. Nuclear Engineering and Design, 20: 339-70, 1972.
- [81] HALL, W.J. et alii. Statistical analyses of earthquake response spectra. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, 3. London, UK, 1-5, Sept., 1975. Proceedings ..., Amsterdam, North-Holland Publishing, 1975. v.4, part K(1/6), p. 1-11.
- [82] RIZZO, P.C. et alii. Vertical design response spectra for rock sites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, 3. London, UK, 1-5, Sept., 1975. Proceedings ..., Amsterdam, North-Holland Publishing, 1975. v.4, part K(1/9), p. 1-13.
- [83] GUPTA, D.C. et alii. Input criterion for seismic analysis of nuclear power plants. In: CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, 5. Berlin, Germany, 13-17, Aug., 1979. Transactions..., Amsterdam, North-Holland Publishing, 1979. v K(a), Session 1/6, p. 1-8.
- [84] KERntechnischer Ausschuss. Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen. Teil 1. Grundsätze. Köln, 1975. (KTA-2201-1).
- [85] KERntechnischer Ausschuss. Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen. Teil 5. Seismische Instrumentierung. Köln, 1975 (KTA-2201-5).
- [86] WALDRON, H.H. & MILLER, R.P. Geotechnical investigations at nuclear power plant sites. Nuclear Engineering and Design. 36 (3): 397-409, Mar. 1976.
- [87] STEVENSON, J.D. Survey of extreme load design - regulatory agency licensing requirements for nuclear power plants. Nuclear Engineering and Design, 37 ; 3-22, 1976.
- [88] MUTO, K. & OMATSUZAWA, K. Earthquake response analysis for a BWR nuclear power plant using recorded data. Nuclear Engineering and Design, 20; 385-92, 1972.
-

- [89] CHRISTIAN, J.T. Comparison of Japanese design earthquake response spectra with those prescribed by U.S. NRC Regulatory Guide 1.60. Nuclear Engineering and Design. 61(3): 369-82, 1980.
- [90] ROGERS, J.W. & ADAMS, J.A.S. Fundamentos de Geologia. Barcelona, Omega, 1969.
- [91] FUSCO, P.B. Conceitos estatísticos associados à segurança das estruturas. São Paulo, Grêmio Politécnico, 1975.
- [92] SETO, W.W. Vibrações Mecânicas. Tradução de N. Negrão e F.V. H. Silva, Rio de Janeiro, McGraw-Hill, 1971.
- [93] IDRIS, I.M. et alii. Analysis for soil-interaction effects for nuclear power plants. New York, N.Y., ASCE, 1979.
- [94] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Safety functions and component classification for BWR, PWR and PTR. Vienna, 1979 (IAEA - Safety Series No. 50-SG-D1).
- [95] —. Aseismic design and testing of nuclear facilities. Vienna, 1968 (IAEA - Technical Reports Series No. 88).
- [96] —. Safety in nuclear power plant siting. A code of practice. Vienna, 1978 (IAEA - Safety Series No. 50-C-S).
- [97] —. Earthquakes and associated topics in relation to nuclear power plant siting. Vienna, 1979. (Safety Series No. 50-SG-51).
- [98] NAIR, K. et alii. An approach to siting nuclear power plants: the relevance of earthquakes, faults and decision analysis. In: SYMPOSIUM ON SITING OF NUCLEAR FACILITIES. Vienna, 9-13, Dec., 1974. Proceedings ..., Vienna, 1975, p. 435-472.
- [99] LAPEDES, D.N. Dictionary of scientific and technical terms. New York, McGraw-Hill, 1974.
- [100] HURTY, W.C. & RUBINSTEIN, M.F. Dynamic of structures. New Jersey, Prentice-Hall, 1964.
- [101] BIGS, J.M. Introduction to structural dynamics, New York, N.Y., McGraw-Hill, 1964.
- [102] NEWMARK, N.M. & ROSENBLUETH. Fundamentals of earthquake engineering. London, Prentice-Hill, 1971.
- [103] CONSIDINE, D.M. Encyclopedia of instrumentation and control. New York, McGraw-Hill, 1971.
-

- [104] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUT. Earthquake instrumentation criteria for nuclear power plants. La Grange Park, Illinois, American Nuclear Society, 1974 (ANS-2.2/N18.5, 1974).
- [105] —. Nuclear safety criteria for the design of stationary pressurized water reactor plants. La Grange Park, Illinois, American Nuclear Society, 1973 (ANS-51.1/N18.2, 1973).
- [106] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Recommended practices for seismic qualification of class 1E equipment for nuclear generating stations. New York, N.Y., 1975 (IEEE - Std - 344).
- [107] BEYNON, D.R. Jr. & JARECKI, S.J. Engineering for earthquakes. Nuclear Energy Digest, No. 4, p. 17-23, 1976.
- [108] TOKARZ, F.J. et alii. Evaluation of methods for seismic analysis of nuclear fuel reprocessing plants. Livermore, Ca., Lawrence Livermore Laboratory, 1975, pt. 1 (UCRL 51802 pt. 1).
- [109] MOORE, W.W. & DONOVAN, N.C. The effect of soil properties on the seismic design of structures. Dames & Moore Engineering Bulletin, Los Angeles, (32): 1-15, Jan. 1967.
- [110] MERRIT, F.S. Structural theory. In: MERRIT F.S. Standard handbook for civil engineers. New York, N.Y., McGraw-Hill, 1968, p. 6.1-6.126.
- [111] BENDAT, J.S. & PIERSOL, A.G. Randon data: analysis and measurement procedures. New York, N.Y., Wiley Interscience, 1971.
- [112] VASCONCELLOS FILHO, A. O método dos elementos finitos: fundamentos teóricos - automatização - aplicações a problemas de placas e de elasticidade plana. Rio de Janeiro, UFRJ, 1970. Tese de Doutorado, COPPE.
- [113] FILHO, R.C.B.L. Controle estatístico de qualidade. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1976.
- [114] MURPHY, J.R. & O'BRIEN, L.J. The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other parameters. Bulletin of the Seismological Society of America, 67 (3): 877-915; June, 1977.
- [115] CONDON, E.U. Theory of Vibrations. In: CONDON, E.U. ed. Handbook of Physics, New York, McGraw-Hill, 1958. Cap. 2, p. 21-7.

- [116] EUA. Nuclear Regulatory Commission. Office of Standard Development. Site Investigation for foundations of nuclear power plants. Washington, D.C, March, 1979 (REG./GUIDE 1.132).
- [117] CORRY, R.T. Instruments. In: BAUMEISTER, T. ed. Mark's standard handbook for mechanical engineers. New York, McGraw-Hill, 1978. p. 16.2-16.25.
- [118] HALL, A.S. et alii. Theory and problems of machine design. New York, Schaum, 1961.
- [119] CHERRY, S. Earthquake ground motions: measurement and characteristics. In: SOLNES, J. ed. Engineering seismology and earthquake engineering. Leiden, Noordhoff, 1974, p. 87-124 (Applied Sciences, Series E, n° 3).
- [120] —. Estimating underground motions from surface accelerograms. In: SOLNES, J. ed. Engineering seismology and earthquake engineering. Leiden, Noordhoff, 1974, p. 125-150 (Applied Sciences, Series E, n° 3).
- [121] VALERA, J.E. & DONOVAN, N.C. Incorporation of uncertainties in the seismic response of soils. In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 5, Rome, Italy, June 1973. Proceedings ... New York, Dames & Moore, 1973.
- [122] DONOVAN, N.C. A statistical evaluation of strong motion data - including the february 9-1971 San Fernando earthquake. In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 5, Rome, Italy. June 1973. Proceedings ..., New York, Dames & Moore, 1973.
- [123] MARSHALL, P.D. Aspects of spectral differences between earthquakes and underground explosions. Geophys. J. Royal Astron. Soc. 20: 397-416, 1970.
- [124] HOUSNER, G.W. Behaviour of structures during earthquakes. J. Eng. Mech. Div., Amer. Soc. Civ. Eng., 85 (EM4): 1091-959, Oct. 1959.
- [125] NEWMARK, N.M. & HALL, W.J. Seismic design criteria for nuclear reactor facilities, In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 4, Santiago, Chile, 1969. Proceedings ..., s.n.t..
- [126] GARCIA, F. & ROESSET, J.M. Influence of damping on response spectra. Cambridge, Mass., Massachussets Institute of Technology, Dept. of Civil Engineering, 1970 (R. 70.4).