

INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA PARA CENTRAIS  
NUCLEARES

AUTOR: MURILLO SENNE JÚNIOR

ORIENTADOR: FLÁVIO SOARES DE MENEZES

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

"INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA PARA CENTRAIS NUCLEARES"

AUTOR: MURILLO SENNE JÚNIOR

ORIENTADOR: FLÁVIO SOARES DE MENEZES

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

Belo Horizonte - Julho/1983

Este trabalho foi realizado nas dependências do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/CDTN, da NUCLEBRÁS, em Belo Horizonte.

À minha esposa e filhos.

## AGRADECIMENTOS

Ao Sr. Flávio Soares de Menezes, meu orientador, que tornou possível a realização deste trabalho, pela grande contribuição técnica, estímulo e compreensão.

Aos meus pais, Murillo de Oliveira Senne e Rosinha Capeloza Senne, pelo incentivo recebido.

Aos Srs. Virgílio Mattos de Andrade e Silva, José Olympio Nardelli Monteiro de Castro e Luiz Augusto de Queiroz e Oliveira, por terem possibilitado a realização deste trabalho nas dependências do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, da NUCLEBRÁS.

À Sra. Márcia Valéria Lima Sandinha Fagundes e ao Sr. Maurício Vieira de Carvalho, pelo competente trabalho de datilografia e desenho.

À Seção de Documentação Técnica do CDTN, pelo pronto atendimento às minhas solicitações.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. SISMOLOGIA E ENGENHARIA DE TERREMOTOS .....	4
3. DEFINIÇÕES .....	7
3.1 Magnitude de um Terremoto .....	7
3.2 Intensidade de um Terremoto .....	8
3.3 Falha .....	8
3.4 Espectro de Resposta .....	9
3.5 Campo Livre .....	9
3.6 Ondas p .....	9
3.7 Ondas s .....	9
3.8 Abalo .....	10
3.9 Sistema Responsável pelo Histórico do Movimen to .....	10
3.10 Unidade Sensora de Aceleração .....	10
3.11 Unidade de Partida .....	10
3.12 Unidade de Registro .....	11
3.13 Interruptor Sísmico .....	11
3.14 Acelerógrafo de Pico .....	11
3.15 Registrador do Espectro de Resposta .....	11
3.16 Interruptor do Espectro de Resposta .....	12
3.17 Sismo Base de Operação .....	12
3.18 Sismo de Desligamento Seguro .....	12
3.19 Triaxial .....	13

3.20	Categoria Sísmica I .....	13
4.	TIPOS DE MOVIMENTOS DO SOLO CAUSADOS POR <u>SIS</u> MOS .....	14
5.	NORMAS E GUIAS QUE REGEM A INSTRUMENTAÇÃO <u>SÍS</u> MICA .....	15
6.	FUNDAMENTO TEÓRICO DA INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA .	20
7.	OBJETIVO DA INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA EM CENTRAIS NUCLEARES .....	28
8.	SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA PARA <u>CEN</u> TRAIS NUCLEARES .....	32
8.1	Sistema Responsável pelo Histórico do <u>Movimen</u> to .....	32
8.1.1	Unidades Sensoras .....	33
8.1.2	Unidade de Partida .....	34
8.1.3	Unidade de Registro .....	36
8.1.4	Unidade de Controle e Suprimento de Energia ..	37
8.1.5	Unidade de "Playback" .....	38
8.2	Interruptor Sísmico .....	39
8.3	Registrador do Espectro de Resposta e Interrup tor do Espectro de Resposta .....	40
8.4	Acelerógrafo de Pico .....	42
9.	DISCRIMINAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES <u>DA</u> INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA DE UMA CENTRAL NUCLEAR.	43
10.	OPERAÇÃO DO SISTEMA E REDUÇÃO DE DADOS .....	52

11.	CONCLUSÃO .....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56
	TABELAS .....	61
	FIGURAS .....	63
	APÊNDICE .....	77

## RESUMO

Esta dissertação descreve um sistema de instrumentação sísmica, utilizado em Centrais Nucleares, para monitorar os parâmetros de projeto dos sistemas, estruturas e componentes, necessários à segurança dessas Centrais, quando sujeitas à ação de um terremoto.

A instrumentação descrita baseia-se nas normas vigentes, sendo indicada a quantidade mínima de sensores e de outros componentes exigidos, sua localização geral, a operação do sistema como um todo e o tratamento dos dados registrados. Não se deteve em detalhes construtivos dos diversos dispositivos utilizados, mas apresentou-se um estudo mais detalhado do acelerômetro, que constitui o componente básico da instrumentação sísmica.

## ABSTRACT

This dissertation describes a seismic instrumentation system used in Nuclear Power Plants to monitor the design parameters of systems, structures and components, needed to provide safety to those Plants, against the action of earthquakes.

The instrumentation described is based on the nuclear standards in force. The minimum amount of sensors and other components used, as well as their general localization, is indicated. The operation of the instrumentation system as a whole and the handling of the recovered data are dealt with accordingly. The various devices used are not covered in detail, except for the accelerometer, which is the seismic instrumentation basic component.

## 1. INTRODUÇÃO

A maioria dos sismos que ocorrem na terra são tão pequenos que passam despercebidos, exceto para os mais delicados sismógrafos. Às vezes, entretanto, ocorrem fortes movimentos, que liberam quantidades imensas de energia elástica armazenada, e a dissipação rápida desta energia, em forma de ondas sísmicas, causa tremores do solo. O movimento relativo do solo raramente é superior a alguns centímetros, mas os movimentos súbitos, desta categoria, podem resultar em danos catastróficos para edifícios e estruturas artificiais.

Apesar do Brasil ser um país de natureza assísmica, já foram aqui registrados sismos que alcançaram a intensidade V a VI na escala Mercalli Modificada. Outros países como os Estados Unidos da América estão potencialmente sujeitos a sismos de intensidade máxima variável de acordo com o local, havendo igualmente regiões consideradas assísmicas. Entretanto, as normas da USNRC exigem que as estruturas Classe I das Centrais Nucleares sejam projetadas para resistirem a um sismo de aceleração horizontal mínima de 0,1 g. No Brasil as Centrais Nucleares devem também ser projetadas para uma aceleração horizontal mínima de 0,1 g, como tem sido adotado para as regiões assísmicas de outros países.

De uma maneira geral, a bibliografia disponível sobre a instrumentação sísmica necessária para a monitoração dos parâmetros utilizados no projeto de uma Central Nuclear é relativamente escassa. A USNRC expediu o Regulatory Guide 1.12 e a

American National Standards Institute (ANSI) aprovou a norma ANS 2.2, regulamentando o assunto. Além disso, artigos publicados em periódicos, informações mais ou menos sucintas de fabricantes e basicamente um livro denominado Earthquake Engineering, indicados na referência bibliográfica, constituem as principais fontes de informação nas quais se baseou este trabalho. Não se desceu a detalhes construtivos dos diversos dispositivos utilizados, mas é apresentada uma dissertação geral sobre o sistema em si, tal como é exigido pelas normas vigentes, com uma explicação da finalidade de cada componente utilizado pela instrumentação e da interligação dos mesmos para formar um sistema. É indicada a quantidade mínima de sensores e outros dispositivos exigidos, bem como sua localização geral prevista em norma, a operação do sistema como um todo e o tratamento dos dados registrados, quer para finalidades simples de arquivo, quer para análise posterior dos efeitos de um terremoto sobre as estruturas e componentes da Central Nuclear, caso venha a ocorrer um sismo de magnitude suficiente para exigir tal investigação.

De todos os componentes da instrumentação utilizados, o mais básico é certamente o acelerômetro, a partir do qual se obtém o histórico do movimento do terreno em diversos pontos da Central Nuclear e ao longo de cada um dos eixos da estrutura. O acelerômetro clássico é constituído de um sistema mecânico de massa sísmica, sustentada por molas e ao qual se incorpora um amortecimento tipicamente da ordem de 70%, já que este valor do fator de amortecimento provê uma boa resposta senoidal estacionária e uma ultrapassagem razoável para estímulos

transitórios. Com o passar dos anos, esse sistema foi aperfeiçoado até se chegar ao acelerômetro de balanceamento de força, hoje bastante difundido e cujo funcionamento se baseia na introdução de realimentação negativa, com a finalidade de tornar o sistema mais rígido, mas sem perda de sensibilidade, aumentando-se a frequência natural do sistema e diminuindo-se a resposta do sistema para excitações em eixos transversais com o eixo de medida. Devido à importância desse componente, foi redigido um capítulo à parte, baseado principalmente na Ref. /27/, incluindo a teoria dos principais tipos de acelerômetros usados e que procura apresentar, de maneira integrada, vários aspectos do funcionamento desse sensor. Esse capítulo, por uma questão de necessidade, utiliza os recursos da teoria de sistemas lineares e por conter um tratamento analítico não utilizado nos demais capítulos do trabalho, foi colocado no apêndice.

## 2. SISMOLOGIA E ENGENHARIA DE TERREMOTOS

Durante muitos séculos, vários dispositivos rudimentares foram usados para detectar sismos, até que por volta de 1930 a instrumentação sísmica teve um avanço em seu desenvolvimento, devido ao interesse na constituição interna da terra e na localização do epicentro de terremotos. Os instrumentos sísmológicos desenvolvidos para esta finalidade são extremamente sensíveis, podendo detectar instantaneamente um pequeno sismo que esteja ocorrendo a milhares de quilômetros de distância.

Estes instrumentos são usados pelos sismologistas e são cuidadosamente projetados para pesquisas específicas de interesse dos geofísicos, mas são instrumentos inadequados para a aplicação direta em engenharia, pelas seguintes razões:

a) O sismologista deseja registrar pequenos sismos que ocorram em qualquer ponto da terra. Isto requer aparelhos sensíveis, de grande ampliação. Um forte terremoto perto do instrumento certamente ocasionará uma leitura fora de escala e poderá até danificar o aparelho.

O engenheiro requer um aparelho robusto, que registre, com exatidão, choques fortes nas vizinhanças do aparelho.

b) O objetivo primordial dos sismologistas consiste em um estudo da constituição interna da terra e seus aparelhos são colocados, se possível, em um



leito rochoso, para eliminar os efeitos geológicos do local e condições do solo.

O engenheiro deseja saber o movimento do solo, em lugares em que são localizadas estruturas de engenharia e às vezes em lugares inteiramente inadequados para observatórios sismológicos.

c) Para investigações sismológicas, a determinação precisa do tempo absoluto de chegada das ondas é essencial, enquanto que medidas reais do movimento do solo são freqüentemente de pequena importância.

O engenheiro não precisa do tempo absoluto, mas o movimento do solo deve ser conhecido com exatidão, para determinação dos efeitos do terremoto em estruturas.

Desta forma, nota-se que os objetivos diferem fundamentalmente e que o engenheiro necessita de instrumentos basicamente diferentes dos exigidos pelos sismologistas. Isto não implica que o engenheiro não obtenha imensos benefícios das atividades do sismologista. É do sismologista que o engenheiro obtém informações sobre a distribuição de sismicidade, no tempo e no espaço, sobre a terra, para que possa avaliar a probabilidade de ocorrência de terremotos de diversas intensidades, em qualquer lugar.

O primeiro sismógrafo para uso em engenharia foi desenvolvido pela U.S. Coast e Geodetic Survey (USCGS), em 1932, e foi usado para registrar um terremoto em Long Beach, na Califórnia.

fôrnia, em 1933. A partir de então, os instrumentos para movi  
mentos fortes têm sido desenvolvidos em muitos países.

A instrumentação sísmica em Centrais Nucleares consisis  
te principalmente destes instrumentos para movimentos fortes.

### 3. DEFINIÇÕES

#### 3.1 Magnitude de um Terremoto

Um grande terremoto é associado ao colapso, originário de tensões, de uma grande área de falha geológica, com liberação de considerável quantidade de energia de deformação elástica, na forma de ondas sísmicas, e com uma grande área da superfície do terreno sujeita a fortes tremores de terra. É importante, do ponto de vista de engenharia, ser capaz de descrever, quantitativamente, a grandeza do terremoto.

Em 1935, C.F. Richter, do Instituto de Tecnologia da Califórnia, definiu a magnitude de um terremoto para choques rasos como sendo:

$$M = \log \frac{A}{A_0}$$

onde M é a magnitude do terremoto; A é a amplitude máxima registrada por um sismógrafo Wood-Anderson (em milésimos de milímetro), a uma distância de 100 km do centro do distúrbio, e  $A_0$  é uma amplitude de um milésimo de milímetro. O instrumento Wood-Anderson tem um período natural de 0,8 segundo, amortecimento quase crítico e amplificação estática nominal de 2.800.

Terremotos de magnitude 5,0, ou maiores, geram movimentos do solo suficientemente fortes para serem potencialmente

### 3. DEFINIÇÕES

#### 3.1 Magnitude de um Terremoto

Um grande terremoto é associado ao colapso, originário de tensões, de uma grande área de falha geológica, com liberação de considerável quantidade de energia de deformação elástica, na forma de ondas sísmicas, e com uma grande área da superfície do terreno sujeita a fortes tremores de terra. É importante, do ponto de vista de engenharia, ser capaz de descrever, quantitativamente, a grandeza do terremoto.

Em 1935, C.F. Richter, do Instituto de Tecnologia da Califórnia, definiu a magnitude de um terremoto para choques rasos como sendo:

$$M = \log \frac{A}{A_0}$$

onde M é a magnitude do terremoto; A é a amplitude máxima registrada por um sismógrafo Wood-Anderson (em milésimos de milímetro), a uma distância de 100 km do centro do distúrbio, e  $A_0$  é uma amplitude de um milésimo de milímetro. O instrumento Wood-Anderson tem um período natural de 0,8 segundo, amortecimento quase crítico e amplificação estática nominal de 2.800.

Terremotos de magnitude 5,0, ou maiores, geram movimentos do solo suficientemente fortes para serem potencialmente

prejudiciais às estruturas. Para magnitudes menores que aproximadamente 5,0, é improvável que o movimento do solo seja prejudicial, por causa de sua duração curta e aceleração moderada.

O uso da escala de magnitude é um modo conveniente de classificar os terremotos, segundo a energia liberada. Entretanto, devido à não uniformidade da crosta terrestre, diferentes orientações de falhas, etc., a magnitude M não é uma medida precisa da energia liberada por um terremoto.

### 3.2 Intensidade de um Terremoto

A intensidade de um terremoto é a medida de seus efeitos no homem, nas estruturas construídas pelo homem e na superfície da terra, em um determinado local. Intensidade significa o valor numérico na escala Mercalli Modificada. Esta escala é apresentada na Tabela 3-1.

### 3.3 Falha

Uma falha é uma deformação da crosta terrestre ao longo da qual ocorrem deslizamentos diferenciais, de materiais adjacentes da terra paralelamente ao plano de ruptura. Ela é diferente de outros tipos de rupturas como os deslizamentos, fendas e crateras. Uma falha pode ter ranhuras ou brechas entre suas duas paredes e inclui qualquer flexão monoclinal associada ou outro aspecto geológico estrutural semelhante.

### 3.4 Espectro de Resposta

Um espectro de resposta é o desenho das máximas respostas (aceleração, velocidade ou deslocamento) de uma família de osciladores amortecidos idealizados, com um grau de liberdade, em função das frequências naturais (ou períodos) dos osciladores, para um movimento vibratório específico aplicado nos seus apoios.

### 3.5 Campo Livre

Campo livre é o terreno em condições naturais, sem a presença de estruturas construídas pelo homem.

### 3.6 Ondas p

São ondas longitudinais, originárias de um sismo, cujo efeito faz com que o meio de propagação se movimente na direção da propagação.

### 3.7 Ondas s

São ondas transversais, originárias de um sismo, cujo efeito faz com que o meio de propagação se movimente perpendicularmente à direção de propagação.

### 3.8 Abalo

Durante a ocorrência de um evento sísmico, o que se tem normalmente é uma seqüência de eventos, sendo o mais intenso deles denominado abalo principal; os eventos que se seguem ao abalo principal são denominados pós-abalos.

### 3.9 Sistema Responsável pelo Histórico do Movimento

É um sistema capaz de medir e registrar permanentemente a aceleração absoluta em função do tempo. Os componentes deste sistema podem ser reunidos em uma unidade autônoma ou podem ser localizados separadamente.

### 3.10 Unidade Sensora de Aceleração

É um dispositivo capaz de detectar a aceleração absoluta e transmitir os dados para um registrador.

### 3.11 Unidade de Partida

É um dispositivo que tem a função de dar partida (colocar em funcionamento) ao sistema responsável pelo histórico do movimento.

### 3.12 Unidade de Registro

É um dispositivo capaz de registrar dados de aceleração em função do tempo.

### 3.13 Interruptor Sísmico

É um dispositivo capaz de fornecer um sinal para indicação remota e imediata de que um valor pré-selecionado de aceleração foi excedido.

### 3.14 Acelerôgrafo de Pico

É um instrumento que não requer nenhuma fonte de energia e tem a capacidade de registrar permanentemente os picos de aceleração.

### 3.15 Registrador do Espectro de Resposta

É um instrumento que tem a capacidade de sentir movimentos e registrar permanentemente o espectro da aceleração em freqüências especificadas.

### 3.16 Interruptor do Espectro de Resposta

É um instrumento que tem a capacidade de fornecer um sinal para indicação remota imediata de que valores pré-selecionados do espectro da aceleração foram ultrapassados.

### 3.17 Sismo Base de Operação

O Sismo Base de Operação representa o sismo que se pode razoavelmente esperar que afete o local da Central Nuclear, durante a vida útil da mesma, considerando a geologia e sismologia regionais e locais e características específicas locais do terreno. É o sismo que produz o movimento vibratório do terreno para o qual certas partes da instalação, necessárias à operação contínua da Central Nuclear, sem risco indevido à saúde e segurança do público, são projetadas para permanecerem funcionais.

### 3.18 Sismo de Desligamento Seguro

O Sismo de Desligamento Seguro representa o abalo sísmico do terreno que se baseia em uma avaliação do máximo sismo potencial, considerando a geologia e sismologia regionais e locais e características específicas locais do terreno, para o qual certas estruturas, sistemas e componentes são projetados para permanecerem funcionais. Estas estruturas, sistemas e com

ponentes são aqueles necessários para assegurar:

1. A integridade do sistema sujeito à pressão do arrefecedor do reator;
2. A capacidade de desligar o reator e de mantê-lo em uma condição segura após o desligamento;
3. A capacidade de evitar ou mitigar as conseqüências de acidentes que poderiam resultar em exposições potenciais para o público em geral.

### 3.19 Triaxial

Descreve a função de um instrumento ou grupo de instrumentos operando em três eixos ortogonais entre si, um dos quais é vertical.

### 3.20 Categoria Sísmica I

Todas as estruturas, sistemas e componentes projetados para permanecerem operacionais durante a ocorrência do Sismo de Desligamento Seguro são designados como pertencendo à Categoria Sísmica I.

#### 4. TIPOS DE MOVIMENTOS DO SOLO CAUSADOS POR SISMOS

Os movimentos do terreno, devido a sismos, são de quatro tipos, que devem ser claramente distinguidos:

- i. O sismo pode ocasionar deslocamentos de terra ou movimentos locais superficiais, que podem destruir estruturas simples, removendo sua fundação;
- ii. a trepidação do terreno com o sismo pode resultar em uma consolidação ou acomodação do solo e subsolo, em larga escala, que poderá danificar estruturas através da deformação excessiva da fundação;
- iii. deslocamentos repentinos de falhas podem ocorrer na superfície do terreno;
- iv. as acelerações do terreno com o sismo podem induzir forças inerciais em uma estrutura, suficientes para danificá-la.

Os três primeiros efeitos podem quase ser chamados de efeitos estáticos. Embora eles sejam iniciados por vibrações do terreno com um sismo, os movimentos de terra, propriamente, são relativamente lentos e não estabelecem forças inerciais apreciáveis nas estruturas.

5. NORMAS E GUIAS QUE REGEM A INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA

Antes de 1971, os acelerôgrafos triaxiais para movimentos fortes foram instalados em Centrais Nucleares selecionadas, analisando-se cada caso em particular. A Atomic Energy Commission (AEC), dos Estados Unidos da América, não tinha a respeito nenhuma diretriz formal publicada. Entretanto, foram feitos acordos para se instalarem de um a três instrumentos registradores em filme fotográfico, em certos locais. As unidades foram instaladas do lado de fora da contenção e normalmente na fundação da contenção ou no campo livre. Os acelerôgrafos para movimentos fortes, instalados durante este período, foram unidades autônomas, contendo em uma única caixa um disparador regulável, acelerômetros triaxiais, sistema temporizador interno, filme registrador, bateria recarregável para suprimento de energia e controles para calibração. O recolhimento dos registros, os testes periódicos e a manutenção de cada um destes instrumentos eram executados no local da instalação dos mesmos.

Em março de 1971, a AEC publicou o Safety Guide 12, "Instrumentation for Earthquakes", contendo uma recomendação sobre o tipo e localização de instrumentos sísmicos. Durante os três anos seguintes, mais de vinte Centrais Nucleares instalaram sistemas de instrumentos com unidades remotas de sensores triaxiais de aceleração, unidade remota de partida, acelerôgrafos registradores de pico de aceleração e unidade central, composta de unidade de registro em fita magnética, unidade de controle e unidade de "playback". A mudança para sensores remotos,

com central de registros em fita magnética, permitiu o conhecimento imediato da aceleração do terreno, em função do tempo, na própria Central Nuclear. Por sua vez, a unidade central permite o acesso, a qualquer momento, aos sistemas de calibração, registro e "playback".

A regulamentação da AEC, durante esse período, exigiu que os valores máximos da aceleração da fundação estivessem disponíveis, na Sala de Controle, poucos minutos após a ocorrência do sismo, para comparação com os critérios de projeto. Foram então estabelecidos, pelas Centrais Nucleares, procedimentos para inspeção visual dos registradores do sistema responsável pelo histórico do movimento. Esses procedimentos incluíram a determinação dos valores máximos registrados horizontalmente e verticalmente e a comparação com os respectivos valores do sismo base de operação.

Em 1968, a American Nuclear Society (ANS) começou a elaborar uma norma para o desenvolvimento industrial da instrumentação sísmica, culminando em 1974 com a apresentação da ANS 2.2, "Earthquake Instrumentation Criteria for Nuclear Power Plants". Após aprovação da ANS 2.2 pelo American National Standards Institute (ANSI), com a denominação alternativa ANSI N918.5-1974, a Nuclear Regulatory Commission (NRC) substituiu o Safety Guide 12 pelo Regulatory Guide 1.12, "Instrumentation for Earthquakes".

O Regulatory Guide 1.12 é baseado na norma ANSI acima referida, apresentando algumas modificações e adições. O Regulatory Guide 1.12 recomenda um número maior de instrumentos

e a razão disto deriva da modificação feita, em dezembro de 1973, no 10 CFR 100, Apêndice A, "Seismic and Geologic Siting Criteria", exigindo que o movimento vibratório do terreno seja definido pelo espectro de resposta. Tornou-se assim possível comparar o espectro de projeto do sismo base de operação com o espectro de um sismo real, no nível da fundação da contenção, para determinar se a Central Nuclear poderá ou não continuar a operar com segurança. O Regulatory Guide 1.12 recomenda também um sistema distinto, que acione um alarme, quando a máxima aceleração do solo, de projeto, for excedida.

O Regulatory Guide 1.12 recomenda os seguintes itens de instrumentação, para instalações com aceleração máxima da fundação correspondente a um sismo de desligamento seguro de valor menor que 0,3 g:

- Sensores triaxiais de aceleração, do sistema responsável pelo histórico do movimento, em três ou quatro lugares distintos.
- Interruptor sísmico triaxial em um local.
- Registradores triaxiais do espectro de resposta, em quatro locais, sendo um com indicação remota, para sinalizar quando as acelerações do sismo base de operação forem excedidas na fundação da contenção.
- Registradores triaxiais, do pico de aceleração, em três lugares.

Se a aceleração máxima na fundação, correspondente ao

sismo de desligamento seguro, for igual ou maior que 0,3 g, é recomendado um acréscimo na quantidade de instrumentos a serem instalados.

O sistema responsável pelo histórico do movimento registra continuamente a aceleração triaxial de certos pontos da instalação ou do terreno, a partir do instante em que a unidade de partida ativa o sistema, até que a aceleração, na unidade de partida, caia abaixo do valor pré-selecionado. A função do interruptor sísmico é a de anunciar um alarme, quando o valor de pico do movimento do solo exceder os critérios de projeto do sismo base de operação. O sistema de registro do espectro de resposta registra o espectro de resposta amortecido e provê sinalização de alarme na Sala de Controle, quando os valores do sismo base de operação, para o projeto da fundação da contenção, são excedidos em quaisquer das frequências monitoradas. O acelerôgrafo de pico registra o pico da aceleração triaxial, mas não registra dados de frequência.

Um sistema que atende as recomendações do Regulatory Guide 1.12 deve conter:

- Sistema Responsável pelo Histórico do Movimento
  - . Unidades Sensoras Remotas
  - . Unidade de Partida Remota
  - . Unidade de Registro
  - . Unidade de Controle e Suprimento de Energia
  - . Unidade de "Playback"

- . Cabos e Interconexões.
- Interruptor Sísmico
  - . Unidade Interruptora Remota
  - . Unidade de Controle e Energia
  - . Cabos e Interconexões.
- Sistema de Registro do Espectro de Resposta
  - . Unidade Sensora Remota (ativa)
  - . Painel de Alarme do Sismo Base de Operação
  - . Unidades Sensoras Remotas (passivas)
  - . Cabos e Interconexões.
- Registradores do Pico de Aceleração
  - . Sensores
  - . Unidades Registradoras.

Para se entenderem os requisitos básicos de projeto de um sismógrafo, adequado para aplicações em engenharia, deve-se considerar:

- i. o uso para o qual os dados serão destinados;
- ii. as características do movimento do solo que será medido.

O problema fundamental que confronta o engenheiro estrutural, em um projeto para suportar sismos, é a determinação das forças dinâmicas induzidas nas estruturas, pelo movimento da base. As equações, que relacionam o movimento sísmico do solo às forças estruturais resultantes, fornecem o deslocamento relativo da estrutura em termos da aceleração do solo. Isto mostra que para o cálculo desejado da resposta estrutural, é necessário conhecer a aceleração real do solo em função do tempo. Pelo fato de haver uma simples relação matemática entre deslocamento, velocidade e aceleração, poder-se-ia pensar que é indiferente qual das grandezas deva ser medida originariamente. Entretanto, ao se considerar a precisão necessária destas medidas, conclui-se que é essencial que a medida original seja a aceleração do solo, devido ao fato da integração ser um processo mais preciso que a diferenciação.

Uma curva de aceleração em função do tempo pode ser integrada para fornecer a velocidade e se integrada novamente fornecerá o deslocamento com uma precisão aceitável. Em geral

não é possível reverter este processo e obter uma curva utilizável da aceleração, a partir da curva de deslocamento, pela diferenciação; a perda de precisão na diferenciação não pode ser evitada, não importando como a operação seja executada, seja ela por técnica elétrica, mecânica ou numérica. Conclui-se então que o transdutor básico de um sismógrafo deve operar como um acelerômetro.

Os acelerômetros são usualmente do tipo massa sísmica, conforme mostrado na Figura 6-1. Uma massa sísmica, suportada por molas, é montada em uma caixa apropriada, provida de um elemento sensor para detectar o movimento relativo entre a massa e a caixa. Utiliza-se também um elemento amortecedor, que na Figura é representado por um amortecedor a êmbulo, montado entre a massa e a caixa.

Idealmente, a massa deveria ficar imóvel, enquanto a caixa move-se com o corpo a qual está presa. Se isto fosse realmente realizado, o movimento relativo, entre a massa e a caixa, seria idêntico ao movimento do corpo suporte e a massa formaria uma verdadeira referência no espaço. Na realidade, é claro, a massa também se move, por causa das forças aplicadas a ela, pelas molas e pelo amortecedor e, por este motivo, somente se aproxima de uma referência fixa. O grau de aproximação é determinado pelas relações massa-mola-amortecedor e pela faixa de magnitudes do movimento medido.

Basicamente, a ação do instrumento sísmico é uma função da aceleração através da inércia da massa. O sinal de saída, contudo, é determinado pelo movimento relativo entre a massa

sa e a caixa. Isto resulta em duas variedades de instrumentos de massa sísmica, o vibrômetro e o acelerômetro. Alguns tipos de detectores de vibração, comumente usados, empregam um transdutor, no qual é usado o movimento relativo entre uma bobina e o campo magnético de um imã, sendo o sinal de saída proporcional à taxa com a qual as linhas de fluxo são cortadas.

Pela seleção apropriada da frequência natural e do amortecimento, é possível projetar o instrumento sísmico tal que o deslocamento relativo, entre a massa e a caixa, seja uma função da aceleração. O sinal de saída de tal instrumento pode, por este motivo, ser calibrado em termos de aceleração e o instrumento será um acelerômetro.

A próxima consideração a ser feita é como projetar um instrumento que irá medir a aceleração absoluta do solo, na faixa exigida de períodos, e na ausência de um ponto fixo de referência. A solução para este problema é indicada na Figura 6-2. A linha hachurada, no alto, do lado esquerdo do diagrama, representa o solo, cujo movimento quer-se determinar. Uma massa  $m$  é presa por meio de uma mola  $k$  e um elemento de amortecimento viscoso  $c$ . Isto constitui o instrumento, cujo sinal de saída é o deslocamento relativo entre a massa e o solo, que pode ser medido, dispensando qualquer ponto de referência fixa. Pode ser mostrado facilmente, pela equação de movimento do sistema massa-mola, que, para qualquer período particular de movimento do terreno, o sinal de saída é proporcional à aceleração do solo. Entretanto, o fator de proporcionalidade depende do período do movimento do terreno e o objetivo do projeto do instrumento é fazer

a resposta tão independente do período quanto possível. A forma de onda da aceleração do terreno inclui muitos componentes de períodos, cobrindo toda a faixa de períodos de interesse estrutural e para reproduzir com precisão a forma de onda, o instrumento deve registrar cada componente com o mesmo fator de proporcionalidade.

A curva de resposta do instrumento da Figura 6-2 mostra como isto pode ser feito, satisfatoriamente, na prática. Se a curva fosse uma linha reta horizontal, a resposta do instrumento seria independente do período. Pode ser visto que para uma escolha adequada de amortecimento em torno de 0,6 a 0,7 do valor crítico, é possível obter-se uma característica do instrumento que é aproximadamente constante, em uma faixa de períodos desde  $T_n/T = 0$  (onde  $T_n$  é o período natural não amortecido e  $T$  é o período de vibração do solo) até um período relativamente próximo do período natural do sistema massa-mola do instrumento. Portanto, o projeto de um transdutor de acelerôgrafo deve satisfazer duas condições principais:

- i. O período natural do instrumento deve ser inferior ao menor período a ser medido;
- ii. o amortecimento deve situar-se entre 0,6 e 0,7 do amortecimento crítico.

Nestas condições, o instrumento dará um registro fiel da componente de período mais curto e todos os períodos mais longos serão medidos ainda com maior precisão.

Uma outra dificuldade, que aparece no projeto de ins

trumento do tipo acima, é um defasamento entre o movimento do solo e o deslocamento relativo medido pelo transdutor, que introduziria distorção de fase. Há três casos em que essa distorção deixa de existir. Primeiro, se não há defasamento de nenhum dos componentes de uma forma de onda complexa, não haverá nenhuma distorção. Este caso dificilmente ocorrerá na prática. Segundo, quando todos os componentes se atrasam de  $180^\circ$ , suas magnitudes relativas permanecem inalteradas, ocorrendo simplesmente uma mudança de sinal em cada componente e na forma de onda resultante, sem introduzir distorção. Terceiro, pode ser mostrado que se o defasamento puder ser dado por uma função linear da frequência, então a onda de saída resultante terá a mesma forma da onda de entrada, com uma pequena constante de defasamento. Esta constante de defasamento simplesmente desloca um pouco a escala de tempo, mas isto não é importante para os objetivos em consideração. Felizmente, ocorre que um elemento transdutor, tendo um amortecimento em torno de 65% do amortecimento crítico, possui uma curva de defasamento em função da frequência que é uma boa aproximação de uma linha reta. Assim, o mesmo valor de amortecimento que dá uma ótima curva de resposta de amplitude é também o melhor valor sob o ponto de vista de deslocamento de fase. Conclui-se então que o valor de amortecimento de 0,6 a 0,7 do amortecimento crítico é um ótimo valor, que produz uma resposta de amplitude e de fase satisfatórias, para períodos naturais que são menores que o menor período a ser medido.

Lembrando que os menores períodos de interesse em movimentos do terreno devido a sismos estão em torno de 0,1 segundo, é evidente que o período do acelerôgrafo deve ser um pouco

menor que 0,1 segundo, se possível. Esta é a consideração que fixou o período usual do acelerôgrafo padrão USCGS para movimentos fortes, numa faixa de 0,05 a 0,08 segundo. A desvantagem de se reduzir ainda mais o período do instrumento para aumentar a precisão em períodos mais curtos de movimento do solo, é que a sensibilidade do instrumento seria reduzida. A deflexão do instrumento, por unidade de aceleração de entrada, é proporcional ao quadrado do período natural não amortecido, de modo que um instrumento de menor período terá menor deflexão, para uma dada aceleração do solo.

Uma das formas na qual o sistema massa-mola-amortecedor, do acelerôgrafo teórico da Figura 6-2, aparece na prática, pode ser vista no diagrama esquemático do elemento transdutor do acelerôgrafo USCGS, mostrado na Figura 6-3. A massa móvel, neste instrumento, é um quadro retangular de fio, que oscila em torno de um eixo vertical de suspensão a torção, ao longo de um lado. A força elástica restauradora é, desta maneira, um conjugado na suspensão a torção, em vez de uma força devida a uma mola retilínea, como na Figura 6-2. À medida que o quadro de fio gira, ele se move no campo magnético formado pelo ímã permanente, e as correntes induzidas no quadro estabelecem forças de amortecimento viscoso. A vantagem do arranjo torcional em vez de retilíneo, é que o deslocamento angular pode ser facilmente amplificado e registrado óticamente, pela montagem de um espelho sobre a suspensão torcionada.

Neste mesmo elemento transdutor, pode-se usar, em lugar do sistema de registro ótico, uma pequena palheta presa ao

elemento rotativo, cujo movimento altera o entreferro num sistema magnético de relutância variável e, por meio de circuitos eletrônicos apropriados, o movimento é registrado como um sinal de frequência modulada numa fita magnética, que naturalmente oferece vantagens no processamento de dados.

Uma modificação deste mesmo elemento é usada em outros acelerógrafos, onde o quadro de fio que forma a massa sísmica é substituído por uma bobina retangular de muitas espiras. Pela mudança da resistência externa no circuito da bobina, o amortecimento pode ser ajustado a qualquer valor desejado. A vantagem do uso do sistema de bobinas é que um sinal elétrico externo pode ser facilmente introduzido no elemento transdutor, para fins de calibração.

Uma outra forma na qual o sistema massa-mola-amortecedor aparece na prática pode ser vista no diagrama esquemático do acelerômetro de balanceamento de força, mostrado na Figura 6-4. Neste acelerômetro, o movimento da massa ou pêndulo é restrito a um ângulo muito pequeno, tipicamente abaixo de  $0,1^\circ$ , para evitar a sensibilidade as acelerações ao longo de um eixo perpendicular ao eixo primário.

Como a sensibilidade transversal é proporcional ao seno do ângulo de deflexão do pêndulo, o movimento do elemento sísmico deve ser mantido em valores pequenos para que o sistema seja preciso. O acelerômetro de balanceamento de força usa uma "mola elétrica" para manter o deslocamento em valores bem pequenos.

O instrumento é equipado com um dispositivo de detec

tação (pickoff), que detecta o movimento da massa. O sinal de saída do "pickoff", resultante do movimento da massa, é levado a um servo amplificador de alto ganho, que energiza uma bobina de balanceamento de força ou gerador de torque, que produz uma força suficiente para retornar a massa a uma posição muito próxima de sua posição de nulo. A saída do amplificador é uma tensão proporcional à aceleração que está sendo medida.

7. OBJETIVO DA INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA EM CENTRAIS NUCLEARES

Basicamente, o objetivo da instrumentação sísmica em Centrais Nucleares é fornecer informações com relação à excitação sísmica do terreno e a resposta vibratória resultante dos vários equipamentos e estruturas importantes do ponto de vista de segurança, no caso de ocorrência de um sismo. Os dados obtidos através desta instrumentação ajudam na avaliação dos seguintes itens:

- i. Saber se o espectro de resposta de projeto utilizado foi ou não excedido;
- ii. saber se a resposta vibratória calculada, usada no projeto de estruturas e equipamentos, foi ou não excedida;
- iii. investigar o rigor dos modelos matemáticos utilizados na análise sísmica das estruturas e equipamentos.

Esta instrumentação deve fornecer rapidamente os dados ao operador, para que ele possa avaliar a intensidade do terremoto e evitar um desligamento desnecessário ou uma operação contínua insegura da instalação.

A ausência de instrumentação sísmica, e a conseqüente ausência de informações sobre os níveis de aceleração do solo devido a um sismo, representa um problema ao proprietário da instalação, pois o órgão fiscalizador poderia obrigar o desliga

mento da instalação para fazer uma investigação física, com a finalidade de avaliar a integridade estrutural da instalação.

Devido ao custo relativamente baixo de uma instrumentação sísmica adequada, é razoável e seguro, da parte do proprietário, instalar esta instrumentação para evitar o desligamento desnecessário da sua instalação ou desligá-la com atraso, em caso de necessidade.

A resposta da instrumentação sísmica deve ser de fácil leitura, para que o operador possa compará-la rapidamente com os limites de segurança. A amplitude dos picos de aceleração do registro do movimento do terreno em função do tempo pode ser comparada rapidamente com os limites predeterminados, através de um gabarito. Os valores de pico de aceleração também podem ser apresentados ao operador, através de medidores analógicos ou digitais. Para que o operador possa ter acesso rápido a esses dados, é conveniente que as respostas das unidades remotas estejam disponíveis na sala de controle ou perto dela.

É prática geral, como acontece nos Estados Unidos da América, fornecer de imediato ao operador os dados sísmicos para que ele possa avaliá-los e determinar a ação apropriada. Entretanto, podem ser usados dispositivos de alarme sísmico, para anunciar um limite ou iniciar um desligamento automático. A iniciação do desligamento automático, durante os primeiros segundos de um evento que cause um acidente de perda de refrigeração, pode reduzir significativamente o alcance do pico de temperatura do núcleo do reator, após o acidente. No entanto, o receio de um desligamento desnecessário (resultante de falsos si

nais da unidade de disparo), a aversão a desligamentos rápidos e a necessidade de substituição de energia alternativa na rede de energia, têm favorecido a avaliação da situação pelo operador.

Se um sismo causar danos reais em uma Central Nuclear, o desligamento automático será executado por outros sistemas de monitoração associados, tais como vibração da turbina, alinhamento, radiação, pressão e temperatura. Assim, no caso de um terremoto que cause danos estruturais, a instrumentação sísmica será de importância secundária para o desligamento do reator, mas de importância primária para a avaliação da extensão dos danos.

Embora a decisão para um desligamento possa ser baseada na simples comparação dos valores de pico de aceleração, é desejável o registro completo do histórico do movimento do terreno em função do tempo, para ser usado em modelos matemáticos, numa análise dinâmica subsequente.

Idealmente, deveriam ser instaladas unidades sensoras triaxiais de aceleração, para que a resposta completa, em todos os equipamentos e locais estruturalmente importantes, pudesse ser registrada. Entretanto, é praticamente impossível instrumentar cada um destes vários lugares e a melhor solução é instrumentar um número moderado de locais, determinados em função dos modelos dinâmicos estruturais, desenvolvidos durante a fase analítica, na qual se calcula a resposta sísmica nos locais de interesse. Uma unidade sensora triaxial de aceleração deve ser instalada no ponto onde o movimento do solo foi aplicado no mo

delo, como por exemplo na interface da estrutura da contenção -solo ou no campo livre. Adicionalmente, uma unidade sensora deve ser instalada na laje da fundação e uma segunda unidade em um ponto da contenção diretamente acima e significativamente distante da primeira unidade.

Este plano é recomendado para que os deslocamentos da contenção possam ser calculados a partir dos conjuntos de dois registros. Assim, a configuração mínima requer unidades sensoras em elevações alta e baixa na contenção e possivelmente uma unidade no campo livre, conforme Figura 7-1.

Os registros de sismos, a partir destes poucos instrumentos, são insuficientes para uma legitimação adequada do modelo. O movimento do terreno no campo livre ou da base da estrutura, na forma de histórico do movimento digitalizado, ou o espectro de resposta, pode ser aplicado aos modelos e as respostas previstas e observadas podem ser comparadas para a localização alta do instrumento na contenção.

Esta comparação é uma medida da capacidade do modelo em prever a resposta real em um ponto. São necessários pontos de verificação adicionais, para se validar a precisão do modelo em numerosos pontos da estrutura.

A confiança na precisão e conservantismo do modelo é aumentada na proporção em que se aumentarem os pontos de verificação.



8. SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA PARA CENTRAIS NUCLEARES

Pelo exposto no capítulo 7, conclui-se que é conveniente a instalação de sensores remotos e de um sistema central de registro em fitas magnéticas, em Centrais Nucleares.

Existem sistemas comercialmente disponíveis que incorporam um número variado de unidades sensoras remotas e unidades de partida, juntamente com unidades de registro centralmente localizadas, fonte de alimentação, unidades de "Playback", de controle e calibração. Um sistema típico é apresentado esquematicamente na Figura 8-1 e descrito a seguir.

8.1 Sistema Responsável pelo Histórico do Movimento

Os componentes do sistema responsável pelo histórico do movimento, do diagrama apresentado na Figura 8-1, são:

- Unidades Sensoras Remotas
- Unidade de Partida Remota
- Unidade de Registro
- Unidade de Controle e Suprimento de Energia
- Unidade de "Playback".

### 8.1.1 Unidades Sensoras

Cada unidade sensora é composta de três acelerômetros de balanceamento de força, montados ortogonalmente entre si, sendo dois horizontais e um vertical, e um circuito de amplificação/calibração.

O acelerômetro de balanceamento de força (Figura 8-2) é um instrumento que consiste de um sistema massa-mola amortecido, de segunda ordem, com um grau de liberdade.

O movimento da massa é restrito a um ângulo muito pequeno, menor que  $0,1^{\circ}$ . Isto é para impedir o acoplamento transversal, ou a sensibilidade a acelerações ao longo dos eixos que formam ângulo reto com o eixo primário. Como a sensibilidade ao eixo transversal é proporcional ao seno do ângulo de deflexão da massa, o movimento do elemento sísmico deve ser limitado a valores pequenos para se ter um sistema preciso. O acelerômetro de balanceamento de força usa uma "mola elétrica" para assegurar que o deslocamento seja o menor possível.

O instrumento é equipado com um dispositivo de detecção, que detecta movimentos da massa. O sinal de saída do dispositivo de detecção, resultante do movimento da massa, é dirigido a um servo amplificador de alto ganho, que energiza a bobina de balanceamento de força, que produz força suficiente para retornar a massa idealmente à posição de nulo. O sinal de saída do amplificador é uma tensão proporcional à aceleração medida.

A faixa de sensibilidade deste sensor é usualmente de 0,01 a 1,0 g; entretanto outras faixas podem ser usadas, para

acomodar valores maiores de aceleração máxima. O sensor deve ter uma resposta plana para a aceleração em todas as frequências estruturalmente importantes, que estão normalmente compreendidas na faixa de 0,1 a 33 Hz. As características construtivas deste instrumento produzem o efeito de enrijecer o sistema e aumentar a frequência natural para 50 Hz, tipicamente. A curva de resposta deste acelerômetro é mostrada na Figura 8-3.

A montagem ortogonal dos sensores, bem como o circuito de amplificação/calibração devem ser colocados em uma caixa rígida e protegidos contra intempéries.

#### 8.1.2 Unidade de Partida

As ondas p originárias de um sismo, que chegam primeiro ao local, são maiores na direção vertical. Isto se deve ao fato do caminho de propagação da energia, do hipocentro ao local, ser mais rápido ao longo das camadas mais profundas, de alta velocidade, do que horizontalmente ao longo da camada superficial (Figura 8-4).

Por muitos anos, o disparador sísmico padrão foi um dispositivo de pêndulo (Figura 8-5), que respondia a movimentos horizontais. Entretanto, a partida vertical assegura que a atuação do dispositivo se dá num tempo muito mais próximo do início do movimento do solo. Desde o seu desenvolvimento em 1970, o dispositivo de partida vertical tem suplantado o pêndulo horizontal como padrão para partida de acelerômetros.

O dispositivo de partida vertical é composto de um sistema massa-mola, sobreamortecido, com transdução eletromagnética. Desenvolveram-se também dispositivos de partida eletromagnéticos horizontais, que combinados com o dispositivo de partida vertical, resultaram numa unidade de partida triaxial.

A unidade de partida triaxial tem um conjunto de circuitos que aciona um relé, quando um valor limite pré-selecionado é excedido em qualquer dos três eixos. O valor de 0,01 g é recomendado como valor a ser selecionado, tanto para o dispositivo vertical como para os horizontais, porque é excedido durante a chegada da primeira parte da onda p, para sismos locais fortes e assegura que os dados estruturalmente importantes serão registrados. Embora a energia de um sismo esteja presente em uma larga faixa de frequência, é importante notar que a energia predominante ocorre na faixa de 1 a 10 Hz. As fontes locais de excitação, tais como tráfego de veículos, explosões e operação de equipamentos pesados, podem causar acelerações maiores que 0,01 g, mas geralmente isto ocorre em frequências acima de 15 Hz, e o sinal de partida é filtrado (filtro passa baixa) para discriminar frequências associadas com fontes assísmicas.

O sistema responsável pelo histórico do movimento dispõe de um gravador de quatro canais para cada unidade sensora triaxial remota, sendo um canal para cada acelerômetro e o quarto canal designado para cada três acelerômetros. O quarto canal é para o sinal de referência de tempo, que é gerado na unidade de controle e registrado em cada gravador. Assim, para um sistema com três unidades sensoras triaxiais remotas, haverá três gravadores no local das unidades centralizadas.

A fita magnética pode ser rebobinada rapidamente na unidade de "playback", imediatamente após o sismo, e os dados podem ser digitalizados para uma subsequente análise detalhada. Os registradores contêm dispositivos que giram a fita magnética num só sentido, para evitar rasuras inadvertidas em dados já registrados.

Cada gravador é provido de fita cassete com capacidade para 30 minutos de registro, permitindo que um grande número de sismos seja registrado em uma mesma fita; assim, um abalo principal e muitos pós-abalos podem ser registrados. Entretanto, na prática, em Centrais Nucleares, a fita é substituída por outra tão logo o operador confira o sistema após um evento sísmico.

#### 8.1.4 Unidade de Controle e Suprimento de Energia

O sistema responsável pelo histórico do movimento aguarda por um sinal da unidade de partida remota, indicando que a aceleração limiar, pré-selecionada, foi excedida. Na condição passiva, as baterias estão sob constante flutuação de carga e sinais luminosos indicam esta condição. As unidades sensoras, unidades de partida e gravadores são energizados pelas baterias desta unidade. O cabo de alimentação da unidade de partida transporta corrente durante todo o tempo e a pequena carga drenada é compensada pelo carregador de bateria.

No instante em que o disparador vertical ou horizontal da unidade de partida sente que a aceleração limite pré-selecionada foi excedida, um relé é acionado na unidade de partida e o cabo desta unidade transporta o chaveamento dos contatos deste relé à Unidade de Controle, que inicia cinco funções simultaneamente:

- i. Envia energia através dos cabos dos acelerômetros para cada uma das unidades sensoras;
- ii. a unidade de registro centralizada é ativada;
- iii. a luz de alarme do painel de controle é acesa;
- iv. os contatos para interface com o sistema de alarme são fechados;
- v. um indicador de evento muda de estado.

Quando a energia alcança as unidades sensoras remotas, o sinal do transdutor do movimento é amplificado e trans

portado, através de cabos, para a unidade de registro, com um nível de saída de 2,5 volts/fundo de escala. O sistema torna-se operacional em menos de 100 milisegundos. A unidade de partida contém um dispositivo de tempo, que mantém o sistema inteiro em operação até alguns minutos após o último movimento acima do valor limite pré-selecionado. Qualquer número de ciclos de sísmos, do início ao fim, pode ser registrado até a capacidade das fitas cassetes (normalmente 30 minutos).

#### 8.1.5 Unidade de "Playback"

As fitas magnéticas, com registro dos dados do sísmo, são introduzidas na unidade de "playback" e os dados são apresentados em um registrador de papel em rolo (strip chart recorder).

A unidade de "playback" não tem capacidade para registrar ou apagar dados, evitando desta forma a destruição acidental de dados já gravados. Nesta unidade, é usada compensação de velocidade para reduzir os efeitos de variação de velocidade da fita. Além da saída registrada em papel, esta unidade dispõe de saídas elétricas simultâneas, para conexão a um conversor analógico-digital.

A unidade de "playback" opera tanto com corrente alternada como corrente contínua e é portátil, para ser transportada a um centro de redução de dados, para o estágio de conversão digital.

O interruptor sísmico é uma unidade de disparo triaxial, que provê o acionamento de um relê, sempre que a aceleração de período zero do sismo base de operação, em pelo menos um dos eixos, for excedida. A aceleração de período zero é a máxima aceleração do solo, especificada para um dado local. No período zero, o espectro de resposta da aceleração é idêntico para todos os valores de amortecimento e é igual à máxima aceleração do solo. Estes parâmetros são definidos com mais detalhes no Regulatory Guide 1.60.

O melhor procedimento para calibração do interruptor sísmico é executar testes em uma mesa vibratória, para verificar o ponto de ajuste. Na maioria dos casos, os pontos de ajuste horizontal e vertical são diferentes, refletindo as acelerações de projeto utilizadas para o local. Normalmente o ponto de ajuste vertical é 2/3 do valor horizontal.

O painel do interruptor sísmico é montado na unidade central e provê o fornecimento de energia para o interruptor, relê para sinalização de alarme e equipamento de teste do interruptor.

O interruptor sísmico pode ser uma unidade autônoma remota, mas muitas vezes a inacessibilidade à bateria impede, nesse caso, que sejam feitos testes regulares, necessários para um bom programa de manutenção preventiva. O uso de painel centralizado torna possível estes testes e facilita a troca de baterias, quando necessário.

Durante períodos sem ocorrência de eventos sísmicos, o carregador fornece uma pequena corrente às baterias, para manter a carga e as baterias são protegidas com diodo zener. Uma lâmpada no painel indica que a instalação de corrente alternada está conectada ao carregador. A tensão da bateria pode ser testada periodicamente pelo uso de um contator, que atua um voltímetro.

Quando o movimento do solo no local da instalação do interruptor sísmico excede o valor limite, o chaveamento dos contatos do relé é levado ao anunciador, na Sala de Controle, através de um relé do painel do interruptor sísmico. O relé do interruptor sísmico remoto conserva-se fechado até alguns segundos após o último sinal de aceleração acima do valor limite pré-selecionado. A integridade dos cabos do sistema é testada através do painel e consiste na aplicação de uma tensão no relé remoto, causando o alarme na Sala de Controle. Se for desejado, o interruptor sísmico pode ser equipado com um relé de contato normalmente fechado, que se abre nos casos da ocorrência de um sismo, ou se os cabos sofrerem algum problema de continuidade ou por mau funcionamento da unidade.

### 8.3 Registrador do Espectro de Resposta e Interruptor do Espectro de Resposta

O registrador do espectro de resposta básico é um dispositivo passivo, provido de vinte lâminas com um grau de liberdade, que oscilam sintonizadas em frequências específicas,

na faixa de interesse da engenharia estrutural. As vinte lâminas, de diferentes comprimentos e pesos, são fabricadas de aço para mola e incorporam uma característica especial para estabelecer o amortecimento (nominalmente de 2% do amortecimento crítico). Este instrumento também é montado com uma configuração triaxial.

Ao terminal livre de cada lâmina está preso um estilete com ponta de diamante, que inscreve um registro permanente da deflexão de cada uma das lâminas, em placas metálicas de registro, removíveis. O Regulatory Guide 1.12 recomenda que um destes instrumentos seja colocado na fundação da contenção e que ele forneça sinais para sinalização na Sala de Controle (Interruptor do Espectro de Resposta). Para esta finalidade, o instrumento é tornado ativo pela adição de contatos ajustados aos valores de deslocamento do sismo base de operação, para cada uma das frequências das lâminas. O chaveamento dos contatos de saída deste instrumento é transferido por cabo à unidade central e conectado ao anunciador do espectro de resposta. Se o valor limite da aceleração do sismo base de operação é excedido em uma ou mais frequências, uma luz é acendida para cada uma destas frequências. Desta forma, o operador da Central será notificado quando o espectro de resposta do sismo base de operação de projeto for excedido e as máximas acelerações são determinadas a partir do registro marcado nas placas, pelo uso de um amplificador, escala e dados de sensibilidade do instrumento.

---

#### 8.4 Acelerôgrafo de Pico

O acelerôgrafo de pico é um instrumento triaxial, passivo, remoto e autônomo, usado para obter informações adicionais sobre a resposta de equipamentos e tubulações, importantes do ponto de vista da segurança. Este instrumento sente e registra os picos de aceleração máxima, positivos e negativos, mas não registra dados de frequência. O registro de cada eixo é riscado permanentemente em uma placa metálica e cada placa é numerada em série e relacionada com o registrador, para assegurar que os registros dos três eixos não sejam confundidos.

9. DISCRIMINAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DA INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA DE UMA CENTRAL NUCLEAR

Uma Central Nuclear deve ser provida de instrumentação sísmica para que, em caso de ocorrência de um sismo, sejam registrados dados suficientes para permitir a confirmação da análise dinâmica da estrutura e uma avaliação da viabilidade de se continuar operando a Central com segurança.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), do Brasil, não possui ainda uma norma sobre especificação e/ou localização dos sensores da instrumentação sísmica em Centrais Nucleares. Entretanto, para a instalação destes sensores na primeira Central Nuclear brasileira, "Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto - Angra I", foi aceito pela CNEN a adoção do Regulatory Guide 1.12, da Nuclear Regulatory Commission, dos Estados Unidos, por serem as normas americanas bastante amplas e normalmente utilizadas também em outros países.

Quando ocorre um sismo, pode não ser imediatamente conhecido quão severo são seus efeitos em uma Central. Por este motivo, é conveniente a instalação de acelerômetros triaxiais (para registro do histórico do movimento), em locais apropriados, para fornecerem dados sobre os estímulos sísmicos de entrada para a contenção, dados sobre frequência, amplitude e relação de fase da resposta sísmica da estrutura da contenção e dados sobre os estímulos sísmicos de entrada para outras estruturas, sistemas e componentes da Categoria Sísmica I. É desejável que estes acelerômetros, para registro de movimentos fortes, se

jam localizados de forma a facilitar a análise dos traços registrados, após um sismo.

O valor da aceleração correspondente ao período zero no espectro de resposta de projeto da fundação da contenção, pode ser denominado *nível da aceleração* do sismo de entrada (estímulo) para a estrutura da contenção. Este *nível de aceleração* é um parâmetro importante, porque as próprias magnitudes dos espectros de projeto são afetadas em grande parte por este nível, e a exigência de desligamento da Central, como especificado no Apêndice A do 10 CFR Parte 100, também é relacionada com este nível. É necessário, portanto, instalar um interruptor sísmico triaxial, em local apropriado, no nível de coroamento da fundação, capaz de fornecer um sinal imediato ao indicador remoto, se a aceleração especificada de período zero for excedida. Isto pode fornecer as bases para providências administrativas, se necessário.

O Apêndice A do 10 CFR Parte 100 exige que todas as estruturas, sistemas ou componentes de uma Central Nuclear, necessários para a operação contínua da Central, sem riscos indesejados à saúde e segurança do público, sejam projetadas para permanecerem funcionais quando sujeitos ao sismo base de operação. Visto que a aceleração de período zero do espectro de resposta de projeto da fundação da contenção, representando o sismo base de operação, pode não descrever plenamente o evento sísmico, é importante ter um registrador triaxial do espectro de resposta, instalado em local apropriado no nível do coroamento da fundação da Central, capaz de fornecer imediatamente sinais para o indicador

remoto, localizado na sala de controle, se alguma parte significativa do espectro de resposta de projeto da fundação for excedida. Isto pode fornecer bases adicionais para as providências administrativas imediatas ou decisões que se seguem a um evento sísmico.

Os efeitos de um movimento sísmico, em um dado nível do piso de uma estrutura, podem ser representados pelo espectro de resposta calculado do piso. Em muitas Centrais Nucleares, os espectros de resposta calculados do piso são também usados para projetar sistemas e componentes, da categoria sísmica I, apoiados nesses níveis. Por isto, é importante instalar registradores triaxiais do espectro de resposta, em locais de apoio selecionados, para verificar se o espectro de resposta calculado do piso foi excedido. Esta informação será necessária para determinar o conservantismo das hipóteses de modelo e projeto, feitas para a estrutura, e estímulos de entrada para o projeto dos sistemas e componentes apoiados na estrutura, e a conveniência de se continuar operando a Central, independentemente de uma análise de segurança após o evento sísmico.

A magnitude da resposta dos sistemas e componentes, apoiados na estrutura da contenção, é exigida a fim de se verificar se a resposta real destas partes excedeu a base de projeto. Isto pode ser monitorado através da instalação de acelerômetros triaxiais de pico, instalados em locais selecionados nestas partes. Além disto, o pico de resposta destas partes será necessário para determinar o conservantismo das hipóteses de modelo e projeto, feitas para estes sistemas e componentes.

O Regulatory Guide 1.12, Revisão 1, de abril de 1974, na parte em que especifica e fornece a localização dos sensores da instrumentação sísmica, adota o sugerido pela norma ANS-2.2, acrescido de alguns outros sensores, sendo estes especificados pelo Regulatory Guide 1.12. Entretanto, a norma ANS-2.2, a que o Regulatory Guide 1.12 se refere, data de 1974 e, em 1978, esta norma foi revisada pela primeira vez, trazendo algumas modificações no que se refere à especificação e localização dos sensores. Com a finalidade de comparar o exigido pelo Regulatory Guide 1.12 e o sugerido pela ANS-2.2, 1978, referente à discriminação e localização dos sensores, construiu-se a Tabela 9-1. Como pode ser observado nesta tabela, os sensores e sua localização são praticamente os mesmos nas duas colunas, diferindo apenas na localização de um dos registradores triaxiais do espectro de resposta.

A severidade da resposta de uma dada estrutura da categoria sísmica I dependerá, em alto grau, da aceleração máxima do sismo de desligamento seguro, na fundação da estrutura da contenção. Por isto, é razoável relacionar a quantidade desejável de instrumentos com a magnitude da aceleração máxima esperada na fundação. Com esta finalidade, os sismos de desligamento seguro são divididos em duas categorias:

- a) Sismos com acelerações máximas na fundação menores que 0,3 g;
- b) sismos com acelerações máximas na fundação maiores ou iguais a 0,3 g.

Os sismos da primeira categoria podem ser considerados como pertencendo à classe de sismos moderados a fortes e os sismos da segunda categoria podem ser chamados de severos. Não se espera a ocorrência de sismos da segunda categoria no Brasil. Por este motivo, não se considerou, neste trabalho, a instrumentação necessária em Centrais Nucleares onde haja a possibilidade de ocorrência de sismos severos.

A norma ANS-2.2, 1978, mostra, em Apêndice, um diagrama da localização dos sensores apresentados na Tabela 9-1. Pelo fato deste diagrama não ser de compreensão imediata, em vista da multiplicidade de escolha que oferece, serão apresentadas, a seguir, algumas possibilidades de combinação da instrumentação mínima, apresentada na referida tabela, para um sismo de desligamento seguro menor que 0,3 g, segundo o Regulatory Guide 1.12.

#### 1º Caso

Quando a interação solo-estrutura não for desprezível, a instrumentação e sua localização podem ser a seguinte:

- a) Sensor Triaxial para Registro do Histórico do Movimento
  - Um no campo livre;
  - um na fundação da contenção;
  - um na estrutura da contenção;
  - um na fundação de estrutura independente, da categoria sísmica I, onde a resposta é diferente

da resposta da estrutura da contenção.

b) Registrador Triaxial do Espectro de Resposta

- Um em um apoio, representativo, do equipamento ou da tubulação do reator;
- um no local mais adequado entre os seguintes situados fora da estrutura da contenção:
  - . no apoio de equipamento da categoria sísmica I;
  - . no apoio de tubulação da categoria sísmica I;
- um na fundação de uma estrutura independente, da categoria sísmica I, onde a resposta é diferente daquela da estrutura da contenção do reator.

c) Acelerôgrafo Triaxial de Pico

- Um em local selecionado no equipamento do reator;
- um em local selecionado na tubulação do reator;
- um no local mais adequado entre os seguintes, situados fora da estrutura da contenção:
  - . equipamento da categoria sísmica I;
  - . tubulação da categoria sísmica I.

d) Interruptor Sísmico Triaxial

- Um localizado na fundação da contenção.

e) Interruptor do Espectro de Resposta

- Um localizado na fundação da contenção.

A Figura 9-1 apresenta um diagrama esquemático deste caso.

### 2º Caso

Quando a interação solo-estrutura for desprezível, a instrumentação e sua localização podem ser a seguinte:

a) Sensor Triaxial para Registro do Histórico do Movimento

- Um no campo livre ou na fundação da contenção;
- um na estrutura da contenção;
- um na fundação de estrutura independente, da categoria sísmica I, onde a resposta é diferente da resposta da estrutura da contenção.

b) Registrador Triaxial do Espectro de Resposta

- Um em um apoio, representativo, do equipamento ou da tubulação do reator;
- um no local mais adequado entre os seguintes, situados fora da estrutura da contenção:
  - . um no apoio de equipamento da categoria sísmica I;
  - . um no apoio de tubulação da categoria sísmica

I;

- um na fundação de uma estrutura independente da categoria sísmica I, onde a resposta é diferente daquela da estrutura da contenção do reator.

c) Acelerôgrafo Triaxial de Pico

- Um em local selecionado no equipamento do reator;
- um em local selecionado na tubulação (do reator);
- um no local mais adequado entre os seguintes, situados fora da estrutura da contenção:
  - . equipamento da categoria sísmica I;
  - . tubulação da categoria sísmica I.

d) Interruptor Sísmico Triaxial

- Um localizado na fundação da contenção.

e) Interruptor do Espectro de Resposta

- Um localizado na fundação da contenção.

A Figura 9-2 apresenta um diagrama esquemático deste caso.

Outras combinações poderiam ser apresentadas, além dos dois casos acima citados como ilustração, mas basicamente a escolha dos locais de posicionamento dos sensores, onde existe alternativa de localização, será determinada em função de

pontos chaves do modelo representativo da estrutura e/ou equipamentos e sistemas.

O sistema descrito no Capítulo 8 aguarda, em estado passivo, por um sinal da unidade remota de partida, indicando que ocorreu um valor de aceleração maior que o limiar pré-selecionado. O fornecimento de energia para a operação dos gravadores é feito por baterias recarregáveis, visto que o suprimento de energia em corrente alternada pode não ser garantido durante a ocorrência de um sismo.

Na condição passiva, as baterias das unidades gravadoras e de "playback" estão sobre constante flutuação de carga e indicadores luminosos no painel central indicam esta condição. No instante em que aceleração limite pré-selecionada é detectada, um sinal da unidade de partida põe em operação os gravadores, os sensores são energizados e um alarme luminoso no painel central é ativado. Todo o sistema torna-se operacional em menos de 100 milisegundos.

Através de contatos em paralelo, o alarme luminoso do Painel Central é ligado ao anunciador da Sala de Controle e assim o operador será notificado de que o sistema foi ativado e está registrando.

É aconselhável que se selecione o valor limite, para dar partida ao sistema, tão baixo quanto praticável, para assegurar que os gravadores comecem a registrar desde o início do sismo. Um valor racional para esta seleção foi apresentado no item 8.1.2 do Capítulo 8.

Um indicador de evento também é ativado e permanece

disparado até ser revertido manualmente à posição original, pelo operador. A unidade de partida contém um dispositivo de tempo, que assegura a operação dos gravadores até alguns segundos (normalmente cerca de 10 segundos) após o último valor de aceleração acima do limite pré-selecionado. Esta característica evita a perda da referência de tempo, no fim do sismo, quando a aceleração pode flutuar acima e abaixo do valor limite. Um pós-abalo dará partida novamente ao sistema, como descrito acima, e qualquer número de início e fim de ciclos pode ser registrado até o tempo de capacidade da fita cassete (normalmente de 30 minutos).

Após um evento, as fitas cassetes são removidas (e substituídas por fitas de reserva), identificadas, rebobinadas e o sinal é recuperado através da unidade de "playback". Se o desligamento da Central for baseado no pico da aceleração, o operador pode colocar um gabarito que mostre as faixas de aceleração para operações seguras e inseguras, sobre o registro do histórico do movimento, obtido através da unidade de "playback" e determinar, rapidamente, se alguma aceleração excedeu o valor permitido. Os registros do sensor colocado na fundação da contenção são normalmente utilizados para esta determinação e este sensor aciona um alarme na Sala de Controle, quando um valor pré-selecionado é ultrapassado.

A seqüência de eventos e ações após um sismo é mostrada na Figura 10-1.

Se qualquer pico de aceleração se aproximar de ou ultrapassar os valores limites de projeto, é aconselhável digitalizá-

zar os dados registrados do histórico do movimento, para uso na análise dinâmica detalhada. Neste caso a unidade de "playback" é conectada a um conversor analógico-digital, para produzir o histórico do movimento digitalizado.

Antes de se proceder à análise dinâmica, é necessário que se execute a seqüência de redução de dados, apresentada na Figura 10-2. A redução de dados pode ser executada em poucas horas, após a ocorrência de um sismo significativo, se a forma e os procedimentos houverem sido estabelecidos previamente.

Os históricos dos movimentos das respostas dos pisos são obtidos através de modelos matemáticos, usando os registros digitalizados do campo livre, ou da base da fundação, como dados de entrada. A comparação entre o histórico do movimento real e o calculado deve ser feita para cada um dos locais das unidades sensoras e o modelo deve ser modificado e ajustado, antes de ser usado novamente.

Os espectros de resposta dos pisos podem ser calculados a partir dos históricos do movimento em cada nível de piso da Central Nuclear e podem ser comparados com os espectros usados no projeto de equipamentos, tubulações e componentes naqueles níveis. Os sensores triaxiais das unidades sensoras devem ser alinhados, durante a instalação, com os eixos principais do edifício, conforme usado no modelo, para permitir o uso direto dos dados no modelo.

Este trabalho procurou descrever os componentes de um sistema de instrumentação sísmica, aplicáveis em Centrais Nucleares, e o modo como esses componentes são interligados para constituírem um sistema. Não se pretendeu apresentar detalhes construtivos da instrumentação, mas procurou-se antes, descrever a função de cada componente e seu modo de operação, bem como apresentar a configuração mínima do sistema e localização geral dos sensores, para monitorar os parâmetros de projeto dos sistemas, estruturas e componentes, necessários à segurança dessas Centrais, quando sujeitas à ação de um terremoto.

O leitor interessado em adquirir um conhecimento básico sobre o assunto poderá se beneficiar da dissertação apresentada, pois esta reúne informações que se encontram disseminadas na literatura.

Para completar o trabalho e facilitar a consulta bibliográfica, foi incluída uma lista das principais referências consultadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ ALMASSY, W. Determining instrument characteristics from manufactures data. Pasadena, California, s.d. (Application Note - 13).
- /2/ AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. American national standard earthquake instrumentation criteria for nuclear power plants. New York, N.Y., 1978. (ANSI/ANS-2.2).
- /3/ BANNER, E.H.W. Electronic measuring instruments. 2.ed. London, Chapman & Hall, 1958.
- /4/ BECKWITH, T.G. & BUCK, N.L. Mechanical measurements. Reading, Massachusetts, Addison - Wesley, 1965.
- /5/ BORK, M. & KAESTLE, H.J. Seismic instrumentation for NPP; an interpretative review of current practice and the related standard in Germany. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY. 4., San Francisco, California, 15-19 August 1977. Proceedings ... Amsterdam, North-Holland, Publishing, 1977. v.k(b), p. k8/13.
- /6/ CHARKEY, E.S. Electromechanical system components. New York, Wiley - Interscience, 1972.

- /7/ DEN HARTOG, J. P. Mechanical vibrations. New York, McGraw-Hill, 1956.
- /8/ ENGDAHL ENTERPRISES. Peak acceleration recorder; model PAR 400. Costa Mesa, California, s.d.
- /9/ \_\_\_\_\_. Response spectrum annunciator; model RSA 960. Costa Mesa, California, s.d.
- /10/ \_\_\_\_\_. Response spectrum recorder; models RSR 1600-H/V and RSR 1600-H/V-A. Costa Mesa, California, s.d.
- /11/ EUA. Atomic Energy Commission. Design response spectra for seismic design of nuclear power plants. Washington, D.C., 1973. (Regulatory Guide 1.60).
- /12/ \_\_\_\_\_. Instrumentation for earthquakes. Washington, D.C., 1974. (Regulatory Guide 1.12).
- /13/ \_\_\_\_\_. Seismic design classification. Washington, D.C., 1978. (Regulatory Guide 1.29).
- /14/ EUA. Leis, decretos, etc. Seismic and geologic siting criteria for nuclear power plants. In: \_\_\_\_\_. Code of federal regulations. Title 10; energy. Pts. 0-199. Washington, D.C. US Government Printing Office, 1979. app. A, p. 646-54.

- /15/ GORE, A.R. Seismic instrumentation for nuclear power plants. In: SYMPOSIUM ON NUCLEAR REACTOR INSTRUMENTATION. Bombay, 20-23 Dec. 1976. Proceedings ... Bombay, Department of Atomic Energy, 1977. v.2, sect. 2, p. 82-9.
- /16/ HANSEN, R.J. ed. Seismic design for nuclear power plants. Cambridge, The M.I.T. Press, 1972.
- /17/ HOWARD, G.E. et alii. Seismic design of nuclear power plants; an assessment. Nuclear Engineering and Design, 38 (3): 385-461, Sept. 1976.
- /18/ HUDSON, D.E. The measurement of ground motion of destructive earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 53 (2): 419-37, Feb. 1963.
- /19/ INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE recommended practices for seismic qualification of class 1E equipment for nuclear power generating stations. New York, N.Y. 1975 (IEEE-Std-344).
- /20/ KINEMATRICS. Conditioning and correction of strong motion data on magnetic tapes. Pasadena, California, s.d. (Application Note-7).
- /21/ \_\_\_\_\_. Kinematics services. Pasadena, California, s.d. (Application Note-1).

- /22/ KINEMATRICS. Kinematics starts. Pasadena, Califor  
nia, s.d. (Application Note-8).
- /23/ \_\_\_\_\_. The Kinematics "wood-Anderson" seismograph.  
Pasadena, California, s.d. (Application Note-10).
- /24/ \_\_\_\_\_. Magnification of Kinematics short period  
seismographs. Pasadena, California, s.d. (Application  
Note-17).
- /25/ \_\_\_\_\_. SMA-1: Strong Motion Accelerograph. Pasadena,  
California, s.d. (Earthquake Engineering Instruments).
- /26/ LOCZY, L. de & LADEIRA, E.A. Geologia estrutural e in-  
trodução à geotectônica. São Paulo, Edgard Blücher,  
1976.
- /27/ MENEZES, F.S. Teoria dos acelerômetros. (comunicação  
pessoal).
- /28/ NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN. Vibration testing  
and seismic analysis of nuclear power plants.  
Amsterdam, V.25, n.1, June 1973. Número especial.
- /29/ PAULY, S.E. Review of current standards and practice  
for earthquake instrumentation of nuclear plants. In:  
WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 6., New  
Delhi, 10 Jan. 1977. Proceedings ... New Delhi,

- Indian Society of Earthquake Technology, 1977.  
p. 2962-8.
- /30/ PAULY, S.E. Strong motion accelerograph selection.  
Pasadena, California, s.d. (Application Note-20).
- /31/ RIHN, W.J. & BECKMANN, W.J. Eletromagnetic starters  
for strong motion accelerographs. Pasadena, Califor  
nia, s.d. (Application Note-15).
- /32/ 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, 1973/1976. 2v.
- /33/ TAKAHASHI, H. Status of seismic design requirements  
for nuclear power plants in Japan. In: INTERNATIONAL  
CONFERENCE ON NUCLEAR POWER AND ITS FUEL CYCLE.  
Salzburg; 2-13 May 1977. Proceedings ... Vienna,  
IAEA, 1977, v. 5, p. 533-45. (IAEA-CN-36/159).
- /34/ WIEGEL, R.L. ed. Earthquake engineering. Englewood  
Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1970.

Tabela 3-1 - Descrição dos Efeitos Correspondentes aos Graus da Escala de Mercalli Modificada

ESCALA DE INTENSIDADES DE SISMOS - MERCALLI MODIFICADA		Aceleração do terreno (a)		
I	- Sismo sentido apenas por poucas pessoas, em circunstâncias especialmente favoráveis.	$\frac{cm}{sec^2}$	$\frac{g}{g}$	
II	- Sentido só por poucas pessoas repousando, principalmente em andares altos de prédios. Objetos delicados suspensos podem oscilar.	2	0,005 g	
		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 estimada.	4		
		5		
		6		
		7		
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 emitir sons. Sensação de caminhão pesado atingindo o prédio. Automóveis parados oscilam nitidamente.	8		0,01 g
		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		0,05 g
		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	0,1 g	
		90		
		100		
VIII	- Danos ligeiros em estruturas bem projetadas, consideráveis em prédios comuns, com colapso parcial, e grandes em estruturas mal construídas. Paredes movimentam-se dos quadros. Quedas de chaminés, monumentos, colunas etc. Móveis caem. Ejeção de pequenas quantidade de areia e lama. Mudanças na água de poços. Perturba pessoas guiando automóveis.	200	0,5 g	
		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		1 g
		900		
		1000		
XI	- Muito poucas estruturas de alvenaria resistem. Fontes destruídas, largas fendas no terreno, tubulações subterrâneas completamente desmanteladas. Escorregamentos em taludes de solo brando. Trilhos deformados consideravelmente.	2000		2 g
		3000		
XII	- Dano total. Ondas observadas sobre a superfície do terreno. Linhas de visada e de nível distorcidas. Objetos lançados no ar.	4000		4 g
		5000	5 g	
		6000	6 g	

TABELA 9-1 - Comparação entre a Instrumentação Sísmica requerida pelo Regulatory Guide 1.12 e a ANS-2.2 - 1978, para Sismo de Desligamento Seguro Menor que 0,3 g.

INSTRUMENTAÇÃO	ANS-2.2 - 1978	REGULATORY GUIDE 1.12
Sensor Triaxial de Aceleração	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Um no campo livre (ver item 2)</li> <li>2. Um na fundação da contenção do reator. Se a interação solo-estrutura for desprezível, um único instrumento pode ser colocado, ou no campo livre ou na fundação da contenção do reator.</li> <li>3. Um na estrutura da contenção ou prédio do reator.</li> <li>4. Um na fundação de estrutura independente de Categoria Sísmica I, onde a resposta é diferente daquela da estrutura da contenção do reator.</li> </ol>	<p>Recomenda a localização e número de instrumentos indicados na ANS-2.2.</p>
Registrador Triaxial do Espectro de Resposta	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Um na fundação da contenção do reator.</li> <li>2. Um em um apoio, representativo, do equipamento ou tubulação do reator.</li> <li>3. Um em um apoio, representativo, do equipamento ou tubulação fora da estrutura da contenção do reator.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Um em um local selecionado do equipamento ou da tubulação do reator.</li> <li>2. Um no local mais adequado entre os seguintes situados fora da contenção: <ol style="list-style-type: none"> <li>a) Um apoio de equipamento da Categoria Sísmica I ou Local apropriado do piso;</li> <li>b) Um apoio de tubulação da Categoria Sísmica I ou local apropriado do piso.</li> </ol> </li> <li>3. Um na fundação de uma estrutura independente, da Categoria Sísmica I, onde a resposta é diferente daquela da estrutura da contenção do reator.</li> </ol>
Acelerógrafo Triaxial de Pico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Um em um item representativo do equipamento do reator.</li> <li>2. Um em um item representativo da tubulação do reator.</li> <li>3. Um em um item representativo do equipamento ou tubulação fora da estrutura da contenção do reator.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Um em local selecionado no equipamento do reator.</li> <li>2. Um em local selecionado na tubulação do reator.</li> <li>3. Um no local mais adequado entre os seguintes fora da estrutura da contenção do reator: <ol style="list-style-type: none"> <li>a) Equipamento da Categoria Sísmica I.</li> <li>b) Tubulação da Categoria Sísmica I.</li> </ol> </li> </ol>
Interruptor Sísmico Triaxial	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Um localizado na fundação da contenção do reator.</li> </ol>	<p>Recomenda a localização e número de instrumentos indicados na ANS-2.2.</p>
Interruptor do Espectro de Resposta	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Um localizado na fundação da contenção do reator.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Um localizado na fundação da contenção do reator.</li> </ol>

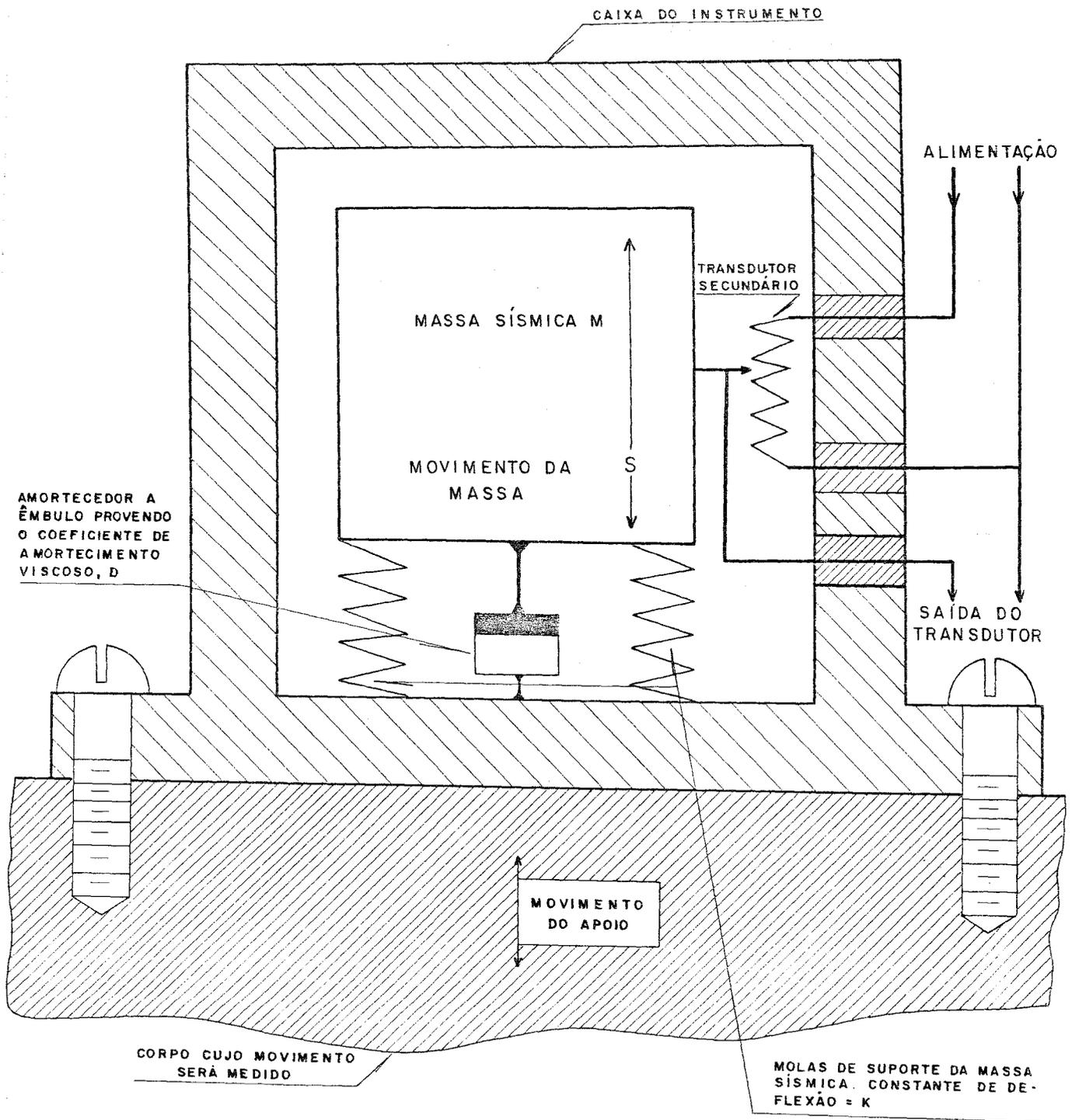


Fig. 6.1 - INSTRUMENTO, TIPO MASSA SISMICA, DE MEDIDA DE MOVIMENTO.

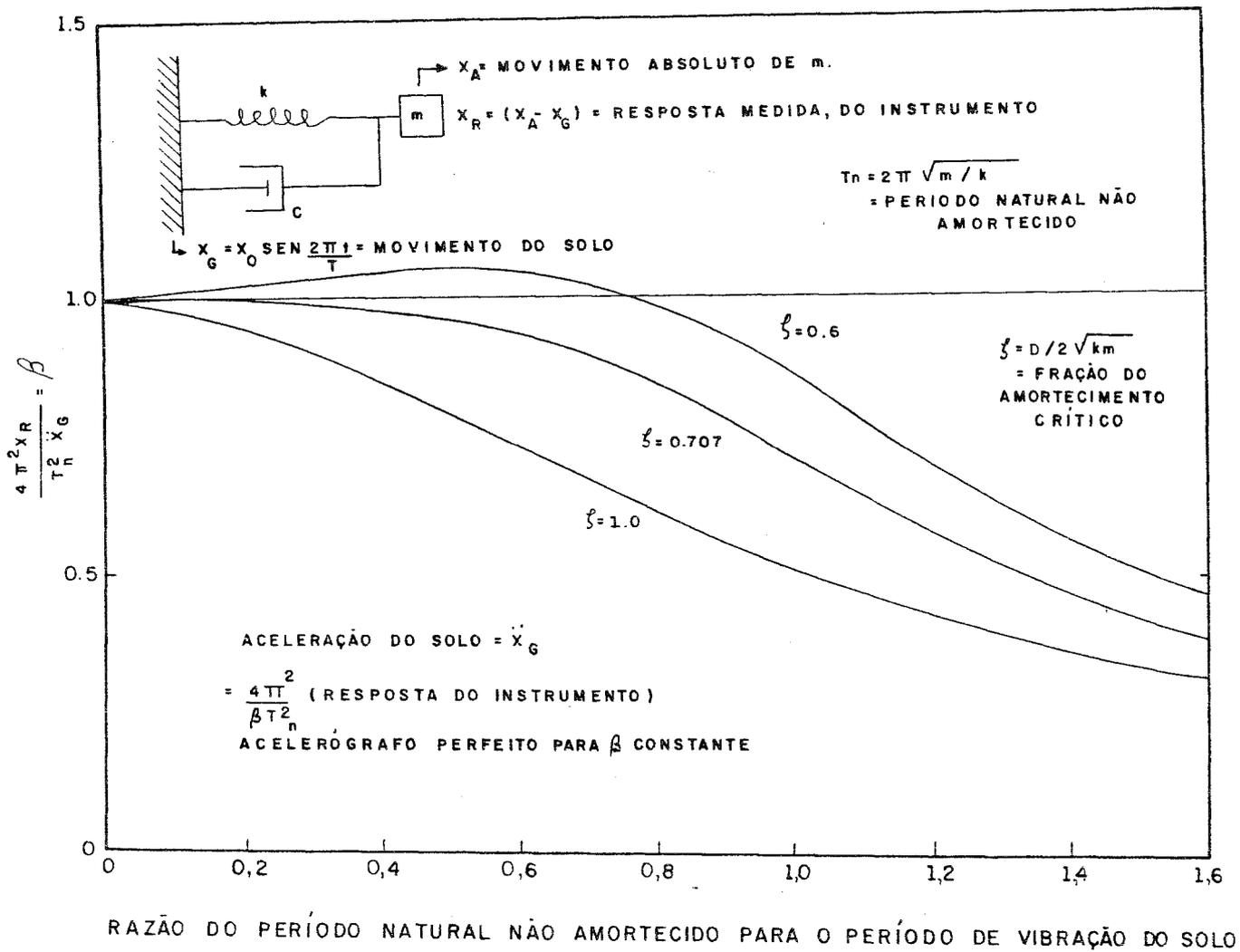


Fig. 6.2 - PRINCÍPIOS DE PROJETO DO ACELERÓGRAFO

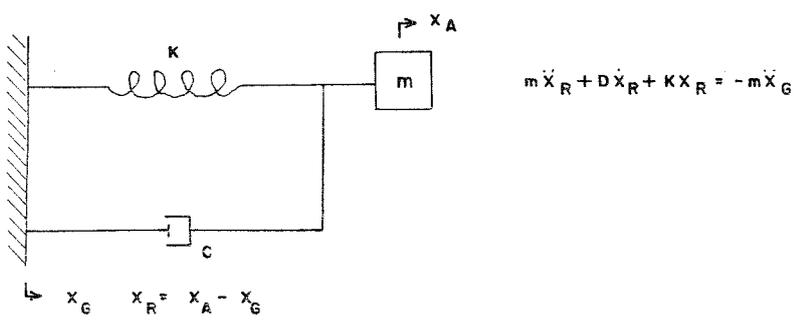
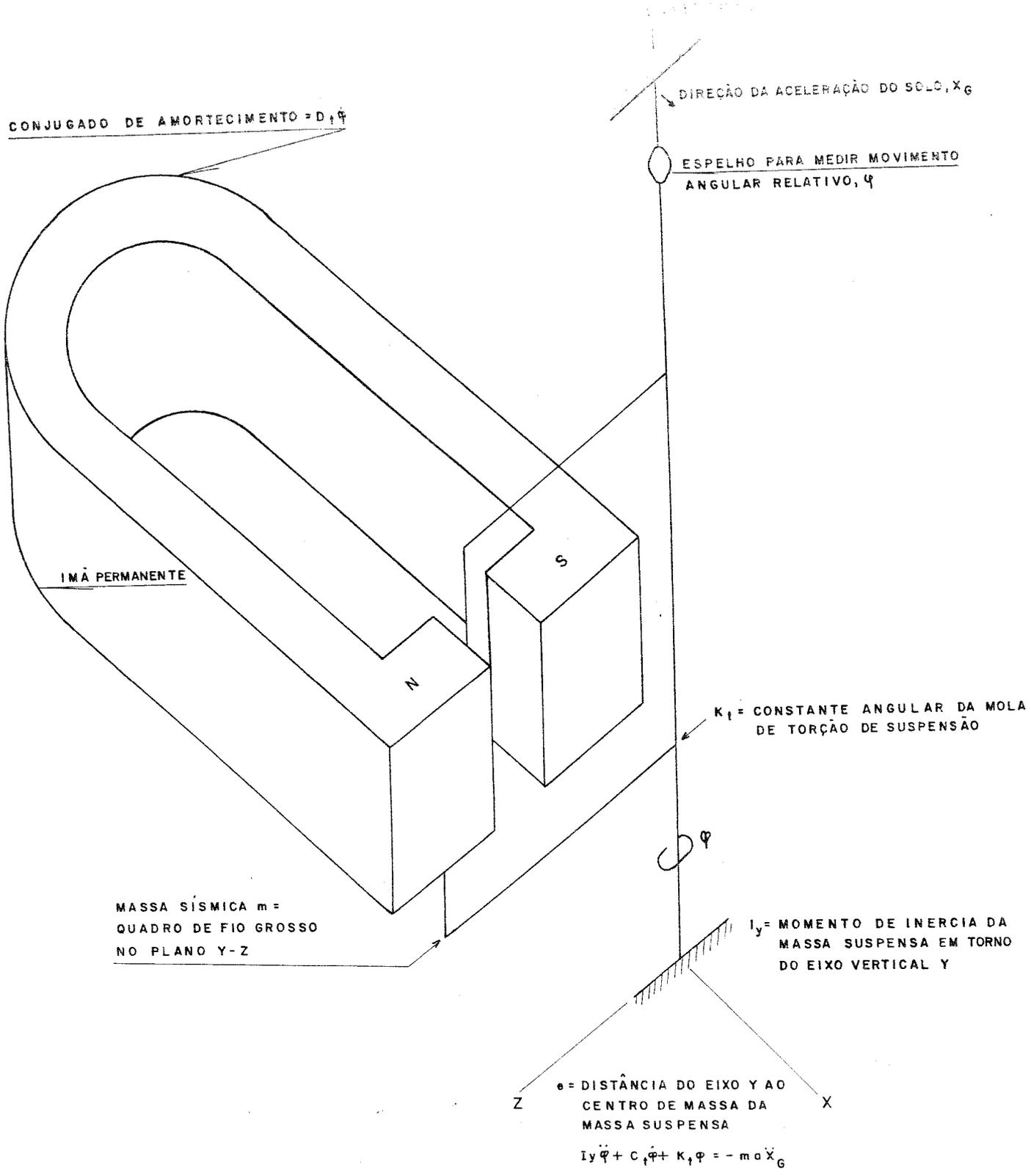


Fig. 6.3 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ACCELERÓGRAFO USC GS

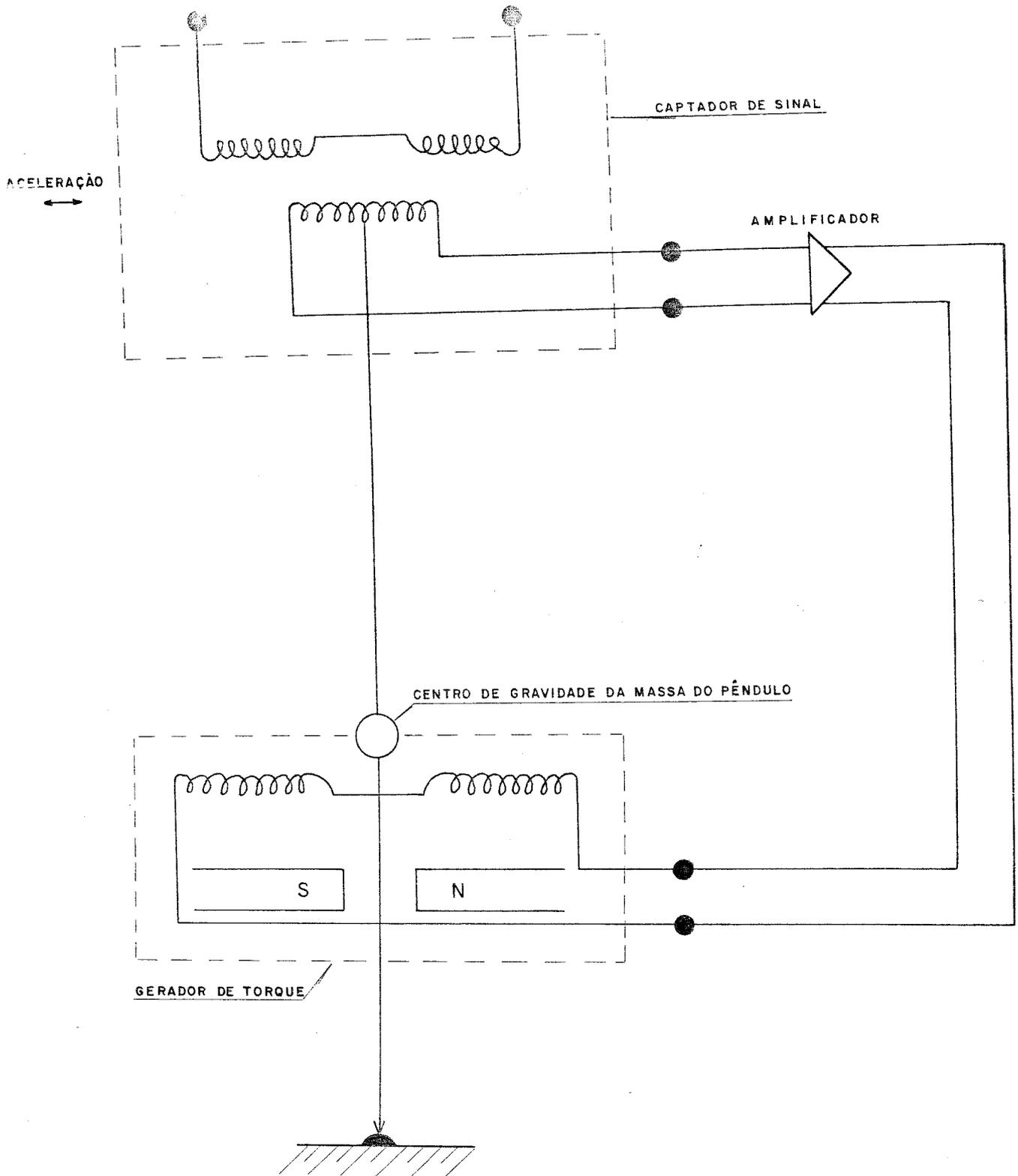


Fig. 6.4 - ACELERÔMETRO DE BALANCEAMENTO DE FORÇA (Esquema)

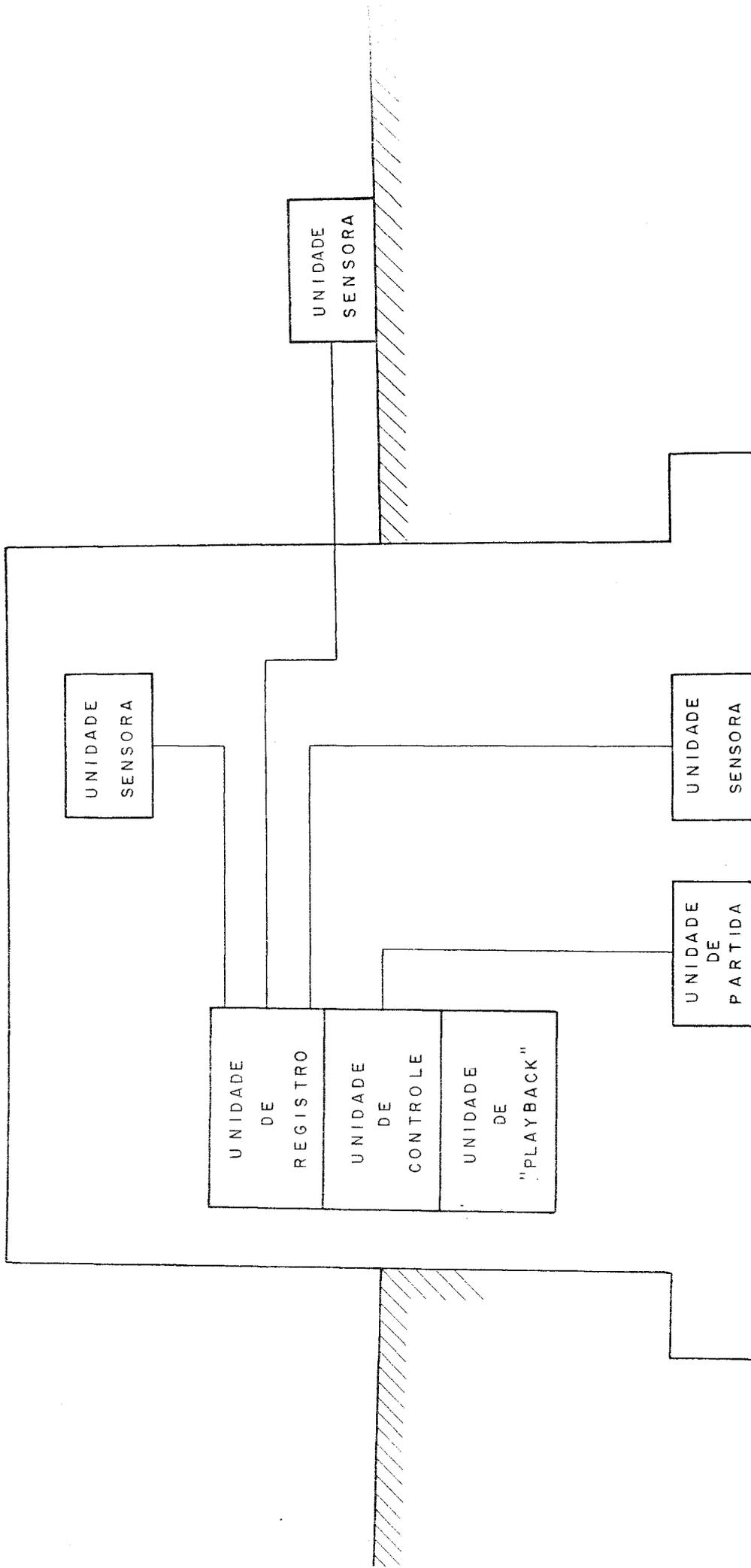


Fig. 7.1 - INTERCONEXÃO ENTRE AS UNIDADES REMOTAS E A UNIDADE CENTRAL PARA A CONFIGURAÇÃO MÍNIMA DE UM SISTEMA PARA REGISTRAR ACELERAÇÃO DE MOVIMENTOS FORTES

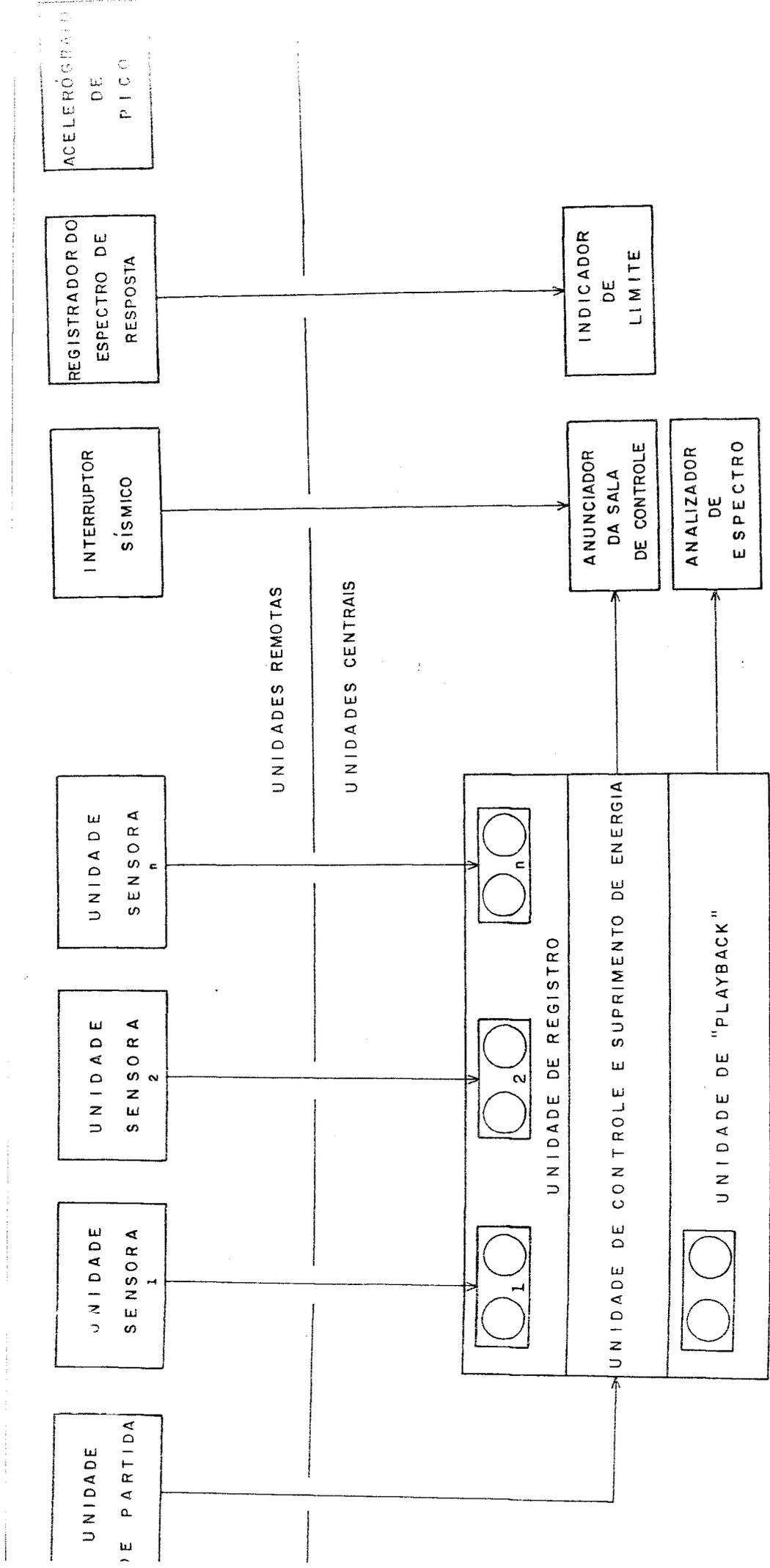


Fig. 8.1 - SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA PARA CENTRAIS NUCLEARES

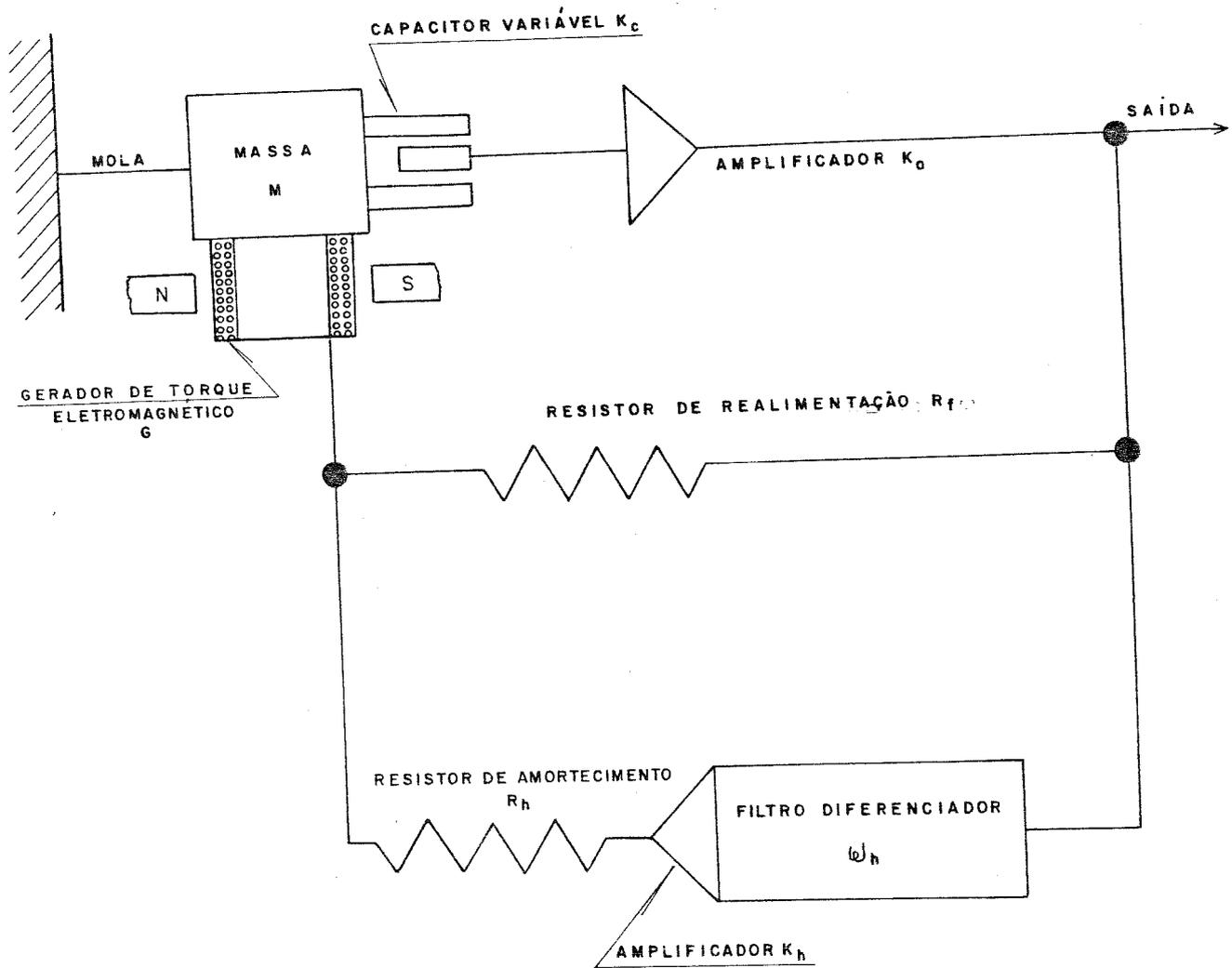


Fig. 8.2 - ACELERÔMETRO DE BALANCEAMENTO DE FORÇA (Esquemático)

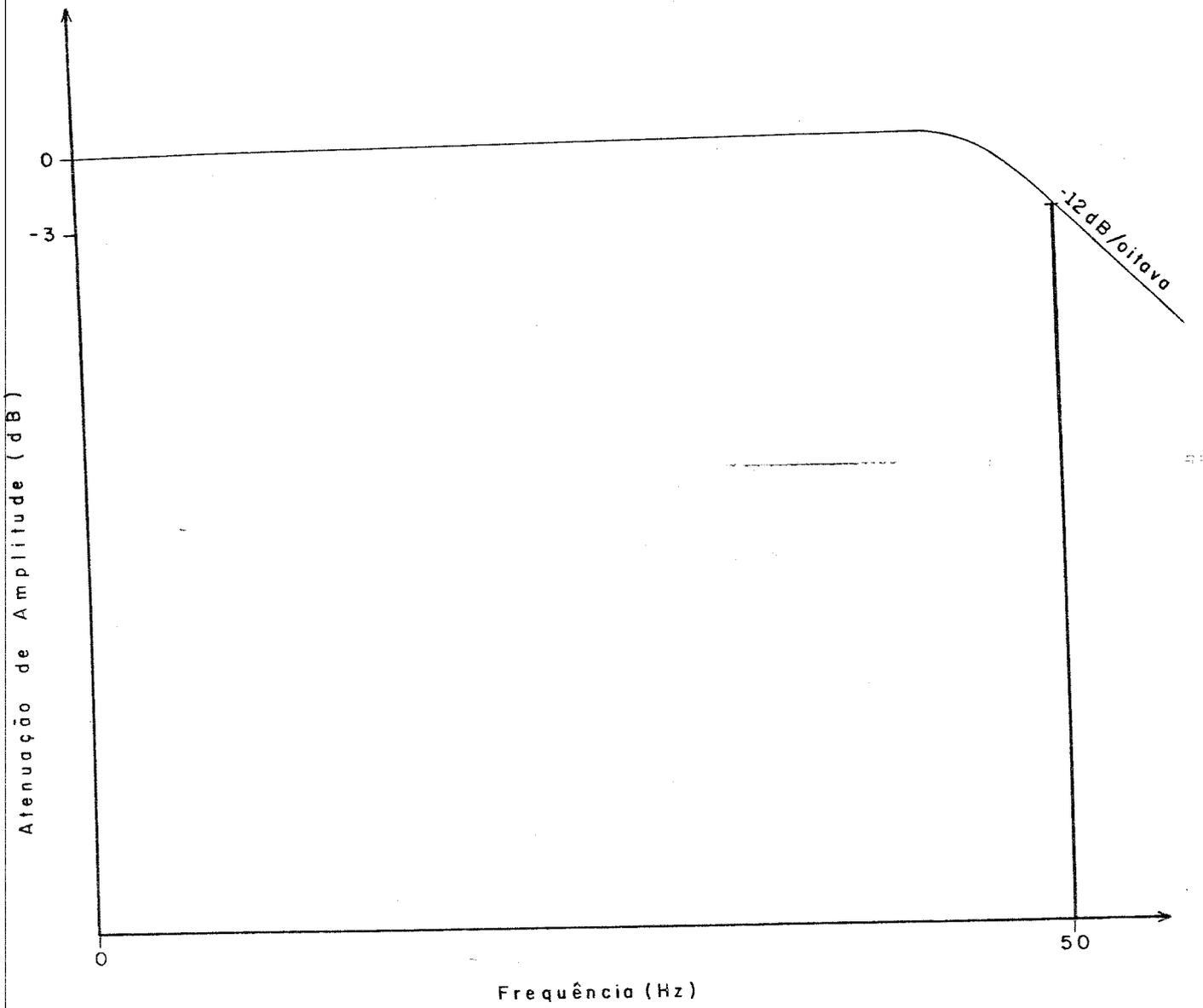


Fig.8.3 - CURVA DE RESPOSTA DO ACELERÔMETRO DE BALACEAMENTO DE FORÇA

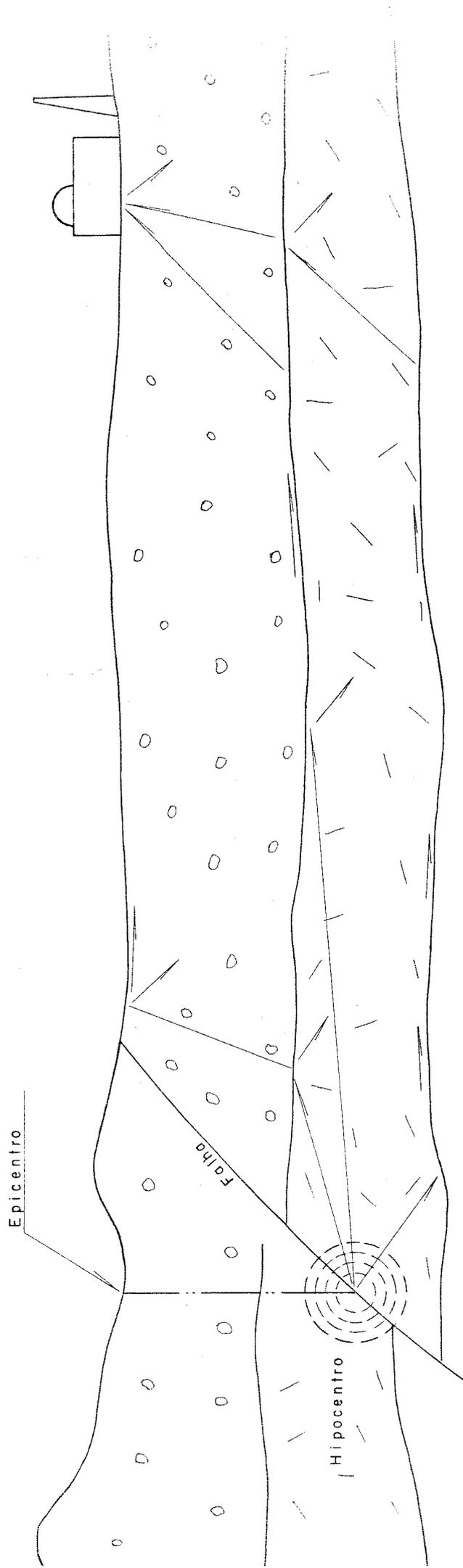


Fig.8.4 - CAMINHOS POSSÍVEIS DE TRANSMISSÃO DE ONDAS SÍSMICAS DE MOVIMENTOS FORTES PRÓXIMOS

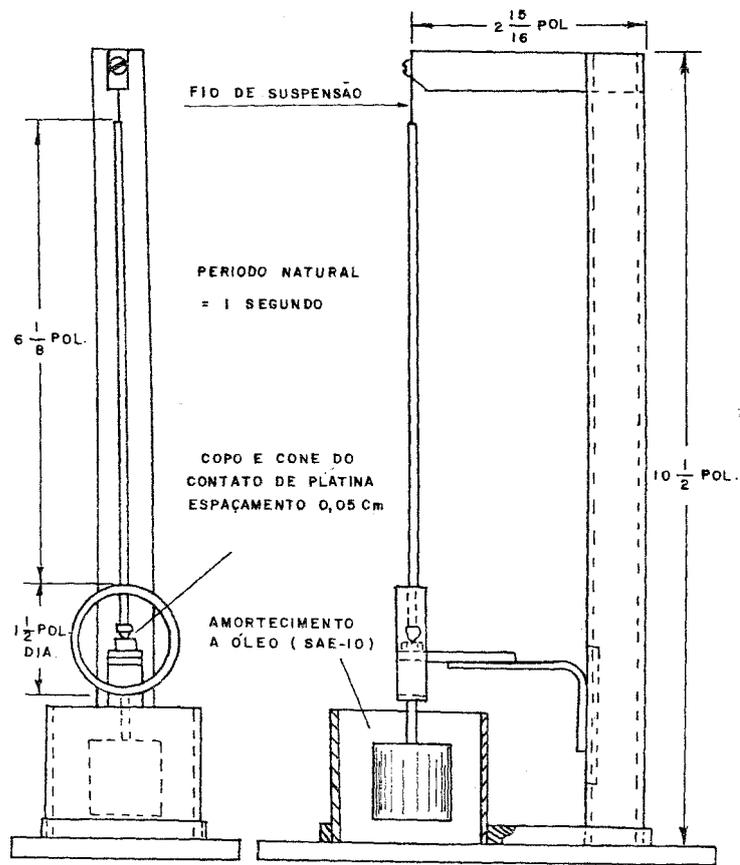


FIG.8.5 - PÊNULO DE PARTIDA DO ACELERÓGRAFO USCGS.

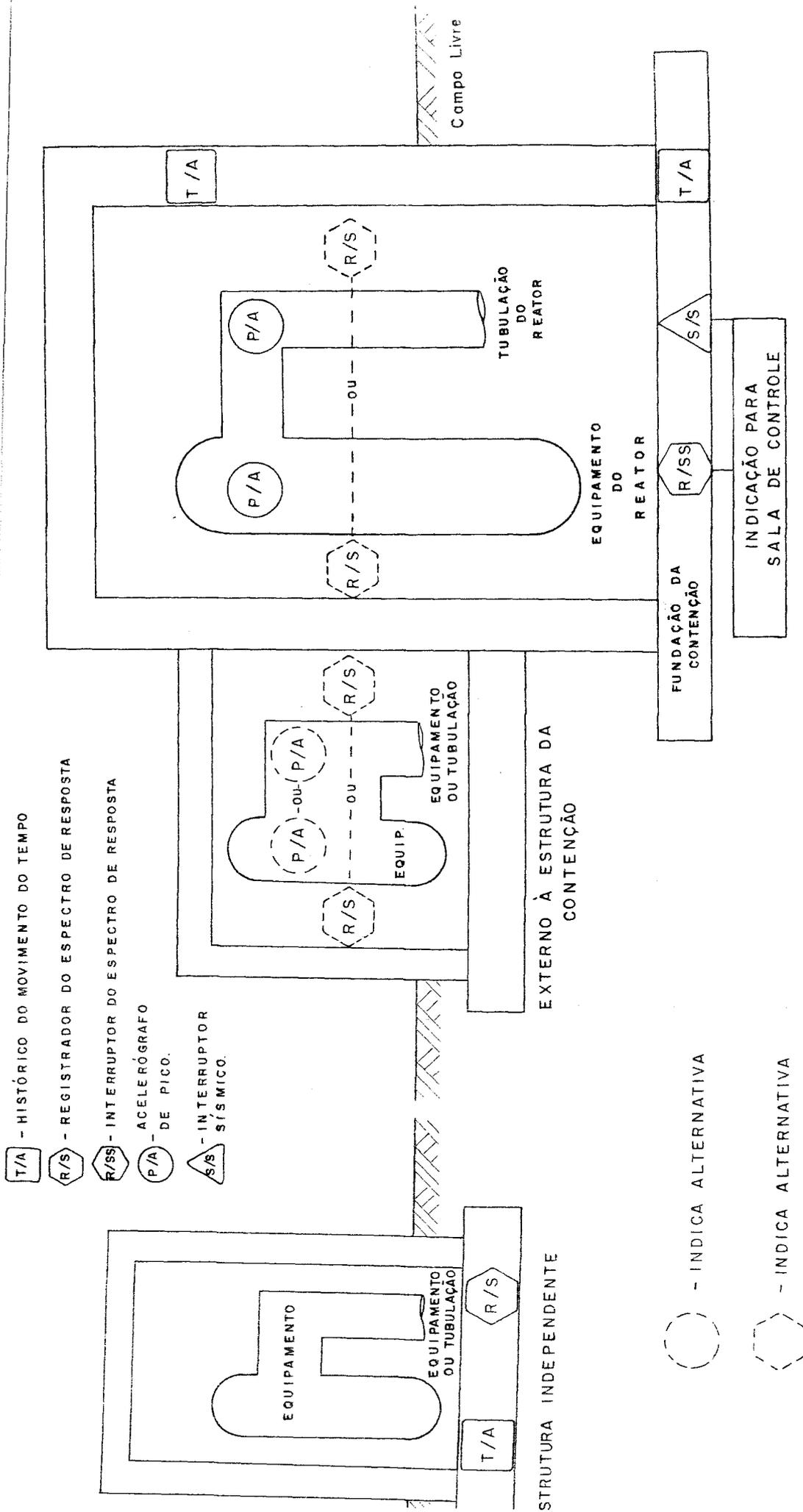


Fig.9.1 - DIAGRAMA DA LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA

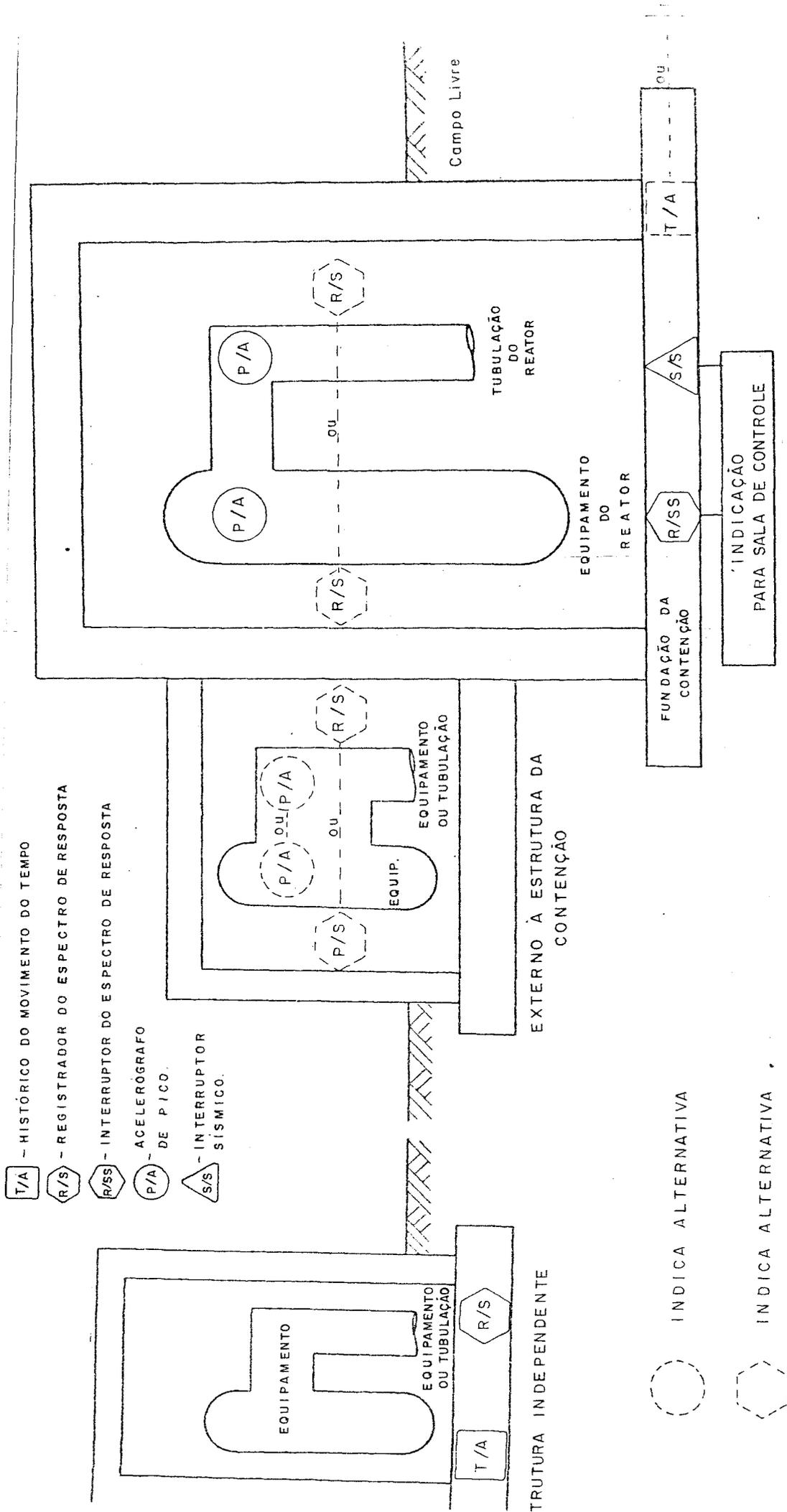


Fig.9.2 - DIAGRAMA DA LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA

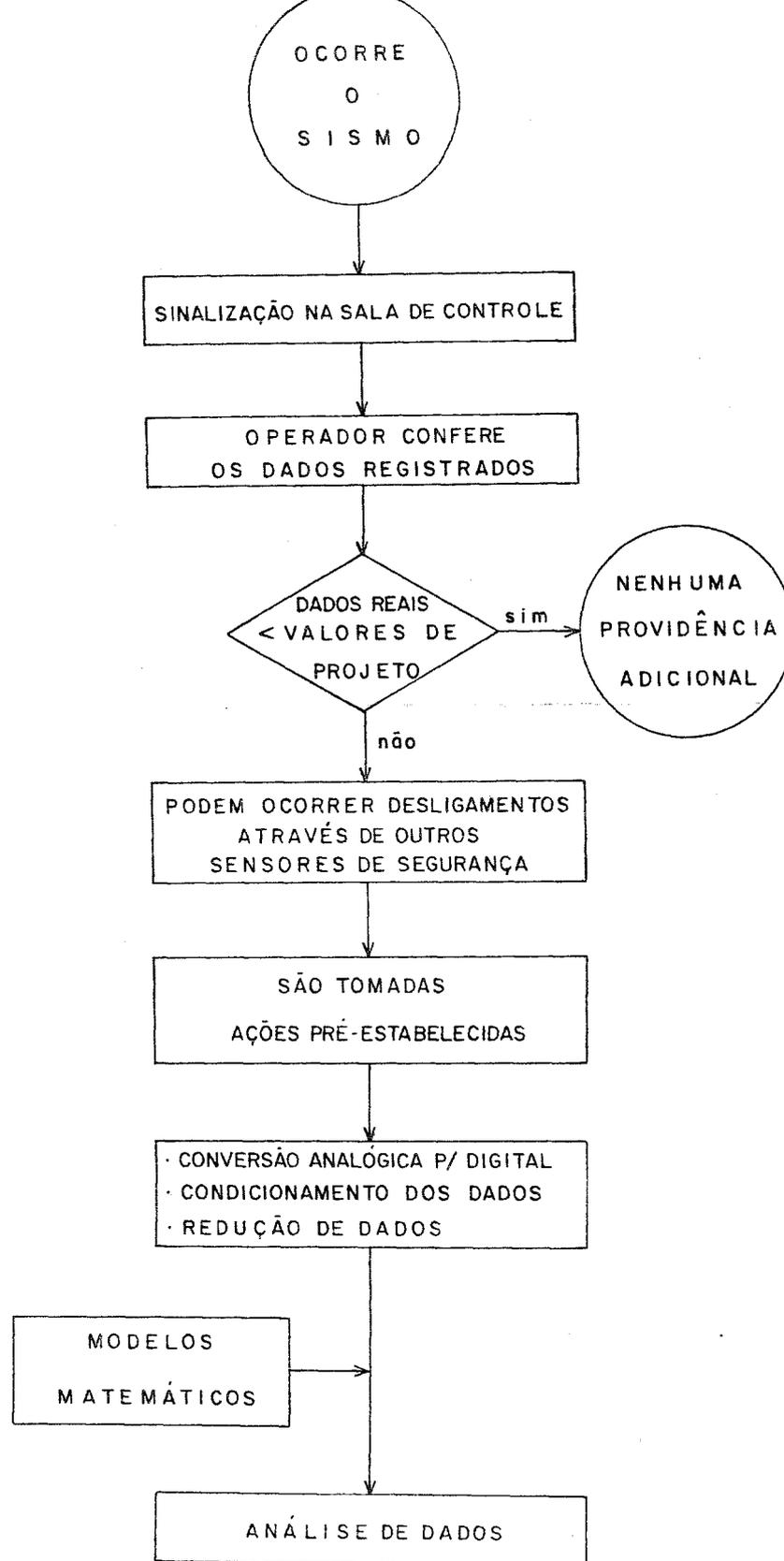


Fig.10.1 - SEQUÊNCIA APÓS A OCORRÊNCIA DE UM SISMO

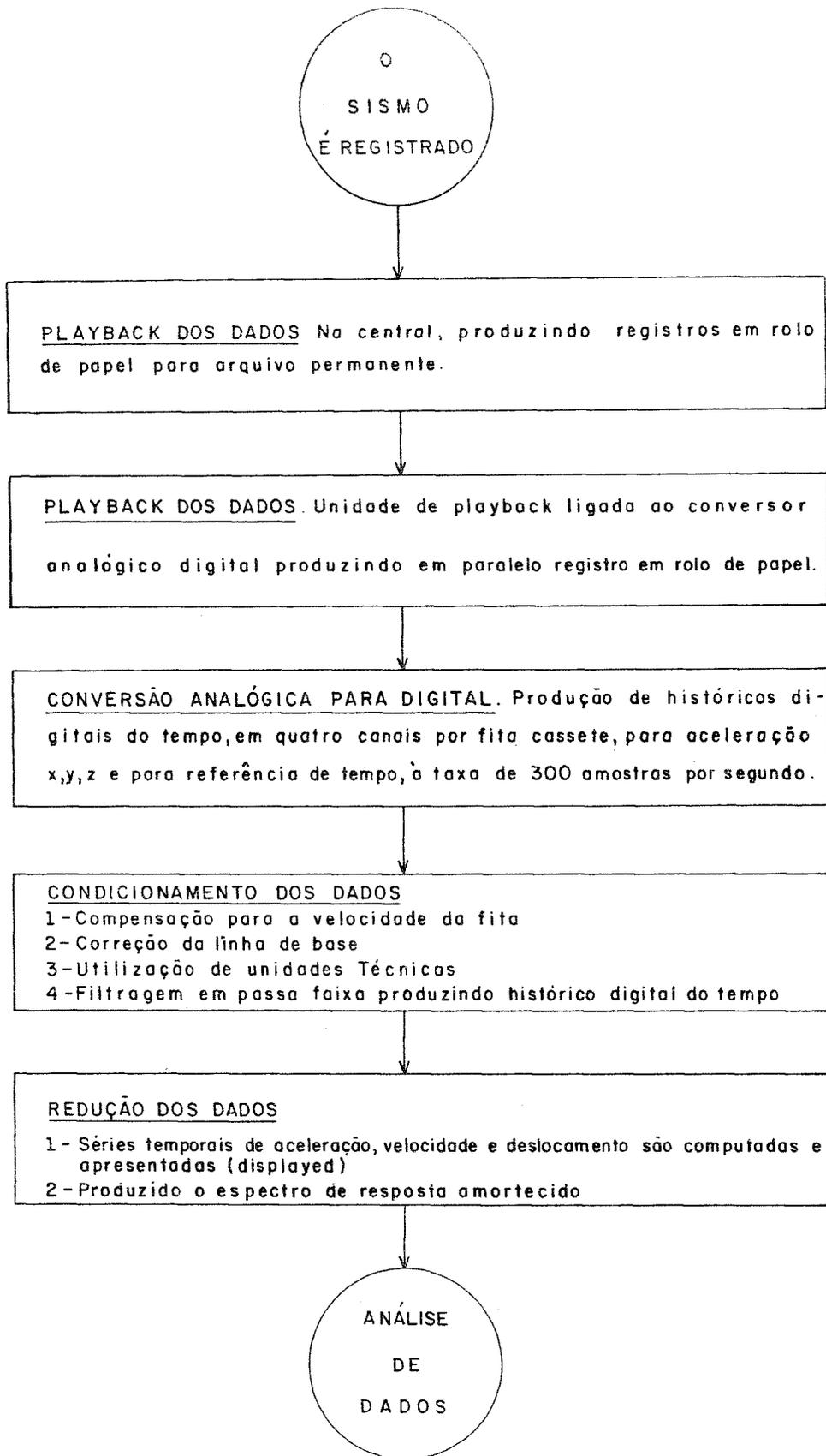


Fig. 10.2 - SEQUÊNCIA DE REDUÇÃO DE DADOS

---

APÉNDICE

# 1. ACELERÔMETRO DE MASSA SÍSMICA

## 1.1 Introdução

A Figura 1a mostra o princípio do acelerômetro, em que uma massa  $M$  está apoiada na mola  $K$  e se introduz atrito viscoso, representado pelo amortecedor  $D$ . As letras  $K$  e  $D$  representam respectivamente os coeficientes das forças de mola e de atrito. O conjunto é montado dentro de uma caixa, que se prende na superfície, cuja aceleração deseja-se medir. A aceleração é medida pelo deslocamento relativo entre a massa e a caixa. Idealmente, a massa deveria ficar imóvel e constituir uma verdadeira referência no espaço, mas ela se move devido às forças a ela transmitidas pela mola e amortecedor. Na Figura 1a estão indicadas as referências positivas estabelecidas para os deslocamentos da massa e da superfície de apoio.

Designa-se:

$x_m$  deslocamento absoluto da massa  $M$ , medido a partir de um ponto de equilíbrio estático do sistema.

$x_s$  deslocamento absoluto da caixa do instrumento, medido a partir de um ponto fixo.

$y$  deslocamento relativo entre a massa sísmica e a caixa do acelerômetro.

$x_r$  deslocamento relativo entre a caixa do acelerômetro e a massa sísmica.

Das definições acima, resulta:

$$y = x_m - x_s \quad (1a)$$

$$x_r = -y \quad (1b)$$

Aplicando-se o princípio de d'Alembert ao sistema em consideração, escreve-se a equação diferencial do movimento:

$$M \frac{d^2 x_m}{dt^2} + D \frac{d}{dt} (x_m - x_s) + K (x_m - x_s) = 0 \quad (2)$$

isto é, para qualquer corpo, a soma algébrica das forças externamente aplicadas e das forças que resistem ao movimento, em qualquer direção, é igual a zero.

Fazendo

$y = x_m - x_s$  na equação (2), obtem-se:

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + D \frac{dy}{dt} + Ky = -M \frac{d^2 x_s}{dt^2} = -M a(t) \quad (3)$$

Examinando-se a equação (3), conclui-se que o deslocamento relativo  $y$  pode ser obtido determinando-se o movimento absoluto da massa  $M$  (ver Figura 1b), quando se aplica a esta massa a força  $f = -M a(t)$  e considerando-se em repouso a caixa do instrumento. Na Figura 1b,  $a(t) = d^2 x_s / dt^2$  representa a aceleração que se pretende medir através do deslocamento  $y$ .

Será mais conveniente, para os objetivos em vista,



substituir  $x_r = -y$  na equação (3), obtendo-se a equação (4):

$$M \frac{d^2 x_r}{dt^2} + D \frac{d x_r}{dt} + K x_r = M a(t) \tag{4}$$

que pode ser interpretada de maneira análoga à equação (3), utilizando-se a Figura 1c.

### 1.2 Função de Transferência do Acelerômetro de Massa Sísmica

Aplicando-se a transformada de Laplace à equação diferencial (4), supondo condições iniciais nulas e fazendo

$$x_r(s) = \int x_r(t),$$

$$A(s) = \int a(t),$$

obtem-se:

$$Ms^2 x_r(s) + Ds x_r(s) + K x_r(s) = M A(s)$$

$$\frac{x_r(s)}{A(s)} = \frac{M/K}{(M/K)s^2 + (D/K)s + 1} \tag{5}$$

A equação (5) é similar à função de transferência de um servomecanismo de 2ª ordem. A frequência natural  $\omega_0 = \sqrt{K/M}$

e o fator de amortecimento  $\zeta = D/D_c$ , onde  $D_c = 2\sqrt{KM}$  é o amortecimento crítico. O movimento relativo entre a caixa do instrumento e a massa sísmica é proporcional à aceleração, em frequências baixas, em que  $M\omega^2/K$  e  $D\omega/K$  são muito menores do que 1. À medida que a frequência de operação  $\omega$  se aproxima da frequência natural, o erro aumenta. Acima da frequência natural, o denominador da equação (5) se comporta como  $M/K s^2$ . Como  $A(s) = s^2 x_s(s)$ , onde  $x_s(s) = \int x_s(t)$ , o sistema mede neste caso o deslocamento da caixa do instrumento:

$$x_r(s) = \frac{M/K}{(M/K) s^2} \quad A(s) = \frac{M/K}{(M/K) s^2} s^2 x_s(s) = x_s(s)$$

O valor usual desejado para o fator de amortecimento  $\zeta$  é cerca de 0,7, uma vez que este valor provê uma boa resposta estacionária a uma excitação senoidal e um sobresinal razoável para excitações transitórias.

O amortecimento pode ser obtido por imersão do conjunto massa-mola em um fluido viscoso, mas a variação da temperatura do fluido introduzirá variações no fator de amortecimento. O fator de amortecimento, entretanto, pode ser estabilizado aquecendo-se o fluido acima da temperatura ambiente e utilizando-se um sistema de controle da temperatura. O amortecimento pode também ser obtido eletricamente, como será visto mais adiante.

Resposta de um Sistema Linear a Excitações Transitórias

A transformada de Fourier possibilita determinar a resposta de um sistema linear a excitações transitórias, em termos da resposta estacionária a excitações senoidais, de acordo com as equações abaixo e Figura 2:

$$F_1(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) e^{-j\omega t} dt \quad (6)$$

$$F_2(j\omega) = F_1(j\omega) T(j\omega) \quad (7)$$

$$f_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_2(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (8)$$

onde  $f_1(t)$  e  $f_2(t)$  são respectivamente os sinais de entrada e saída de um sistema linear,  $F_1(j\omega)$  e  $F_2(j\omega)$  os correspondentes espectros de frequência e  $T(j\omega)$  é a função de transferência do sistema linear para uma excitação senoidal de frequência  $\omega$  rad/s.

Para uma transmissão sem distorção através do sistema linear, deve-se ter:

$$f_2(t) = A f_1(t - t_0) \quad (9)$$

onde  $A$  representa uma atenuação ou ganho constante e  $t_0$  representa o atraso de tempo da resposta em relação à excitação. Determinando-se a transformada de Fourier de  $f_2(t)$ , na equação

(9) pela equação (6), encontra-se:

$$F_2(j\omega) = A e^{-jt_0\omega} F_1(j\omega) \quad (10)$$

Comparando as equações (7) e (10), conclui-se que a função de transferência  $T(j\omega)$  para transmissão sem distorção deve ser

$$T(j\omega) = A e^{-jt_0\omega} \quad (11)$$

isto é, uma amplitude constante com a frequência e uma variação de fase proporcional à frequência.

Prosseguindo agora na análise do acelerômetro, vê-se, em vista do exposto, que as condições ótimas de operação do mesmo situam-se na faixa de frequências de excitação em que a resposta de amplitude é constante e a resposta de fase é proporcional à frequência.

#### 1.4 Resposta de Frequência do Acelerômetro de Massa Sísmica

Multiplicando o numerador e denominador da equação (5) por  $K/M$  e substituindo  $K/M = \omega_0^2$  e  $D/M = \zeta D_c/M = \zeta 2 \sqrt{KM}/M = 2 \zeta \sqrt{K/M} = 2 \zeta \omega_0$ , obtem-se a equação (12):

$$\frac{x_r(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{D}{M}s + \frac{K}{M}} = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$$

$$G(s) = \frac{x_r(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (12)$$

Fazendo  $s = j\omega$  na equação (12), encontra-se a resposta de frequência do acelerômetro de massa sísmica:

$$G(j\omega) = \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + j2\zeta\omega_0\omega} = \frac{1/\omega_0^2}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2 + 2j\zeta\frac{\omega}{\omega_0}} =$$

$$= |G(j\omega)| e^{j\theta(\omega)} \quad (13)$$

A resposta de amplitude é

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\omega_0^2 \sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2]^2 + (2\zeta\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \quad (14)$$

A resposta de fase é

$$\theta(\omega) = -\phi \quad (15a)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\zeta\omega/\omega_0}{1 - (\omega/\omega_0)^2} \quad (15b)$$

Observa-se que a frequência natural  $\omega_0$  é uma constante para um dado instrumento. A Figura 3 mostra a resposta de am

plitude, dada pelo gráfico de  $\omega_0^2 |G(j\omega)|$ , em função da relação de frequências  $\omega/\omega_0$  e do fator de amortecimento  $\zeta$ .

Pela Figura 3, vê-se que para um fator de amortecimento  $\zeta \approx 0,7$ , a resposta de amplitude se mantém constante para  $\omega/\omega_0$  variando entre 0,0 e cerca de 0,4. A extensão da faixa de frequência útil depende da magnitude do erro que pode ser tolerado. A Figura 4 mostra o erro de amplitude para vários valores do fator de amortecimento e de onde se conclui que o valor mais adequado de  $\zeta$  situa-se entre 0,65 e 0,70 (Erro de amplitude é a diferença entre o valor real de  $\omega_0^2 |G(j\omega)|$  e seu valor ideal de 1, em porcentagem).

A Figura 5 mostra a resposta de fase, em graus, em função da relação de frequências  $\omega/\omega_0$  e do fator de amortecimento  $\zeta$ .

Pela Figura 5, vê-se que para  $\omega/\omega_0$  variando entre 0,0 e 0,4 e para um fator de amortecimento compreendido entre 0,65 e 0,70, o ângulo de fase varia praticamente linearmente com a frequência, o que resulta na resposta de fase desejada.

2.1 Introdução

A Figura 6 mostra o esquema de um acelerômetro massa-mola, com transdução eletromagnética. Quando o acelerômetro é vibrado, a bobina move-se no campo magnético de um imã permanente, gerando uma tensão. Esta tensão é usada para amortecer o acelerômetro e é em seguida amplificada e integrada para produzir um sinal de saída proporcional à aceleração. A resposta de frequência é plana com relação à aceleração, desde uma frequência próxima de zero até a frequência natural do sistema massa-mola (tipicamente de 0,1 a 25 Hz).

A tensão induzida na bobina é proporcional à velocidade de relativa entre a bobina e o imã permanente e, portanto, proporcional à derivada da aceleração aplicada ao acelerômetro. A tensão induzida faz fluir uma corrente, limitada pela resistência de amortecimento. Esta corrente produz na bobina móvel uma força de reação proporcional à velocidade relativa bobina/imã, introduzindo amortecimento viscoso.

Para uma análise mais detalhada, será usado o circuito elétrico análogo ao sistema eletromecânico em consideração, mostrado na Figura 7, onde  $M$  é a massa associada à bobina móvel,  $L$  e  $R_c$  são a indutância e resistência da bobina,  $R_D$  a resistência de amortecimento e  $K$  o coeficiente da força de mola. O transformador ideal, presente no circuito análogo, transforma

quantidades mecânicas em elétricas e vice versa e tem uma relação de transformação  $1 : B\ell$ , onde  $B$  é a densidade de fluxo magnético no entreferro e  $\ell$  é o comprimento total do condutor da bobina. A tensão no primário do transformador ideal representa a velocidade relativa entre a bobina e o imã e a tensão no secundário representa a tensão induzida na bobina, quando o acelerômetro é vibrado. O amortecimento intrínseco do sistema massa-mola seria representado por uma condutância  $D$ , ligada em paralelo no circuito primário, mas foi desprezado em comparação com o amortecimento introduzido pela resistência  $R_D$ . O circuito análogo é estimulado por uma fonte de corrente  $f_s(t) = M d^2x_s/dt^2 = M a(t)$ , representando a força de inércia, introduzida pela aceleração aplicada ao sistema, pois, como se viu anteriormente, o deslocamento relativo (entre bobina e imã neste caso) pode ser obtido determinando-se o movimento absoluto da massa  $M$ , sujeita à ação da força  $f_s(t)$ , quando se considera em repouso a caixa do acelerômetro.

A tensão de saída  $v_o(t)$  do acelerômetro é dada pela tensão  $iR_D$  do circuito da Figura 7, atenuada a seguir pelo potenciômetro  $R_p$  de ajuste de sensibilidade, amplificada e integrada pelo amplificador-integrador, resultando em

$$v_o(t) = \int_0^t \lambda iR_D dt \quad (16)$$

onde  $\lambda$  é um fator numérico que leva em conta o potenciômetro  $R_p$  e o amplificador-integrador.

2.2

Função de Transferência do Acelerômetro com Transdução Eletromagnética

As equações de equilíbrio do circuito da Figura 7 podem ser escritas utilizando-se as relações do transformador ideal, representativas do acoplamento eletromecânico:

$$f = B \ell i \quad (17)$$

$$v = B \ell u \quad (18)$$

e as leis de Kirchhoff, supondo condições iniciais nulas:

$$M \frac{du}{dt} + K \int_0^t u dt + f = M a(t) \quad (19)$$

$$L \frac{di}{dt} + (R_C + R_D) i = v \quad (20)$$

Substituindo-se na equação (19)  $f = B \ell i$  dada pela equação (17) e aplicando a transformada de Laplace à equação resultante, obtem-se a equação (21):

$$s M u(s) + K \frac{u(s)}{s} + B \ell I(s) = M A(s) \quad (21)$$

onde  $u(s) = \mathcal{L} u(t)$ ,  $I(s) = \mathcal{L} i(t)$ ,  $A(s) = \mathcal{L} a(t)$ . Da equação (21), obtem-se:

$$u(s) = \frac{M A(s) - B \ell I(s)}{Ms + K/s} \quad (22)$$

Substituindo-se na equação (20)  $v = B \ell u$  dada pela equação (18) e aplicando a transformada de Laplace à equação resultante, obtem-se a equação (23):

$$s L I(s) + (R_C + R_D) I(s) = B \ell u(s) \quad (23)$$

Substituindo-se  $u(s)$  dado pela equação (22) na equação (23) e resolvendo a equação resultante em relação a  $I(s)$ , encontra-se:

$$\begin{aligned} I(s) &= \frac{B \ell \frac{sA(s)}{s^2 + \omega_0^2}}{sL + R_C + R_D + \frac{(B \ell)^2}{M} \frac{s}{s^2 + \omega_0^2}} \\ &= \frac{B \ell s A(s)}{Ls^3 + (R_C + R_D) s^2 + \left[ \omega_0^2 L + \frac{(B \ell)^2}{M} \right] s + (R_C + R_D) \omega_0^2} \end{aligned} \quad (24)$$

onde  $\omega_0 = \sqrt{K/M}$  é a freqüência natural do sistema massa-mola.

De acordo com a equação (16), a transformada de Laplace da tensão de saída  $v_o(t)$  é

$$V_o(s) = I(s) R_D \frac{\lambda}{s} \quad (25)$$

Substituindo-se  $I(s)$  dada pela equação (24) na equação (25) e dividindo o numerador e denominador da equação resultante por  $R_C + R_D$ , encontra-se:

$$\frac{V_O(s)}{A(s)} = \frac{B \ell \lambda \frac{R_D}{R_C + R_D}}{\frac{L}{R_C + R_D} s^3 + s^2 + \left[ \frac{\omega_0^2 L}{R_C + R_D} + \frac{(B \ell)^2}{M(R_C + R_D)} \right] s + \omega_0^2} \quad (26)$$

A equação (26) mostra a função de transferência do sistema, tratando-se neste caso de um sistema de 3ª ordem.

Nesta equação, o termo

$$\frac{(B \ell)^2}{M(R_C + R_D)} = \frac{D}{M} = 2 \zeta \omega_0 \quad (27)$$

onde  $D$  é o coeficiente da força de atrito viscoso (amortecimento introduzido por  $R_C + R_D$ ) e  $\zeta = D/D_C$  é o fator de amortecimento, sendo  $D_C = 2 \sqrt{MK}$  a expressão do amortecimento crítico do sistema massa-mola.

Para interpretar o termo  $(B \ell)^2/M(R_C + R_D)$ , considere  $L = 0$  na Figura 7 e transfira  $R_C + R_D$  para o primário do transformador ideal. Obtem-se no primário uma resistência  $(R_C + R_D)$   $(1/B \ell)^2$  ou uma condutância  $(B \ell)^2/(R_C + R_D)$ . Mas uma condutância no primário, em paralelo com a capacitância  $M$  e com a indutância  $1/K$ , representa realmente o coeficiente de uma for

ça de atrito viscoso. Portanto  $(B \ell)^2 / (R_C + R_D) = D$  e  $(B \ell)^2 / M (R_C + R_D) = D/M = 2 \zeta \omega_0$  como se vê pela equação (27).

Agora, se  $L \neq 0$ , o coeficiente da força de atrito viscoso contém ainda um componente dependente de  $L$ , como se verá a seguir.

### 2.3 Resposta de Freqüência do Acelerômetro com Transdução Eletromagnética

Fazendo  $s = j\omega$  na equação (26) e substituindo-se  $2 \zeta \omega_0$  da equação (27), obtem-se a função de transferência para excitação senoidal:

$$\begin{aligned} \frac{V_o(j\omega)}{A(j\omega)} &= \frac{B \ell \lambda R_D / (R_C + R_D)}{\frac{-L\omega^2}{R_C + R_D} (j\omega)^2 + \left[ \frac{\omega_0^2 L}{R_C + R_D} + \frac{(B \ell)^2}{M(R_C + R_D)} \right] j\omega + \omega_0^2} \\ &= \frac{B \ell \lambda R_D / (R_C + R_D)}{-\omega^2 + \left[ \frac{-L\omega^2}{R_C + R_D} + \frac{L \omega_0^2}{R_C + R_D} + 2 \zeta \omega_0 \right] j\omega + \omega_0^2} \end{aligned} \quad (28)$$

Esta equação é semelhante à equação (13) para o acelerômetro massa-mola, em que o termo entre colchetes é  $2 h \omega_0$ , designando-se por  $h$  o fator de amortecimento total, isto é:

$$\frac{-L \omega^2}{R_C + R_D} + \frac{L \omega_0^2}{R_C + R_D} + 2 \zeta \omega_0 = 2 h \omega_0 \quad (29)$$

Observa-se, de acordo com esta relação, que o fator de amortecimento  $h$  é variável com a frequência  $\omega$ . Então pode-se fazer uma escolha de parâmetros como será mostrado no item seguinte, de forma a ampliar a faixa de frequências do sistema massa-mola, que antes se estendia apenas até uma fração de  $\omega_0$ . Reescrevendo a equação (28) com o parâmetro  $h$ , obtém-se

$$\begin{aligned} \frac{V_0(j\omega)}{A(j\omega)} &= \frac{B \ell \lambda R_D / (R_C + R_D)}{\omega_0^2 - \omega^2 + j 2 h \omega_0 \omega} = \\ &= \frac{B \ell \lambda R_D / (R_C + R_D)}{\omega_0^2 \left[ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j 2 h \frac{\omega}{\omega_0} \right]} \end{aligned} \quad (30)$$

que como já se observou é análoga à equação (13) para um sistema de 2ª ordem.

A resposta de amplitude é

$$\left| \frac{V_0(j\omega)}{A(j\omega)} \right| = \frac{B \ell \lambda R_D / (R_C + R_D)}{\omega_0^2 \sqrt{\left[ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \right]^2 + \left( 2 h \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}} \quad (31)$$

A resposta de fase é

$$\theta(\omega) = - \phi \quad (32a)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2 h \omega / \omega_0}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (32b)$$

## 2.4 Projeto do Acelerômetro com Transdução Eletromagnética

As equações desenvolvidas anteriormente permitem escolher os parâmetros do sistema para uma resposta de frequência ótima. Idealmente, o radicando da equação (31) deve ser igual a 1, dentro da faixa de frequências de operação do acelerômetro, já que para  $\omega = 0$  seu valor é 1.

Fazendo

$$\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left[2 h \frac{\omega}{\omega_0}\right]^2 = 1 \quad (33)$$

para  $\omega/\omega_0 = 1$ , encontra-se  $h = 0,5$ .

Substituindo  $\omega = \omega_0$  e  $h = 0,5$  na equação (29), encontra-se  $\zeta = 0,5$ .

A equação (29) simplifica-se então para

$$\frac{-L\omega^2}{R_C + R_D} + \frac{L\omega_0^2}{R_C + R_D} + \omega_0 = 2 h \omega_0 \quad (34)$$

Fazendo  $\omega/\omega_0 = 0,5$  (centro da faixa de operação) na

equação (33), encontra-se  $h = 0,661$ . Substituindo-se  $\omega = 0,5 \omega_0$  e  $h = 0,661$  na equação (34), obtem-se:

$$\frac{-L (0,5 \omega_0)^2}{R_C + R_D} + \frac{L \omega_0^2}{R_C + R_D} + \omega_0 = 2 (0,661) \omega_0,$$

de onde se calcula

$$\frac{L \omega_0}{R_C + R_D} = 0,429 \text{ ou } \frac{L}{R_C + R_D} = \frac{0,429}{\omega_0} \quad (35)$$

A equação (35) mostra a relação entre  $L$ ,  $R_C + R_D$  e  $\omega_0$ , para uma resposta de amplitude ótima no centro e no extremo da faixa de frequências, isto é, para  $\omega = 0,5 \omega_0$  e  $\omega = \omega_0$ .

Substituindo-se a equação (35) na equação (34), encontra-se:

$$h = 0,715 - 0,215 (\omega/\omega_0)^2 \quad (36)$$

A equação (36) permite determinar o valor de  $h$  para cada valor de  $\omega$  entre 0 e  $\omega_0$ . Ela foi determinada para que o radicando no denominador da equação (31) seja igual a 1 nas frequências  $\omega = \omega_0$  e  $\omega = 0,5 \omega_0$ , já que ele é igual a 1 na frequência  $\omega = 0$ . Os demais pontos da resposta de amplitude podem ser determinados calculando-se o valor de  $h$  para cada valor de  $\omega/\omega_0$ , de acordo com a equação (36) e substituindo-se estes valores na equação (31). Observa-se que na equação (31) o coeficien

te

$$\frac{B \ell \lambda R_D / (R_C + R_D)}{\omega_0^2}$$

é uma constante para um dado acelerômetro e não modifica a forma da resposta de amplitude.

A resposta de fase pode ser determinada para os mesmos valores de  $\omega/\omega_0$  e  $h$ , utilizando-se as equações (32).

Os resultados destes cálculos estão reunidos na Tabela 1 e as curvas de resposta são apresentadas nas Figuras 8 e 9.

#### Observação

A presença de um integrador ideal foi implicitamente considerada ao escrever-se a equação (25). Entretanto, a resposta de frequência de um integrador construído com um amplificador operacional difere da resposta do integrador ideal apenas nos extremos da faixa de frequências. No extremo inferior, a resposta é afetada por um polo em  $-1/A_0 RC$ , em vez de um polo na origem, sendo  $RC$  a constante de integração e  $A_0$  o ganho de malha aberta do amplificador operacional, em frequências baixas. Como  $A_0$  é muito grande, a resposta de frequência resultante do acelerômetro com transdução eletromagnética pode ser considerada plana a partir de um valor muito pequeno de  $\omega$ . O outro polo da função de transferência do integrador encontra-se muito

afastado da origem e não afeta a resposta de frequência do ac  
lerômetro.

3.1 Introdução

A Figura 10 mostra o princípio deste tipo de acelerômetro, que consta de um dispositivo massa-mola, com amortecimento intrínseco praticamente desprezível, sendo a massa solidária a um gerador de força\*. Este compõe-se de uma bobina situada no campo magnético de um ímã permanente. A mola do acelerômetro é do tipo de flexão. O deslocamento relativo  $x_r(t)$  entre a caixa do instrumento e a massa sísmica é detectado por um dispositivo a capacitor variável, cuja constante de proporcionalidade (função de transferência) é dada por

$$K_c = \frac{\text{tensão de saída}}{\text{deslocamento relativo de entrada}} \quad (37)$$

Um transformador diferencial linear variável poderia também ser utilizado como detector, mas no caso tem-se um captador de sinal a capacitor variável. A tensão fornecida pelo detector é amplificada em um amplificador de ganho  $G_a$ , obtendo-se a tensão de saída  $e_c(t)$ . Quando a caixa do acelerômetro é vibrada por um movimento de aceleração  $a(t)$ , tudo se passa como se a caixa permanecesse imóvel e a massa  $M$  sofresse a ação de uma força  $M a(t)$ . O deslocamento relativo entre a caixa e a massa,

---

\* Alternativamente denominado gerador de torque.

$x_r(t)$ , mede a aceleração  $a(t)$ . Para tornar o sistema mais rígido e aumentar sua frequência natural, realimenta-se o sinal de saída, através da resistência  $R_f$ , no gerador de força. A corrente que circula na bobina do gerador de força produz uma força  $f = K'i$ , que atua na direção do eixo sensível do acelerômetro e no sentido de se opor ao movimento da massa  $M$ .  $K'$  é uma constante de proporcionalidade que relaciona as grandezas força e corrente no gerador de força. Para estabilizar o sistema e controlar seu amortecimento, realimenta-se o sinal de saída, através de um filtro de avanço de fase, de função de transferência  $s/(s + \omega_h)$ . Para obter-se o amortecimento apropriado, projeta-se o filtro para agir como um diferenciador puro, na faixa de frequências de trabalho do acelerômetro,  $\omega < \omega_n$ , onde  $\omega_n$  é a frequência natural do sistema. Para isto, escolhe-se  $\omega_h \gg \omega_n$ . Supondo, por exemplo,  $f_n = 50$  Hz, escolhe-se  $f_h = 500$  Hz, que correspondem respectivamente a  $\omega_n = 314$  rad/s e  $\omega_h = 3140$  rad/s.

O amortecimento pode ser ajustado pela resistência  $R_h$  ou pelo ganho da tensão  $G_h$ , do amplificador que se segue ao filtro diferenciador da Figura 10.

### 3.2 Diagrama de Blocos do Acelerômetro

Para uma análise mais detalhada, traça-se, na Figura 11, o diagrama de blocos do sistema da Figura 10.

Na Figura 11, a função de transferência

$$\frac{1}{s^2 + 2 \zeta \omega_0 s + \omega_0^2}$$

representa o sistema massa-mola, cujo fator de amortecimento in trínseco é dado por  $\zeta$  e a frequência natural é  $\omega_0 = \sqrt{(K/M)}$ .

$K_c$  é o coeficiente de proporcionalidade do dispositi vo detector a capacitor variável, conforme definido anteriormen te, e  $G_a$  é o ganho de tensão do amplificador de mesmo nome.

A corrente realimentada através de  $R_f$  pode ser calcu lada desprezando-se a impedância da bobina em relação a  $R_f$  e desprezando-se a tensão induzida na bobina (devido ao movimento desta no campo mangético) em relação a  $e_c(t)$ , obtendo-se:

$$I_f(s) = \frac{E_c(s)}{R_f}$$

A força gerada pelo gerador de força é proporcional à corrente,

$$F_f(s) = K' I_f(s) = \frac{K' E_c(s)}{R_f} .$$

Sendo a bobina solidária à massa  $M$ , a aceleração cor respondente vale

$$A_f(s) = \frac{F_f(s)}{M} = \frac{K'}{R_f M} E_c(s), \quad (38)$$

que é útil na construção do diagrama de blocos.

O amortecimento no sistema da Figura 10 é obtido realimentando-se no gerador de força uma corrente proporcional à derivada da tensão de saída. Usa-se um resistor de amortecimento  $R_h$ , um amplificador de ganho  $G_h$  e um filtro diferenciador, de função de transferência  $s/(s + \omega_h)$ . Assim, tem-se atuando sobre a massa  $M$  uma força proporcional à derivada da tensão de saída, ou seja, proporcional à velocidade relativa massa/caixa do instrumento.

Para o diagrama de blocos, deve-se converter a corrente em força, multiplicando-se por  $K'$  e dividir o resultado por  $M$ , obtendo-se a aceleração:

$$A_h(s) = \frac{K'}{R_h M} G_h \frac{s}{s + \omega_h} E_c(s) \quad (39)$$

onde  $G_h$  é o ganho de tensão do amplificador de mesmo nome.

Com isto, completa-se a explanação sobre o diagrama de blocos da Figura 11.

### 3.2 Função de Transferência do Acelerômetro

O diagrama de blocos pode agora ser reduzido, obtendo-se a função de transferência de malha fechada do sistema.

Elimina-se primeiro a malha interna no diagrama da Figura 11, pela aplicação da fórmula clássica  $G/(1 + GH)$ , obtendo-se:

$$\frac{\frac{K_c G_a}{s^2 + 2 \zeta \omega_0 s + \omega_0^2}}{1 + \frac{K_c G_a}{s^2 + 2 \zeta \omega_0 s + \omega_0^2} \left(\frac{K'}{R_f M}\right)} = \frac{K_c G_a}{s^2 + 2 \zeta \omega_0 s + \omega_0^2 + \frac{K_c G_a K'}{R_f M}} \quad (40)$$

Esta função de transferência vem mostrada no diagrama reduzido da Figura 12.

Aplicando-se novamente a mesma fórmula anterior, elimina-se a malha de realimentação da Figura 12 e obtém-se, finalmente, a função de transferência de malha fechada para o acelerômetro de balanceamento de força:

$$\frac{E_c(s)}{A(s)} = \frac{K_c G_a}{s^2 + 2 \zeta \omega_0 s + \omega_0^2 + \frac{K_c G_a K'}{R_f M} + K_c G_a \frac{K'}{R_h M} G_h \frac{s}{s + \omega_h}} \quad (41)$$

Esta função de transferência pode ser simplificada da maneira que se segue:

Como se viu anteriormente, faz-se  $\omega_h \gg \omega$ , onde  $\omega$  representa as frequências de trabalho do acelerômetro e assim o filtro de avanço de fase age como um diferenciador puro, isto é,  $s/(s + \omega_h) \cong s/\omega_h$ .

Além disso, o amortecimento intrínseco do sistema massa-mola é praticamente desprezível, sendo assim  $\zeta \cong 0$ . Ainda, no sistema de balanceamento de força, tem-se

$$\omega_0^2 \ll K_c G_a \frac{K'}{R_f M}$$

Com estas simplificações, a função de transferência de malha fechada final torna-se

$$\frac{E_c(s)}{A(s)} = \frac{K_c G_a}{s^2 + K_c G_a \frac{K'}{R_h M \omega_h} s + \frac{K_c G_a K'}{R_f M}} \quad (42)$$

Comparando-se esta equação com a equação de um sistema de 2ª ordem

$$\frac{\text{saída}}{\text{entrada}} = \frac{K}{s^2 + 2 h \omega_n s + \omega_n^2} \quad (43)$$

onde  $h$  é o fator de amortecimento e  $\omega_n$  é a frequência natural do sistema, conclue-se que

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_c G_a K'}{R_f M}} \quad (44)$$

e

$$\begin{aligned} 2 h \omega_n &= K_c G_a \frac{K'}{R_h M \omega_h} \\ &= K_c G_a \frac{K'}{R_f M} \frac{R_f}{R_h} \frac{G_h}{\omega_h} = \omega_n^2 \frac{R_f}{R_h} \frac{G_h}{\omega_h}, \end{aligned}$$

de onde se obtém

$$h = \frac{1}{2} \frac{\omega_n}{\omega_h} \frac{R_f}{R_h} G_h \quad (45)$$

A função de transferência dada pela equação (42) mostra que o acelerômetro de balanceamento de força é também um sistema de 2ª ordem, com frequência natural dada pela equação (44) e fator de amortecimento dado pela equação (45). Da mesma maneira que para o acelerômetro de massa sísmica, cujo funcionamento é descrito pela equação (12), o valor mais adequado para o coeficiente de amortecimento do acelerômetro de balanceamento de força é também  $h = 0,7$ .

A resposta de frequência do acelerômetro de balanceamento de força é dada também pelas curvas da Figura 3 e Figura 5, com  $\omega_0$  substituído por  $\omega_n$  e  $\zeta$  substituído por  $h$  e com a ressalva de que as ordenadas da Figura 3 representam agora

$$\omega_n^2 \left| \frac{E_c(j\omega)}{A(j\omega)} \right| \frac{1}{K_c G_a},$$

em vez de

$$\omega_0^2 \left| \frac{X_r(j\omega)}{A(j\omega)} \right|.$$

Tabela 1 - RESULTADOS DE PROJETO DE UM ACELERÔMETRO  
COM TRANSDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA.

$w/w_0$	$h$	Resposta de Amplitude	Erro da Am plitude(%)	Resposta de Fase
0,0	0,715	1,000	0	0°
0,1	0,713	1,000	0	8,20°
0,2	0,706	1,000	0	16,40°
0,3	0,696	1,000	0	24,64°
0,4	0,681	1,000	0	32,95°
0,5	0,661	1,000	0	41,40°
0,6	0,638	1,003	0,3	50,09°
0,7	0,610	1,006	0,6	59,14°
0,8	0,577	1,009	0,9	68,71°
0,9	0,541	1,008	0,8	78,96°
1,0	0,500	1,000	0	90°

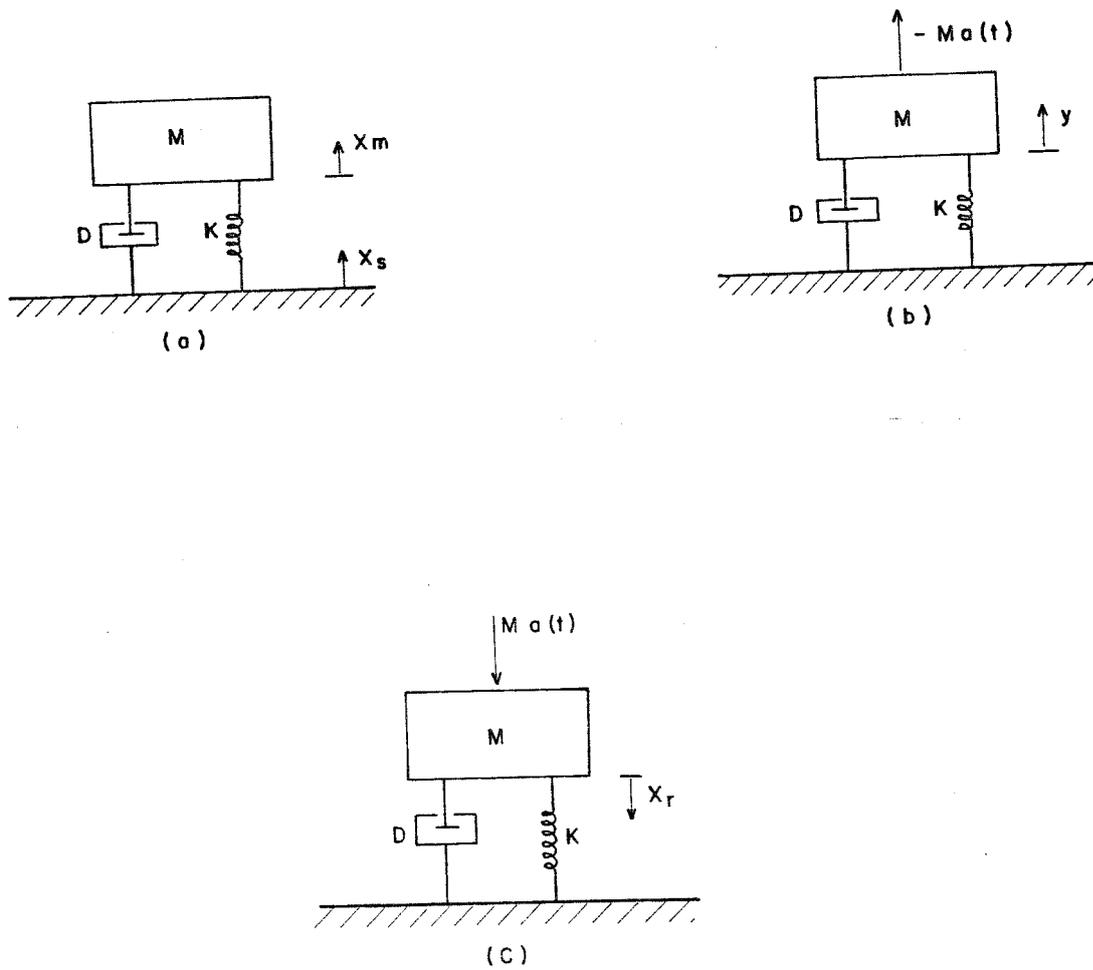


Fig. 1 - PRINCÍPIO DO ACELERÔMETRO MASSA-MOLA

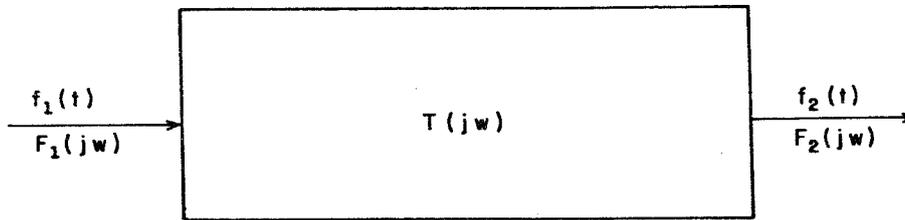


Fig.2 - SISTEMA LINEAR  $T(j\omega)$

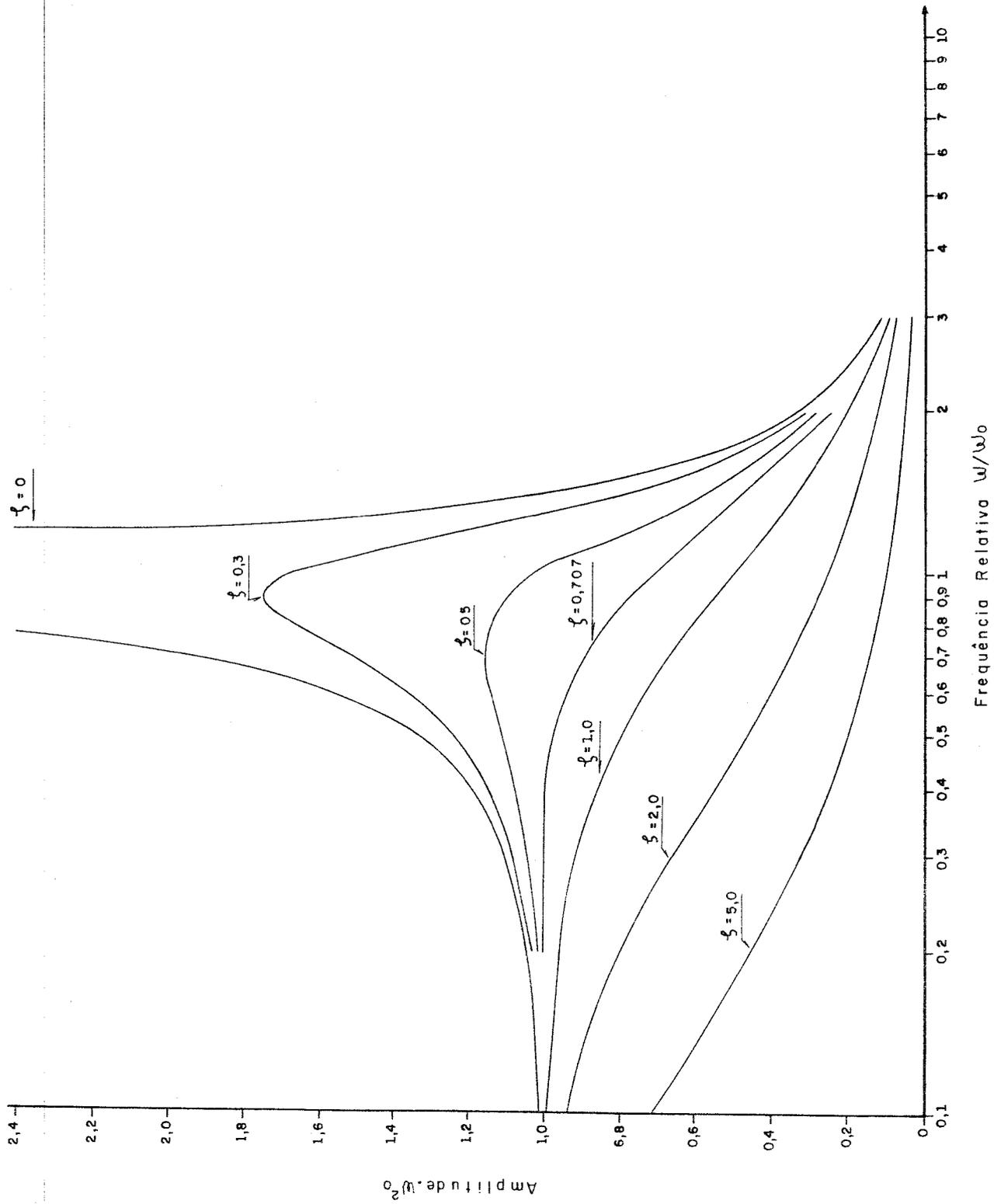


Fig. 3 - RESPOSTA DE UM INSTRUMENTO SÍSMICO À ACELERAÇÃO SENOIDAL

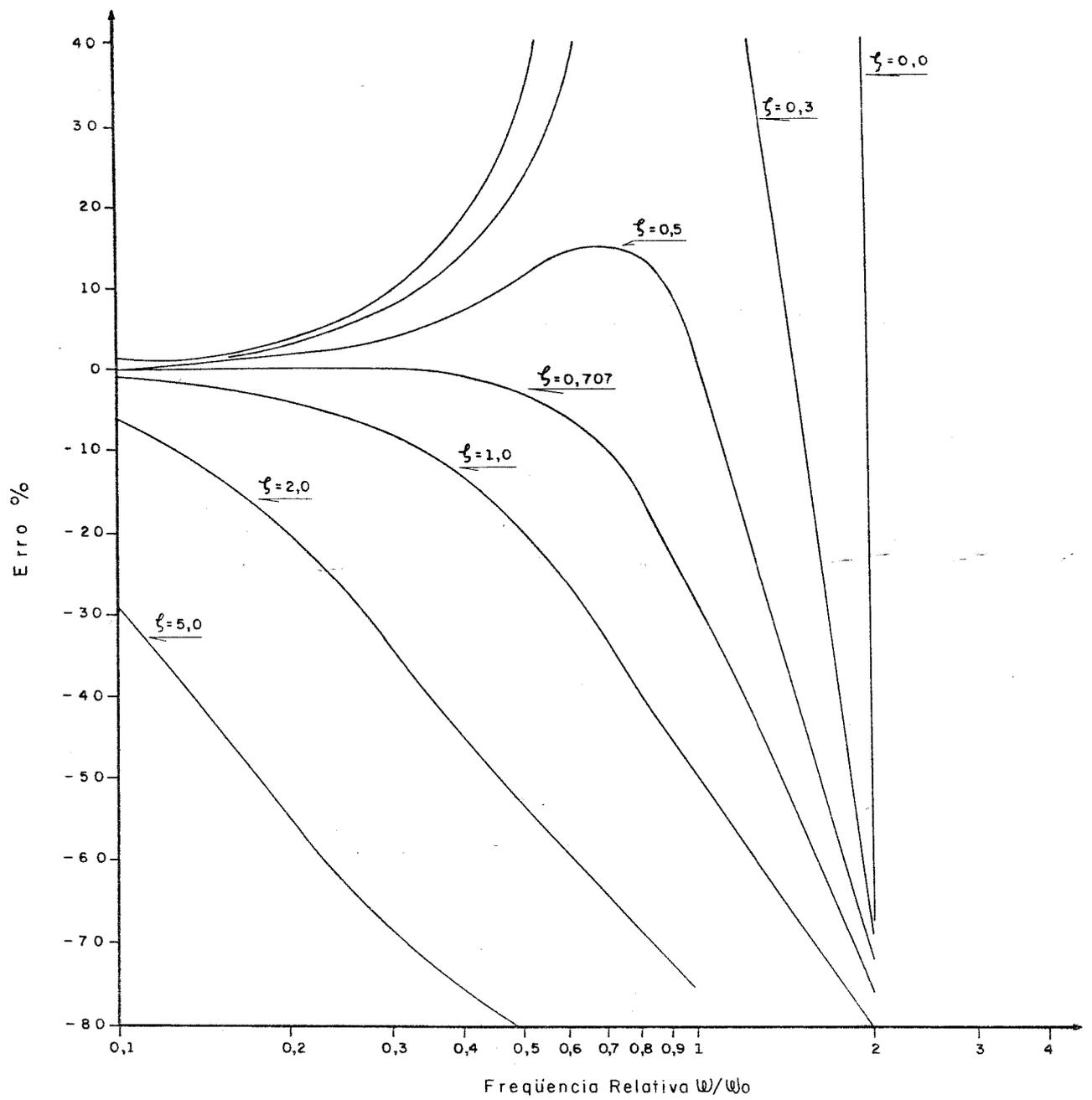


Fig.4 - ERRO DE AMPLITUDE PARA UM ACELERÔMETRO MASSA - MOLA

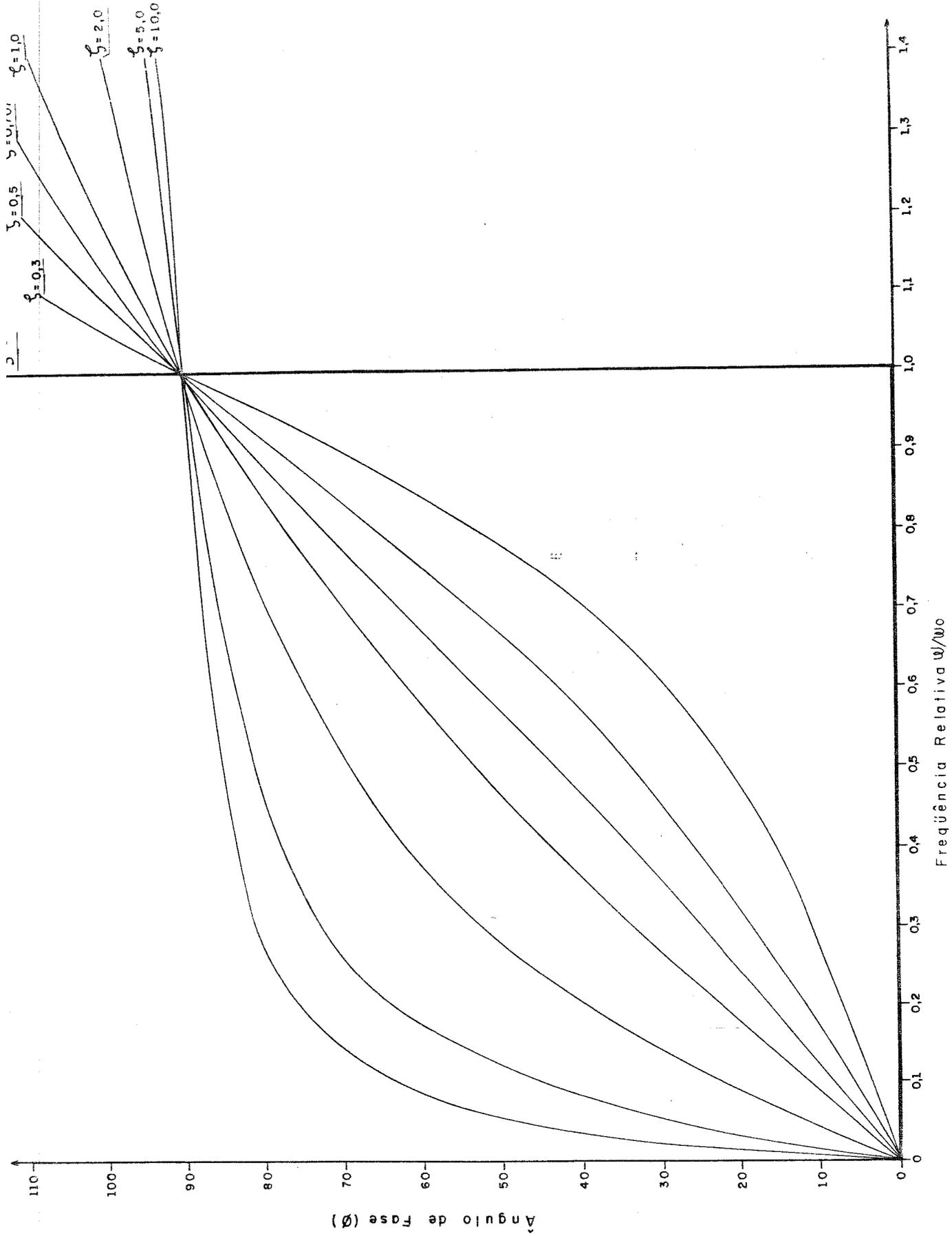


Fig. 5 - RESPOSTA DE FASE DE UM INSTRUMENTO SÍSMICO À ACELERAÇÃO SENOIDAL.

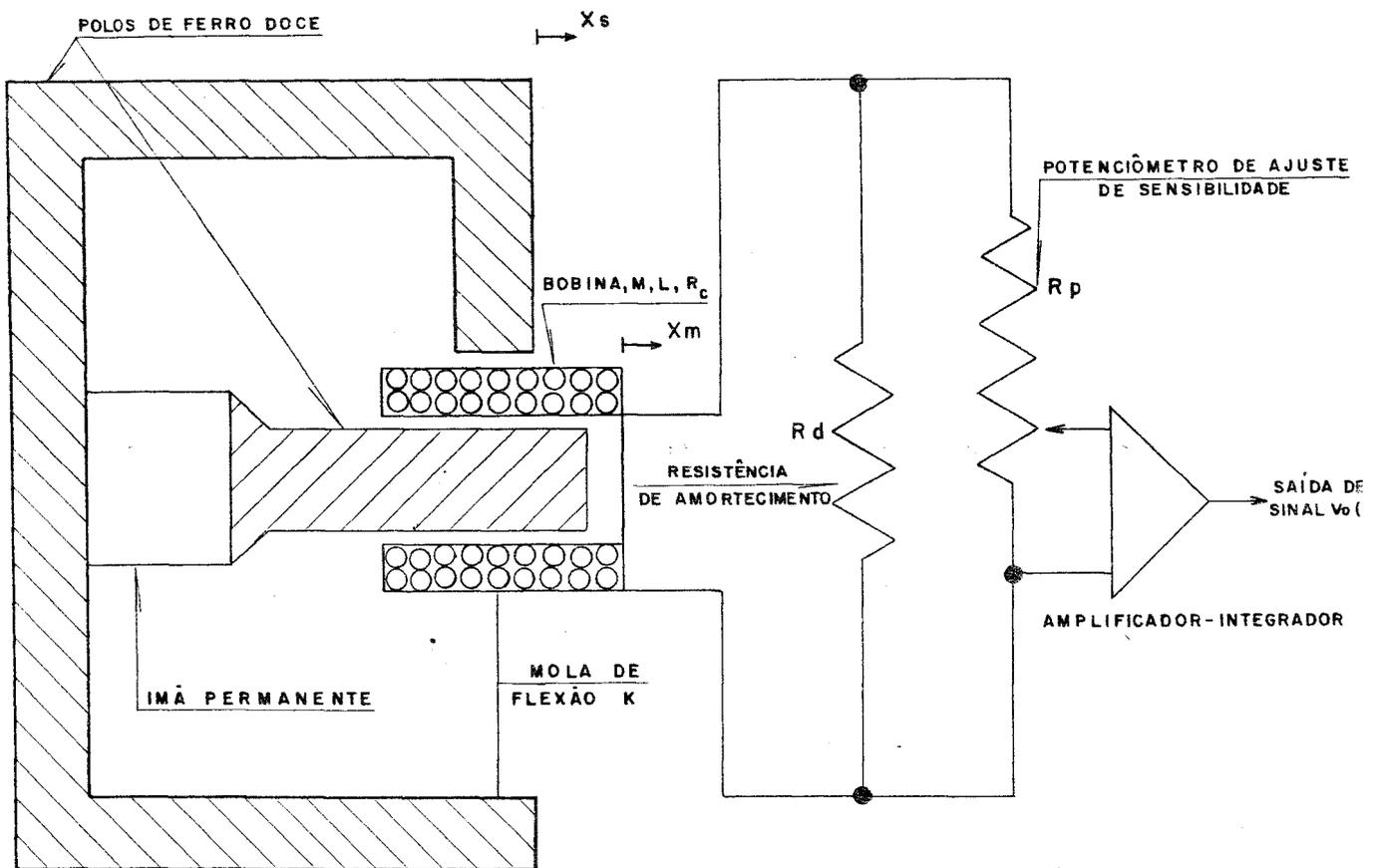
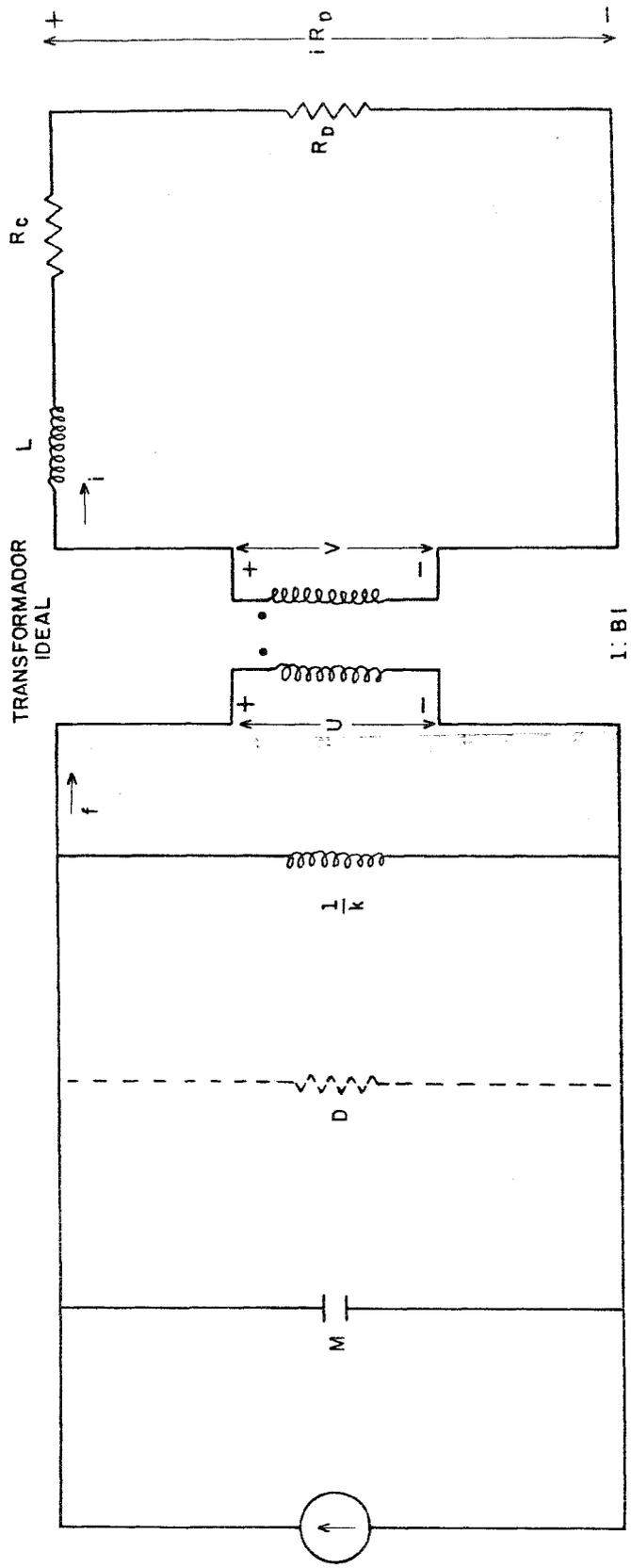


Fig. 6 - ESQUEMA DE UM ACELERÔMETRO MASSA-MOLA COM TRANSDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA



$$M \frac{d^2 x_s}{dt^2} = M a(t) = f_s(t)$$

Fig. 7 - CIRCUITO ANÁLOGO DE UM ACELERÔMETRO COM TRANSDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

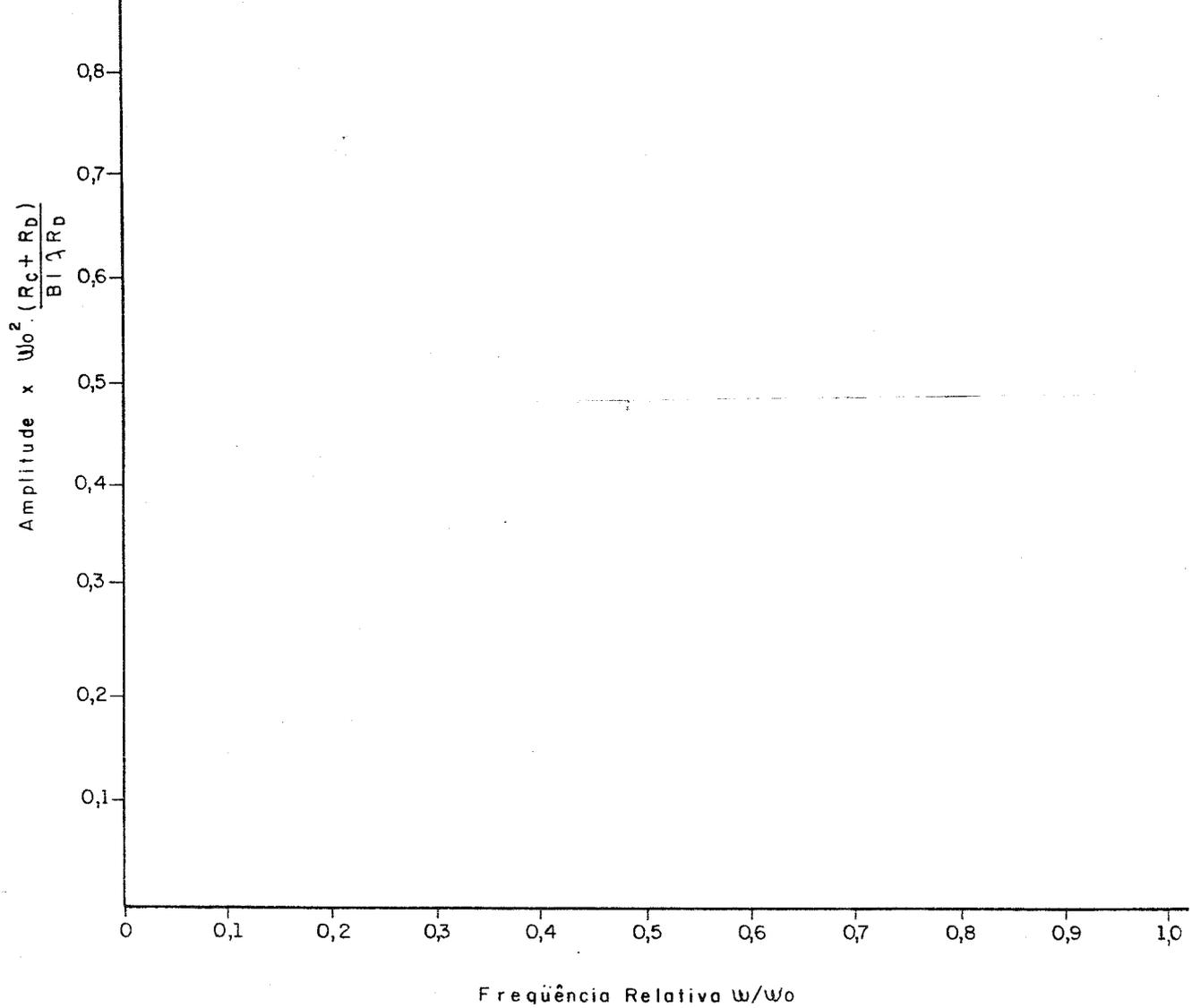


Fig.8 - RESPOSTA DE AMPLITUDE DE UM INSTRUMENTO SÍSMICO COM TRANSDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA À ACELERAÇÃO SENOIDAL.

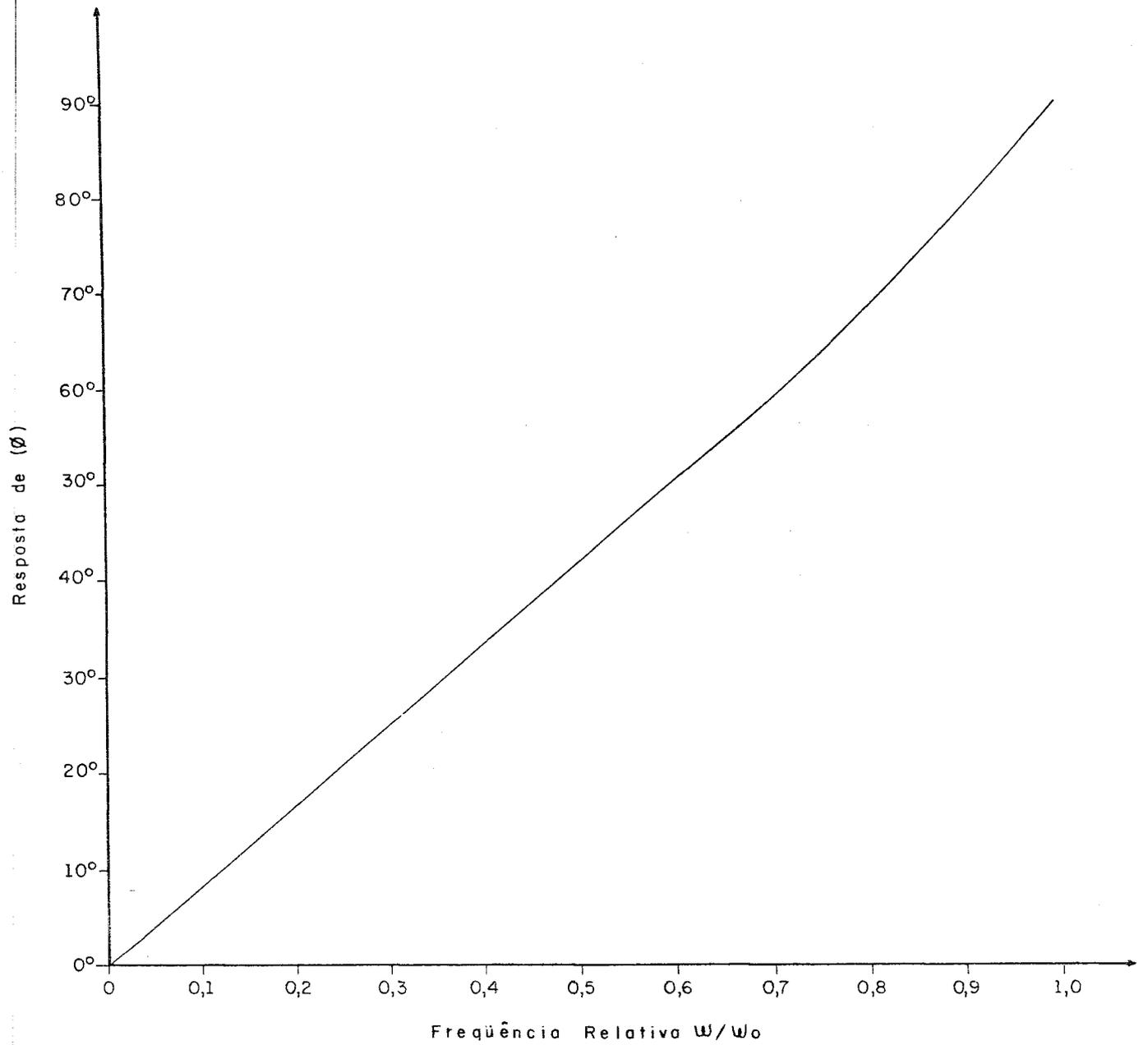


Fig.9 - RESPOSTA DE FASE DE UM INSTRUMENTO SÍSMICO COM TRANSDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA À ACELERAÇÃO SENOIDAL.

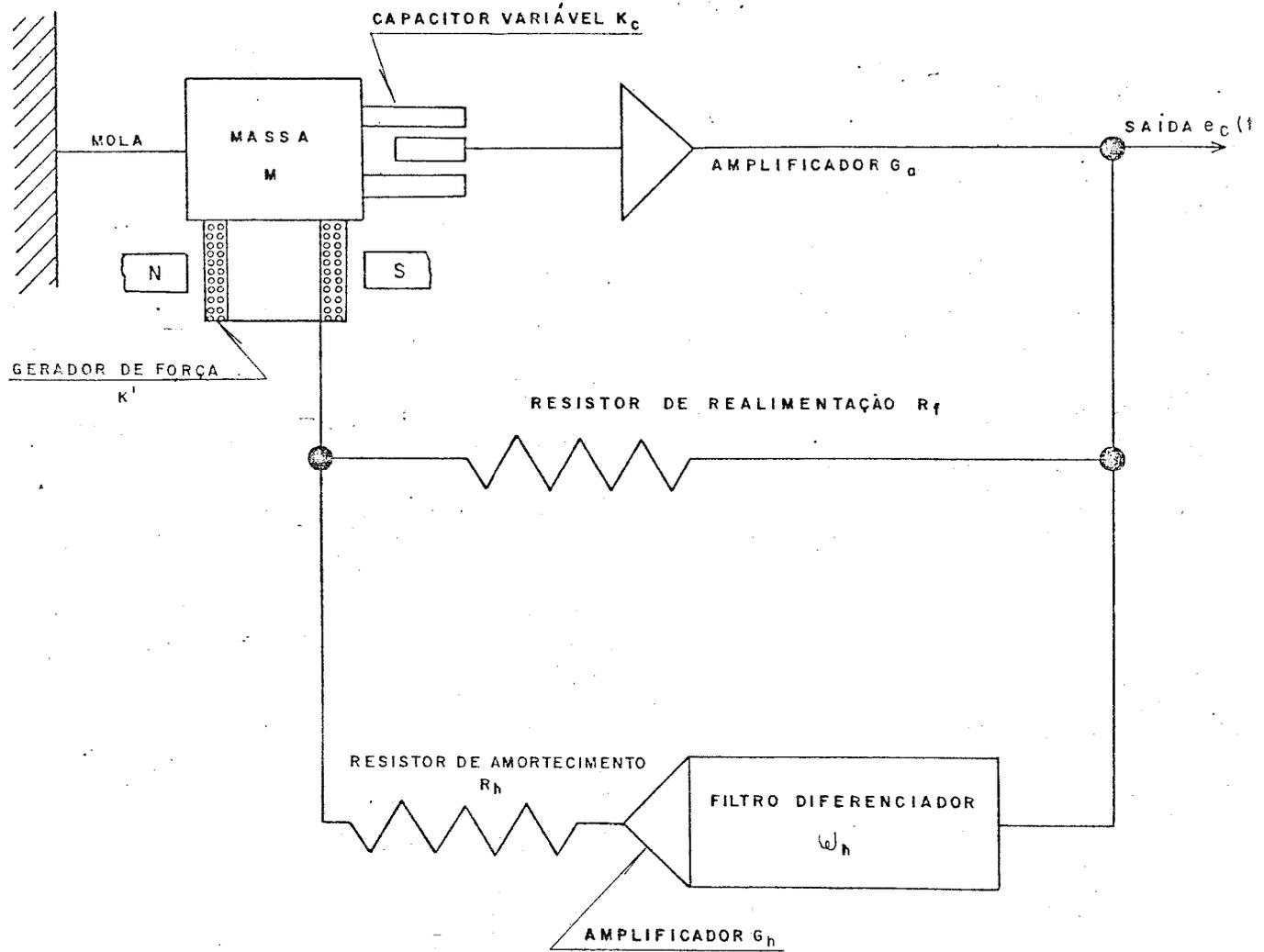


Fig. 10 - ACCELERÔMETRO DE BALANCEAMENTO DE FORÇA (Esquemático)

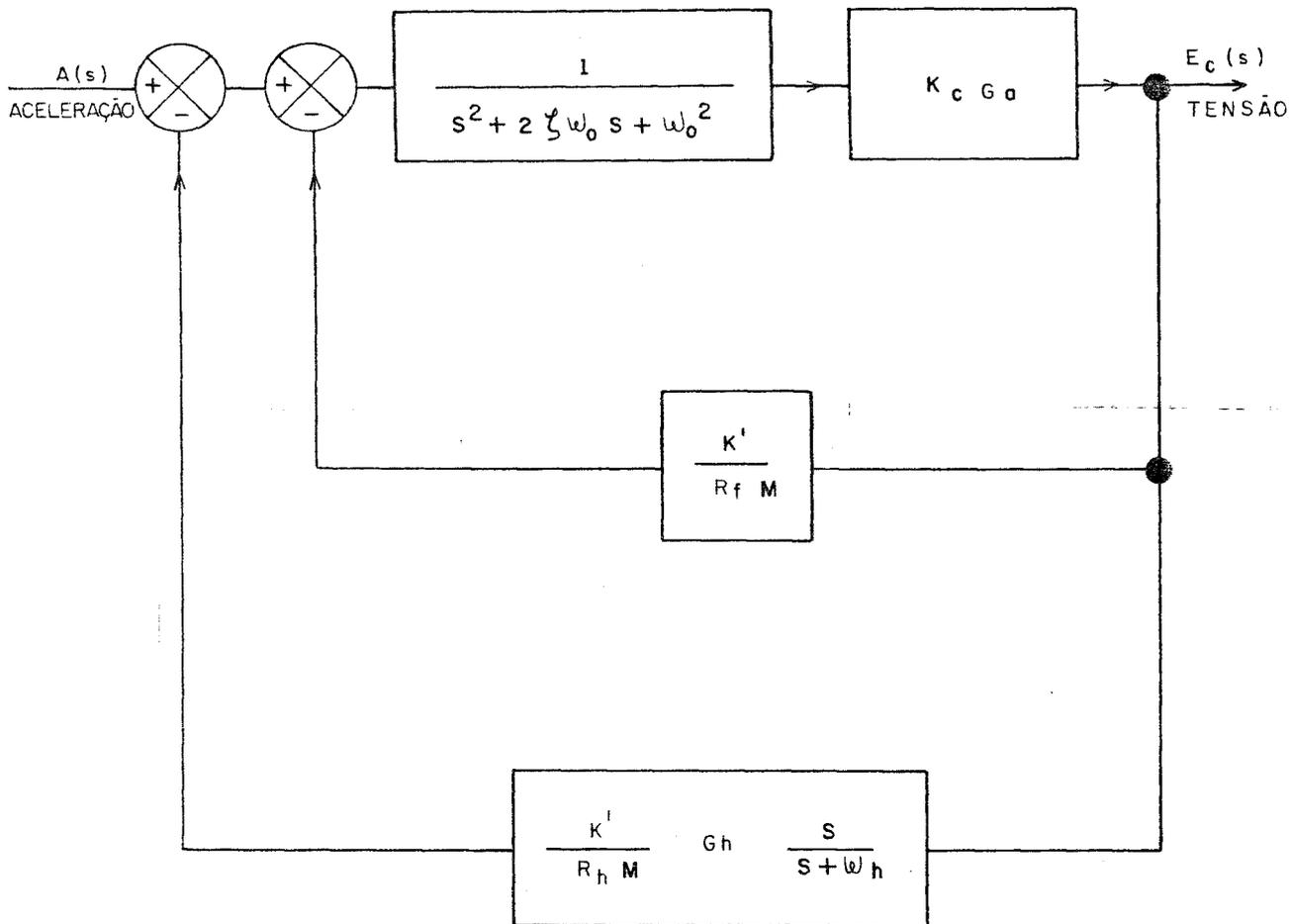


Fig.11 - DIAGRAMA DE BLOCO DO ACELERÔMETRO DE BALANCEAMENTO DE FORÇA

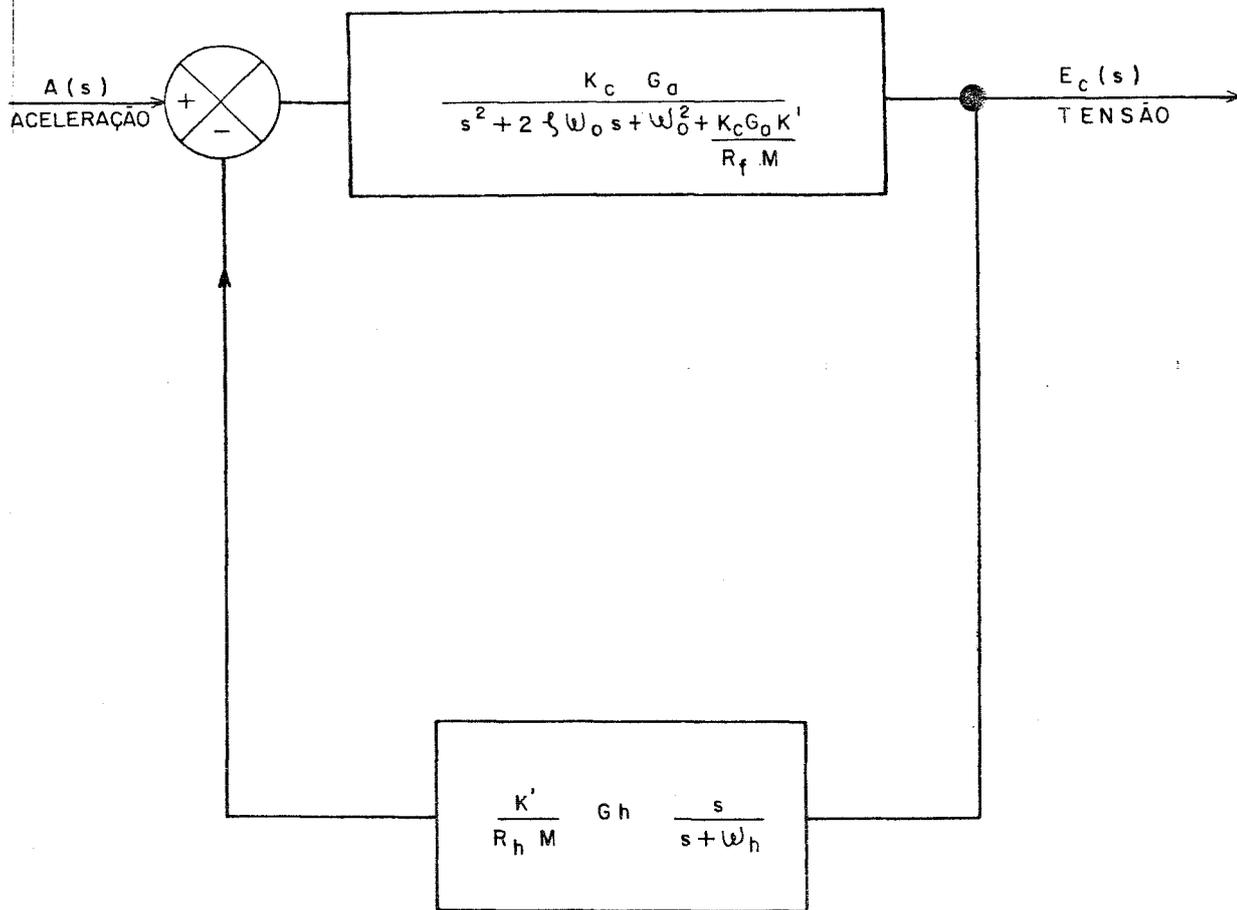


Fig.12 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO ACELERÔMETRO DE BALANCEAMENTO DE FORÇA (Em Processo de Redução)

INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA PARA CENTRAIS  
NUCLEARES

AUTOR: MURILLO SENNE JÚNIOR

ORIENTADOR: FLÁVIO SOARES DE MENEZES