

# INFLUÊNCIA DA NATUREZA DO SOLO NA SEGURANÇA DAS ESTRUTURAS AOS SISMOS

## Effects of soil conditions upon earthquake structural safety

por

A. J. C. Mineiro\*

**RESUMO :** Mostra-se como a natureza do solo pode afectar apreciavelmente as características das solicitações sísmicas e, conseqüentemente, o comportamento e a probabilidade de rotura das estruturas nele fundadas. Apontam-se os inconvenientes de definir a intensidade sísmica independentemente da natureza do solo de fundação, através de uma densidade média espectral de aceleração constante para um dado intervalo de frequências (0 a 5 Hz). Para reduzir a probabilidade de roçura de uma estrutura a valores compatíveis com a sua função, é fundamental avaliar a capacidade de selectividade de frequência do terreno de fundação e atender aos eventuais efeitos de amplificação por ressonância solo-estrutura.

**SYNOPSIS :** Seismic loading can be considerably influenced by local soil conditions, and so the behaviour and probability of failure of structures founded on soil. It is emphasized that it is inconvenient to define seismic intensity through a constant power spectrum of acceleration over the frequency range of 0 to 5 Hz, taking no account of local soil conditions. To reduce to acceptable values the probability of failure of a structure it is necessary to evaluate the frequency selectivity of the soil to take in account the eventual amplification effects produced by a sort of resonant phenomenon.

### INTRODUÇÃO

O problema da segurança das estruturas é, como se sabe, essencialmente probabilístico. Existem inúmeras incertezas na previsão do comportamento de estruturas, quer de terra, quer de betão simples ou armado, quer metálicas.

Com efeito, a variabilidade das características resistentes dos mate-

---

\* Engenheiro Civil (I.S.T.), M.Sc., D.I.C., (London)

Da Hidrotécnica Portuguesa.Lisboa.

Regente de Mecânica dos Solos e Fundações.Instituto Superior Técnico.Lisboa.

riais; os inevitáveis erros e não cumprimento das especificações de projecto; os demasiados afastamentos entre os comportamentos reais dos protótipos e os inferidos através de modelos matemáticos ou reduzidos, etc., são entre outros, factores que não permitem afirmar que uma estrutura não atingirá um estado limite. Quando muito, poder-se-á avaliar a sua probabilidade de rotura, dentro de um dado intervalo de tempo, em geral, o previsto para a vida funcional da estrutura.

Infelizmente, na maioria dos problemas de engenharia civil, a probabilidade de rotura não é explicitamente avaliada, pois que fica implicitamente integrada na adopção dos factores de segurança regulamentares, ou nos de uso corrente.

No caso de estruturas de betão armado, o nosso regulamento R.E.B.A., pretendeu limitar a probabilidade de rotura a valores muito baixos, da ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$ , tendo definido os factores de segurança de projecto (ou factores de majoração das solicitações) apropriados. Porém, em relação a solicitações do tipo II, as probabilidades de rotura são bem mais difíceis de definir, em especial no caso de solicitações sísmicas, como se terá ocasião de referir em pormenor.

Por outro lado, para estes tipos de solicitações, sismos, vento e ocorrências de cheias, os engenheiros, na prática, sentem uma necessidade muito maior de tratar explicitamente o problema, sob uma forma probabilística. É uma reacção natural a um tipo de solicitações cujos valores máximos não poderá dominar.

E conduzindo, em geral, a solicitação sísmica à maior probabilidade de rotura é natural que a ela se dedique a maior atenção.

Procurar-se-á mostrar que a natureza do solo influencia apreciavelmente as características das solicitações sísmicas e que o comportamento das estruturas e a sua probabilidade de rotura, dependerão, assim, essencialmente, das características do solo.

#### CONCEITO DE SEGURANÇA

A segurança de estruturas é encarada através da probabilidade de se atingir um estado limite. Considerando as solicitações actuantes e as resistências como independentes, a probabilidade de rotura numa estrutura é dada pela convolução:

$$P_r = \int_0^{\infty} \frac{dF_s}{dx} F_r dx$$

sendo  $F_s$  e  $F_r$  as funções de distribuição das solicitações e resistências, respectivamente.

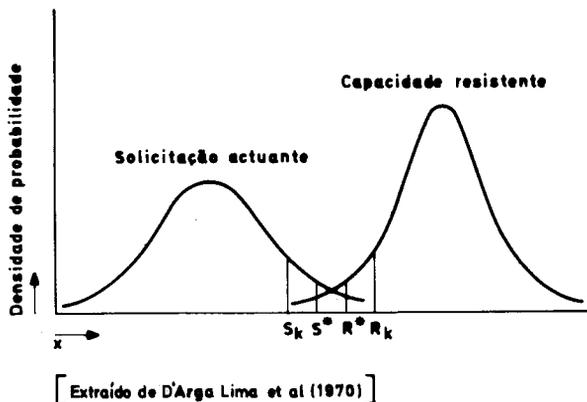


Figura 1 - Densidades de probabilidade das distribuições das solicitações e das resistências.

O factor de segurança  $\gamma$  ou factor de majoração das solicitações, define-se pelo quociente

$$\gamma = \gamma_s = \frac{\gamma_m (\text{factor de minoração}) \times \text{Resistência característica}}{\text{solicitação característica}} =$$

$$= \frac{X_r(0,005)}{X_s(0,95)} = R^*/X_s(0,95) \quad R^* \geq \gamma_s X_{s0,95} \quad R^* \geq S^*$$

A avaliação da probabilidade de rotura em termos de efeitos das solicitações é mais conveniente, uma vez que as resistências se exprimem usualmente em termos dos valores últimos dos efeitos das solicitações e a segurança é verificada comparando os efeitos das solicitações com os valores últimos das resistências, também expressos em termos dos efeitos das solicitações.

Actualmente, a análise do comportamento de estruturas permite uma melhor definição em termos de forças limites do que em termos de deslocamentos últimos.

Por outro lado, as solicitações sísmicas, ou melhor os seus efeitos nas estruturas, exprimem-se mais facilmente em termos de deslocamentos últimos, e indirectamente recorrendo ao conceito de factor de ductilidade. É pois, essencial, o estabelecimento de um processo de avaliação da ductilidade global de estruturas, para permitir uma melhor apreciação da sua probabilidade de rotura, uma vez que são ainda poucas os elementos disponíveis relativos à dis

tribuição estatística da resistência de estruturas, expressa em termos de deslocamentos últimos. Borges e Castanheta (1968, 1970) .

## **FACTORES DE SEGURANÇA EM MECÂNICA DOS SOLOS**

É usual afirmar-se que os factores de segurança que se adoptam correntemente em mecânica dos solos são demasiadamente baixos, pois conduzem a probabilidades de rotura mais elevadas que as correspondentes em outros campos da engenharia civil, em especial no da teoria das estruturas.

Tal aspecto seria tanto mais grave quanto se sabe que as incertezas na previsão de comportamentos de solos são bem maiores que em estruturas.

Além do mais, a mecânica dos solos, com excepção do caso de aterros, lida em geral com complexos produtos da natureza, ao passo que a teoria das estruturas utiliza materiais que se podem seleccionar, controlar facilmente e cujas características se podem especificar.

Mas os factores de segurança em mecânica dos solos são fictícios. As características resistentes dos materiais são em geral afectadas empiricamente por coeficientes de minoração de acordo com a confiança nos resultados dos ensaios de campo e laboratoriais e a experiência pessoal do projectista. Também a aplicação ou interpretação dos modelos matemáticos é feita com muito maiores reservas que na teoria das estruturas, o que conduz a segurança adicional.

De acordo com a importância da obra o engenheiro de solos é solicitado a encarar a resolução do problema em termos de risco calculado e tendo em vista a economia, ele projecta à medida que a obra avança, estando sempre pronto a adaptar a sua solução às condições mais ou menos desfavoráveis que se vierem a revelar.

É de este espírito que pode resultar a adopção corrente de factores de segurança baixos em barragens de terra e de enrocamento e em estruturas de suporte de terras. Já em relação a fundações em que as adaptações são difíceis os factores de segurança correntes são maiores, conduzindo por isso a probabilidades de rotura equivalentes aos das estruturas.

### **Barragens de terra**

Meyerhof (1969) indica que barragens de terra projectadas com um factor de segurança mínimo global de cerca de 1,5 têm uma probabilidade de rotura através de uma superfície de deslizamento, de cerca de  $5 \times 10^{-3}$ , durante os primeiros anos de funcionamento da albufeira.

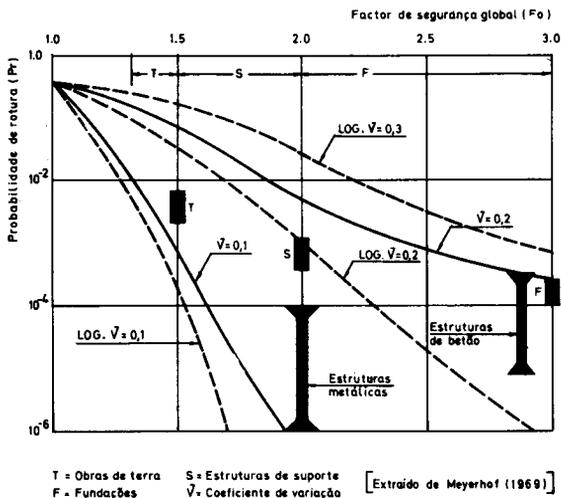


Figura 2 - Comparação entre factores de segurança e probabilidade de rotura.

Little (1970) refere que este tipo de rotura, o mais investigado na fase de projecto, é apenas responsável por 10% de todos os restantes tipos de rotura. Afirma também que o comportamento insatisfatório mais comum parece ser o devido à erosão interna causada pela percolação. Parece, também, que a maioria dos acidentes ocorrem durante a construção ou poucos anos depois, o que é lógico.

Só para dar uma ideia do número de acidentes em barragens de todos os tipos, refere-se que já caíram nestes últimos 20 anos cerca de 50 barragens, tendo causado cerca de 5000 mortes e 22 milhões de contos de prejuízos.

### Estruturas de suporte de terras

Os factores de segurança convencionais de 1,5 a 2 adoptados no dimensionamento de estruturas de suporte importantes correspondem, segundo Meyerhof, provavelmente a uma probabilidade de rotura de  $10^{-3}$ . Lumb (1969) indica  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$ .

### Fundações

Para um dimensionamento de fundações com factores de segurança de 2 a

3 a probabilidade de rotura será da ordem de  $10^{-4}$  (segundo Lumb  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$ ).

Meyerhof numa análise semi-probabilística mostra que os factores de segurança habituais são concordantes com os coeficientes globais de variação dentro dos limites 0,1 a 0,3. O valor inferior refere-se evidentemente a obras de terra e o superior às fundações.

Embora sejam necessários mais elementos de campo, Meyerhof faz notar que tais limites dos coeficientes de variação são confirmados pelos valores observados dos coeficientes de variação das resistências do solo, solicitações aplicadas e análises de segurança.

### JUSTIFICAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DAS ACÇÕES SÍSMICAS

A probabilidade de rotura sob a acção de cargas sísmicas foi estudada por Borges e Castanheta (1969), com base no facto de que a função de distribuição que define a sismicidade seria extrema do tipo II:  $F(x) = \exp(-kx)^{-\beta}$ , sendo  $\beta = 3$ .

Verificaram que para esta lei e admitindo um coeficiente de segurança  $\gamma = 1$  (em relação a um valor característico definido estatisticamente) e para os valores usuais de coeficientes de variação das resistências, a probabilidade de rotura atinge cerca de  $10^{-2}$ .

Tal resultado prova como a solicitação sísmica afecta drasticamente a probabilidade de rotura, ou seja no caso referido um aumento de  $10^{-5}$  para  $10^{-2}$ . No mesmo artigo refere-se, no entanto, que os factores de ductilidade usualmente adoptados em projecto são, em geral, mais baixos que os reais, resultando, portanto, probabilidades de rotura reais inferiores a  $10^{-2}$ .

No caso do vento os mesmos autores mostram que para  $\gamma = 1$  e para uma função de distribuição extrema do tipo I com um coeficiente de variação  $\nu_s = 0,2$  a probabilidade de rotura é de  $2 \times 10^{-3}$ , o que faz sobressair a importância das acções sísmicas.

Concluem que os valores característicos das acções sísmicas e do vento devem ser multiplicados por factores de segurança adequados para reduzir a probabilidade de rotura.

### INTENSIDADE SÍSMICA

Há uma tendência para definir a intensidade sísmica, num determinado ponto e para a vibração do terreno numa dada direcção, por uma simples quantidade  $S$  (densidade média espectral de aceleração para um dado intervalo de fre-

quências).

Tal simplificação poderá aceitar-se para espectros correspondentes a determinados tipos de terreno, mas em geral a densidade espectral dependerá da geometria e propriedades mecânicas do terreno, e da natureza do sismo e sua distância epidêntrica.

Tem sido justificada a simplificação de adoptar a densidade média espectral de aceleração, tomando por base os estudos de Jervis Pereira (1965), que estudou a resposta de osciladores lineares sujeitos a três tipos de espectros, todos com a mesma densidade média, e concluindo-se que as médias dos máximos deslocamentos são da mesma ordem de grandeza.

Nas figuras seguintes pode verificar-se que o espectro I com um máximo de  $950 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-4} / \text{Hz}$  nos 2,2 Hz, ou seja com uma ponta 35% superior ao valor médio, dá origem a um deslocamento cerca de 25% maior, para  $\eta = 0,02$ . Para maiores amortecimentos a diferença é menor.

Parece, portanto, poder concluir-se que a forma do espectro tem importância, principalmente para os osciladores que tenham um período próprio de vibração da mesma ordem de grandeza daquele em que o espectro é mais rico.

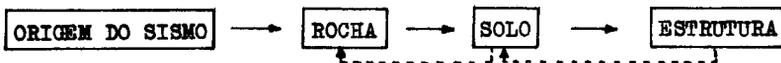
Trata-se de um fenómeno de ressonância que a experiência tem mostrado ser responsável por muitos dos danos sofridos por edifícios fundados em camadas de solo, cujo período próprio é da ordem de grandeza dos dos edifícios.

## INFLUÊNCIA DA NATUREZA DO TERRENO DE FUNDAÇÃO NAS ACÇÕES SÍSMICAS

A experiência, em todo o Mundo, tem mostrado que a natureza do terreno de fundação tem uma influência muito marcada nos danos sofridos pelas estruturas quando solicitadas por sismos intensos.

Muito se tem investigado para tentar quantificar tais efeitos.

O terreno influencia o conjunto "sismo-terreno-estrutura" sob as seguintes formas:



a - Como um transmissor de energia, modelará as frequências, amplitudes, e durações das ondas sísmicas incidentes.

b - Como um dissipador de energia, retransmitirá parte da sua energia e parte da energia de vibração da estrutura, novamente para o substrato rochoso.

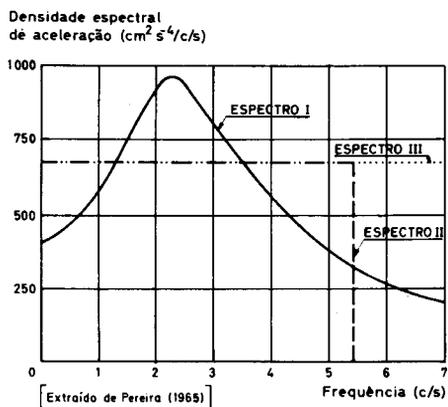


Figura 3 - Variação da densidade espectral de aceleração em função da frequência.

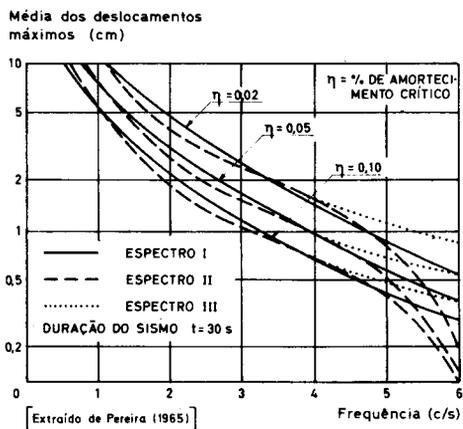


Figura 4 - Variação da média dos deslocamentos máximos de osciladores lineares de um grau de liberdade em função da frequência.

Também absorverá energia, quer por amortecimento viscoso das on das incidentes e reflectidas, quer por resposta inelástica dos movimentos da estrutura no contacto com o solo.

c - Como fundação, permitirá rotações e deslocamentos da estrutura na sua base, influenciando a resposta.

Solos brandos permitirão, durante os sismos, assentamentos diferenciais importantes ou movimentos horizontais das estruturas, quer em virtude das forças dinâmicas impostas pela base da estrutura, quer por rearranjos do esqueleto das partículas sólidas do solo.

A estrutura solo de fundação não poderá pois dissociar-se da super-estrutura e o conjunto das duas estruturas e as suas interacções têm de ser consideradas.

O problema é extremamente complexo e tem sido abordado de várias maneiras.

Kanai (1956, 1957) propôs uma fórmula semi-experimental para definir as características espectrais dos movimentos sísmicos, baseado em que a densidade espectral de aceleração é uniforme no substrato rochoso, e que o movimento à superfície da camada ou camadas de solo que cobrem o substrato, é amplificado de acordo com as características dinâmicas de tais solos.

Nessa fórmula Kanai definiu a função de transferência, de um oscilador de um grau de liberdade, para as características de frequência de camadas superficiais de solo.

De um modo geral os estudos das respostas do solo durante sismos têm sido encarados semelhantemente, supondo o terreno constituído por várias camadas com características físicas diferentes e admitindo a propagação das ondas sísmicas a partir do substrato rochoso.

A maioria dos estudos tem considerado as camadas de solo como corpos elásticos e por isso Seed (1969) e Ambraseys (1969) defendem o princípio de que durante os sismos intensos a resposta do solo é afectada pelo seu comportamento não linear, não se assemelhando as características espectrais à superfície, quando ocorrem sismos intensos ou fracos.

A opinião é lógica, mas o certo é que o limite para o qual o comportamento do solo deixa de ser elástico depende de caso para caso, e em muitas circunstâncias interessará avaliar o efeito do solo no comportamento das estruturas, mesmo para sismos não muito intensos.

A análise da resposta de camadas de solo em regime não elástico tem sido estudada destacando-se os trabalhos de Penzien (1964), de Seed (1969) e Ambraseys (1970). Mas tais análises dinâmicas que consideram modelos analíticos representados por sistemas de massas concentradas ou elementos finitos exigem a determinação das relações tensões-deformações dos vários solos envolvidos e avaliação das características de amortecimento.

Porém, as formações de solos naturais são em geral extremamente complexas e heterogêneas e exigem para a sua caracterização dinâmica ensaios extremamente evoluídos e onerosos.

Quando não for possível ou não se justificar a realização de tais ensaios para caracterização dinâmica dos solos, poder-se-á recorrer à determinação das características filtrantes e de amplificação do solo pela análise de registos de sismos ou de microsismos.

Na maior parte dos casos os espectros de microsismos são complexos, aparecem muitos picos, grandes e pequenos e é praticamente impossível deduzir um modelo dinâmico que represente uma forma tão complexa de espectro.

A experiência, principalmente no Japão, tem, no entanto, mostrado que quando o período próprio de vibração do solo se aproxima do dos edifícios os danos são mais importantes.

Mas esta circunstância não basta. Com efeito os períodos próprios dos edifícios no Japão variam entre 0,2 e 0,5 seg e registos de sismos e microsismos têm revelado períodos próprios do terreno da mesma ordem de grandeza sem que os danos sejam maiores que os esperados.

Porém, se o solo tiver uma selectividade suficiente para concentrar a sua potência espectral numa dada frequência, que seja a mesma dos edifícios, então os danos serão importantes como se constatou no sismo de Caracas.

Há pois que definir uma outra característica dinâmica do solo, da maior importância para o comportamento sísmico das estruturas nele fundadas, ou seja a sua selectividade de frequência.

Assim se, por exemplo, dois solos tiverem a mesma frequência própria de vibração mas apresentando espectros de densidade de potência como os da figura seguinte, as estruturas de frequência própria  $f_e = 1$  Hz fundadas no solo B sofrerão solicitações sísmicas bem mais intensas.

Também, será evidente que um sismo com um espectro de densidade constante no substrato rochoso, atingirá a superfície do solo, no caso do solo A, com uma densidade espectral ainda sensivelmente constante embora eventualmente

amplificada; e no caso do solo B o espectro à superfície será certamente mode lado pela selectividade de frequência do solo.

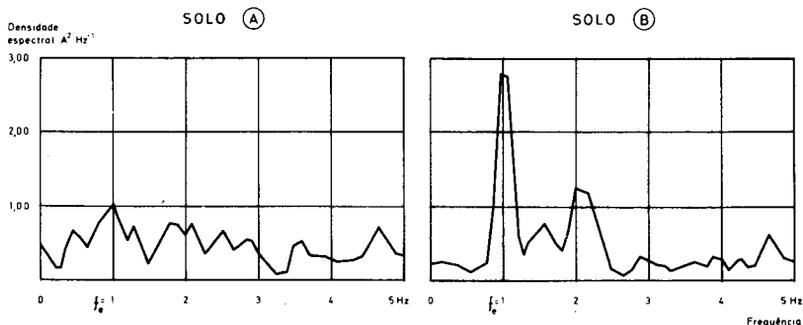


Figura 5 - Espectros de potência de microsismos em dois solos com a mesma frequência própria, mas com diferentes poderes de selectividade de frequência.

Parece, portanto, que uma das características dinâmicas mais importantes a determinar no solo de fundação de uma estrutura, será o da capacidade de se lectividade de frequência do solo, para a frequência própria da estrutura.

A informação, mesmo qualitativa que seja, e a partir somente do registo de microsismos, permitirá empiricamente ajuizar da possibilidade de admitir ou não uma densidade espectral constante  $S$  para definir a sollicitação sísmica, ou se pelo contrário se deverá investigar as consequências para a estrutura de um efeito amplificador, do tipo ressonância.

Uma vez que a probabilidade de rotura é muito alta para o caso das sollicitações sísmicas, convirá adoptar factores de segurança elevados sempre que a frequência de grande selectividade do solo seja da ordem de grandeza da da estrutura.

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil colaborou nos estudos do sismo de Caracas, ocorrido a 29 de Julho 1967. Ao autor foi dada a oportunidade de participar nos estudos correspondentes aos problemas geotécnicos. Para apreciar a influência da natureza do solo nas acções sísmicas, foi proposta a obtenção de registos de microsismos à superfície do terreno. Os registos foram obtidos em Caracas pelo Engenheiro José Grases em Março de 1968, utilizando um microsismógrafo do LNEC. Foram registadas duas componentes em 3 locais diferentes, sensivelmente nas direcções N-S e E-W, na zona de Palos Grandes-Al-

tamira, uma das mais afectadas pelo sismo de 1967.

As características principais do microsismógrafo que foi utilizado são as seguintes:

Microsismógrafo Hottinger Messtechnik Tipo B4 h (System Dr. Baule)

Sistema pendulo com: frequência própria 1 Hz

sensibilidade  $10^{-5}$  mm

amortecimento tipo magnético 70%

Campo de frequências: 1 a 100 Hz.

O microsismógrafo trabalha acoplado a um amplificador Hottinger Baldwin Messtechnik, 5 kHz kWS/T-S e a um registador tipo Scripto de 4 velocidades se lectivas de 10, 20, 50 e 100 mm/seg. As amplificações são também reguláveis. Adoptou-se uma amplificação de 100 x e velocidade de 20 mm/seg.

De cada um dos 6 registos disponíveis, seleccionaram-se troços com cerca de 13 segundos de duração e que por observação visual se consideraram os mais característicos dos movimentos.

Os registos foram ampliados fotograficamente e as medições de amplitudes feitas com intervalos de 1/40 de segundo. Obtiveram-se cerca de 500 pontos por registo, número que se considerou suficiente para o tipo de análise em vista.

O cálculo dos espectros de potência foi feito no computador do centro de cálculo automático do LNEC, com programa baseado no critério de Tuckey-Hanning (Blackman, 1958).

Os 6 registos foram primeiramente calculados usando uma resolução de frequências de 0,5 Hz.

Os espectros muito regulares mostravam uma tendência para localizar os seus máximos na banda de frequências de 0,5 Hz a 1,0 Hz. Tornou-se, portanto, necessário utilizar uma resolução de frequência mais curta, que se escolheu igual a 0,1 Hz. Apresentam-se na figura 6, os espectros calculados usando as duas resoluções de frequência.

Perante os resultados obtidos com a resolução de frequências de 0,1 Hz, que denunciaram uma selectividade de frequência notável, admitiu-se que a frequência própria fundamental da camada aluvial de fundação da zona ensaiada, estaria situada na banda 0,6 a 0,8 Hz.

No quadro seguinte indicam-se as bandas de frequências para as quais a densidade espectral é máxima.

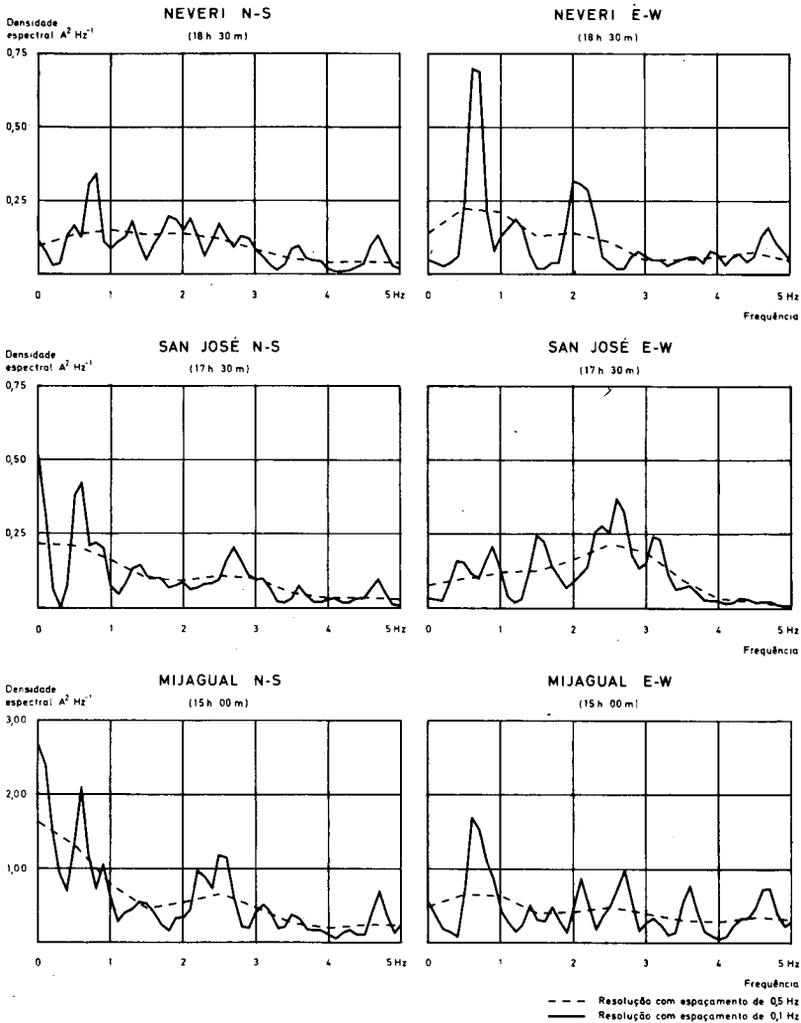


Figura 6 - Espectros de potência de microsismos registados na zona Palos Grandes-Altamira (Caracas).

## LOCALIZAÇÃO DOS MÁXIMOS DE DENSIDADE ESPECTRAL

LOCAL DO REGISTO	RESOLUÇÃO DE 0,5 Hz		RESOLUÇÃO DE 0,1 Hz	
	N-S	E-W	N-S	E-W
SAN JOSÉ	0,5 Hz	2,5 Hz* (1,0 Hz)	0,5 a 0,6 Hz	2,6 Hz (0,4-0,9 Hz)
NEVERI	1 Hz	0,5-1,0 Hz	0,7 a 0,8 Hz	0,6-0,7 Hz
MIJAGUAL	0,5 Hz	7,5 Hz (0,5-1,0 Hz)	0,6 Hz	7,6-7,7*Hz (0,6-0,7 Hz)

(Os valores indicados com \* são os máximos de densidade espectral e os valores entre parêntesis são os correspondentes a outros picos igualmente com densidade espectral elevada).

Porque tais frequências são da ordem de grandeza da maioria dos edifícios altos existentes naquela zona, e onde se concentraram os danos e colapsos mais importantes, sugeriu-se que a maior intensidade sísmica aí verificada, seria uma consequência dum efeito amplificador selectivo local, do tipo ressonância (Borges, Grases e Ravara, 1968; Mineiro, 1968).

### CONCLUSÕES

- Com base em trabalhos de Ferry Borges e Mário Castanheta faz-se sobressair a alta probabilidade de rotura das estruturas quando sujeitas a acções sísmicas, desde que, para tais efeitos, não sejam convenientemente dimensionadas.

- A natureza do solo de fundação afecta o comportamento sísmico das estruturas não se podendo na generalidade considerar a intensidade sísmica dum local como representada por uma densidade espectral de aceleração constante, num dado intervalo de frequência.

- Para reduzir a probabilidade de rotura de uma estrutura, uma das características mais importantes a avaliar é a da capacidade de selectividade de frequência do seu solo de fundação.

No caso das frequências próprias da estrutura e do solo de fundação terem valores próximos, há que adoptar factores de segurança apropriados que cubram os efeitos de amplificação por ressonância das solicitações sísmicas na estrutura.

## BIBLIOGRAFIA

- AMERASEYS, N.N. - Macro seismic Observations from Some Recent Earthquakes 4<sup>th</sup> World Conference of Earthq. Eng., Chile, 1969.
- BORGES, J.F.; CASTANHETA, M. - General Recommendations Derived From Basic Studies on Structural Safety. Symposium on Concepts of Safety of Structures and methods of design, London, 1969.
- BORGES, J.F.; CASTANHETA, M. - Structural Safety, Course 101, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1968/1970.
- BORGES, J.F.; et al. - Behaviour of Tall Buildings During the Caracas Earthquake of 1967 4<sup>th</sup> World Conference of Earthq. Eng., Chile, 1969.
- D'ARGA E LIMA, et al. - Manual de Betão Armado. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1970.
- KANAI, K. - The Requisite Condition for The Predominant Vibration of Ground. Bulletin of the Earthq. Research Inst., Vol. 35, 1956.
- KANAI, K. - Semi-empirical Formula for The Seismic Characteristics of Ground Trans. of the Architectural Inst. of Japan, Nº 57, Sep. 1957.
- MINEIRO, A.J.C. - Estudo de problemas geotécnicos relativos ao sismo de Caracas de 1967. Relatório interno do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 1968.
- PENZIEN, J.; et al. - Seismic Analysis of Bridges on Long Piles. Proc. ASCE. Vol. 90, Nº EM 3, 1964.
- PEBEIRA, J. - Behaviour of an Elastic-plastic Oscillator Acted By Random Noise Vibration. Proc. 3<sup>th</sup> World Conference on Earthq. Eng., New Zealand, 1965.
- SEED, H.B. - The Influence of Local Soil Conditions on Earthquake Damage. 7<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Soil Dynamics Specialty Conference, México, 1969.