

ARTIGOS DE DESENVOLVIMENTO TÉCNICO  
TECHNICAL DEVELOPMENT ARTICLES

DESENVOLVIMENTO DE ACELERÔMETRO  
PARA USO EM SÍSMICA DE ALTA RESOLUÇÃO

Fabio Taioli

Este trabalho descreve o princípio teórico, o desenvolvimento e testes laboratoriais de um acelerômetro para uso em trabalhos sísmicos aplicados à engenharia, hidrogeologia e problemas ambientais. Consiste em um acelerômetro piezoelétrico do tipo compressional simples, sendo que o pré-amplificador de voltagem é incorporado em seu corpo. O pré-amplificador utiliza um amplificador operacional do tipo MOS-FET, cuja impedância de entrada é decrescida a cerca de 100 M $\Omega$ , limitando, desta forma, a resposta às baixas frequências e minimizando a influência de variações térmicas. Um potenciômetro permite a calibração dos acelerômetros para que se torne possível compensar eventuais heterogeneidades, permitindo um intercâmbio entre eles. A colocação do pré-amplificador no corpo do acelerômetro evita a capacitância do cabo (que diminui sua sensibilidade) e diminui a impedância de saída do sinal (permitindo o uso de cabos longos). Em contrapartida, torna necessária a vinda de alimentação para este circuito. Diversos testes em laboratório foram efetuados, sendo que o acelerômetro apresentou comportamento linear ( $\pm 0,5$  dB) em frequências na faixa de 5 Hz a 2 kHz, e sinal de saída de 1 V/g. A sensibilidade, em termos de deslocamento de partículas é de 600 pm, limitada pelo ruído instrumental do pré-amplificador. Várias aplicações em trabalhos de campo têm mostrado seu bom desempenho.

**Palavras-chave:** Acelerômetro; Alta resolução; Sísmica rasa.

**DEVELOPMENT OF ACCELEROMETER FOR NEAR-SURFACE SEISMIC APPLICATIONS** - *This paper presents the theoretical principle, the design and laboratory tests of an accelerometer to work on seismic applications related to engineering, hydrogeology and environmental problems. The accelerometer is a piezoelectric simple compression type and a voltage pre-amplifier is placed in its case. The pre-amplifier uses a MOS-FET operational amplifier which the input impedance is decreased to 100 M $\Omega$ , limiting the low frequency response and minimizing the influence of thermal variations. A potentiometer permits to calibrate the accelerometers, allowing to compensate eventual heterogeneities, making them interchangeable. The placement of the pre-amplifier in the case avoids cable capacitance (which decreases the sensitivity) and decreases the output impedance of the signal (allowing the use of long cables). On the other hand makes necessary to bring power supply to this circuit. Several laboratory tests were carried out and showed a linear ( $\pm 0.5$  dB) behavior between 5 Hz and 2 kHz, and output signal of 1 V/g. The sensitivity, in terms of particle displacement, is 600 pm limited by the instrumental noise of the pre-amplifier. Some field works have showed its good performance.*

**Key words:** Accelerometer; High resolution; Near-surface Geophysics.

Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo  
Departamento de Geologia Econômica e Geofísica Aplicada  
Rua do Lago, 562  
05508-900 - Cidade Universitária  
São Paulo - SP - Brasil  
Fone: (011) 818-4200 Fax: (011) 818-4207  
E-mail: ftaioli@usp.br

## INTRODUÇÃO

Os progressos com relação aos sensores (geofones) utilizados em prospecção sísmica têm sido enormes ao longo do tempo. Os primeiros sensores consistiam em uma bobina móvel suspensa por molas em torno de um núcleo magnético, exatamente do mesmo princípio que os utilizados atualmente, mas a grande diferença é que aqueles pesavam em torno de 5 a 6 kg (10 Hz de frequência natural), e possuíam amortecimento por óleo (Born, 1960). Com a adoção de técnicas de exploração mais complexas (e.g., CDP e filtros espaciais) e com o acréscimo do número de canais por instrumento, surgiu a necessidade de miniaturização dos geofones, o que foi possível com a introdução de ímãs mais fortes e de amortecimento elétrico (resistivo), White & Press, 1960. Na década de 40, o aprimoramento da qualidade das válvulas disponíveis no mercado também permitiu que se trabalhasse com sensores menos sensíveis, e portanto menores, sem que isto comprometesse a qualidade final do registro.

Com o advento da tecnologia digital e o acentuado aumento da faixa dinâmica dos instrumentos, tornou-se necessário novamente melhorar a qualidade dos sensores, o que se conseguiu utilizando-se ímãs de ligas especiais (Wolff & Mercanti, 1972).

O incremento na utilização de levantamentos sísmicos de alta resolução levou os fabricantes a desenvolverem e produzirem também sensores com resposta em frequência mais ampla, visto que os convencionais são utilizáveis somente até uma frequência de 500 Hz (Washburn & Wiley, 1941; Fail et al., 1962; Lamer, 1970 e Lepper, 1981), apesar de serem lineares até frequências mais baixas (Lepper, 1981).

Klaassen & Van Peppen (1983) desenvolveram um geofone eletromagnético mais apropriado para trabalhos de resolução maior, valendo-se da sensibilidade à aceleração do sensor e de um circuito eletrônico interno, no corpo do geofone. Segundo os autores, estes geofones mantêm sua linearidade até a frequência de 500 Hz. Atualmente existem sensores de bobina móvel cuja resposta linear em frequências do elemento sensor abrange a faixa de 40 Hz a 1 kHz. No entanto, esta resposta pode ser comprometida pelo seu encapsulamento no corpo do geofone.

Paralelamente ao desenvolvimento e aprimoramento dos sensores eletromagnéticos, os sensores piezoelétricos também apresentaram grande aperfeiçoamento, tornando-se pequenos e robustos graças à utilização de pastilhas sintéticas de acentuadas propriedades piezoelétricas. Esses

sensores são mais apropriados a trabalhos com alta frequência (Lepper, 1981), no entanto, o seu alto custo tem feito com que sua aplicação se limite a projetos especiais, quando o registro de alta frequência é imperioso.

Estudos recentes (Berni, 1994) mostram que a utilização de sensores baseados na interferometria a laser é possível, porém, em situações bastante particulares e a custos não competitivos.

A sísmica exploratória tem usado, apesar das limitações, os sensores eletromagnéticos pela sua versatilidade, portabilidade, bom desempenho, robustez e relativo baixo custo. No entanto, um sensor para trabalhos em sísmica exploratória para fins de engenharia e fundações, hidrogeologia de detalhe e para estudos de problemas ambientais, principalmente em áreas urbanas, deve aliar uma resposta plana em uma faixa de frequências ampla, além da possibilidade de utilizá-lo fora de seu eixo vertical pois, muitas vezes, torna-se necessário trabalhar dentro de galerias, túneis, poços, etc.

O sensor que melhor se adapta a tal utilização é o acelerômetro piezoelétrico, visto que ele pode ser usado numa faixa de frequências bastante ampla, com excelente linearidade; os sinais gerados podem ser integrados eletronicamente para fornecer dados em velocidade ou mesmo deslocamento, além da possibilidade de ser utilizado omnidirecionalmente (Serridge & Licht, 1986).

Diversos tipos de acelerômetros, com diferentes montagens mecânicas são encontrados no mercado, porém, devido à sua simplicidade e menor custo, cerca de 75% dos acelerômetros fabricados são do tipo compressional simples (Licht et al., 1987).

O acelerômetro compressional simples consiste em um sistema onde um cristal com propriedades piezoelétricas é colocado sobre uma base rígida, e sobre o cristal é assentada uma massa (chamada de massa sísmica). O movimento do conjunto faz com que o cristal gere uma corrente proporcional à sua aceleração.

## REVISÃO TEÓRICA

Uma analogia mecânica comumente utilizada para demonstrar o funcionamento de um acelerômetro piezoelétrico consiste em considerá-lo como um sistema massa-mola, conforme apresentado na Fig. 1.

As forças presentes no modelo são:

$$F = k(x_s - x_b - L) ; \quad (\text{força na mola})$$



$$m_b \ddot{x}_b = F + F_e ; \quad (\text{força na base})$$

$$m_s \ddot{x}_s = -F . \quad (\text{força na massa sísmica})$$

$$\mu = \frac{m_s m_b}{m_s + m_b} . \quad (2)$$

$\mu$  é freqüentemente referido como “massa reduzida” e  $r$  é o deslocamento relativo entre a base e a massa sísmica, ou

$$r = x_s - x_b - L .$$

Quando o acelerômetro está livremente suspenso, e não está sendo excitado por forças externas ( $F_e = 0$ ), a equação de movimento se reduz a:

$$\mu \ddot{r} = -kr .$$

Esta equação diferencial pode ser resolvida assumindo-se que o deslocamento de  $m_s$  em relação a  $m_b$  varia harmonicamente com a amplitude  $R$ , ou:

$$r = R \sin \omega t ,$$

portanto

$$-\mu R \omega^2 \sin \omega t = -k R \sin \omega t ,$$

desta forma, a freqüência de ressonância  $\omega_n$  pode ser escrita como:

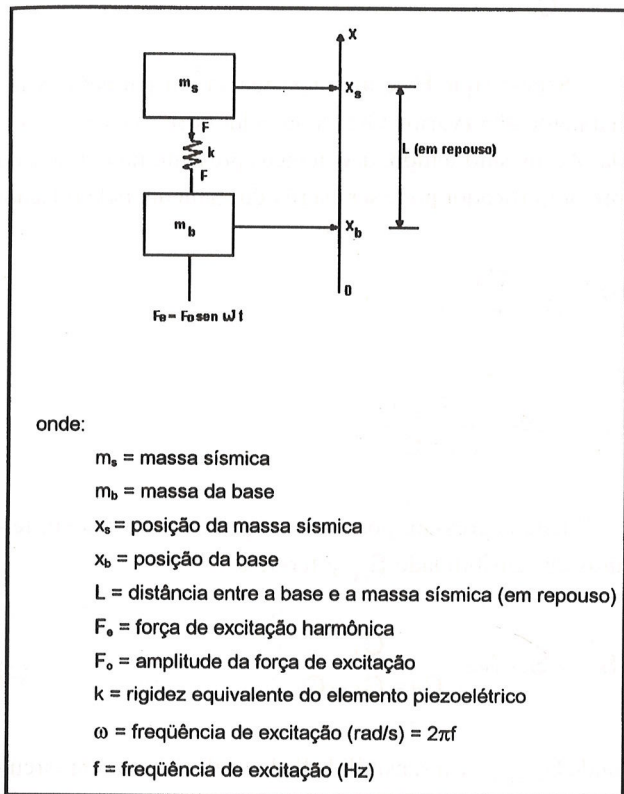
$$\omega_n^2 = \frac{k}{\mu} .$$

As implicações desta equação podem ser vistas substituindo-se  $\mu$  pela Eq. 2:

$$\omega_n^2 = k \left( \frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b} \right) . \quad (3)$$

Se o acelerômetro é montado com perfeita rigidez sobre uma estrutura muito mais pesada do que ele próprio, então  $m_b$  torna-se muito maior do que  $m_s$ . Tomando-se o limite ( $m_b \rightarrow \infty$ ) a equação se reduz a:

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m_s} . \quad (4)$$



**Figura 1** - Analogia mecânica utilizada para demonstrar o funcionamento de um acelerômetro piezoelétrico (adaptado de Serridge & Licht, 1986).

**Figure 1** - Mechanical analogy of the piezoelectric accelerometer principle (adapted from Serridge & Licht, 1986).

A equação de movimento para este modelo é:

$$\ddot{x}_s - \ddot{x}_b = -\frac{F}{m_s} - \frac{F + F_e}{m_b} = -\frac{k}{\mu} (x_s - x_b - L) - \frac{F_e}{m_b} , \quad (1)$$

ou

$$\mu \ddot{r} = -kr - \frac{\mu}{m_b} F_e \sin \omega t ,$$

onde:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b} ,$$

ou

Esta é a frequência natural do sistema massa sísmica-mola e é definida como a frequência de ressonância de montagem ( $\omega_m$ ) do acelerômetro. Esta propriedade irá definir a faixa de frequência utilizável do acelerômetro.

A dedução apresentada permite concluir que para se obter maior frequência de ressonância da montagem deve-se utilizar elemento piezoelétrico de maior rigidez ou massa sísmica menor. Considerando que a rigidez da cerâmica piezoelétrica é constante, dever-se-á adotar menor massa sísmica. Isto, no entanto, fará com que a sensibilidade do acelerômetro decresça, uma vez que a força inercial exercida na cerâmica será menor. Portanto, fica claro que se deve estabelecer um compromisso entre a sensibilidade desejada e a frequência de ressonância do acelerômetro, a qual vai definir a faixa de frequência de utilização.

O sinal gerado pelo conjunto sensor propriamente dito é de alta impedância, portanto torna-se necessário o uso de um pré-amplificador para aumentar a potência do sinal. Para isto pode-se utilizar pré-amplificador de corrente ou de voltagem.

acelerômetro não sofre influência do cabo e pré-amplificador, a voltagem presente na saída ( $V_a$ ) será:

$$V_a = \frac{Q_a}{C_a}$$

Sabe-se que  $R_a$  é uma resistência em paralelo extremamente alta (vários  $G\Omega$ ), podendo, portanto ser ignorada. Ao mesmo tempo, a voltagem presente na entrada do pré-amplificador pode ser escrita diretamente pela relação:

$$V_i = \frac{Q_a}{C_a + C_c + C_p}$$

e

$$V_o = GV_i = \frac{GV_a C_a}{C_a + C_c + C_p}$$

Esta expressão, por sua vez, pode ser escrita em termos de sensibilidade  $S_{va}$ , e ter-se-á:

$$S_{va} = S_{va(aberto)} \frac{C_a}{C_a + C_c + C_p} \tag{5}$$

onde  $S_{va(aberto)}$  é a sensibilidade do acelerômetro em circuito aberto, ou seja, sem carga.

Esta expressão mostra que a sensibilidade do acelerômetro é dependente da sua própria capacitância adicionada à do cabo elétrico utilizado entre a unidade sensora propriamente dita e o pré-amplificador. Portanto, grandes comprimentos de cabo irão diminuir a sensibilidade do acelerômetro.

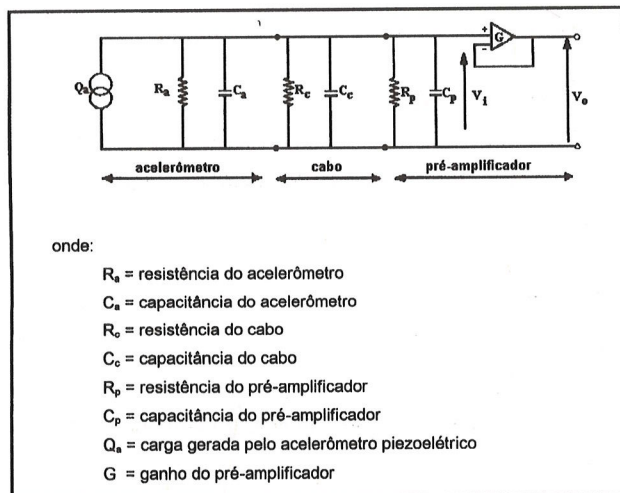
Foi visto que o limite de resposta às altas frequências do acelerômetro está vinculado à frequência de ressonância do sistema massa-mola. O limite de resposta às baixas frequências pode ser calculado pela expressão:

$$f_b = \frac{1}{2\pi R_t C_t}$$

onde:

$$C_t = C_a + C_c + C_p$$

e



**Figura 2** - Circuito equivalente de um acelerômetro conectado a um pré-amplificador de voltagem (adaptado de Serridge & Licht, 1986).

*Figure 2 - Equivalent circuit of a piezoelectric accelerometer connected to a voltage amplifier (adapted from Serridge & Licht, 1986).*

A Fig. 2 apresenta o circuito equivalente de um acelerômetro conectado a um pré-amplificador de voltagem.

Do circuito equivalente pode-se afirmar que se o



$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_p}$$

Portanto, para tornar o acelerômetro sensível a baixas frequências pode-se aumentar a capacitância do cabo e do pré-amplificador, uma vez que a do acelerômetro é intrínseca ao elemento piezoelétrico, ou utilizar um pré-amplificador com alta resistência de entrada.

Evidentemente, se a capacitância total for aumentada, isto provocará um decréscimo na sensibilidade do sistema (Eq. 5). Portanto, o caminho normalmente utilizado é se construir um pré-amplificador com alta resistência de entrada.

### ACELERÔMETRO DESENVOLVIDO

O acelerômetro piezoelétrico desenvolvido neste trabalho objetivou aliar uma sensibilidade compatível a trabalhos sismográficos a uma faixa de resposta de frequências de cerca de 5 Hz a até 2.000 Hz com um desvio não maior do que 0,5 dB. A fim de possibilitar a utilização de cabos sismográficos longos, optou-se por colocar um pré-amplificador interno, dentro do corpo do acelerômetro. Este pré-amplificador tem a função de baixar a impedância do sinal de saída e possibilitar a variação de ganho, de forma a permitir um intercâmbio dos acelerômetros no caso de se utilizar sistemas multicanais (Taioli, 1992).

O acelerômetro piezoelétrico é formado por uma base de latão sobre a qual é colada uma pastilha de material piezoelétrico (zirconato titanato de chumbo e bário) com diâmetro de 23 mm e altura de 4 mm. Sobre a pastilha é colada uma massa sísmica também de latão e de diâmetro igual, porém de altura correspondente ao dobro da altura da pastilha (8 mm). Os terminais elétricos são o próprio corpo da base (terminal negativo), e a massa sísmica (terminal positivo). O pré-amplificador utiliza um amplificador operacional do tipo MOS-FET, cuja impedância de entrada é decrescida para cerca de 100 MΩ por meio de um resistor colocado em paralelo à sua entrada. O pré-amplificador é fixado à base por meio de parafusos. O ganho utilizado na calibração dos acelerômetros foi ajustado por meio de um potenciômetro até se atingir um sinal de saída de 1 Volt/g ( $\pm 1\%$ ) a 300 Hz. A alimentação do pré-amplificador é fornecida por meio de cabo sismográfico especial. O esquema deste acelerômetro é apresentado na Fig. 3. A Fig. 4 mostra o diagrama elétrico esquemático do pré-amplificador utilizado internamente no acelerômetro.

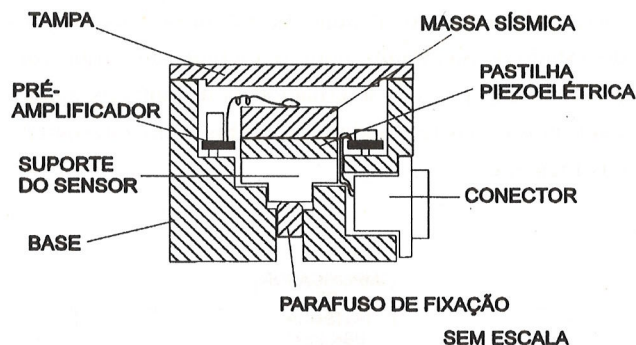


Figura 3 - Diagrama esquemático do acelerômetro piezoelétrico desenvolvido.

Figure 3 - Schematic diagram of the developed piezoelectric accelerometer.

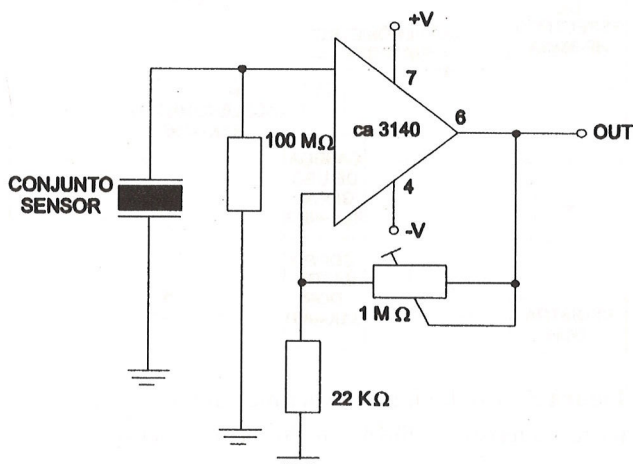


Figura 4 - Diagrama elétrico do circuito do pré-amplificador do acelerômetro desenvolvido.

Figure 4 - Schematic electrical circuit of the pre-amplifier.

### RESULTADOS OBTIDOS

O levantamento das características dinâmicas do acelerômetro foi efetuado pelo autor, utilizando a configuração experimental, conforme esquematizado na Fig. 5, até a definição de uma boa solução mecânica e eletrônica. Em seguida foi enviado um exemplar do acelerômetro ao Laboratório de Ensaio Dinâmicos da Divisão de Enge-

nharia Mecânica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, onde se efetuou um ensaio comparativo com padrões internacionais disponíveis naquele Laboratório. Os resultados ali obtidos estão apresentados nas Figs. 6 e 7.

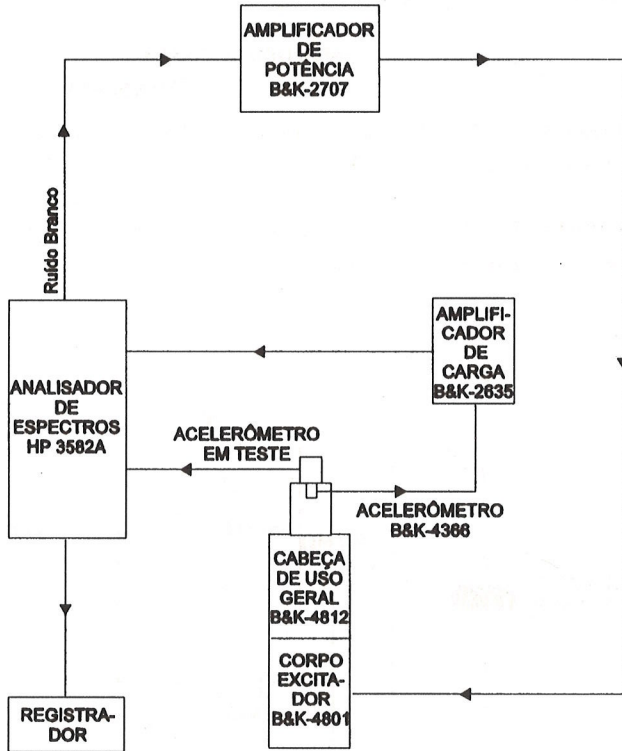


Figura 5 - Configuração experimental utilizada para teste das características dinâmicas dos acelerômetros.

*Figure 5 - Experimental configuration used to test the dynamic characteristics of the accelerometers.*

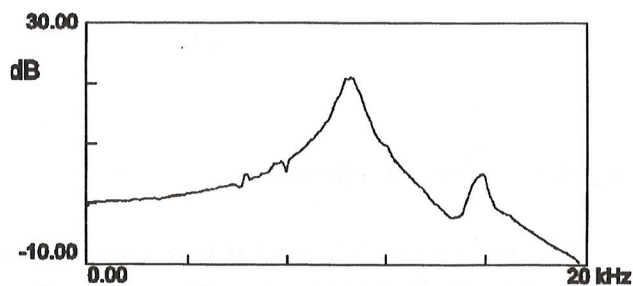


Figura 6 - Resposta em frequência de DC a 20 kHz do acelerômetro desenvolvido.

*Figure 6 - Frequency response of the accelerometer (from DC to 20 kHz).*

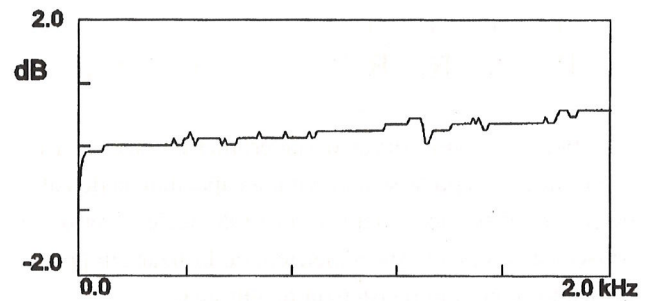


Figura 7 - Resposta em frequência de DC a 2 kHz do acelerômetro desenvolvido.

*Figure 7 - Frequency response of the accelerometer (from DC to 2 kHz).*

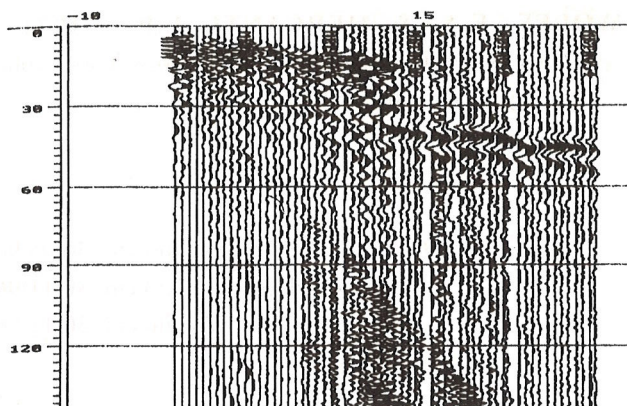
A análise destes resultados permite concluir que o acelerômetro apresenta uma resposta plana, dentro de  $\pm 0,5$  dB, na faixa de frequências de 5 Hz a 2.000 Hz. O sinal de saída observado nos testes foi da ordem de 1 Volt/g (g sendo aceleração da gravidade). Acrescenta-se que medidas efetuadas em laboratório determinaram que o ruído instrumental destes sensores encontra-se na faixa de  $10^{-3}$  g, o que, para uma frequência referencial de 200 Hz, equivale a cerca de 600 pm de deslocamento das partículas, valor inferior ao menor valor de deslocamento possível de ser captado pelos geofones eletromagnéticos encontrados no mercado (aproximadamente 10 nm, GeoSpace, 1995).

Com relação a efeitos indesejáveis devido a variações de temperatura, a própria impedância utilizada na entrada do pré-amplificador (da ordem de 100 M $\Omega$ ) filtra as frequências extremamente baixas causadas pela variação de temperatura.

Evidentemente, apesar da relativa baixa impedância do sinal de saída do pré-amplificador, longos comprimentos de cabo irão afetar a amplitude do sinal. Testes com cabos de até 100 metros de comprimento mostram que o sinal não sofre alteração.

Diversos trabalhos de campo vêm sendo realizados com sistema sismográfico que utiliza este acelerômetro (Taioli, 1992, Taioli et al., 1993, Taioli & Dourado, 1994, Taioli, 1995), tendo apresentado resultados satisfatórios. A Fig. 8 é um exemplo de aplicação do acelerômetro, e consiste em uma seção experimental realizada em área urbana na cidade de São Paulo, utilizando filtro passa-altas de 200Hz, para minimizar a influência do ruído cultural.





**Figura 8** - Seção sísmica experimental obtida em região urbana utilizando um conjunto de acelerômetros conforme o descrito.

*Figure 8* - Experimental seismic section acquired in urban region using a set of accelerometers according the description.

## CONCLUSÕES

O sistema (mecânica e eletrônica) como proposto aqui, foi projetado e construído para que, ao mesmo tempo que fosse o mais econômico possível, atendesse às necessidades básicas e mais comuns da maioria dos geofísicos envolvidos em trabalhos sísmicos aplicados à engenharia, hidrogeologia e meio ambiente, onde o registro de altas frequências é necessário. As características de faixa de frequências, linearidade, sensibilidade e ruído instrumental podem ser consideradas aceitáveis para os trabalhos a que se propõe.

As principais vantagens que o acelerômetro apresenta em relação aos geofones de bobina móvel são a faixa de frequências de operação e a possibilidade de uso omnidirecional, necessário para algumas aplicações em túneis, galerias, etc. Por outro lado, como desvantagem, é a necessidade de alimentação elétrica ao pré-amplificador incorporado no corpo do acelerômetro.

## AGRADECIMENTOS

O autor deseja agradecer aos colegas Eng. Vilmondes Ribeiro e Geol. Nicolau Palm que contribuíram profundamente neste trabalho.

Ao CEPAS - Centro de Estudos de Águas Subterrâneas,

que financiou a usinagem do corpo dos acelerômetros, e ao IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, que forneceu a infra-estrutura para os testes laboratoriais, o autor expressa sua gratidão.

## REFERÊNCIAS

- BERNI, A.J. - 1994** - Remote sensing of seismic vibrations by laser Doppler interferometry. *Geophysics*, **59**: 1856-1867.
- BORN, W.T. - 1960** - A review of geophysical instrumentation. *Geophysics*, **25**: 77-91.
- FAIL, J.P., GRAU, G. & LAVERGNE, M. - 1962** - Couplage des sismographes avec le sol. *Geophysical Prospecting*, **10**: 128-147.
- GEOSPACE - 1995** - GS-30CT - Close tolerance geophone. Catálogo de especificações. USA. 2 pp.
- KLAASSEN, K.B. & VAN PEPPEN, J.C.L. - 1983** - Electronic acceleration-sensitive geophone for seismic prospecting. *Geophysical Prospecting*, **31**: 457-480.
- LAMER, A. - 1970** - Couplage sol-geophone. *Geophysical Prospecting*, **18**: 300-319.
- LEPPER, C.M. - 1981** - Guidelines for selecting seismic detectors for high-resolution applications. Bureau of Mines - RI 8599. United States Department of the Interior. Washington. 37pp.
- LICHT, T.R., ANDERSEN, H. & JENSEN, H.B. - 1987** - Recent developments in accelerometer design. *Technical Review, Brüel & Kjaer*, **2**: 1-22.
- SERRIDGE, M. & LICHT, T.R. - 1986** - Piezoelectric accelerometer and vibration preamplifiers - theory and application handbook. Denmark: Brüel and Kjaer. 151 pp.
- TAIOLI, F. - 1992** - Desenvolvimento e testes de sistema sismográfico de alta resolução. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 119pp.
- TAIOLI, F. - 1995** - Desenvolvimento e testes de sistema sismográfico de alta resolução. *Bol. IG-USP, Série Cient.*, **26**: 29-43.
- TAIOLI, F., DOURADO, J.C. & CORDEIRO, R.P. - 1993** - Determinação de matações por sísmica de reflexão de alta resolução. *Anais do 7º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE*, v1, 219-226. Poços de Caldas, MG, Brasil.
- TAIOLI, F. & DOURADO, J.C. - 1994** - Geofísica apli-



cada a problemas urbanos. Um novo desafio. Bol. de Res. Expand. 38º Cong. Brasil. Geol. SBG. Camburiú, SC, Brasil, v2, pp.16-17.

**WASHBURN, H. & WILEY, H. - 1941** - The effect of the seismometer on its response characteristics. *Geophysics*, 6: 116-131.

**WHITE, J.E. & PRESS, F. - 1960** - Geophysical research and progress in exploration. *Geophysics*, 25: 168-180.

**WOLFF, E.A. & MERCANTI, E.P. - 1974** - (Eds.). *Geoscience Instrumentation*. New York.- John Wiley & Sons, Inc. 819 pp.

Submetido em: 30/05/96

Revisado pelo(s) autor(es) em: 30/11/96

Aceito em: 30/11/96

## DEVELOPMENT OF ACCELEROMETER FOR NEAR-SURFACE SEISMIC APPLICATIONS

The development of sensors used in seismic exploration has been enormous in the present century. The first geophones were formed by a moving coil suspended by a spring, around a magnetic core. This is exactly the same principle of the geophones used nowadays. The basic difference between them is the weight. Old versions weighed about 5 to 6 kg and the resonance damping was accomplished by using oil. With the progress on the geophysical instrumentation (e.g. the introduction of digital acquisition techniques), the sensors also had their quality improved in order to increase the dynamic range of the whole system. This was achieved basically using magnets made with special alloys.

Despite some limitations, mostly due to the frequency response, exploration geophysics has used the electromagnetic geophone due to its versatility, reliability, portability and relatively low cost.

Increasingly high resolution seismology and the popularization of the use of reflection seismic in engineering, hydrogeological and environmental problems, has made necessary geophones with broader frequency response and higher sensitivity than those normally used in petroleum exploration. Otherwise, some applications may need sensors with higher frequency response and omnidirectional capability. This is not possible with conventional electromagnetic geophones.

This paper presents the design and laboratory tests of an accelerometer intended for use in seismic applications related to engineering, hydrogeology and environmental problems. The theory of piezoelectric accelerometers is reviewed. The accelerometer developed is a piezoelectric simple compression type. The piezoelectric element is placed on a metallic base and a seismic mass is placed on top of the piezo element. The mechanical analogy is a mass-spring system where the spring is the piezo element. Due to its high rigidity, the system resonant frequency depends on the seismic mass added to the piezo mass. The electrical signal produced by the piezoelectric element (zirconate-titanate of barium and

lead) when excited by a vibration has very high impedance. A MOS-FET voltage pre-amplifier is placed in its case in order to avoid cable capacitance (which decreases the sensitivity). The pre-amplifier decreases the output impedance of the signal, allowing the use of long cables. The input impedance of this pre-amplifier is limited at 100 M $\Omega$  by means of a resistor. It also limits the low frequency response, avoiding influence of thermal drift and other very low frequency noises. This pre-amplifier has also a potentiometer which allows the calibration of the output voltage amplitude. To adjust an voltage output of 1 V/g it is necessary to apply a gain of about 2. This potentiometer is necessary because the electrical characteristics of the piezoelectric elements are not homogeneous. The power supply is obtained externally, and comes by the electrical cable and connector which is placed in the accelerometer base. This connector has 4 pins (+8V, -8V, GND and output signal).

Laboratory tests were made comparing the accelerometer developed with international standards. These tests were carried out using a shaker table fed with white noise and the transfer function between both was recorded. The results showed a linear ( $\pm 0.5$  dB) behavior between 5 Hz and 2 kHz, and output signal of 1 V/g (which was the amplitude set by the potentiometer in the pre-amplifier). The sensitivity, in terms of particle displacement, is 600 pm for a reference frequency of 200 Hz. This sensitivity is limited by the instrumental noise of the pre-amplifier. Field tests have shown that cable lengths up to 100 m do not affect the output signal.

The advantages of the new accelerometer over the conventional geophones are the possibility to operate omnidirectionally with high sensitivity and the superior frequency response. Otherwise, the disadvantages are the need for an external power supply, the weight and higher cost.

Several field works have been carried out using the accelerometer described (Taioli, 1992; Taioli et al., 1993; Taioli & Dourado, 1994; Taioli, 1995), and have showed its good performance.