



## VIBRAÇÕES INDUZIDAS EM ESTRUTURAS NOS LEVANTAMENTOS SÍSMICOS

Joaquim Xavier Cerqueira Neto CPGG/UFBA  
Neri João Boz PETROBRAS

### ABSTRACT

This report deals with monitoring of particle vibration due to explosions. The field work was undertaken during the 3-D seismic survey at CEXIS oil field in the Recôncavo Basin, finished last year. The aim was to avoid damage to houses, power lines and so on, and determining the charge amount as a function of safety distance to the engineering facilities nearby the seismic lines. In the monitoring operation was used a 24-channel seismograph, the ABEM Terraloc Mark3 System and triaxial geophones, in a joint project involving PETROBRAS, CEPED and UFBA. The results are (i) useful mathematical formulas relating charge amount, safety distance and the velocity of vibrations, which are suitable for the specific geological and soil conditions, and (ii) a field procedure that permits simultaneously to monitor different targets.

### INTRODUÇÃO

O trabalho tem como objetivo determinar as equação **distância-carga segura** para condições geológicas e de solo próprias do sítio e dos alvos monitorados. Faz parte de um estudo mais amplo, dentro do projeto (PETROBRAS, CEPED e UFBA) de monitoramento durante o levantamento sísmico 3-D no Campo CEXIS, Bacia do Recôncavo, executado pela equipe sísmica ES-26 da PETROBRAS, nos anos de 1997/98 (Cerqueira Nt. & Peruzzolo, 1997a; Cerqueira Nt. et al, 1997b). Apresenta, ainda, um procedimento de registro simultâneo muito valioso no estudo das vibrações transmitidas a diferentes alvos distantes entre si.

Foram monitorados três alvos, ou seja, casas de fazenda – duas das quais tendo padrão construtivo bom a médio (respectivamente, Casas c1 e c2) e a terceira (c3), baixo. O sismógrafo empregado (modelo TERRALOC - Mark3 da ABEM, de propriedade do CPGG/UFBA) possui 24 canais, processador com 02 unidades de saída, impressora e unidade de registro de tempo com precisão variável de 5ms a 24 $\mu$ s. Foram utilizados detectores sensíveis a vibrações nos planos horizontal e vertical, isto é geofones que medem, em cada ponto de observação, três componentes de vibrações - uma longitudinal e duas transver-

sais. Os geofones triaxiais têm frequência natural em 6 Hz.

### Localização

A área de estudo situa-se no Município de Candeias-BA, distante aproximadamente 80km de Salvador. A localização dos imóveis no contexto do levantamento sísmico é vista na Fig. 01, que mostra, também, a disposição das linhas sísmicas e dos pontos de tiro (PT's) circundantes.

### Caracterização Geológica da Área e Tipo de Solo

A geologia de superfície é constituída de sedimentos da Fm S. Sebastião, predominando folhelhos pouco litificados e bastante alterados, que originam a cobertura de solos argilosos. Essa formação é caracterizada por uma camada média (Kssm) de folhelhos nas cores cinza, vermelho ou matizes do cinza; e pelo membro superior, no qual predominam camadas de arenitos-Ksss (SME-SGM, 1991).

Na área ocorrem solos argilosos conforme mostram os resultados dos ensaios laboratoriais, referentes a amostras coletadas no terreno, em torno e nos terços médios das laterias dos imóveis, próximas às fundações. Na Tabela-1 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos solos (CEPED, 1997), ao lado das classificações usuais na engenharia geotécnica.

### PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Para realização dos ensaios foram instalados geofones no interior dos alvos (c1, c2 e c3), em pontos críticos, e ao longo do caminhamento entre eles, de modo a permitir, também, a determinação da velocidade de partícula no terreno e velocidade de fase.

No Quadro-1 encontram-se as distâncias e as quantidades de explosivos empregadas nos pontos de tiro do levantamento sísmico e carregadas nos PT's do presente ensaio sísmográfico. Neste trabalho foram reproduzidos os mesmos parâmetros dos PT's

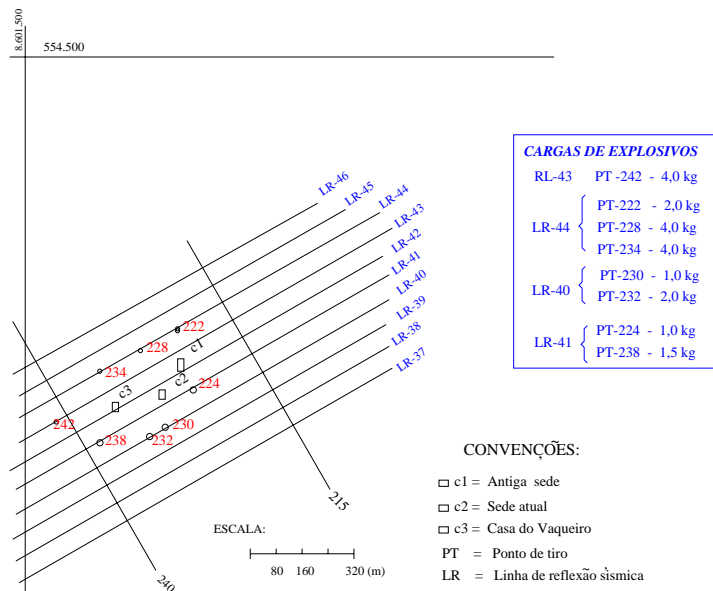


Figura 1: Localização dos Imóveis Monitorados e “Layout” das Linhas Sísmicas

de produção, sendo suas cargas deflagradas de modo idêntico ao ocorrido à época do levantamento sísmico. Foi utilizada a numeração original dos PT’s acrescida de “t”, para efeito de referência.

**Quadro - 1**  
PONTOS DE TIRO E DISTÂNCIAS DAS CASAS

Ident.	Explosivo (kg)		Distâncias (m)			Obs.:
	Carga p. Furo	Carga total	c1	c2	c3	
PTt-242	1,0	4,0	550	440	250	LR-43
PTt-222	0,5	2,0	150	280	405	LR-44
PTt-228	1,0	4,0	172	202	250	LR-44
PTt-234	1,0	4,0	325	270	150	LR-44
PTt-230	0,5	1,0	260	132	215	LR-40
PTt-232	1,0	4,0	310	172	185	LR-40
PTt-224	0,5	1,0	115	138	327	LR-41
PTt-238	0,5	1,5	437	305	148	LR-41

c1, c2 e c3 → imóveis, alvos do monitoramento sísmográfico.

Dadas às distâncias relativamente grande entre os imóveis, os ensaios foram realizados em duas etapas. Na primeira com a estação sísmográfica situada na distância média entre as casas c1 e c2, e na segunda com a estação entre as casas c2 e c3. Desta forma, em cada ensaio, foi possível fazer o registro simultâneo das vibrações em dois imóveis, situados a distâncias críticas relativamente a determinados PT’s, como se vê na Fig. 1.

**INTERPRETAÇÃO DOS DADOS**

Os registros, (8 no total) foram interpretados com auxílio de computador digital de grande porte, utilizando aplicativos do sistema ProMAX (1992) nas análises espectral e na obtenção dos dados de amplitudes, a partir da qual são obtidas as tensões nos amplifica-

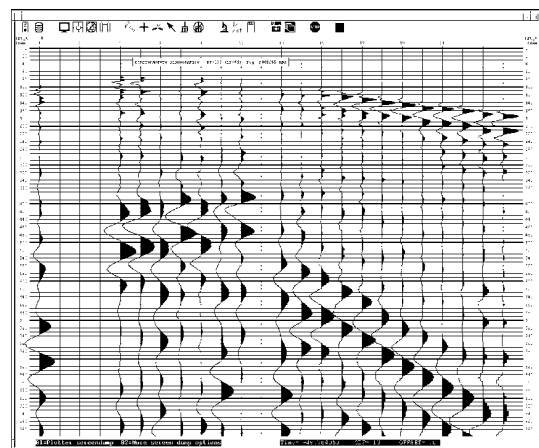


Figura 2: Registro típico. PT-238 LR-41, (r001265.abm)

dores do sísmógrafo. Foram selecionadas, em cada registro, as máximas amplitudes em termos do valor absoluto, considerando as outras 02 componentes (no mesmo tempo) para obtenção dos dados expressos como velocidades de partícula.

A Fig. 2 mostra um registro típico referente a um dos alvos monitorados.

**Distância Escalonada versus Velocidade de Partícula**

Na determinação da distância escalonada  $D_\epsilon \times$  velocidade de partícula,  $V_p$ , foram empregados os dados do Quadro-1 referentes aos dois ensaios sísmográficos, considerando os pontos  $(D_\epsilon; V_p)$  de melhor correlação, em cada alvo monitorado (casas c1, c2 e

c3).

**Casa c1:**

A análise de regressão linear em termos dos logaritmos das distâncias escalonadas *versus* velocidade de partícula,  $(\log D_\epsilon \times \log V_p)$ , fornece o coeficiente de correlação  $r = -82,3\%$  para a fórmula  $D_\epsilon = \frac{D}{Q^{1/2}}$ , adotada pela Norma Brasileira;  $r = -98,6\%$  para a fórmula  $D_\epsilon = \frac{D}{Q^{1/3}}$  de Ambraseys e Hedron e  $r = -19,5\%$  para a fórmula  $D_\epsilon = \frac{D}{Q^{3/2}}$ , de Langefors e Kihlstrom (Gustafsson, 1973).

**Casa c2:**

Para este alvo, o resultado da análise fornece os coeficientes de correlação:

$r = -96,3\%$  para a fórmula  $D_\epsilon (= \frac{D}{Q^{1/2}}) \times V_p$ ;

$r = -86,0\%$  para a fórmula  $D_\epsilon (= \frac{D}{Q^{1/3}}) \times V_p$ ;

$r = -94,2\%$  para  $D_\epsilon (= \frac{D}{Q^{3/2}}) \times V_p$ .

**Casa c3:**

E, finalmente, tem-se os seguintes coeficientes de correlação:

$r = -71,4\%$  para  $D_\epsilon (= \frac{D}{Q^{1/2}}) \times V_p$ ;

$r = -97,1\%$  para  $D_\epsilon (= \frac{D}{Q^{1/3}}) \times V_p$ ;

$r = -99,98\%$  para  $D_\epsilon (= \frac{D}{Q^{3/2}}) \times V_p$ .

**Equação da Energia**

**Casa-sede c1:**

A denominada equação de energia fica, então, definida pelos dados de maior correlação, segundo a fórmula:

$$\frac{D}{Q^{\frac{1}{3}}} = \delta V_p^\beta, \tag{1}$$

onde:

- $\left\{ \begin{array}{l} D = \text{distância (m)} \\ Q = \text{carga de explosivo (kg)} \\ V_p = \text{velocidade de partícula (cm/s)}. \end{array} \right.$

Assim, a fórmula para determinação da carga de explosivo segura é dada por

$$Q = \left[ \frac{D \times V_p^{-\beta}}{\delta} \right]^3 \tag{2}$$

onde as constantes  $\delta = 67,344$  e  $\beta = -0,857$ , são específicas da área em estudo nos níveis de vibrações efetivamente registrados. Na Fig. 3 a seguir encontra-se o gráfico da Distância Escalonada *versus* Velocidade de partícula, referente aos PT's 228 e 222 da LR-44; 224(LR-41) e 230 da LR-40.

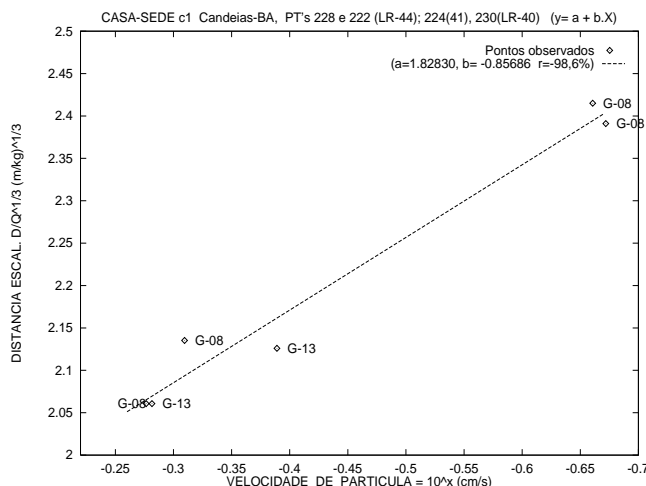


Figura 3: Distância Escalonada *versus* Velocidade de Partícula. Casa-sede c1.

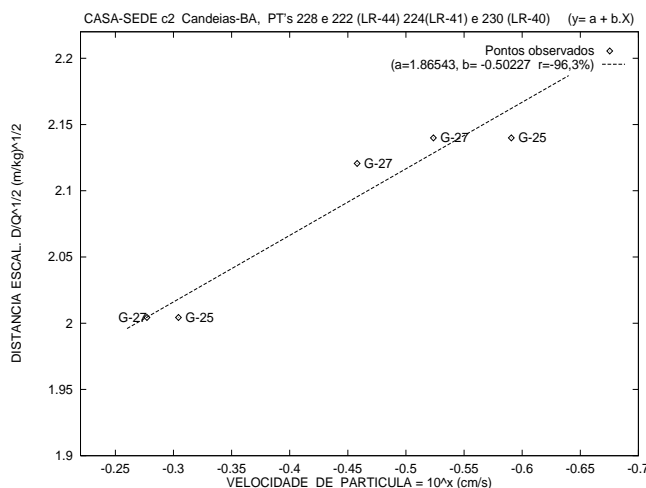


Figura 4: Distância Escalonada *versus* Velocidade de Partícula. Casa-sede c2.

**Casa-sede c2:**

O maior coeficiente de correlação em valor absoluto ( $r = -96,4\%$ ) indica para equação da energia a fórmula:

$$\frac{D}{Q^{\frac{1}{2}}} = \delta V_p^\beta, \tag{3}$$

E, para determinação da carga segura a fórmula:

$$Q = \left[ \frac{D \times V_p^{-\beta}}{\delta} \right]^2 \tag{4}$$

onde as constantes  $\delta = 73,355$  e  $\beta = -0,502$ . Na Fig. 4 acima encontra-se o gráfico da Distância Escalonada *versus* Velocidade de partícula, referente aos PT's 228 e 222 da LR-44; 224(LR-41) e 230 da LR-40.

**Casa c3:**

Neste caso, o maior coeficiente de correlação em valor absoluto ( $r = -99,98\%$ ) indica para equação da energia, a fórmula:

$$\frac{D}{Q^{\frac{2}{3}}} = \delta V_p^{-\beta}, \tag{5}$$

E, para determinação da carga segura a fórmula:

$$Q = \left[ \frac{D \times V_p^{-\beta}}{\delta} \right]^{\frac{3}{2}} \tag{6}$$

onde as constantes  $\delta = 7,093$  e  $\beta = -2,617$ . Na Fig. 5 abaixo encontra-se o gráfico da Distância Escalonada versus Velocidade de partícula, referente aos PT's 234(LR-44), 242(LR-43) e 238(LR-41).

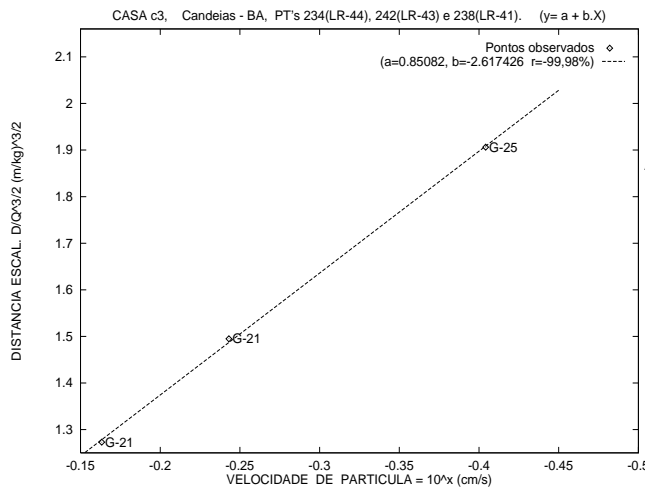


Figura 5: Distância Escalonada versus Velocidade de Partícula. Casa c3.

**CONCLUSÕES**

Os resultados dos ensaios permitiram estabelecer as fórmulas (2), (4) e (6) para a carga de explosivos segura. Naturalmente, cada um dos parâmetros  $\delta$  e  $\beta$  refletem as características geológicas e dos solos da área, além das condições estruturais dos imóveis estudados. É importante observar a excelência do coeficiente de correlação para cada uma das equações da energia consideradas (eq. 1, 3 e 5), tornando-as assim muito úteis na definição da distância e carga seguras em levantamentos similares. O procedimento de campo, com o emprego de sismógrafo multicanal permite o monitoramento simultâneo de alvos distantes entre si, operação que não teria condição de ser realizada, por exemplo, com o emprego de equipamento mais simples, como os sismógrafos empregados na engenharia.

**REFERÊNCIAS**

ABNT, 1986. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR-9653 1986, 8p. São Paulo.

CEPED, 1996. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. Governo do Estado da Bahia, SEPLANTEC, 24p. Salvador.

Cerqueira Nt. J.X. & Peruzzolo, C.F., 1997. Monitoramento Sismográfico da Estação de Tratamento de Água-ETA e Elevatória do Sistema Adutor Pedra do Cavalo. Anais do 5º Congresso Internacional da SBGf, v.1, p. 413-416, São Paulo.

Cerqueira Nt. J.X.; Couto, L.S. & Marques, M.P., 1997. Ensaio de Vibrações Induzidas em Paredes de Alvenaria de Tijolos Cerâmicos. Anais do 5º Congresso Internacional da SBGf, v.1, p. 434-436, São Paulo.

Gustafsson, R., 1973. Swedish Blasting Technique. Ed. SPI, Gothenburg, 323p. Suécia.

ProMAX, 1992. Interactive Seismic Data Processing System. Advance Geophysical Corporation, Denver, USA.

SME-SGM, 1991. Projeto Argila. Governo do Estado da Bahia, Secretaria das Minas e Energia, 50p. Salvador.

**Agradecimentos**

Os autores agradecem à PETROBRAS e ao CEPED pelo fornecimento dos dados e, ao Engº Luiz Fernando Pego, pelo apoio nos trabalhos de campo.

**Tabela - 1**  
**CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS**  
Amostras Coletadas Junto às Fundações

LOCALIZAÇÃO	Prof.(m)	ABNT	HRB	UCS	Obs.:
<b>Casa-sedec1:</b>					
Furo-1	0,3	argila areno-siltosa	A7	CL	Em frente à casa
"	1,0	argila areno-siltosa	A7	CL	"
Furo-2	0,3	argila areno-siltosa	A7	CL	Lado direito
"	1,0	argila areno-siltosa	A7	CH	"
Furo-3	0,3	argila areno-siltosa	A7	CH	Fundo da casa
"	1,0	argila silto-arenosa	A7	CL	"
Furo-4	0,3	argila areno-siltosa	A6	CL	Lado esquerdo
"	1,0	argila areno-siltosa	A7	CL	"
<b>Casa-sedec2:</b>					
Furo-1	0,3	argila areno-siltosa	A7	CL	Em frente à casa
"	1,0	argila areno-siltosa	A7-6	CL	"
Furo-2	0,3	argila areno-siltosa	A7	CL	Lado direito
"	1,0	argila silto-arenosa	A7	CI	"
Furo-3	0,3	argila areno-siltosa	A7	CL	Fundo da casa
"	1,0	argila areno-siltosa	A7-6	CL	"
Furo-4	0,3	argila areno-siltosa	A7	CL	Lado esquerdo
"	1,0	argila silto-arenosa	A7	CL	"
<b>Casa c3:</b>					
Furo-1	0,3	argila areno-siltosa	A7	CL	Em frente à casa
"	1,0	argila silto-arenosa	A7	CL	"
Furo-2	0,3	argila areno-siltosa	A7	CL	Lado direito
"	1,0	argila areno-siltosa	A7	CI	"
Furo-3	0,3	argila areno-siltosa	A7	CL	Fundo da casa
"	1,0	argila areno-siltosa	A7	CL	"
Furo-4	0,3	argila areno-siltosa	A7	CL	Lado esquerdo
"	1,0	argila areno-siltosa	A7	CL	"

ABNT ⇒ Associação Brasileira de Normas Técnicas  
HRB ⇒ Highway Research Board. UCS ⇒ unified system classification.