



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO  
Núcleo de Modelação Matemática e Física

Proc. 0402/11/16117

## **RADIAÇÃO SÍSMICA DUMA FALHA PARA UMA BARRAGEM ABÓBADA**

Lisboa • Maio de 2007

**I&D** BARRAGENS DE BETÃO

**RELATÓRIO 264/2007 – NMMF**



**RADIATION SEISMIQUE D' UNE FAILLE  
POUR UNE BARRAGE VOUTE**

**SEISMIC RADIATION FROM A FAULT  
TO AN ARCH DAM**

**RADIAÇÃO SÍSMICA DUMA FALHA PARA  
UMA BARRAGEM ABÓBADA**

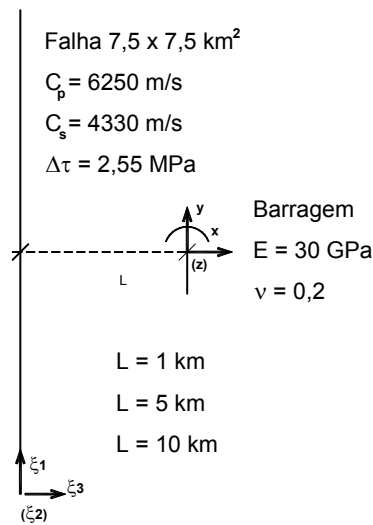
## ÍNDICE

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 – EXEMPLO</b>	<b>1</b>
<b>3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>2</b>
<b>4 – CONCLUSÕES</b>	<b>4</b>
<b>5 – BIBLIOGRAFIA</b>	<b>4</b>
<b>FIGURAS</b>	<b>5</b>

## 1 - INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste relatório resultados da aplicação de um modelo para a análise dos efeitos de um sismo, gerado numa falha, sobre uma barragem. Este modelo efectua uma análise global incluindo a falha sísmica e a barragem abóbada, em que a falha radia ondas elásticas por anulamento das tensões de corte no seu plano, ondas essas que se propagam até à barragem. Então nos paramentos da barragem consideram-se aplicadas com sinal contrário as tensões que existiriam num espaço completo [1]. Utiliza-se o método de Euler para integração das equações do movimento. Conhecendo-se para um input de acelerações normais ao paramento de montante o output de pressões hidrodinâmicas, aplicam-se em cada instante as forças correspondentes, o que constitui para movimentos transientes uma generalização das massas de água de Westergaard.

## 2 - EXEMPLO



Considerou-se uma falha vertical quadrada  $7,5 \times 7,5 \text{ Km}^2$  cujo traço tem a direcção montante-jusante (Y) da barragem. Segundo a direcção normal à falha (X) considerou-se o local da obra a 1Km, 5Km e 10Km, respectivamente, do ponto a meio do traço da falha. O escorregamento por corte ao longo da falha ocorre para uma frente de rotura recta propagando-se segundo a horizontal ( $\xi_1 // Y$ ) a uma velocidade de 4000 m/s. Os escorregamentos máximos são atingidos por um salto Heaviside no tempo, segundo:

$$D(\xi_1, \xi_2) = C \times 2 \times \sqrt{2} \times \frac{\Delta\tau}{\mu} L \times \sin(\pi\xi_1) \times \sin(\pi\xi_2)$$

com  $C=2$  para ter em conta o tratar-se de um meio espaço e não de um espaço completo. Adoptou-se para a falha um “stress-drop”  $\Delta\tau \equiv 2,55 \text{ MPa}$ . O espaço completo admitiu-se homogéneo, isótropo com constantes de Lamé  $\mu = 4,5 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,  $\lambda = 4 \times 10^3 \text{ MPa}$ . Vem assim:

$$C_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = 6250 \text{ m/s}; \quad C_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = 4330 \text{ m/s}$$

O escorregamento médio da falha vem  $D_{\text{med}} = \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 D_{\text{max}} = 0,487 \text{ m}$ . Corresponde a estes valores um momento sísmico de:

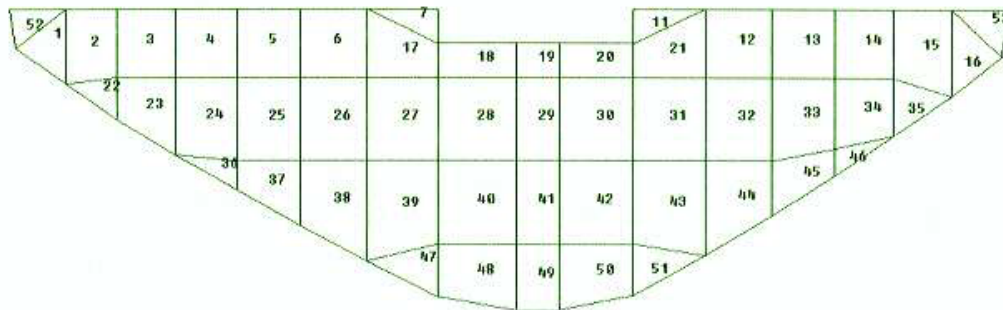
$$M_0 = 4,5 \times 7,5 \times 7,5 \times 10^{16} \times 0,487 = 1,23 \times 10^{18} \text{ N} \times \text{m}$$

e uma magnitude:

$$M_w = \left(\frac{7 + \log_{10} M_0}{1,5}\right) - 10,73 = 6,0$$

$$M_S = \log_{10} S + 4,15 = 5,9; \quad S \text{ -- Km}^2$$

À barragem abóbada atribuiu-se  $E=30\text{GPa}$ ,  $\nu = 0,2$ ,  $\rho = 2,4\text{t/m}^3$  e um amortecimento  $\tau = 0$ . Foi discretizada por uma malha de elementos finitos triangulares de casca. A falha quadrada foi discretizada em quadrados de 25m de lado.



### 3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os gráficos foram apresentados nas unidades m, s. As tensões em MPa. Assim o espectro de potência das acelerações exprime-se em  $\text{m}^2/\text{s}^3$  e as acelerações em  $\text{m}/\text{s}^2$ .

Na Fig. 1 apresenta-se o acelerograma segundo Y, para uma distância à falha  $L=1 \text{ Km}$  sem filtro no tempo ( $n=0$ ). Como se verifica das Figs. 2 a 5 o conteúdo é elevado nos tons ( $>20\text{Hz}$ ) de elevada frequência. Nas Figs. 6 a 10 apresentam-se os resultados utilizando um filtro correspondente a atribuir ao ponto central a média dos cinco pontos adjacentes ( $n=5$ ). O conteúdo de frequência é razoável. Nas Figs. 11 e 12 apresentam-se a velocidade e o deslocamento função do tempo e nas Figs. 13 e 14 apresentam-se as componentes normal à falha e vertical do acelerograma. O deslocamento segundo Y no fecho do arco superior e sua densidade espectral de potência apresentam-se nas Figs. 16,17 e Figs. 22,23, respectivamente, na situação de albufeira cheia e vazia. As tracções e compressões no instante em que o deslocamento

é máximo apresentam-se nas Figs. 18 a 21 e Figs. 25 a 28, respectivamente, nas situações de albufeira cheia e vazia. Admitiu-se para a análise da estrutura um passo  $dt=0,001s$  e para a falha  $dt=0,005s$ . Verifica-se um efeito de massa nas frequências para albufeira cheia, associada a menores deslocamentos (mesma força sísmica aplicada). Os deslocamentos apenas dependem dos modos de vibração de frequência mais baixa como se constata da Fig. 24 em que a estrutura filtra as frequências do som. As maiores tensões verificam-se para as consolas junto aos encontros (torção da barragem), com insuficiência nos arcos para abrir as juntas de contracção na hipótese de albufeira cheia.

Na Fig. 29 apresenta-se o acelerograma segundo Y, para uma distância à falha  $L=5$  Km sem filtro no tempo ( $n=0$ ). O passo para a falha é  $dt=0,005s$ . Como se verifica das Figs. 30 e 31 o conteúdo é elevado nos sons de elevada frequência. Nas Figs. 32 a 34 apresentam-se os resultados utilizando um filtro correspondente a atribuir ao ponto central a média dos cinco pontos adjacentes ( $n=5$ ). O conteúdo de frequência é razoável. Nas Figs. 36 e 37 apresentam-se a velocidade e o deslocamento função do tempo e nas Figs. 38 e 39 apresentam-se as componentes normal à falha e vertical do acelerograma.

Na Fig. 40 apresenta-se o acelerograma segundo Y, para uma distância à falha  $L=5$  Km sem filtro no tempo ( $n=0$ ). O passo para a falha é  $dt=0,01s$ . Como se verifica das Figs. 41 e 42 o conteúdo é elevado nos sons de elevada frequência. Nas Figs. 43 a 45 apresentam-se os resultados utilizando um filtro correspondente a atribuir ao ponto central a média dos três pontos adjacentes ( $n=3$ ). O conteúdo de frequência é razoável. Nas Figs. 46 e 47 apresentam-se a velocidade e o deslocamento função do tempo e nas Figs. 48 e 49 apresentam-se as componentes normal à falha e vertical do acelerograma.

Na Fig. 50 apresenta-se o acelerograma segundo Y, para uma distância à falha  $L=10$  Km sem filtro no tempo ( $n=0$ ). Como se verifica das Figs. 51 e 52 o conteúdo é elevado nos sons de elevada frequência. Nas Figs. 53 a 55 apresentam-se os resultados utilizando um filtro correspondente a atribuir ao ponto central a média dos três pontos adjacentes ( $n=3$ ). O conteúdo de frequência é razoável. Nas Figs. 56 e 57 apresentam-se a velocidade e o deslocamento função do tempo e nas Figs. 58 e 59 apresentam-se as componentes normal à falha e vertical do acelerograma.

A atenuação das acelerações de pico com a distância à falha são apresentadas nas Figs. 60 e 61.

Nas Figs. 62 a 64 apresenta-se o sismo ocorrido na ilha do Faial, Açores, em 1998/7/9 e respectivos espectros de resposta em acelerações e velocidades para um amortecimento estrutural  $\tau=0$ . Note-se o bom acordo das formas com os espectros das Figs. 9 e 10. Existe também um bom acordo dos espectros de potência das acelerações Figs. 65 e 7.

Nas Figs 66 e 67 apresenta-se um acelerograma do sismo ocorrido no Hawai em 2006/10/15 e respectivo espectro de potência. Note-se a curta duração do sismo e o elevado conteúdo de sons de alta frequência.

#### **4 - CONCLUSÕES**

Tratando-se de ondas elásticas as frequências elevadas não são amortecidas, o que é razoável para distâncias curtas à falha (<10 Km). As formas simplificadas das velocidades em função do tempo apenas se podem admitir em rocha para magnitudes não superiores a 6. Para magnitudes superiores a 6 ter-se-á de compor o movimento devido a menores sismos elementares. O filtro temporal elimina som do registo mas não afecta as tensões na barragem. Foram comparados acelerogramas correspondentes a sismos em condições próximas destas com o de sismos gerados numericamente a partir dos escorregamentos de uma falha associados a um dado mecanismo cinemático de rotura.

#### **5 – BIBLIOGRAFIA**

[1] – Câmara, R.C. – “Modelação sísmica de barragens abóbada”. LNEC, ITB-31, 2005.

#### **AGRADECIMENTOS**

O autor agradece ao Eng. Alfredo Campos Costa o programa de cálculo dos espectros de resposta dado o acelerograma e o material sobre o sismo do Faial.



## **FIGURAS**

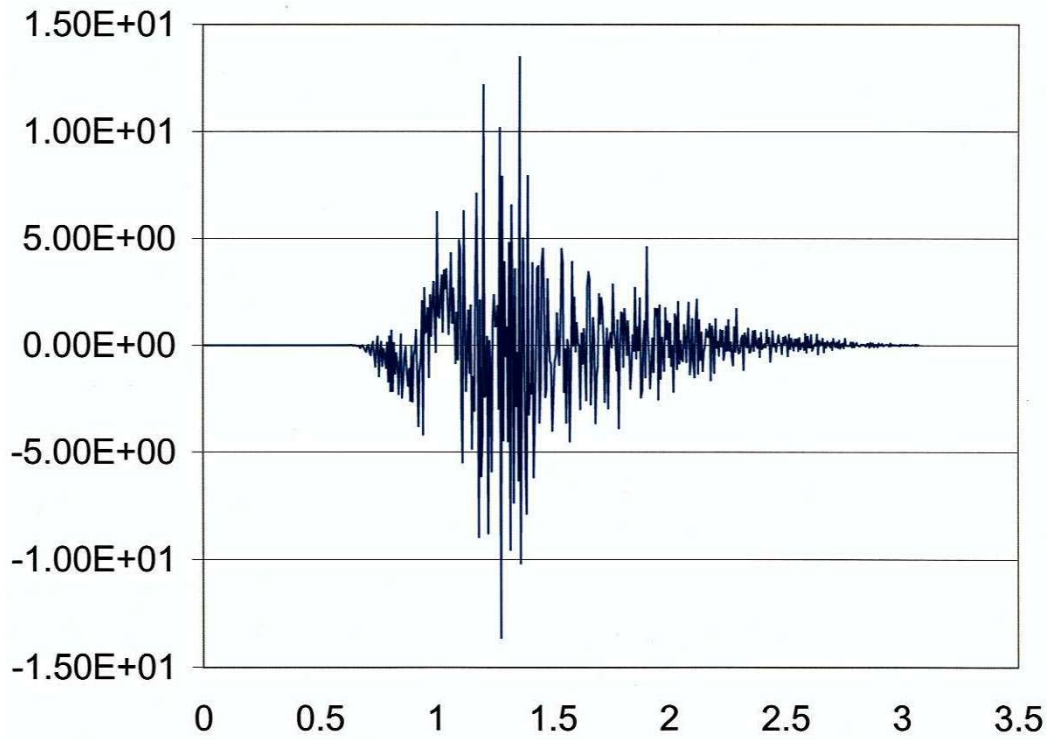


Fig. 1 – Acelerograma segundo Y; dt=.005s. n=0. L=1km.

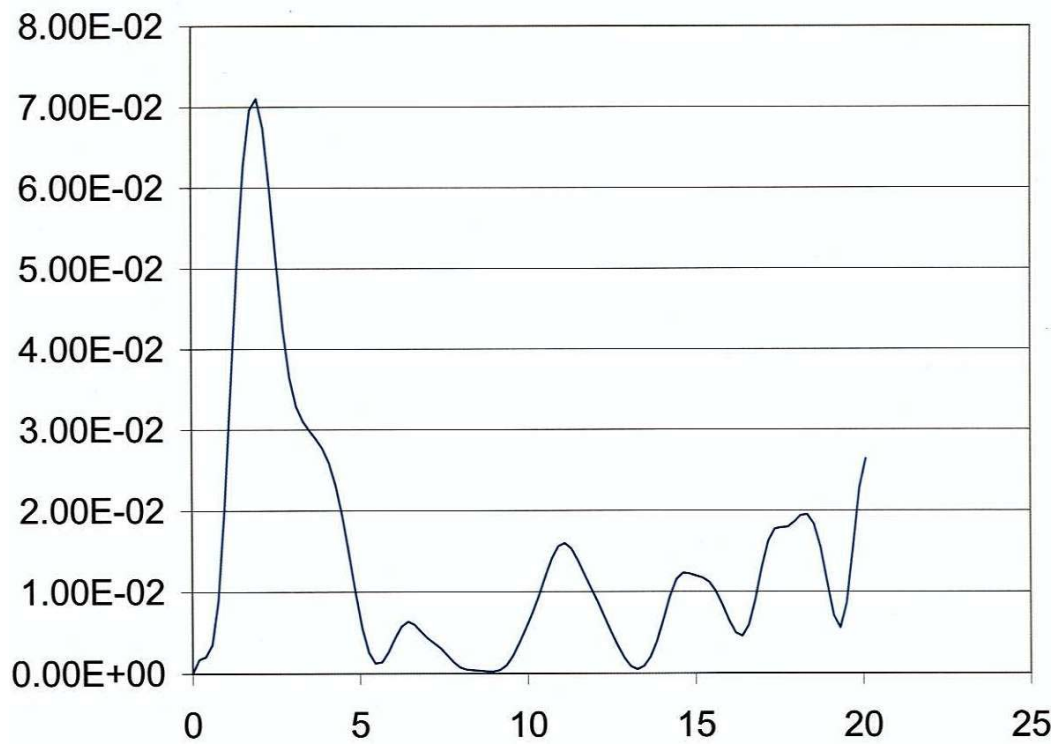


Fig. 2 – Espectro de potência das acelerações segundo Y; dt=.005s. n=0. L=1km.

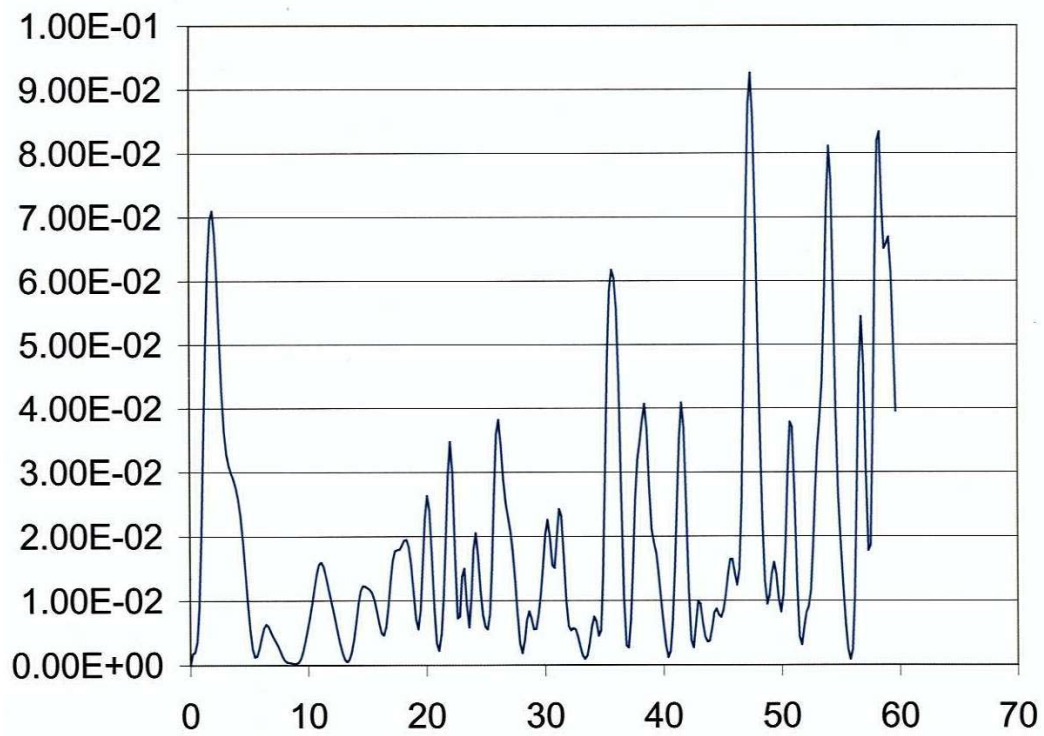


Fig. 3 – Espectro de potência das acelerações segundo Y;  $dt=.005s$ .  $n=0$ .  $L=1km$ . Escala diferente.

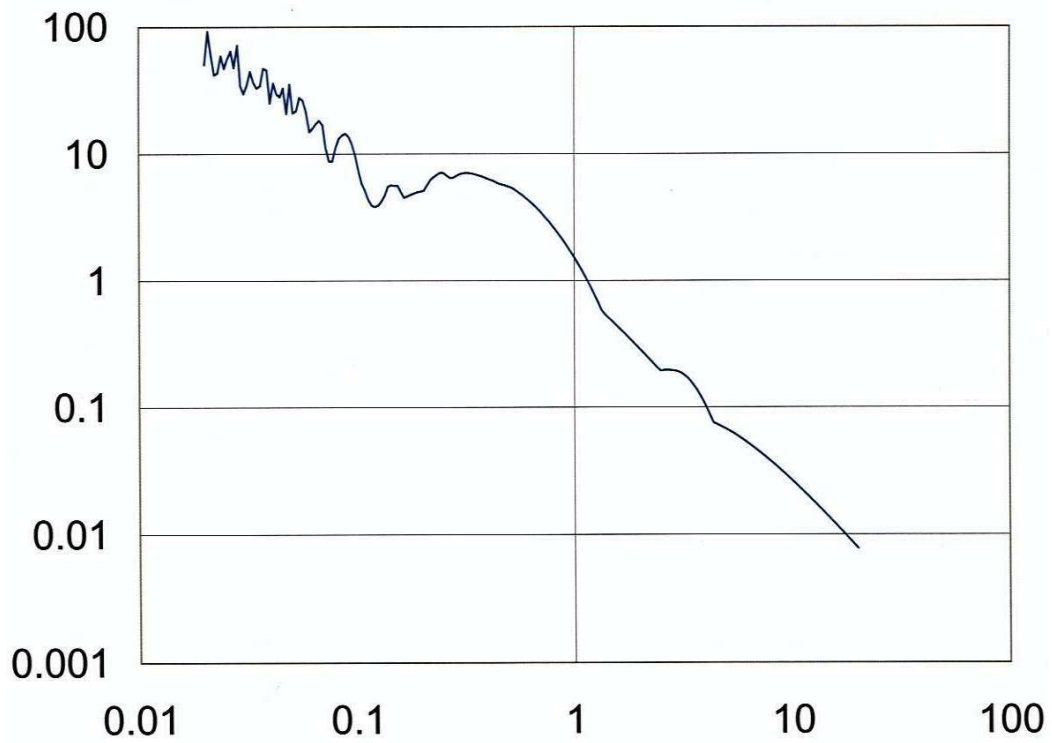


Fig.4 - Espectro de resposta das acelerações segundo Y,  $\tau=0$ ;  $dt=.005s$ .  $n=0$ .  $L=1km$ .

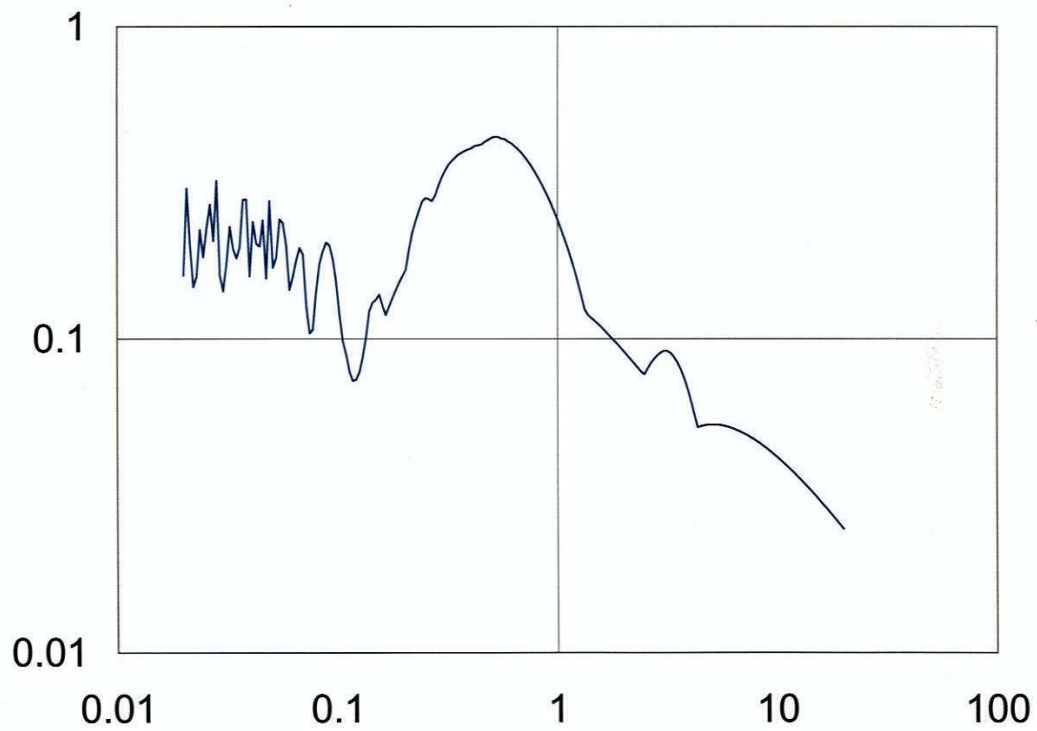


Fig. 5 - Espectro de resposta das velocidades segundo Y,  $\tau=0$ ;  $dt=.005s$ .  $n=0$ .  $L=1km$ .

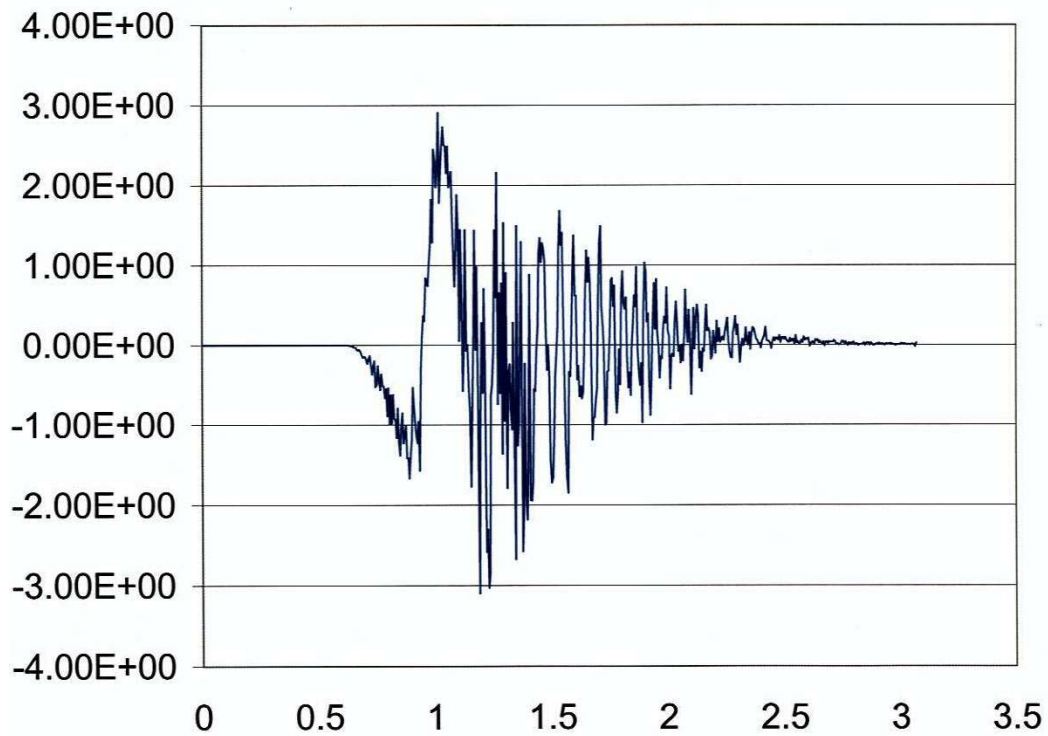


Fig. 6 - Acelerograma segundo Y;  $dt=.005s$ .  $n=5$ .  $L=1km$ .

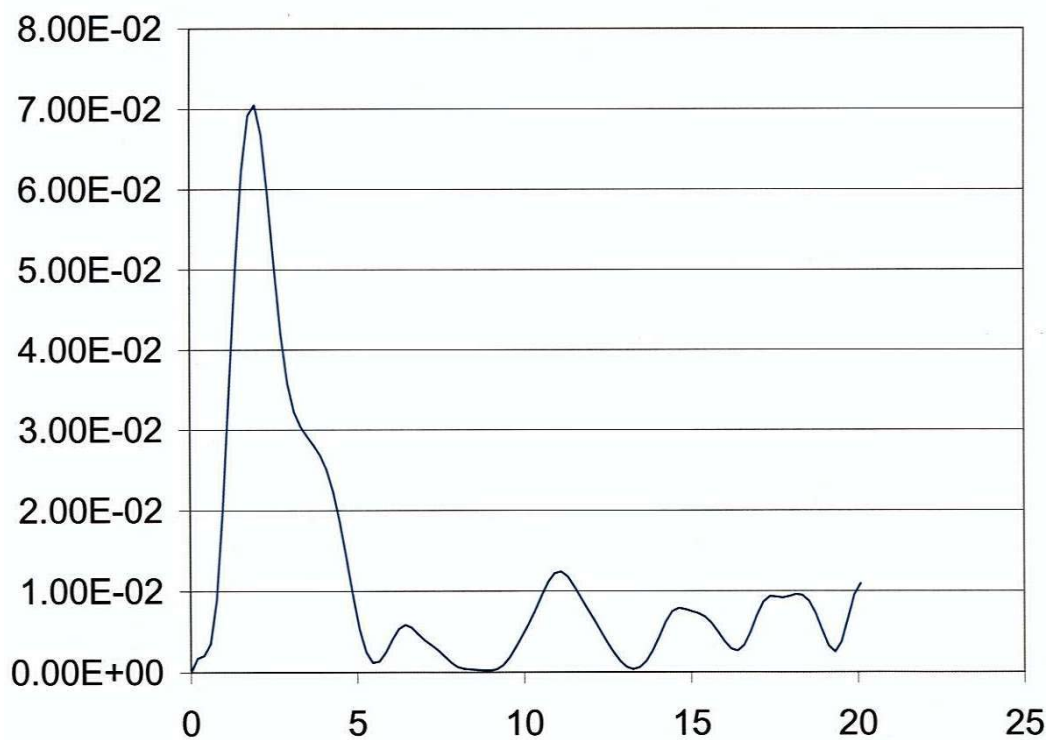


Fig. 7 - Espectro de potência das acelerações segundo Y; dt=.005s. n=5. L=1km.

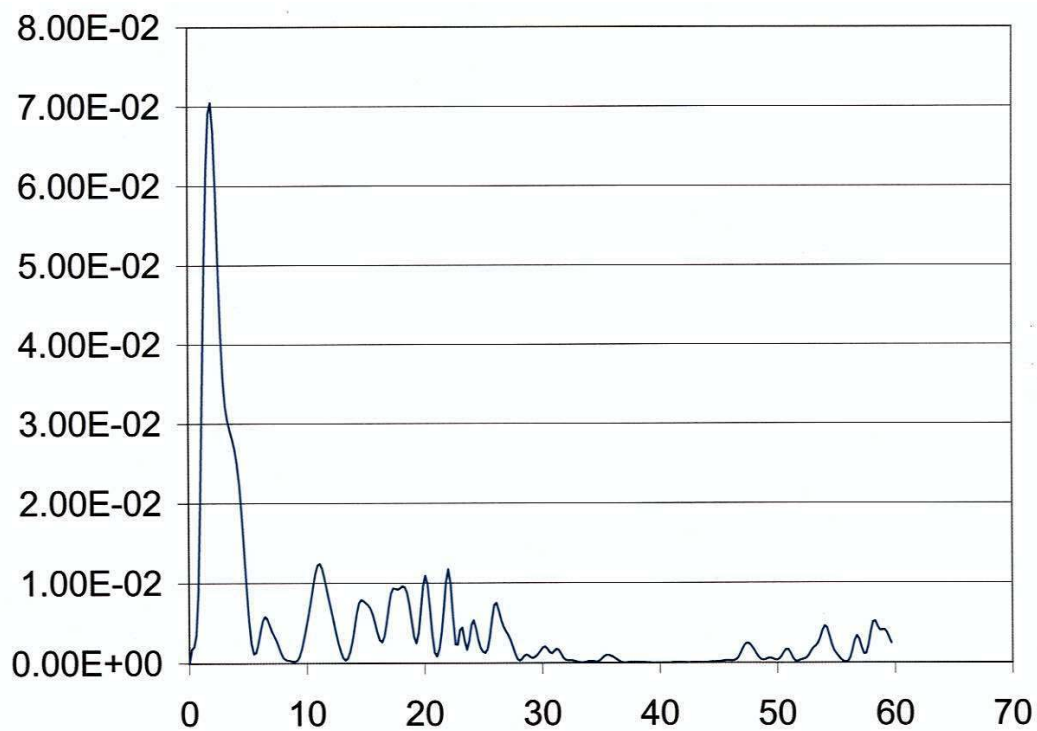


Fig. 8 - Espectro de potência das acelerações segundo Y; dt=.005s. n=5. L=1km. Escala diferente.

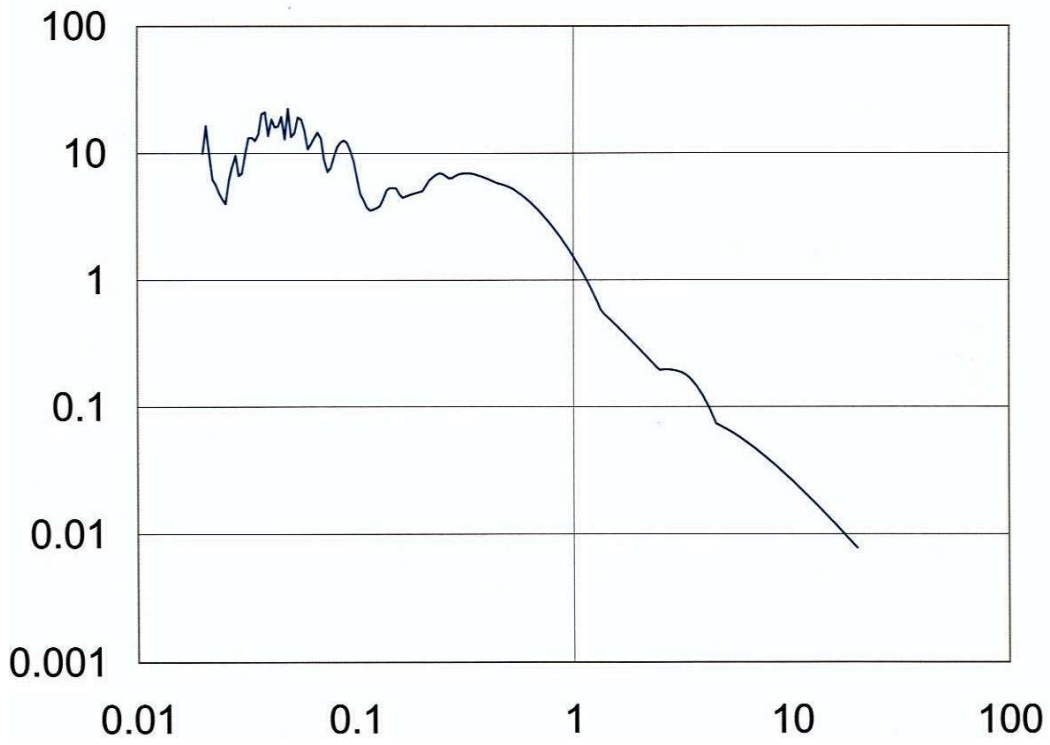


Fig. 9 - Espectro de resposta das acelerações segundo Y,  $\tau = 0$ ;  $dt = .005s$ .  $n = 5$ .  $L = 1km$ .

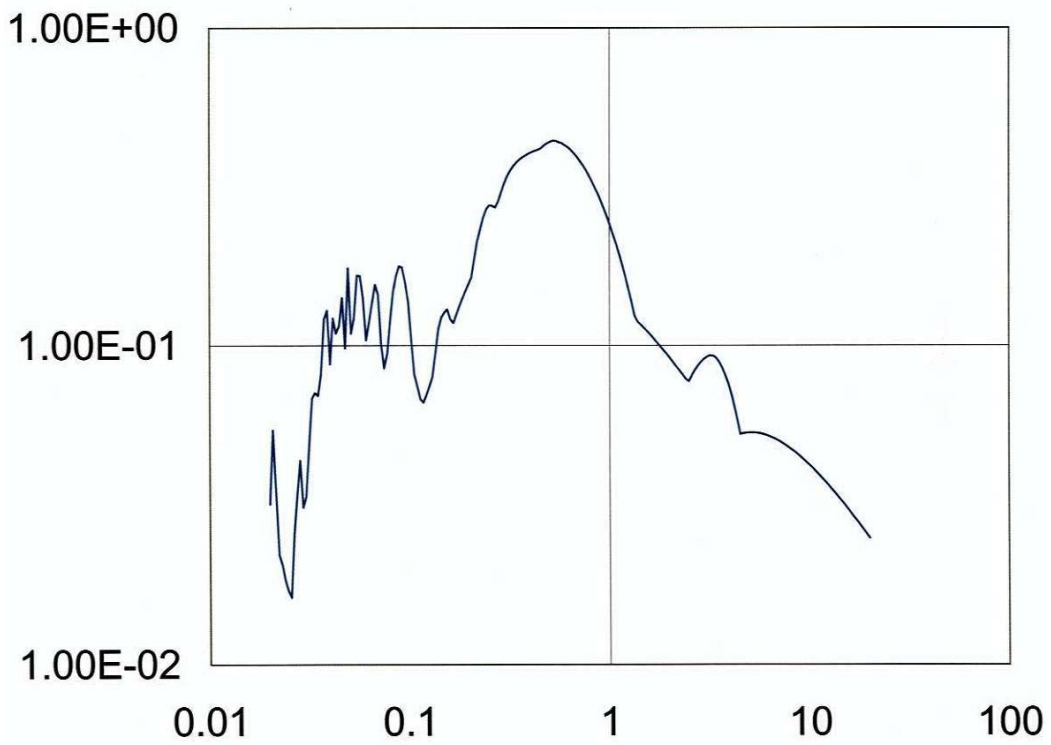


Fig. 10 - Espectro de resposta das velocidades segundo Y,  $\tau = 0$ ;  $dt = .005s$ .  $n = 5$ .  $L = 1km$ .

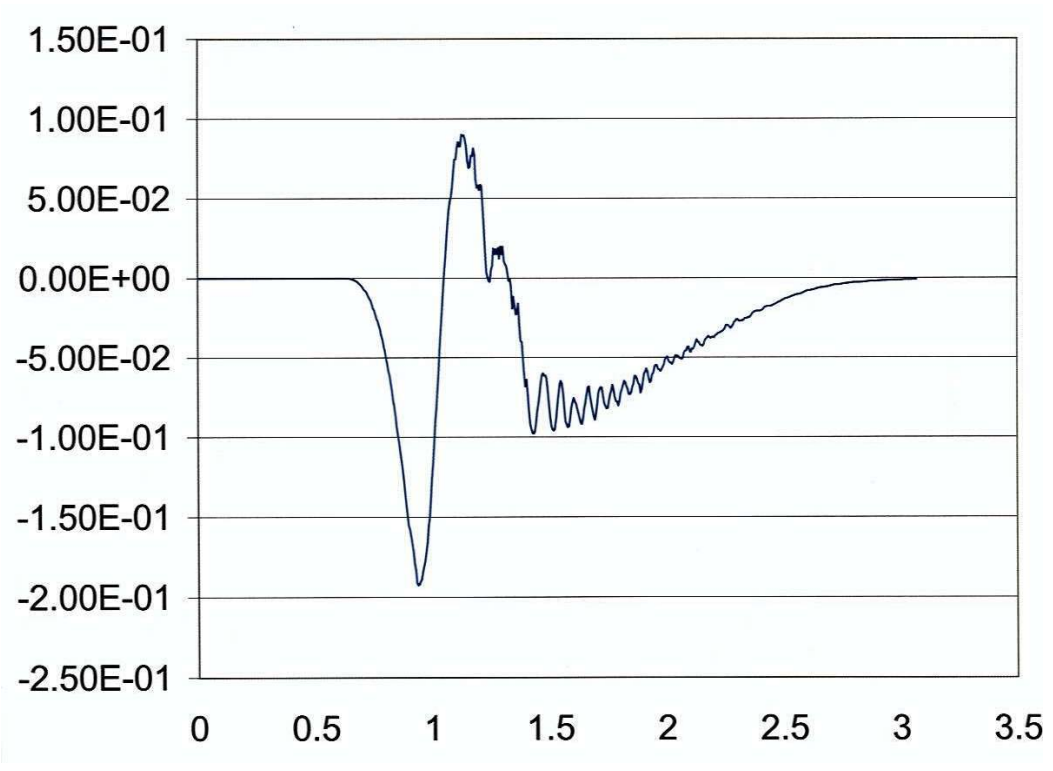


Fig. 11 – Velocigrama segundo Y; dt=.005s. n=5. L=1km.

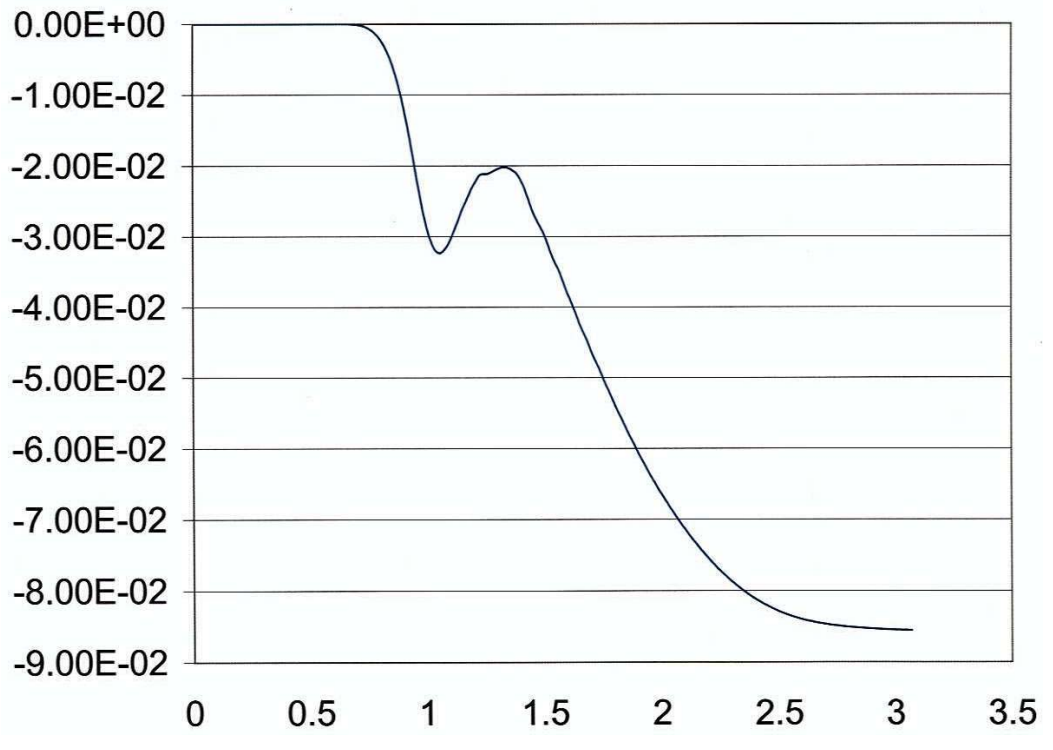


Fig. 12 – Deslocamento segundo Y; dt=.005s. n=5. L=1km

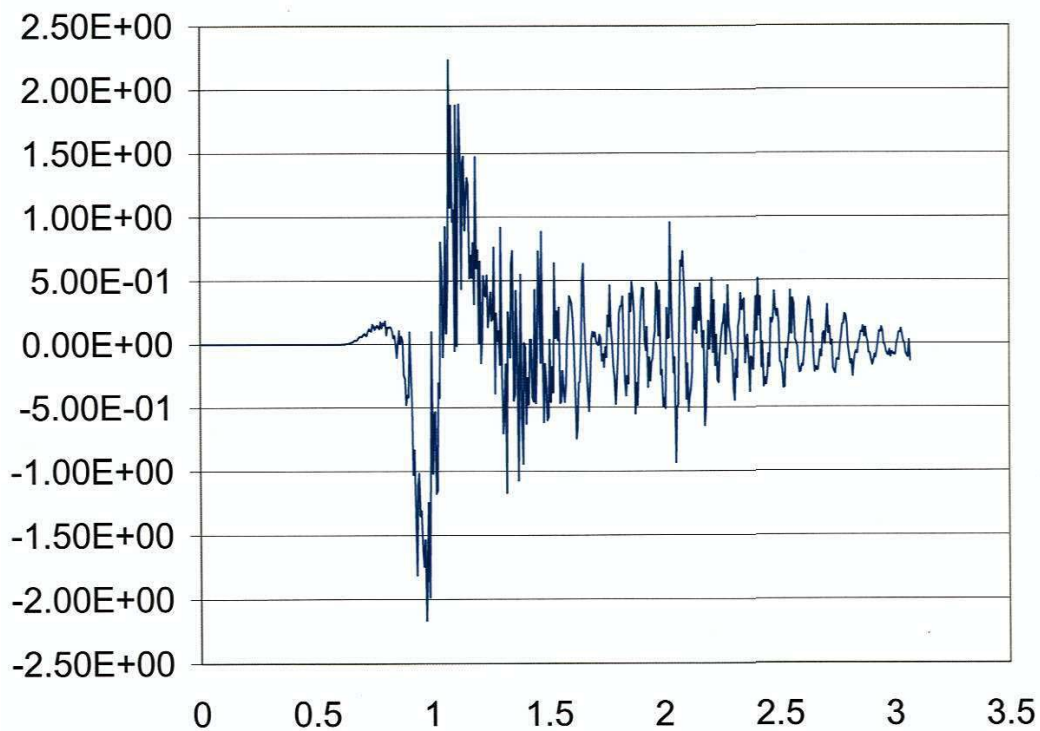


Fig. 13 - Acelerograma segundo X;  $dt=.005s$ .  $n=5$ .  $L=1km$ .

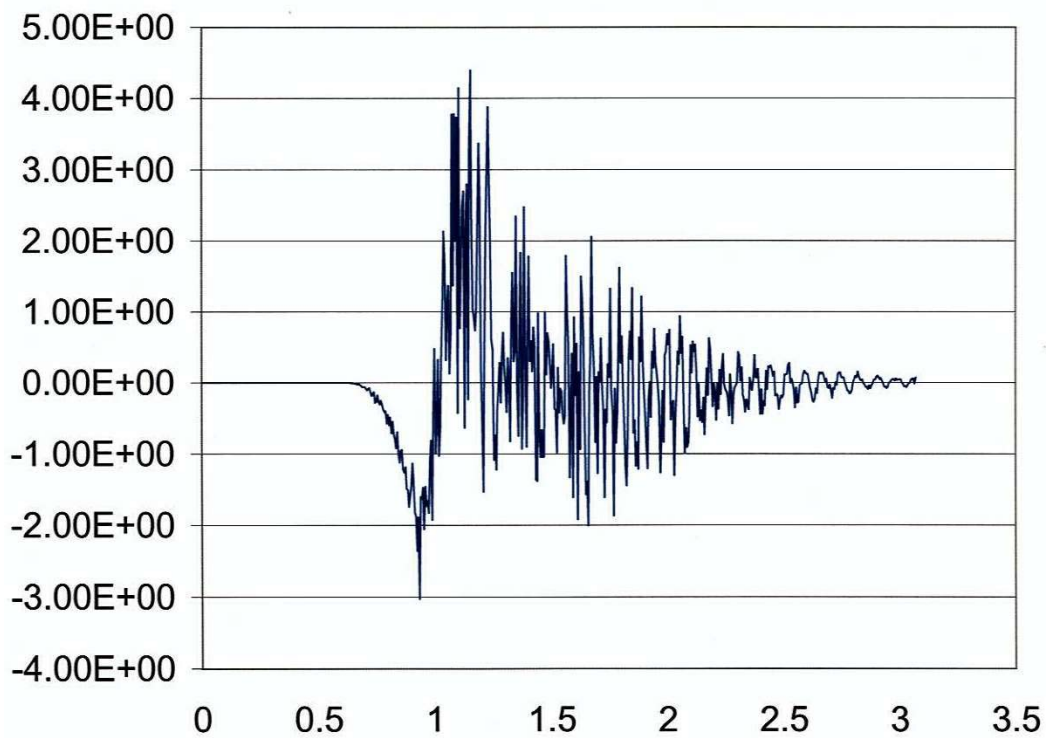


Fig. 14 - Acelerograma segundo Z;  $dt=.005s$ .  $n=5$ .  $L=1km$ .



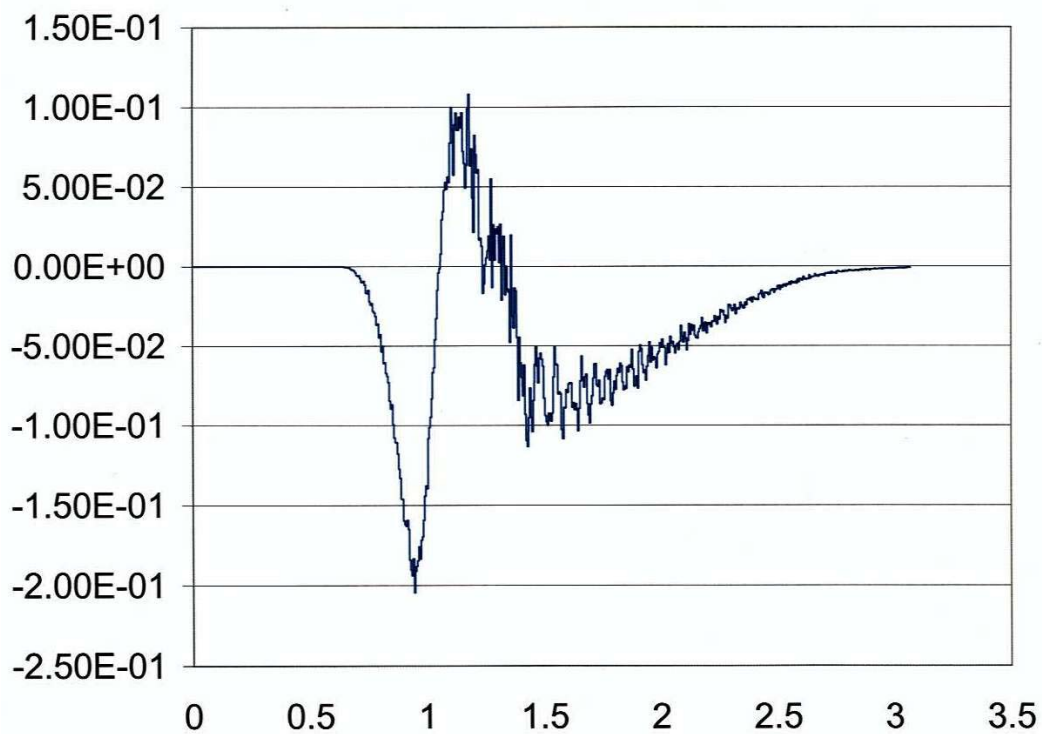


Fig. 15 - Velocigrama segundo Y;  $dt=.005s$ .  $n=0$ .  $L=1km$ . Constante em  $dt=5 \times .001$

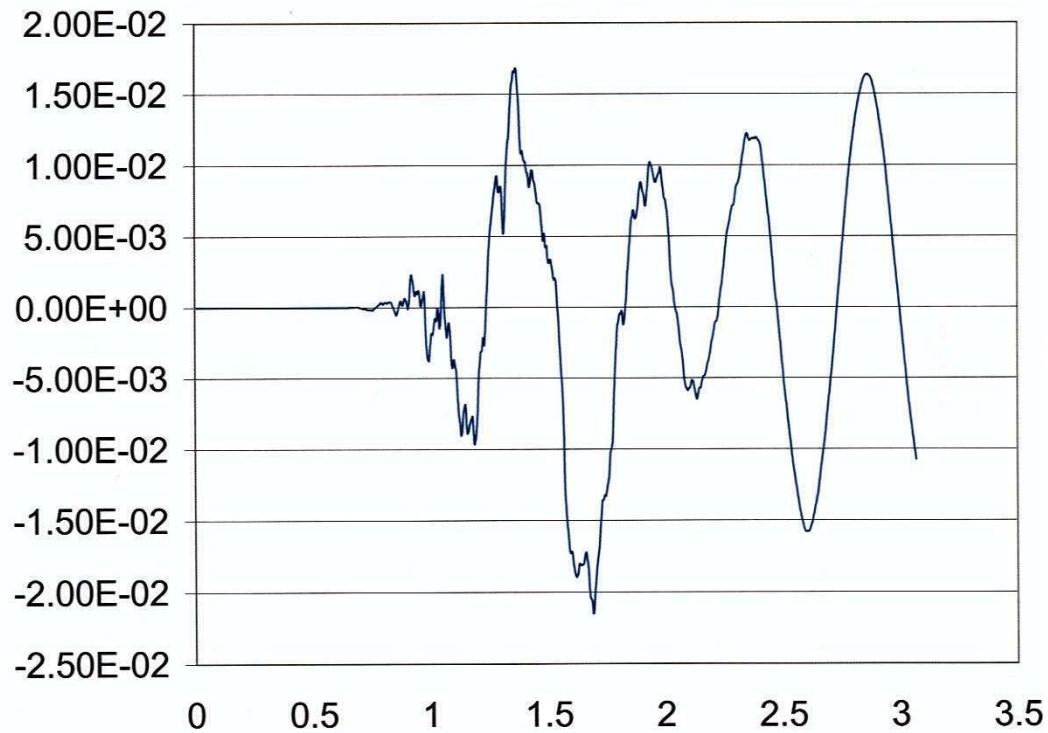


Fig. 16 - Deslocamento segundo Y no fecho do arco superior. Albufeira Cheia.  $\tau = 0$ ;  $dt=5 \times .001$ .  $n=0$ .  $L=1km$ .

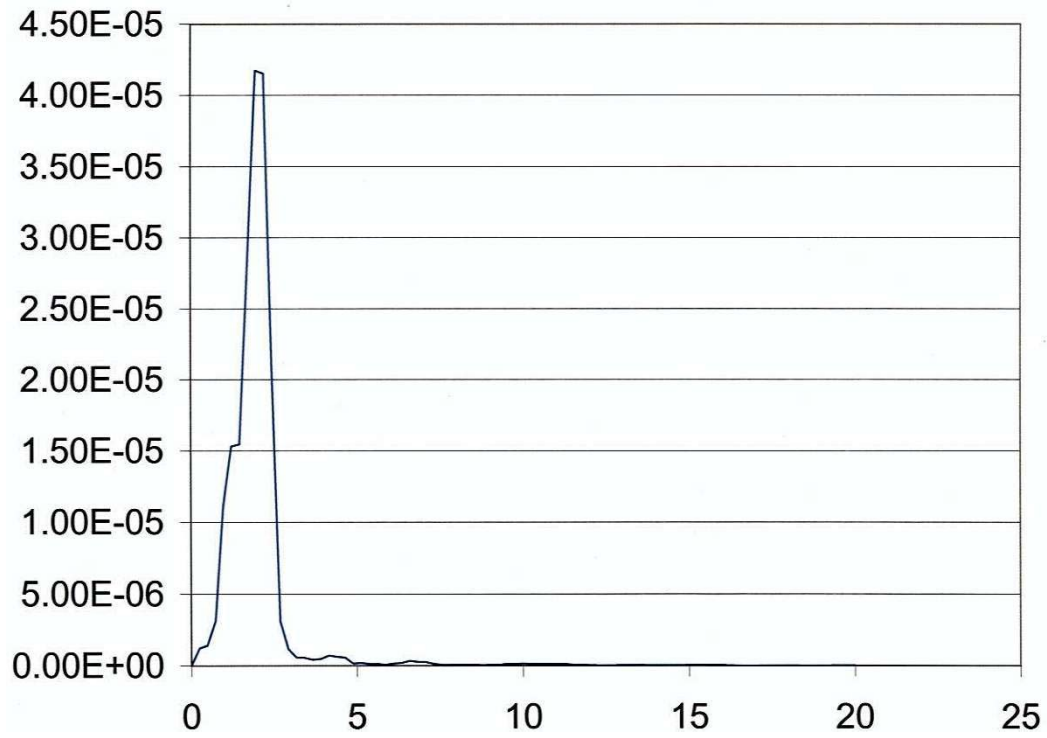


Fig. 17 – Espectro de potência dos deslocamentos segundo Y. Albufeira Cheia.  $\tau = 0$ ;  $dt=5 \times .001$ .  $n=0$ .  $L=1\text{km}$ .

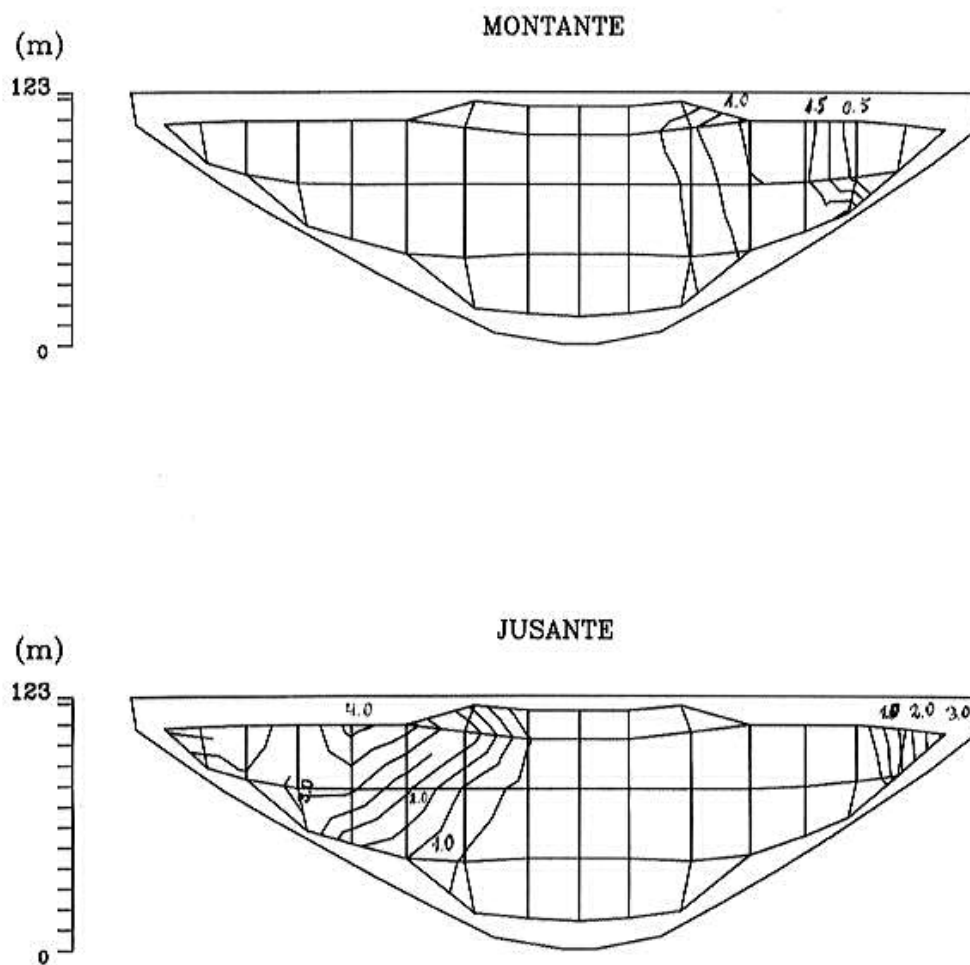


Fig. 18 – Tracções nas consolas. Albufeira Cheia.  $\tau = 0$ ;  $dt=5 \times .001$ .  $L=1\text{km}$ .  
 Máx. a montante=1.5Mpa  
 Máx. a jusante=4.0MPa

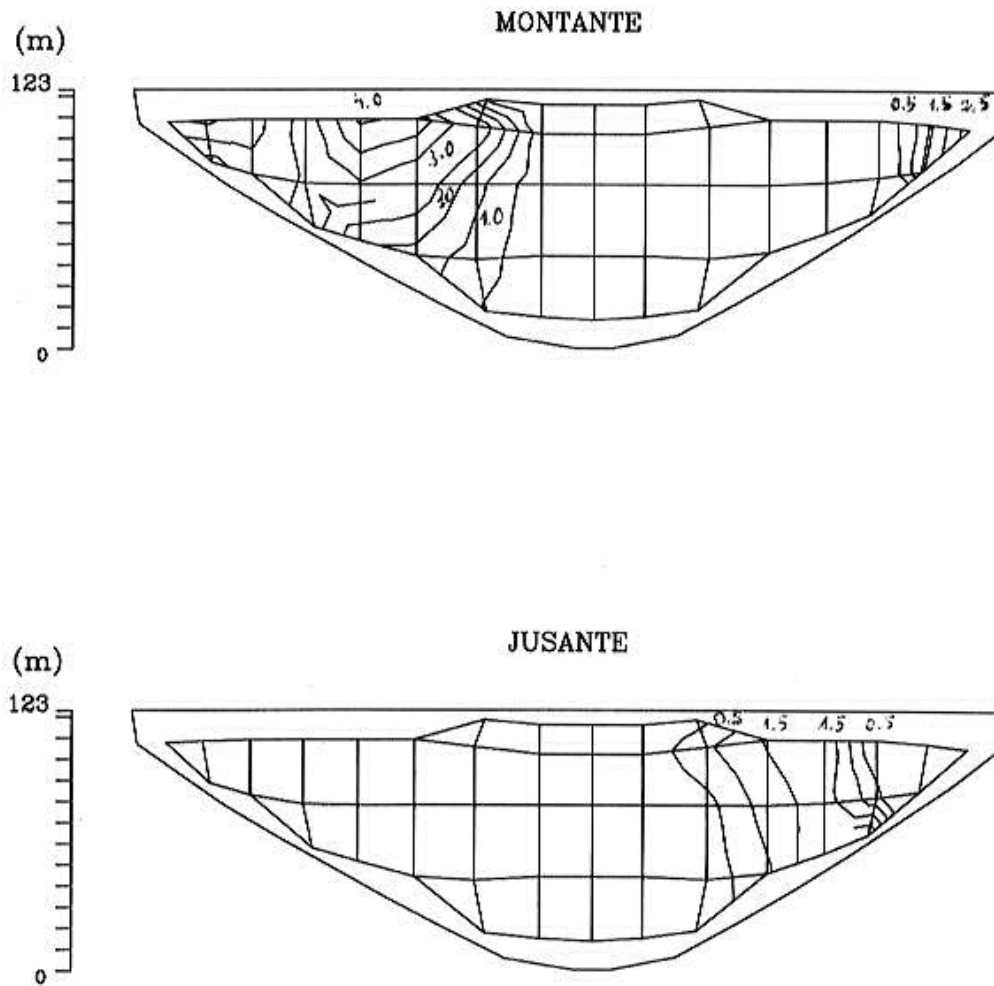


Fig. 19 - Compressões nas consolas. Albufeira Cheia.  $\tau = 0$ ;  $dt=5 \times .001$ .  $L=1\text{km}$ .  
 Min. a montante=-4.0Mpa  
 Min a jusante=-1.5MPa

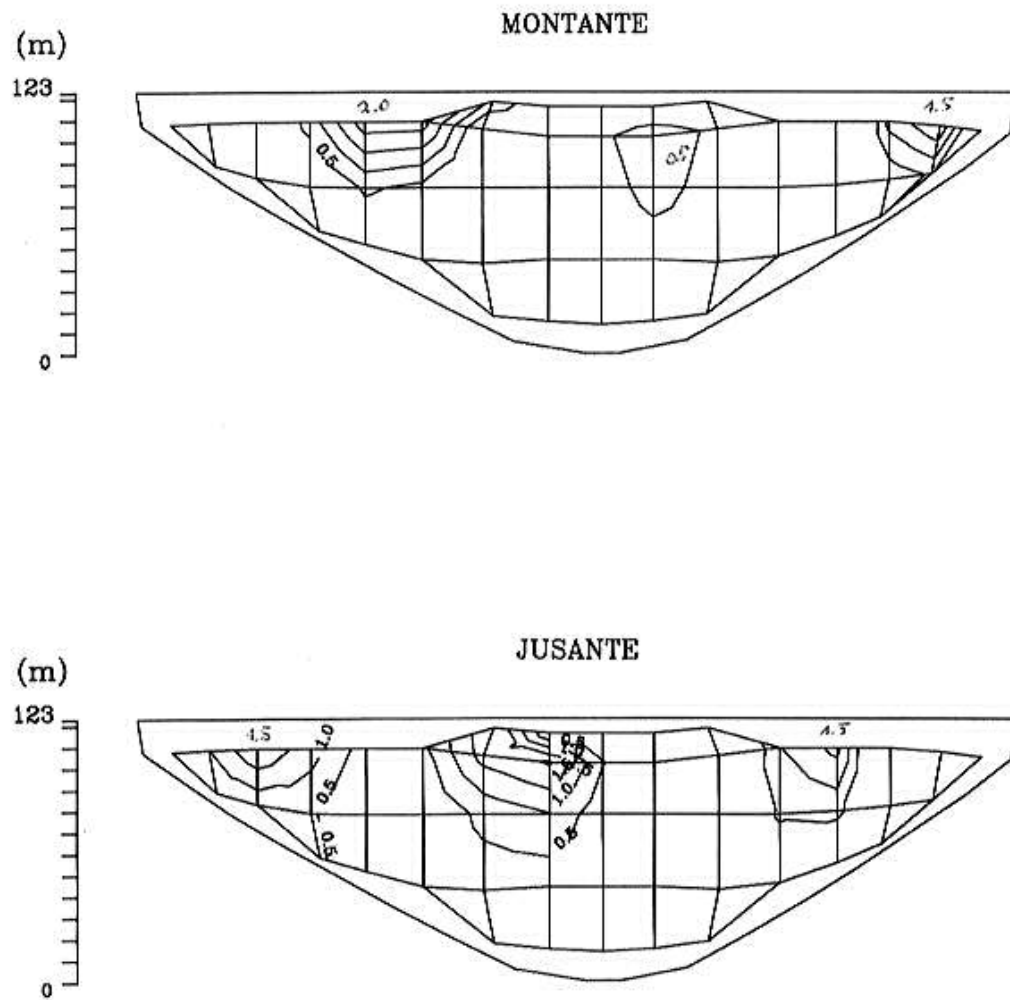


Fig. 20 - Tracções nos arcos. Albufeira Cheia.  $\tau = 0$ ;  $dt=5 \times .001$ .  $L=1\text{km}$ .  
 Máx. a montante=2.0Mpa  
 Máx. a jusante=1.5MPa

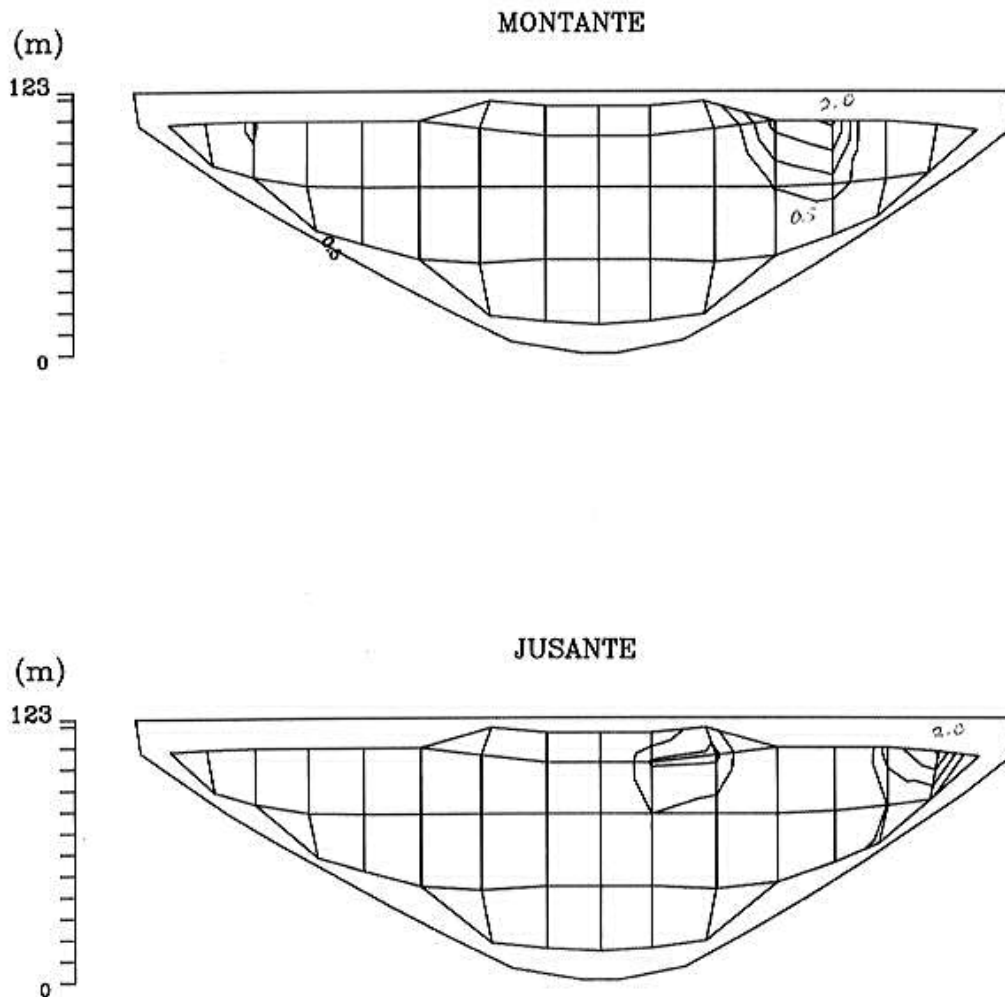


Fig. 21 - Compressões nos arcos. Albufeira Cheia.  $\tau = 0$ ;  $dt=5 \times .001$ .  $L=1\text{km}$ .  
 Min. a montante=-2.0Mpa  
 Min a jusante=-2.0MPa

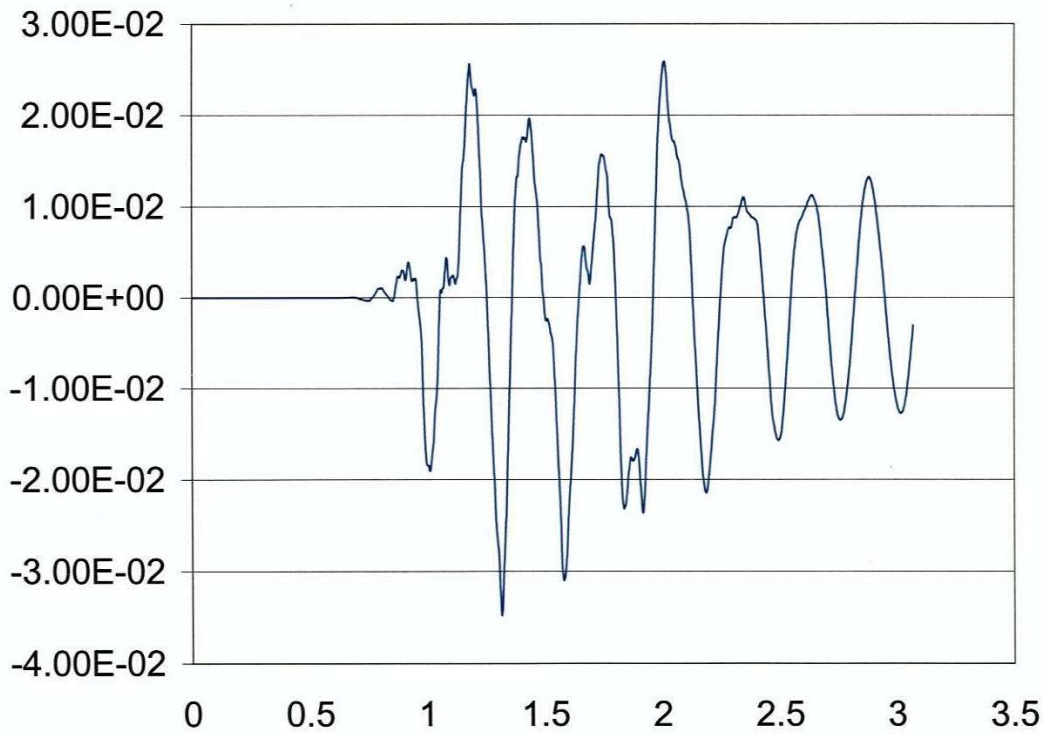


Fig. 22 – Deslocamento segundo Y no fecho do arco superior. Albufeira Vazia.  $\tau = 0$ ;  $dt=5 \times .001$ .  $n=0$ .  $L=1\text{km}$ .

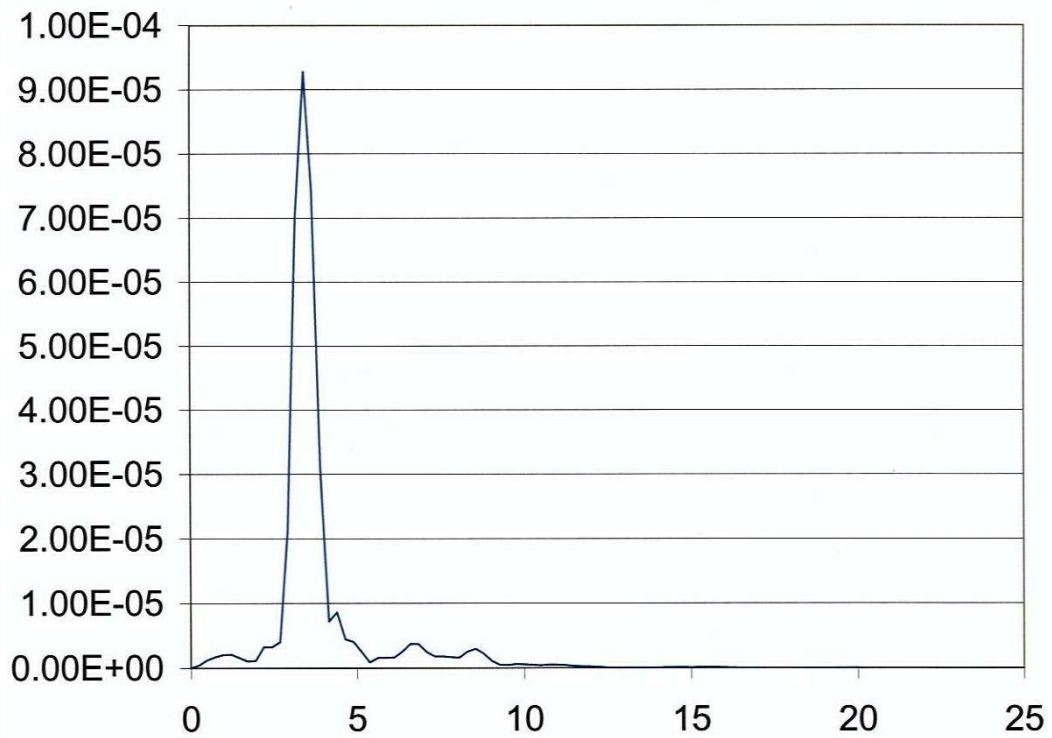


Fig. 23 – Espectro de potência dos deslocamentos segundo Y. Albufeira Vazia.  $\tau = 0$ ;  $dt=5 \times .001$ .  $n=0$ .  $L=1\text{km}$ .

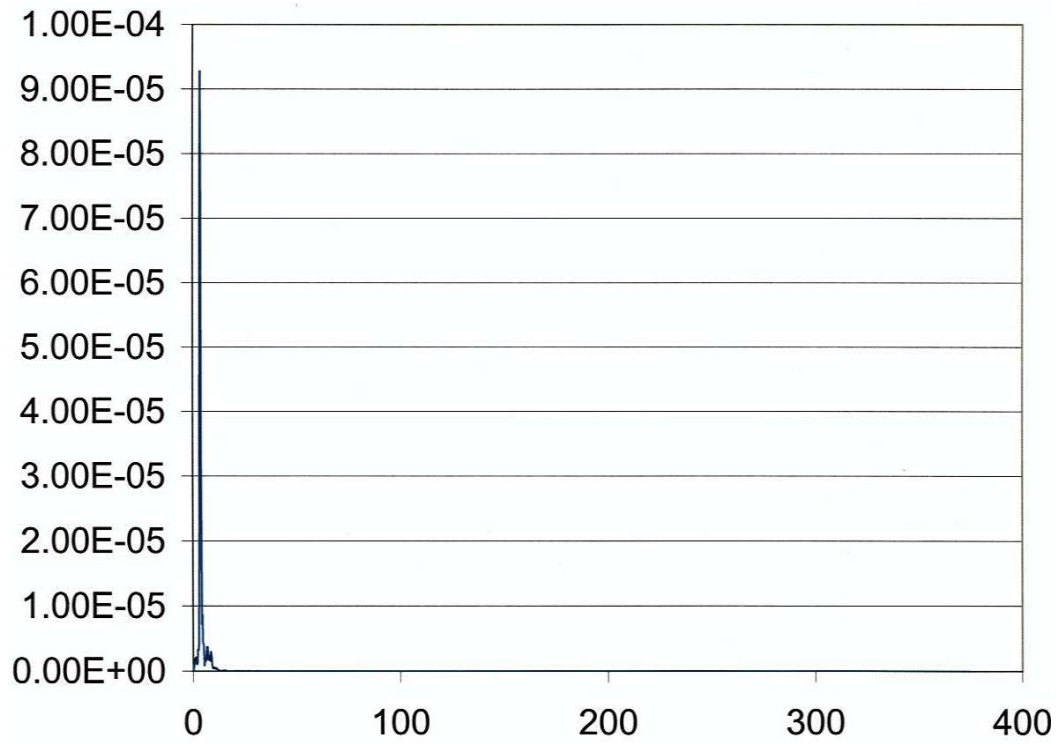


Fig. 24 – Espectro de potência dos deslocamentos segundo Y. Albufeira Vazia.  $\tau = 0$ ;  $dt=5 \times .001$ .  $n=0$ .  $L=1\text{km}$ .  
Escala diferente.



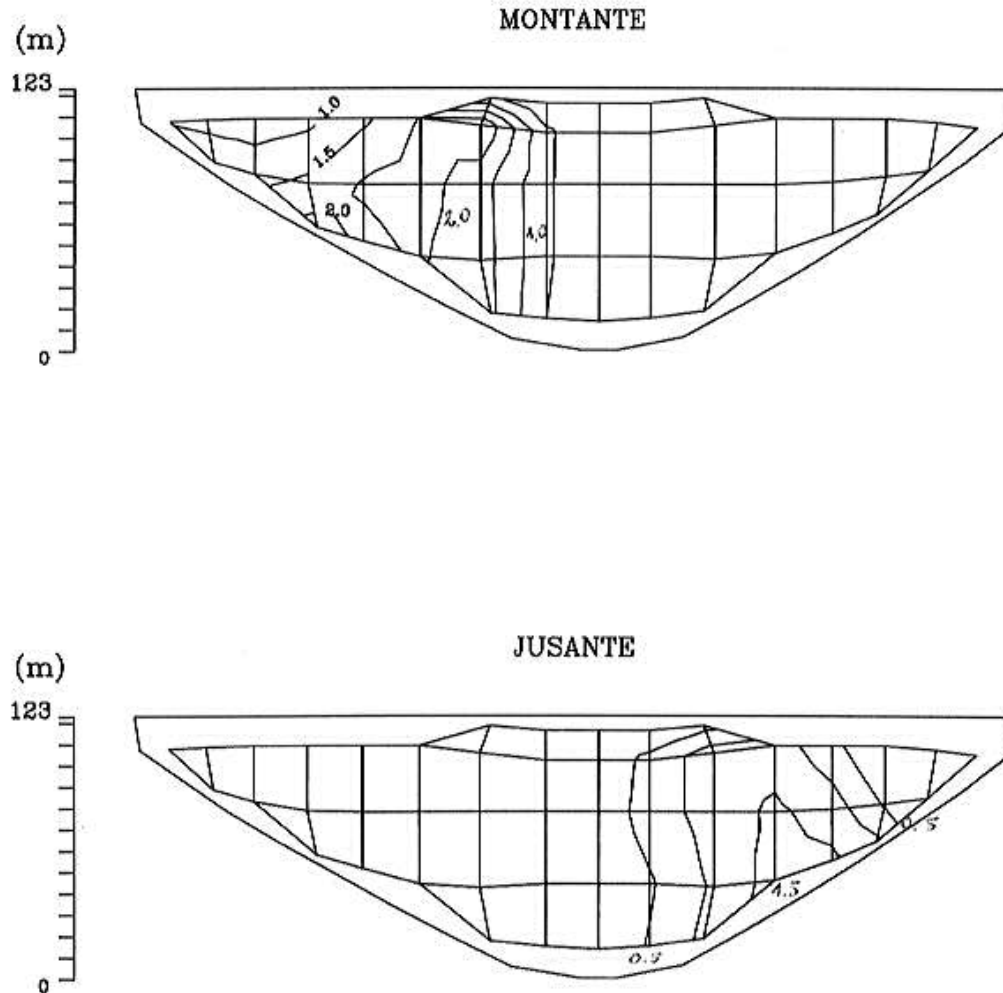


Fig. 25 – Tracções nas consolas. Albufeira Vazia.  $\tau = 0$ ;  $dt=5 \times .001$ .  $L=1\text{km}$ .  
Máx. a montante=2.0Mpa  
Máx. a jusante=1.5MPa

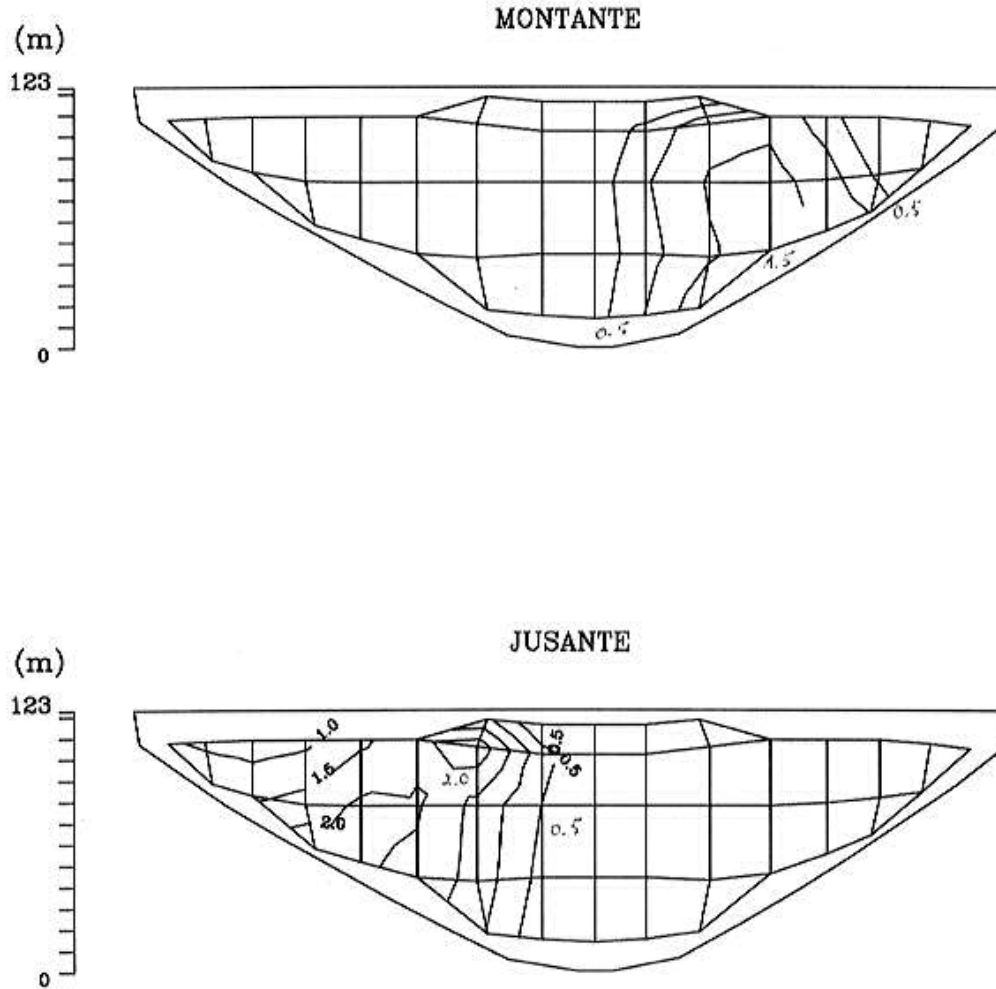


Fig. 26 - Compressões nas consolas. Albufeira Vazia.  $\tau = 0$ ;  $dt=5 \times .001$ .  $L=1\text{km}$ .  
 Min. a montante=-1.5Mpa  
 Min. a jusante=-2.0MPa

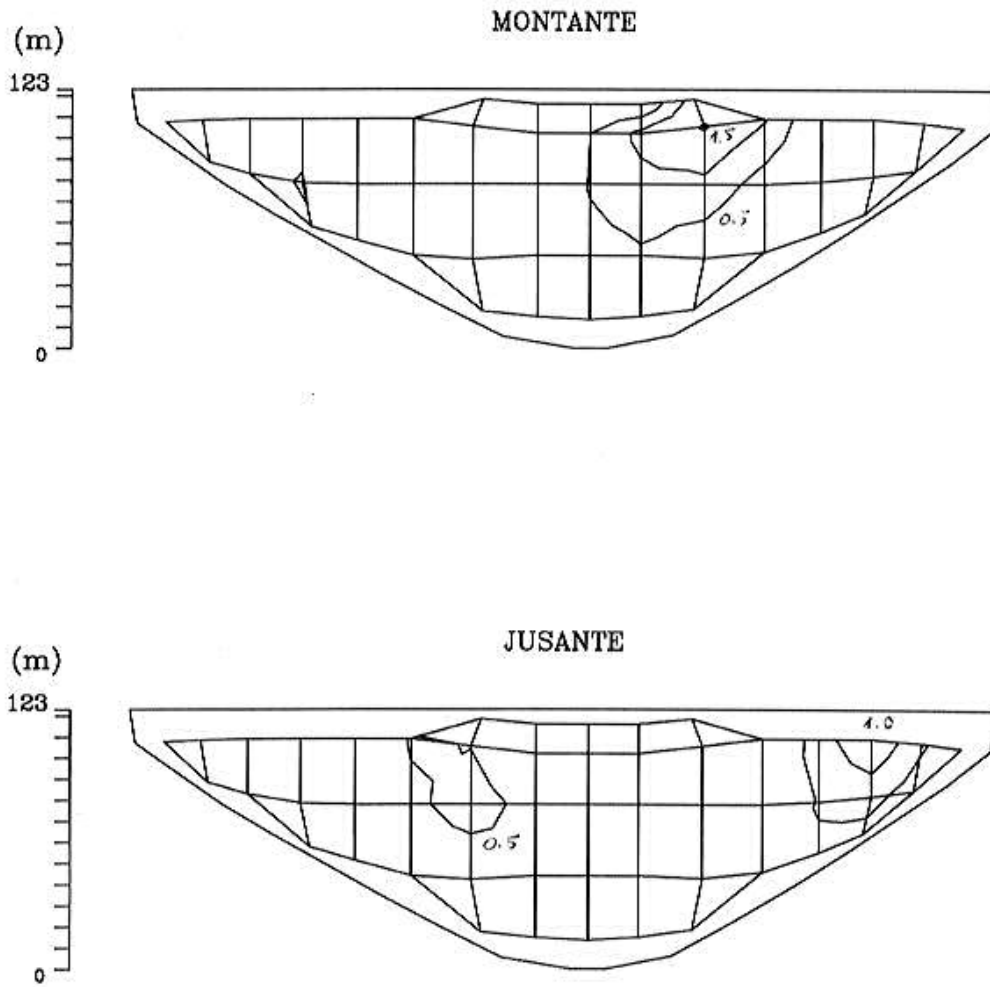


Fig. 27 - Tracções nos arcos. Albufeira Vazia.  $\tau = 0$ ;  $dt=5 \times .001$ .  $L=1\text{km}$ .  
Máx. a montante=1.5Mpa  
Máx. a jusante=1.0MPa

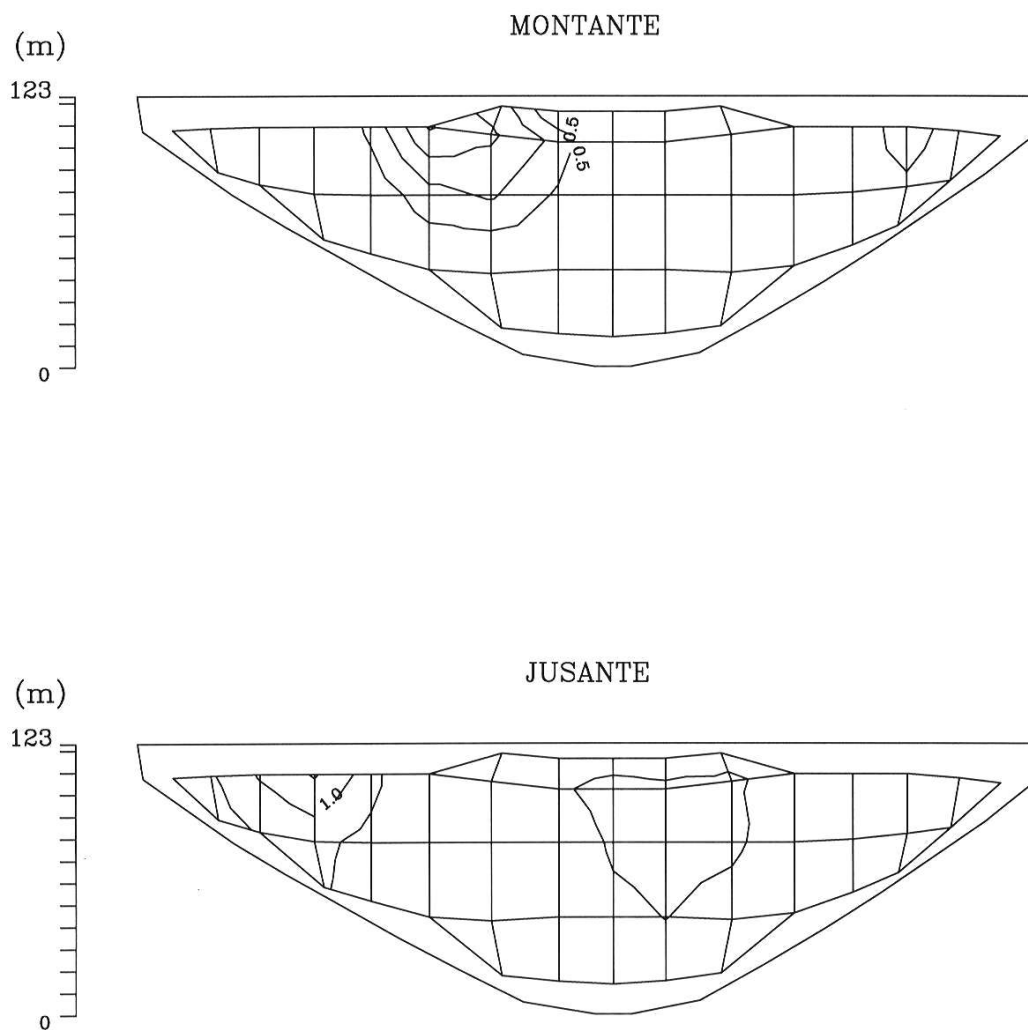


Fig. 28 - Compressões nos arcos. Albufeira Vazia.  $\tau = 0$ ;  $dt=5 \times .001$ .  $L=1\text{km}$ .  
 Min. a montante=-1.5Mpa  
 Min. a jusante=-1.5MPa

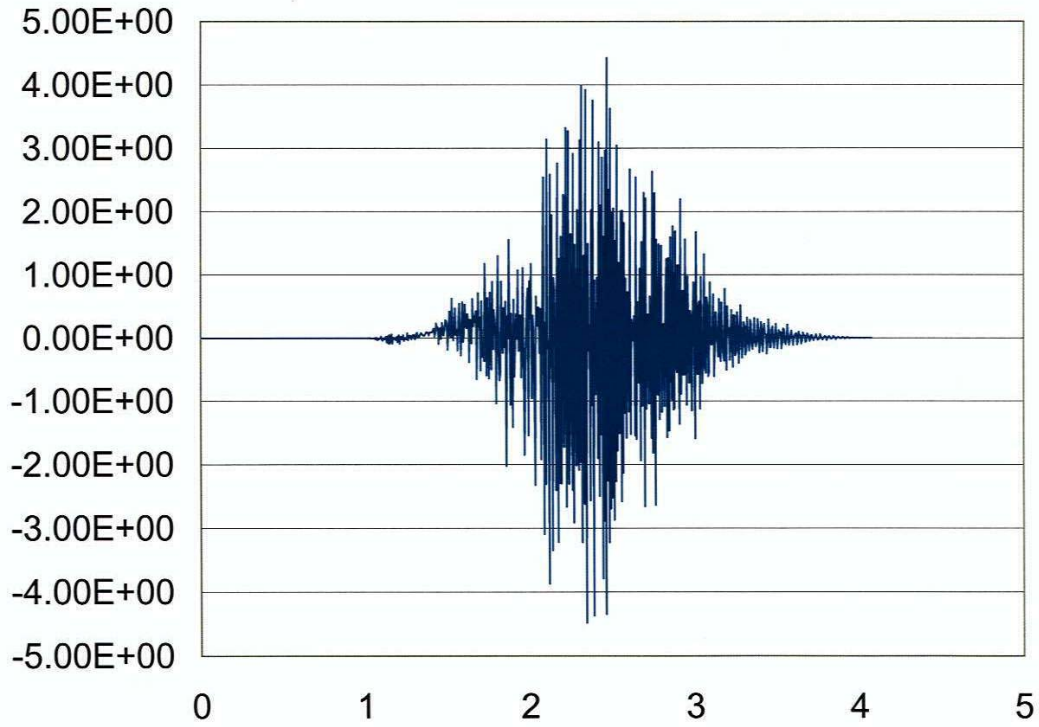


Fig. 29 – Acelerograma segundo Y;  $dt=.005s$ .  $n=0$ .  $L=5km$ .

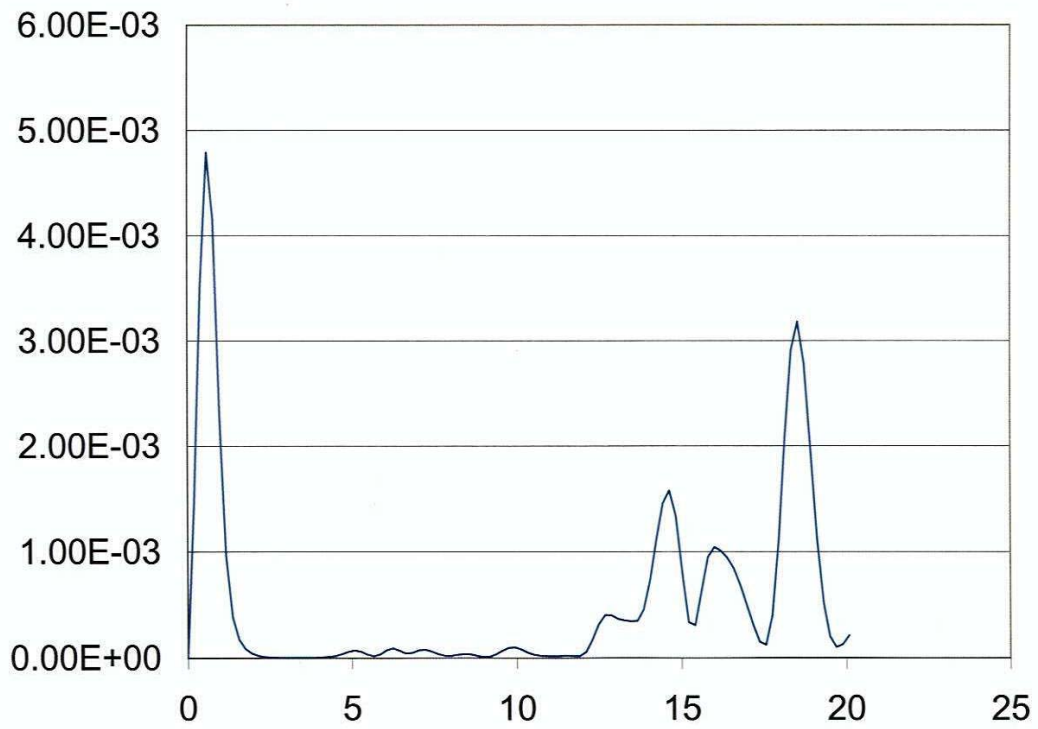


Fig. 30 – Espectro de potência das acelerações segundo Y;  $dt=.005s$ .  $n=0$ .  $L=5km$ .

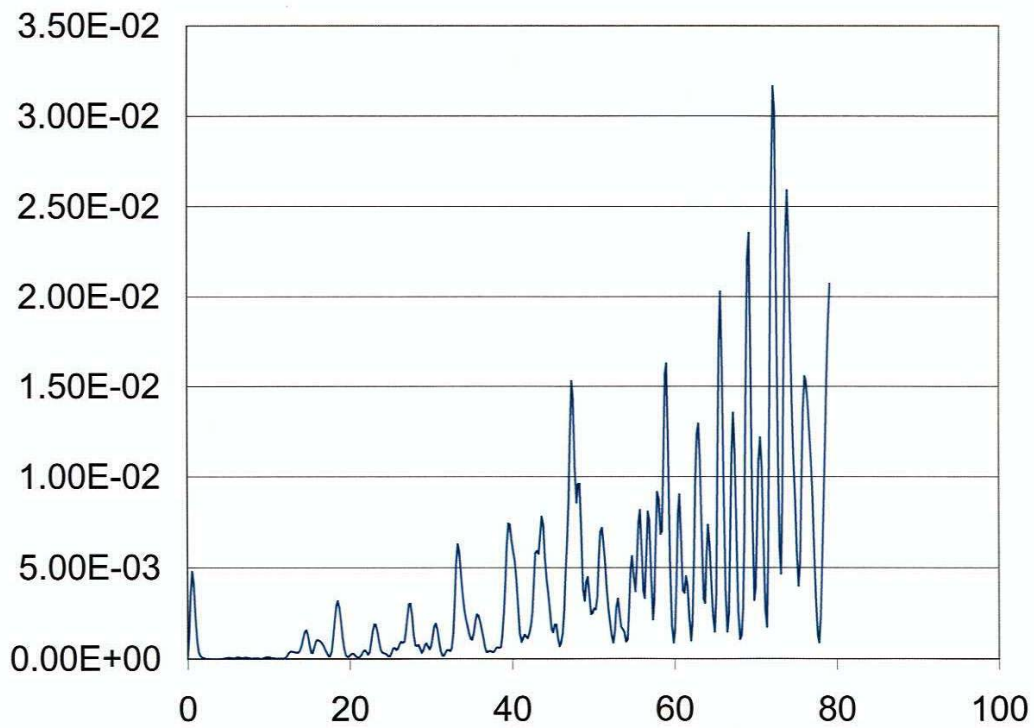


Fig. 31 – Espectro de potência das acelerações segundo Y; dt=.005s. n=0. L=5km. Escala diferente.

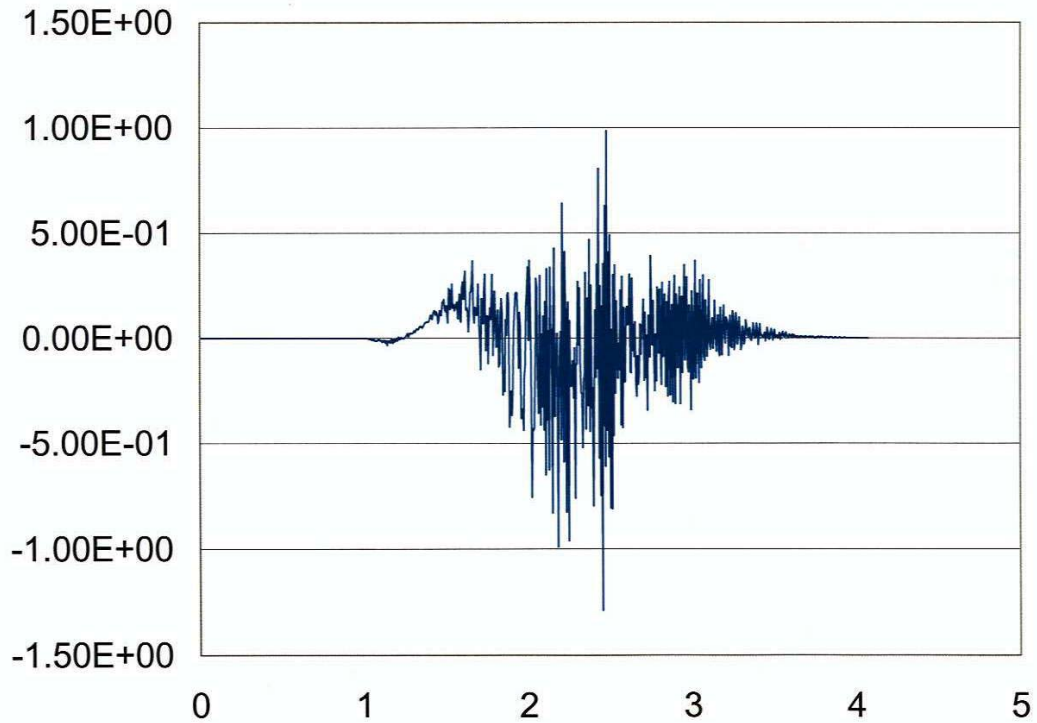


Fig. 32 - Acelerograma segundo Y; dt=.005s. n=5. L=5km.

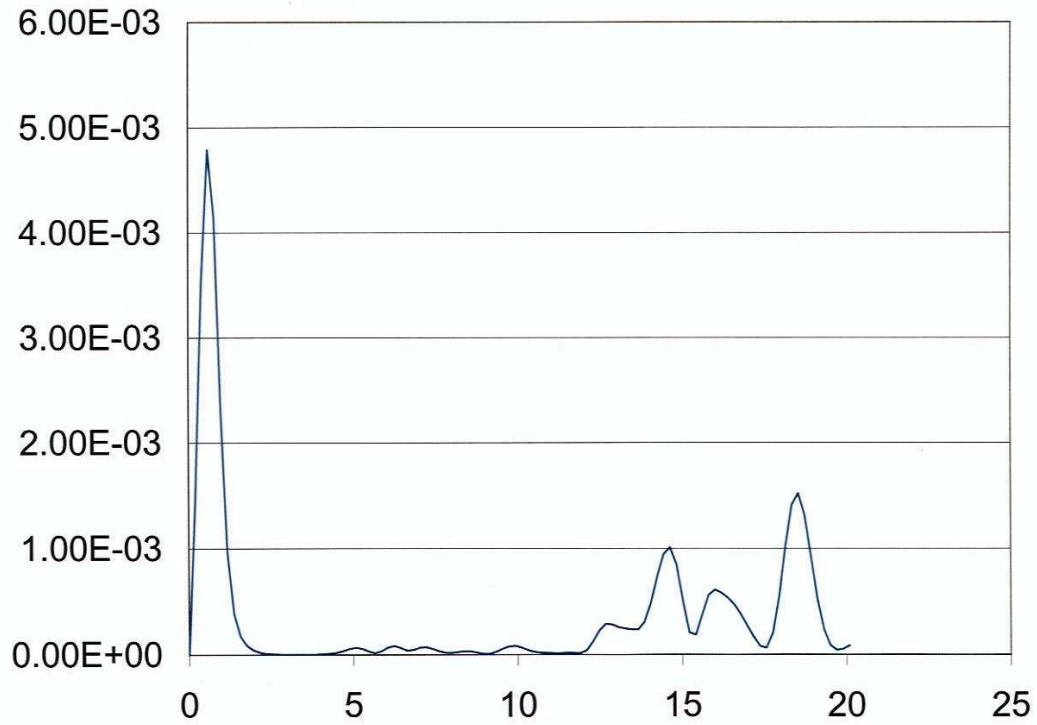


Fig. 33 - Espectro de potência das acelerações segundo Y; dt=.005s. n=5. L=5km.

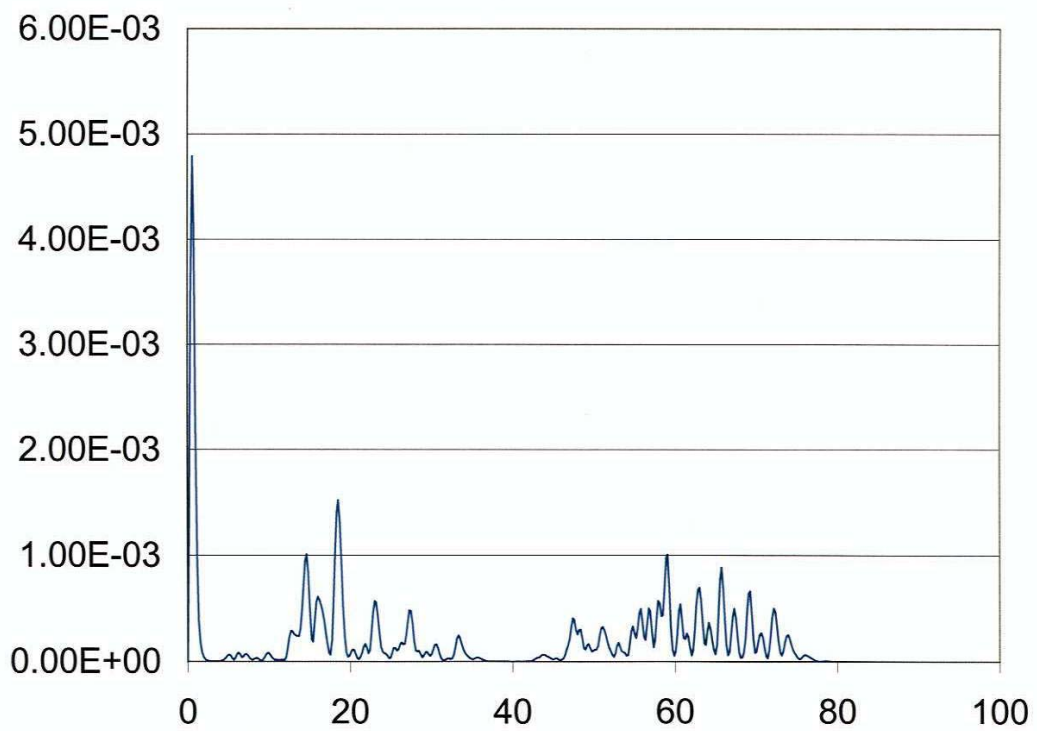


Fig. 34 - Espectro de potência das acelerações segundo Y; dt=.005s. n=5. L=5km. Escala diferente.

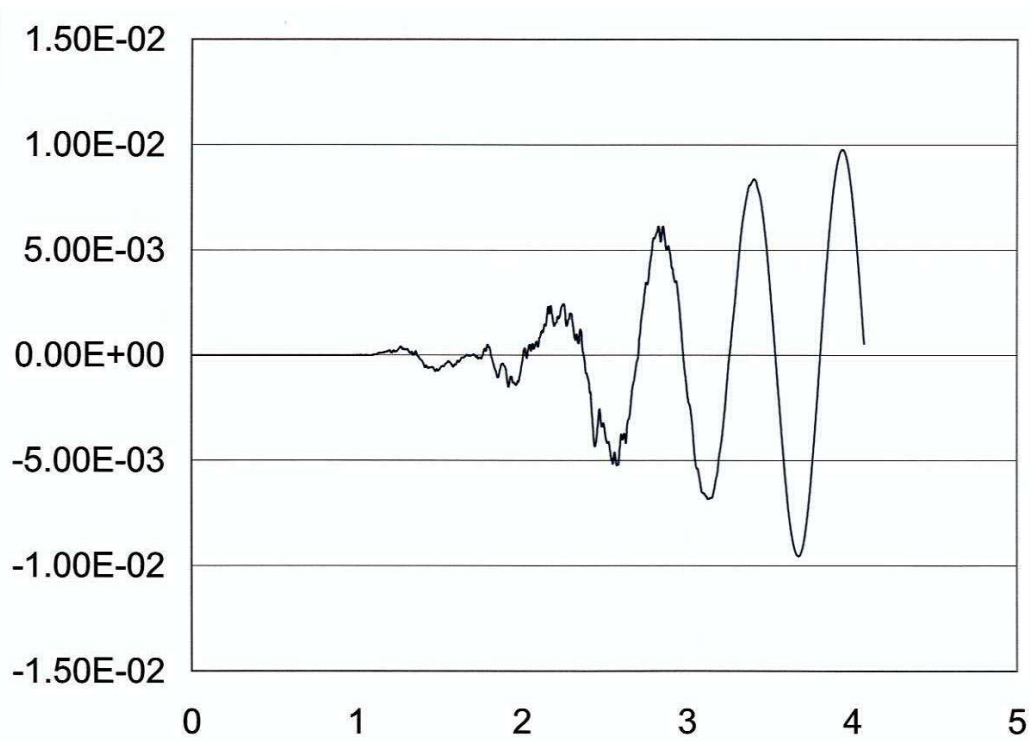


Fig. 35 – Deslocamento segundo Y no fecho do arco do coroamento. Albufeira cheia.  
 $\tau = 0$ .  $dt = 5 \times .001s$ .  $n=0$ .  $L=5km$

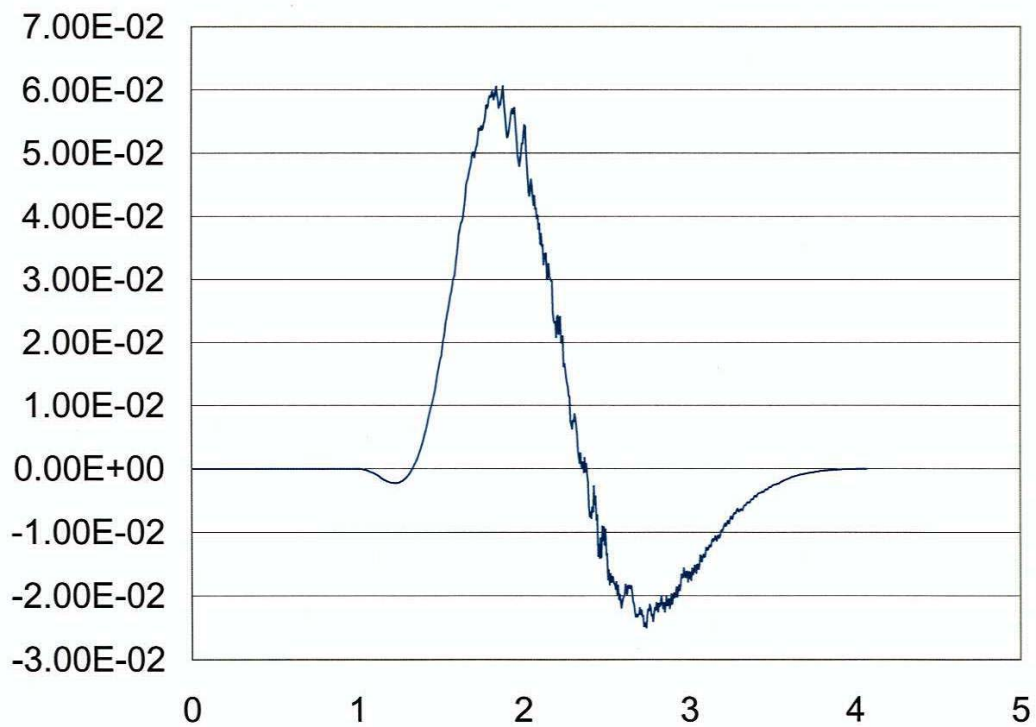


Fig. 36 – Velocigrama segundo Y;  $dt=.005s$ .  $n=5$ .  $L=5km$ .



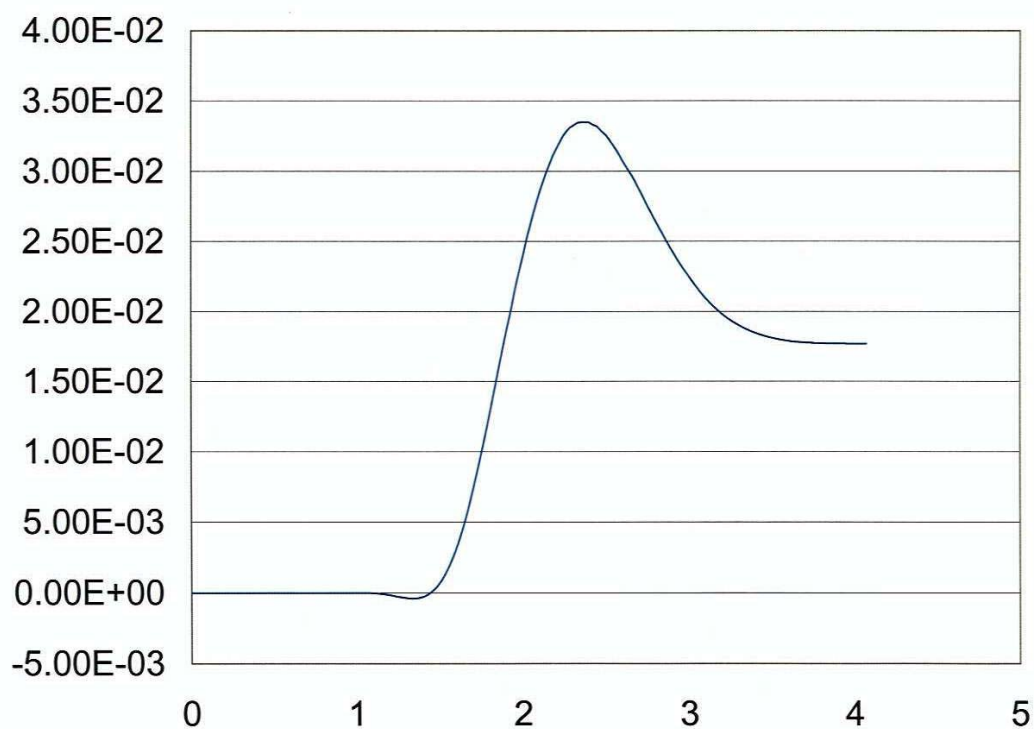


Fig. 37 – Deslocamento segundo Y;  $dt=.005s$ .  $n=5$ .  $L=5km$

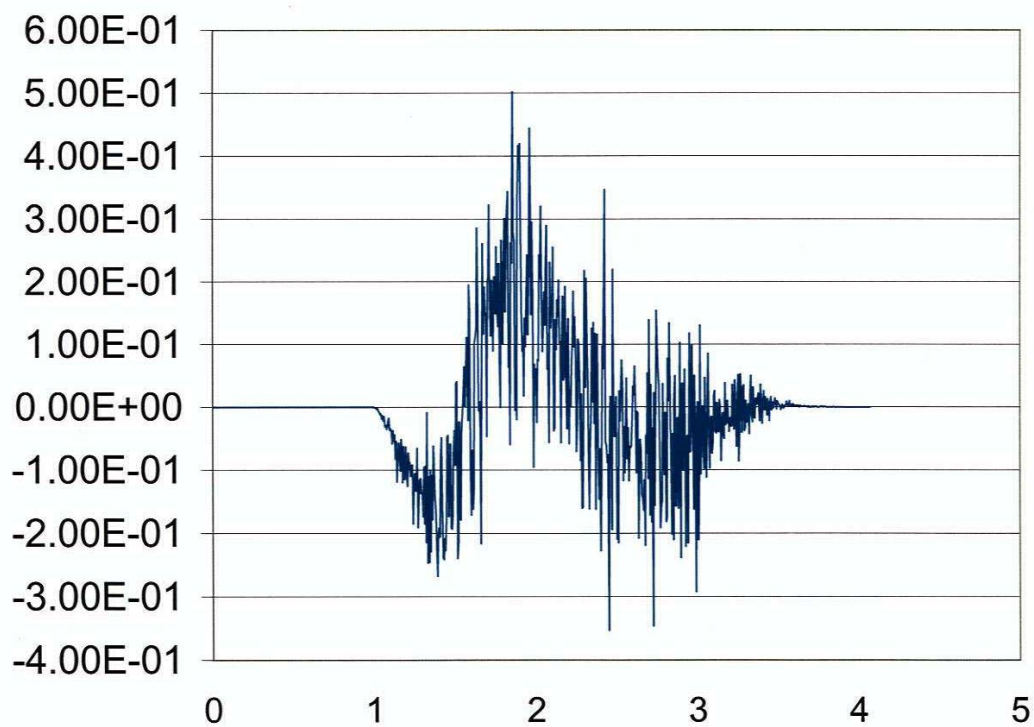


Fig. 38 - Acelerograma segundo X;  $dt=.005s$ .  $n=5$ .  $L=5km$ .

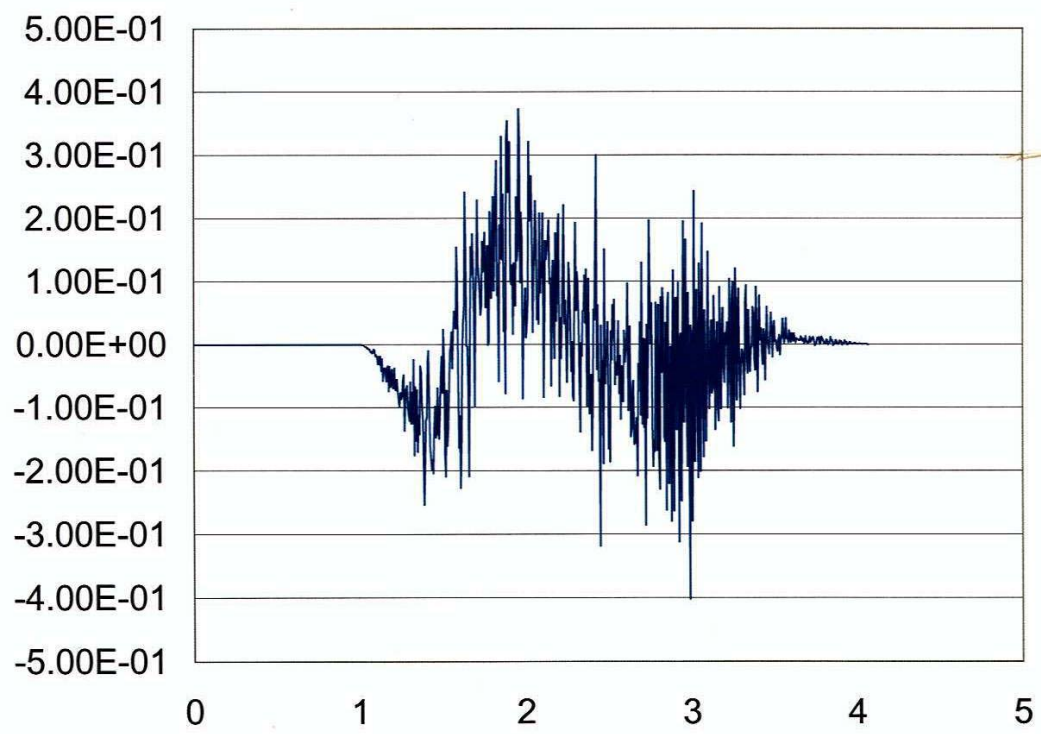


Fig. 39 - Acelerograma segundo Z;  $dt=.005s$ .  $n=5$ .  $L=5km$ .

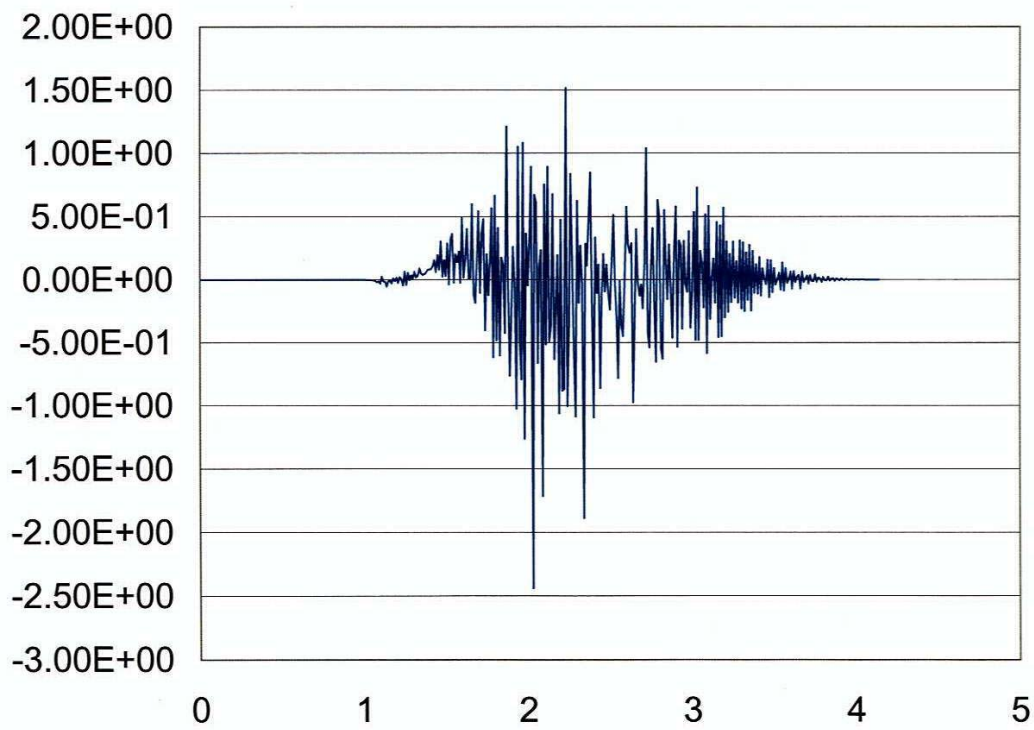


Fig. 40 – Acelerograma segundo Y; dt=.01s. n=0. L=5km.

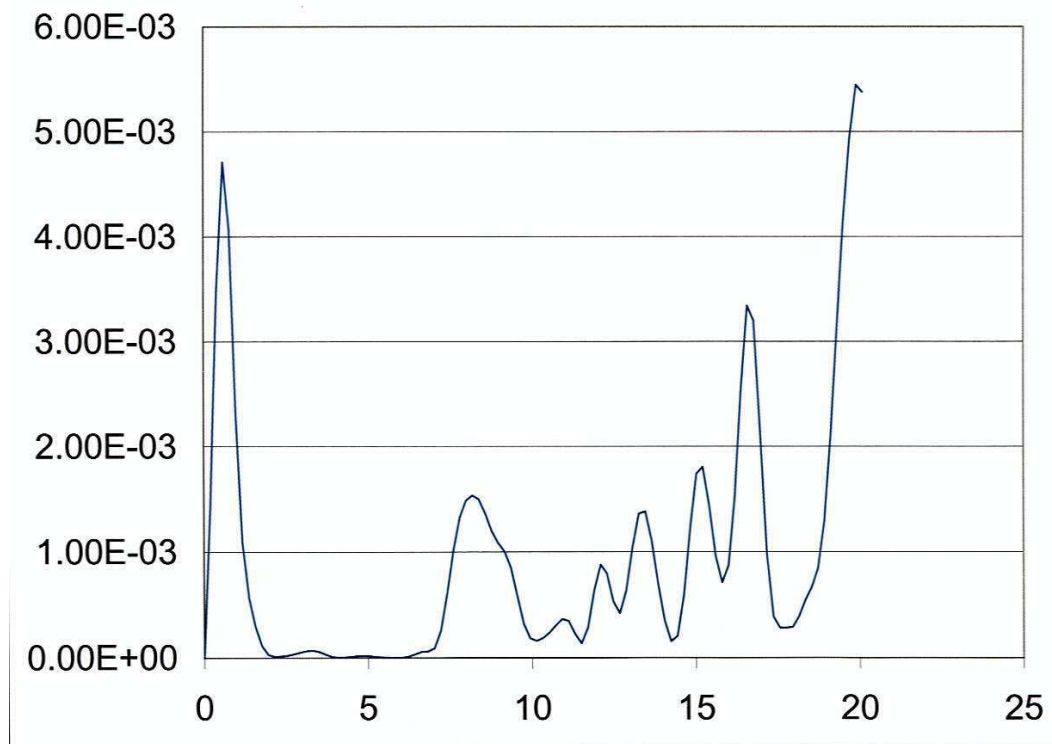


Fig. 41 – Espectro de potência das acelerações segundo Y; dt=.01s. n=0. L=5km.

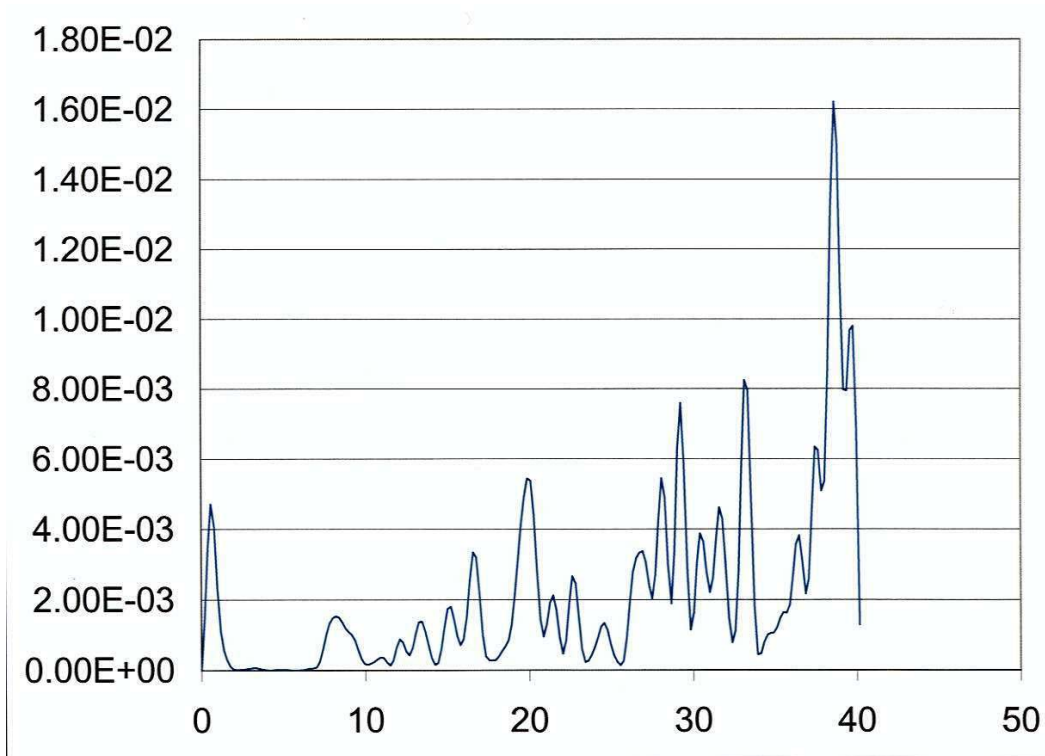


Fig. 42 – Espectro de potência das acelerações segundo Y;  $dt=.01s$ .  $n=0$ .  $L=5km$ . Escala diferente.

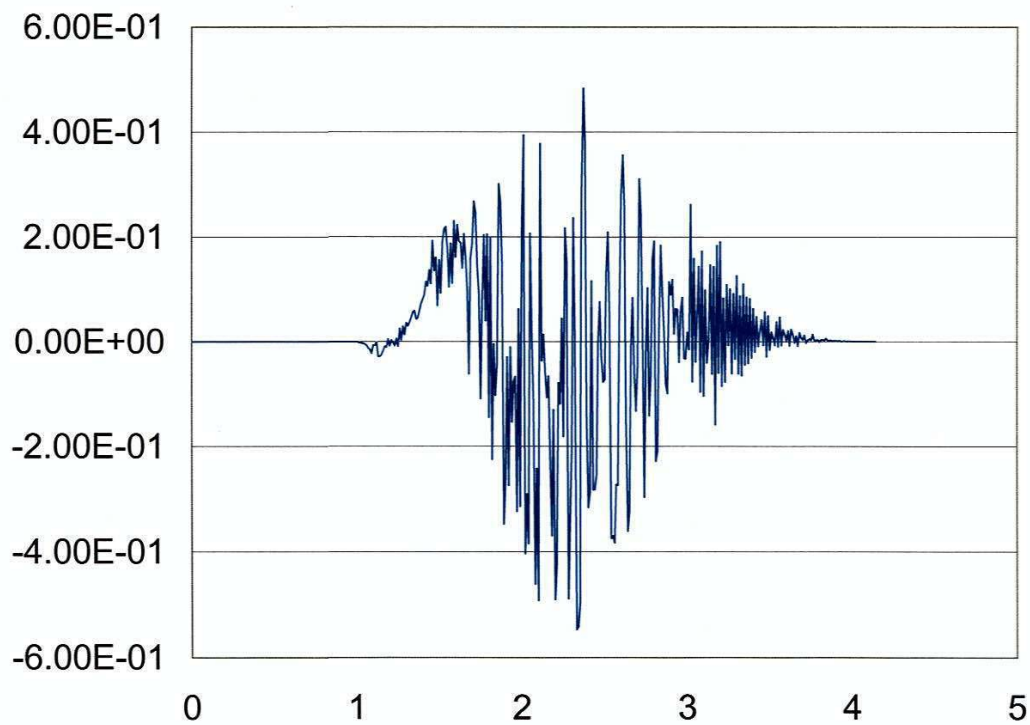


Fig. 43 - Acelerograma segundo Y;  $dt=.01s$ .  $n=3$ .  $L=5km$ .

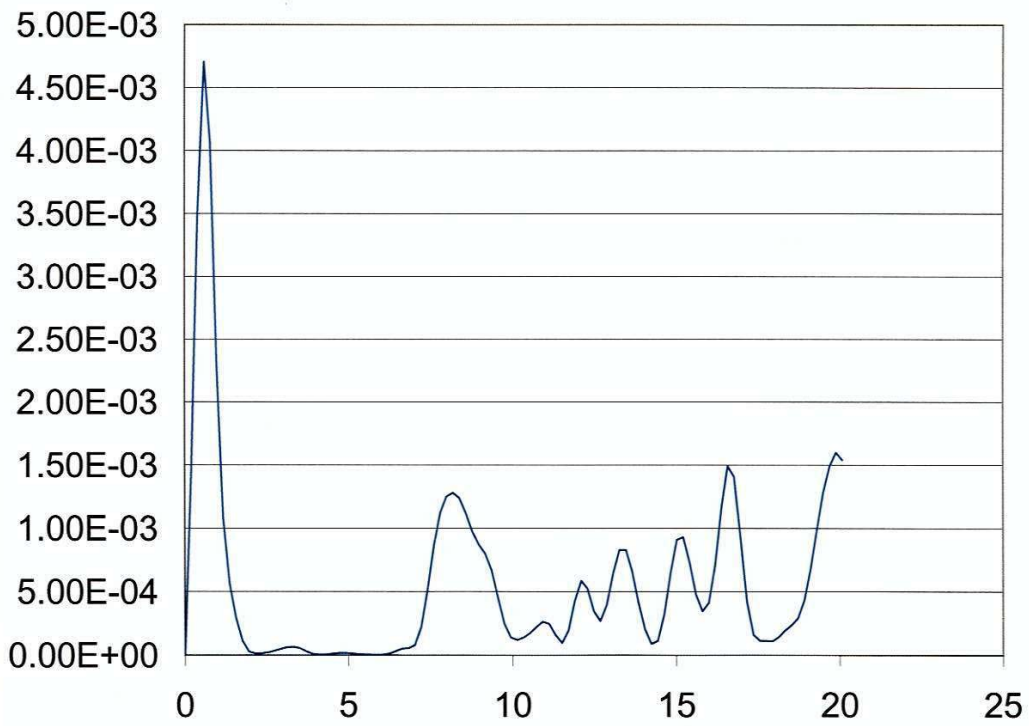


Fig. 44 - Espectro de potência das acelerações segundo Y; dt=.01s. n=3. L=5km.

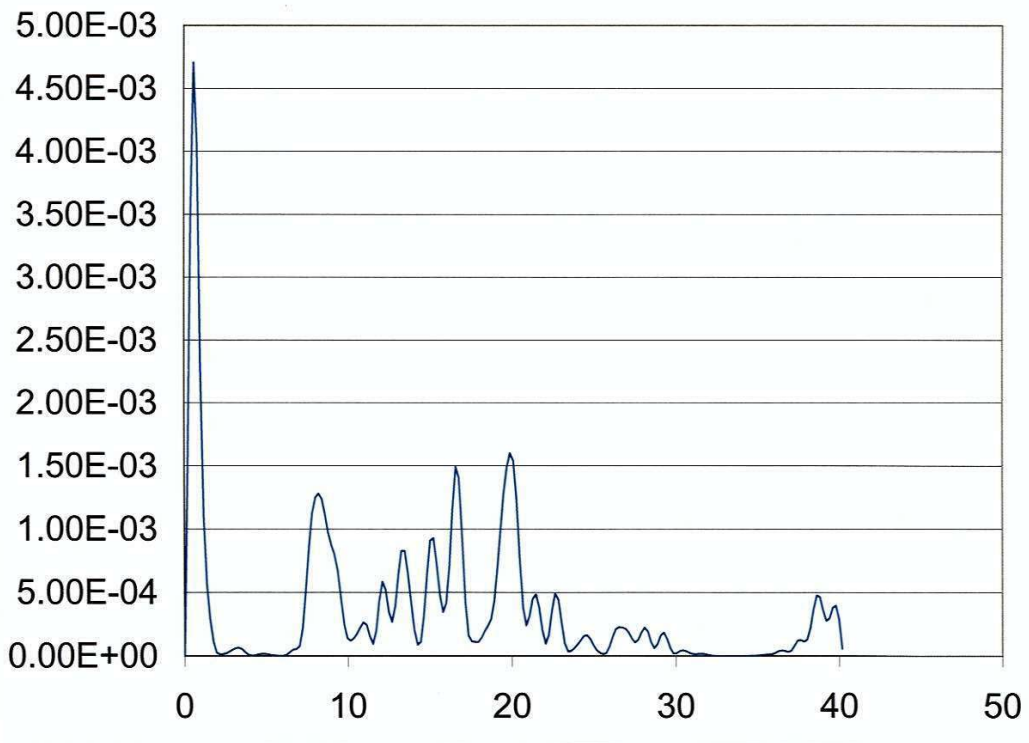


Fig. 45 - Espectro de potência das acelerações segundo Y; dt=.01s. n=3. L=5km.  
Escala diferente.

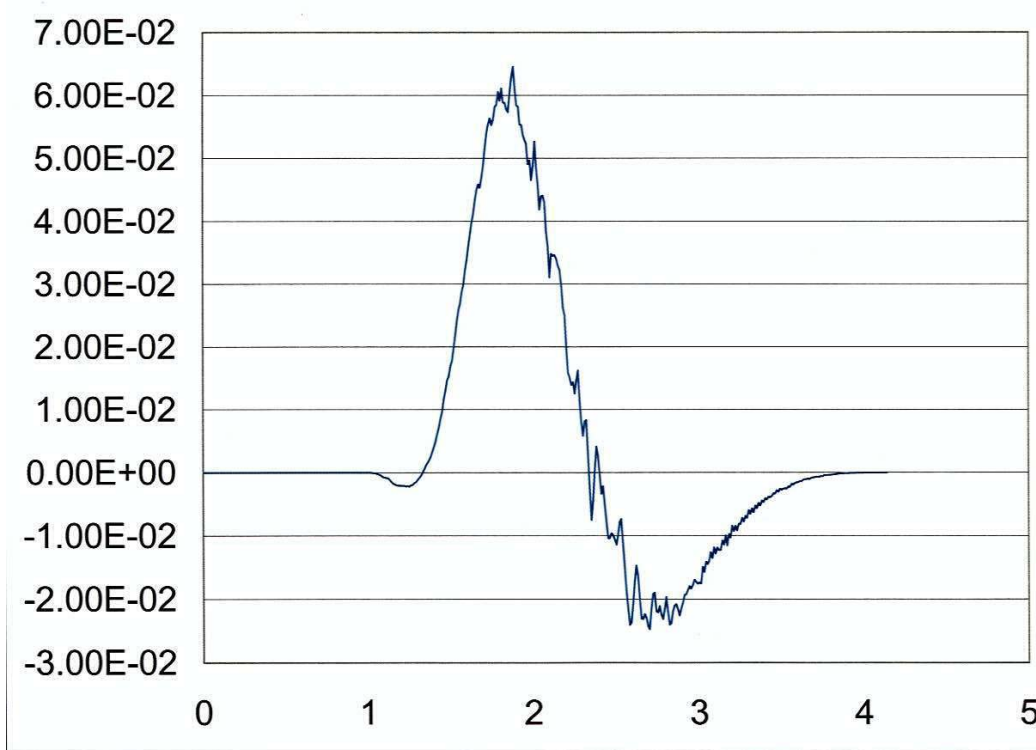


Fig. 46 – Velocigrama segundo Y;  $dt=.01s$ .  $n=3$ .  $L=5km$ .

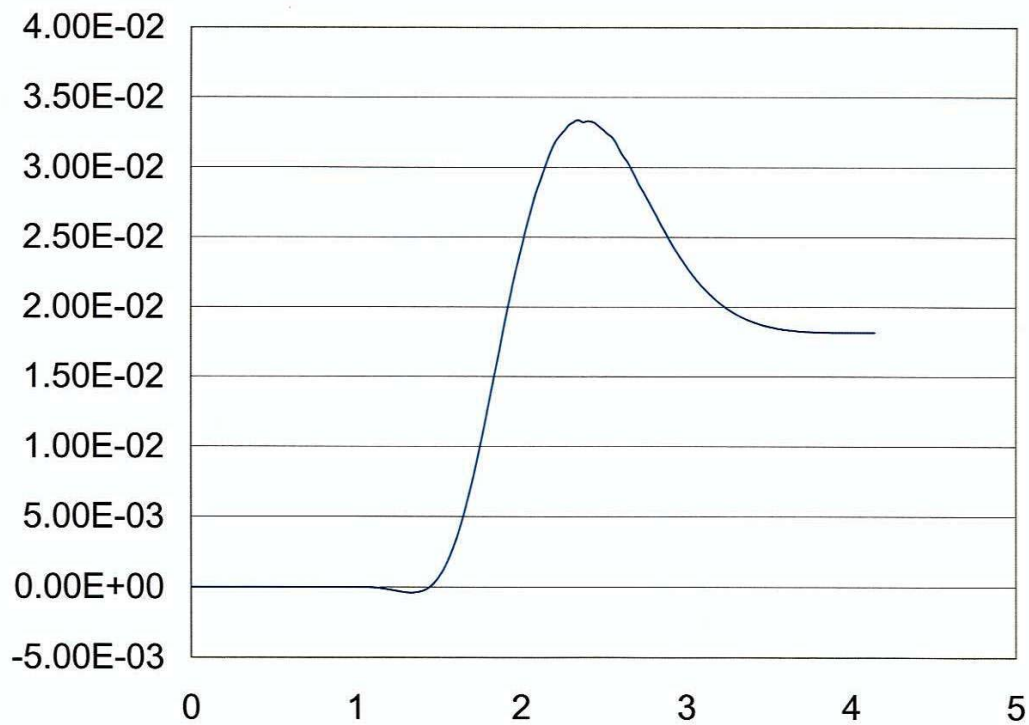


Fig. 47 – Deslocamento segundo Y;  $dt=.01s$ .  $n=3$ .  $L=5km$



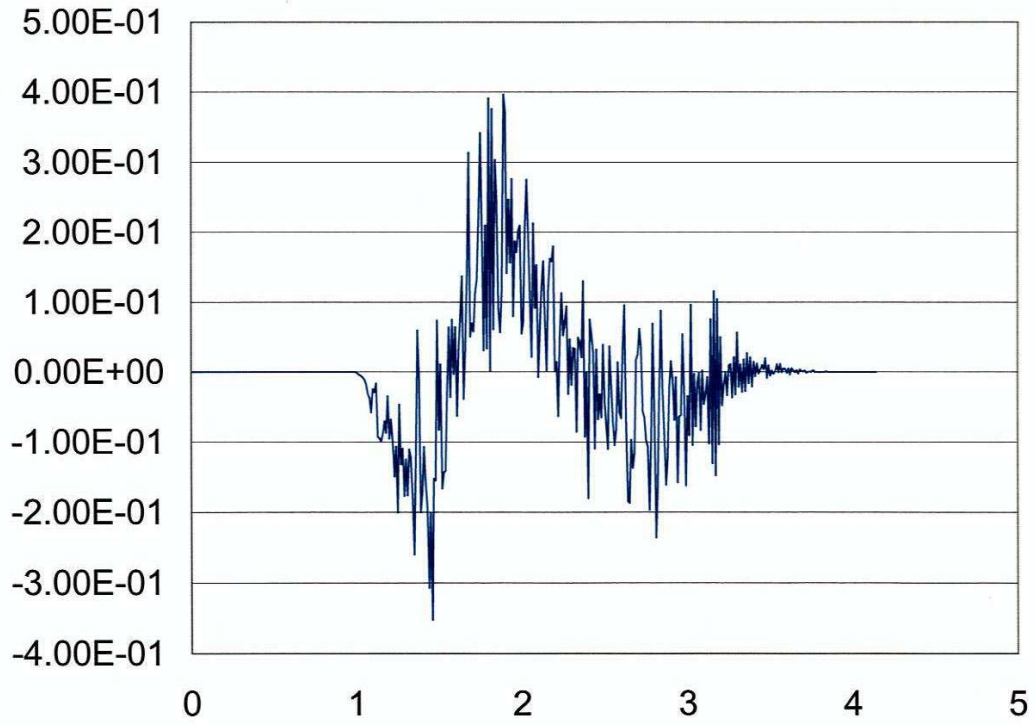


Fig. 48 - Acelerograma segundo X; dt=.01s. n=3. L=5km.

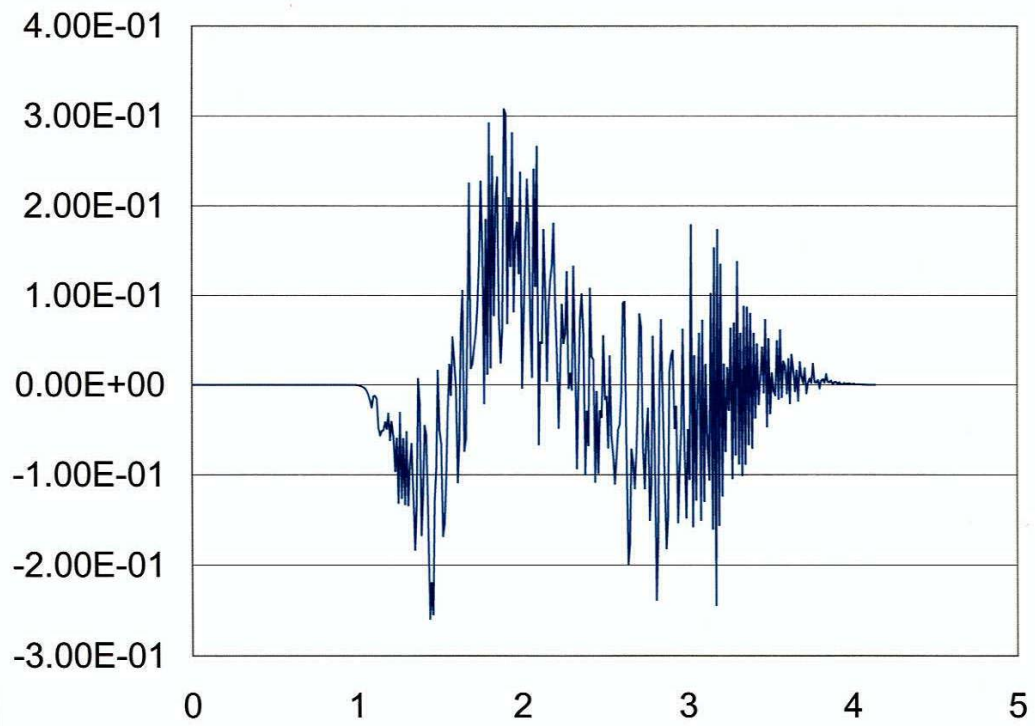


Fig. 49 - Acelerograma segundo Z; dt=.01s. n=3. L=5km.

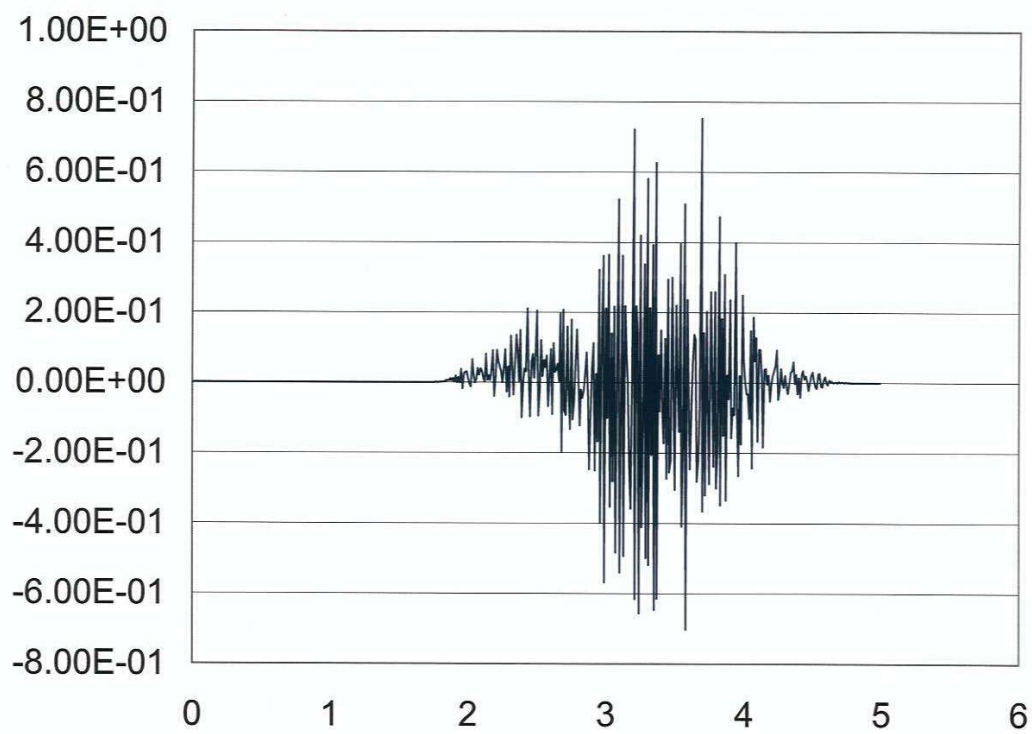


Fig. 50 – Acelerograma segundo Y;  $dt=.01s$ .  $n=0$ .  $L=10km$ .

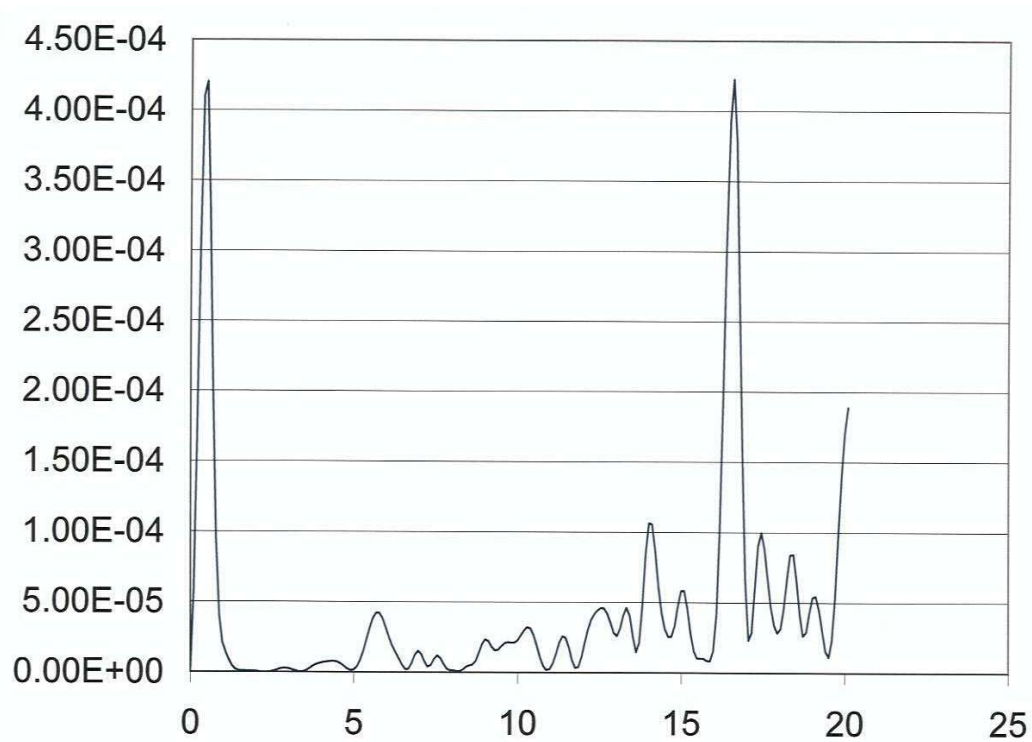


Fig. 51 – Espectro de potência das acelerações segundo Y;  $dt=.01s$ .  $n=0$ .  $L=10km$ .



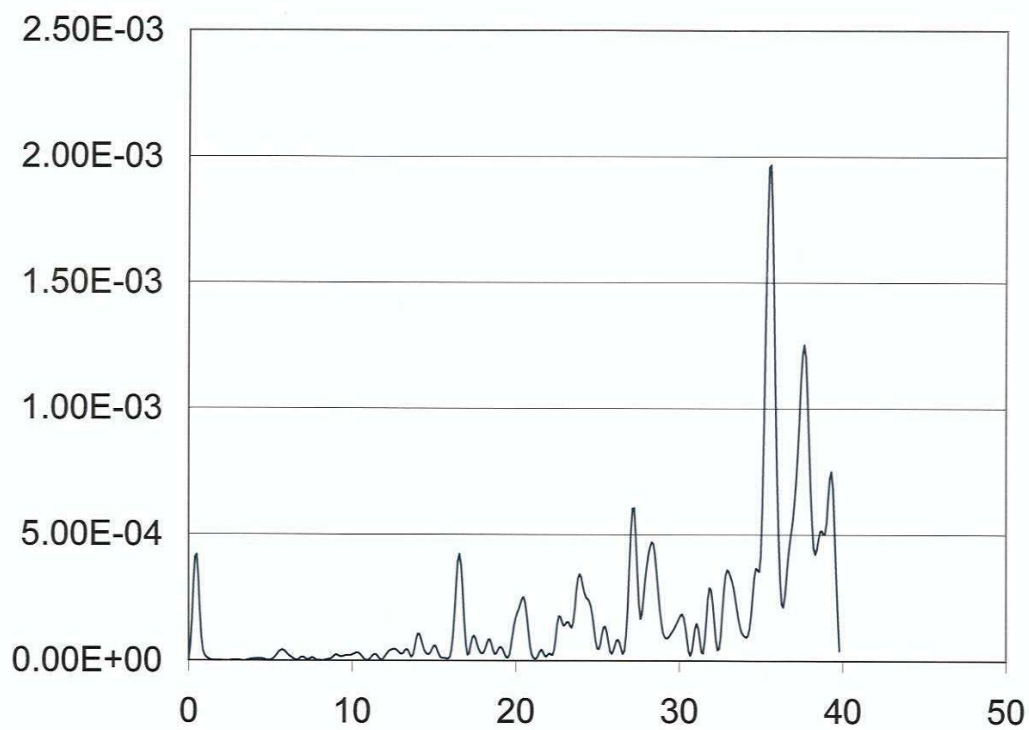


Fig. 52 – Espectro de potência das acelerações segundo Y;  $dt=.01s$ .  $n=0$ .  $L=10km$ . Escala diferente.

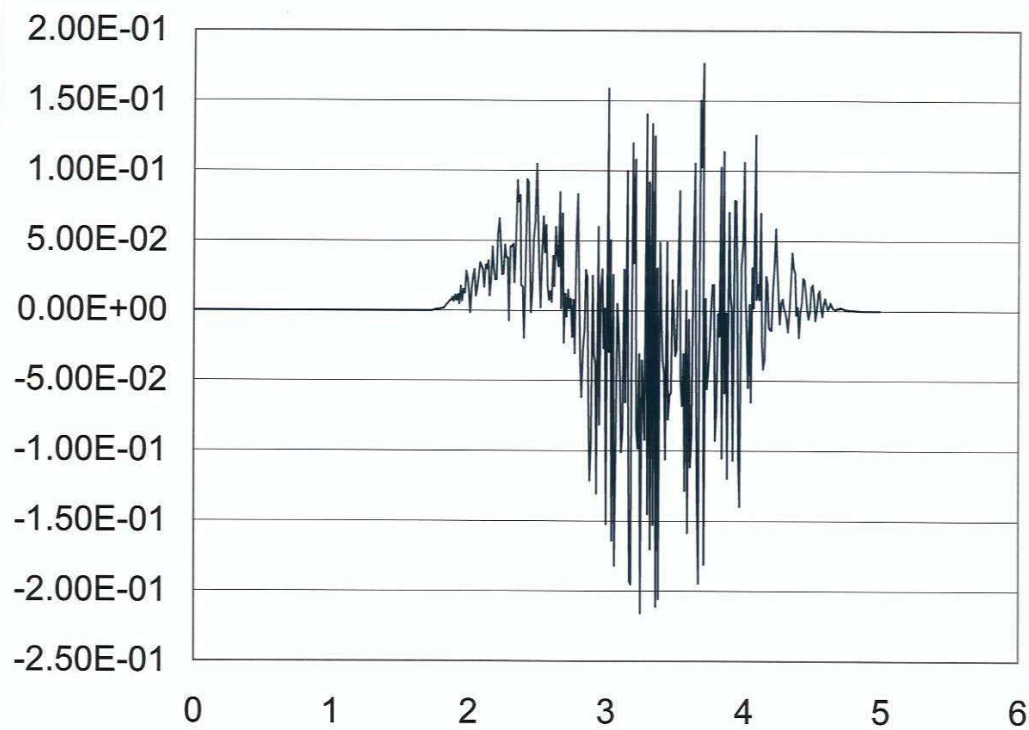


Fig. 53 - Acelerograma segundo Y;  $dt=.01s$ .  $n=3$ .  $L=10km$ .

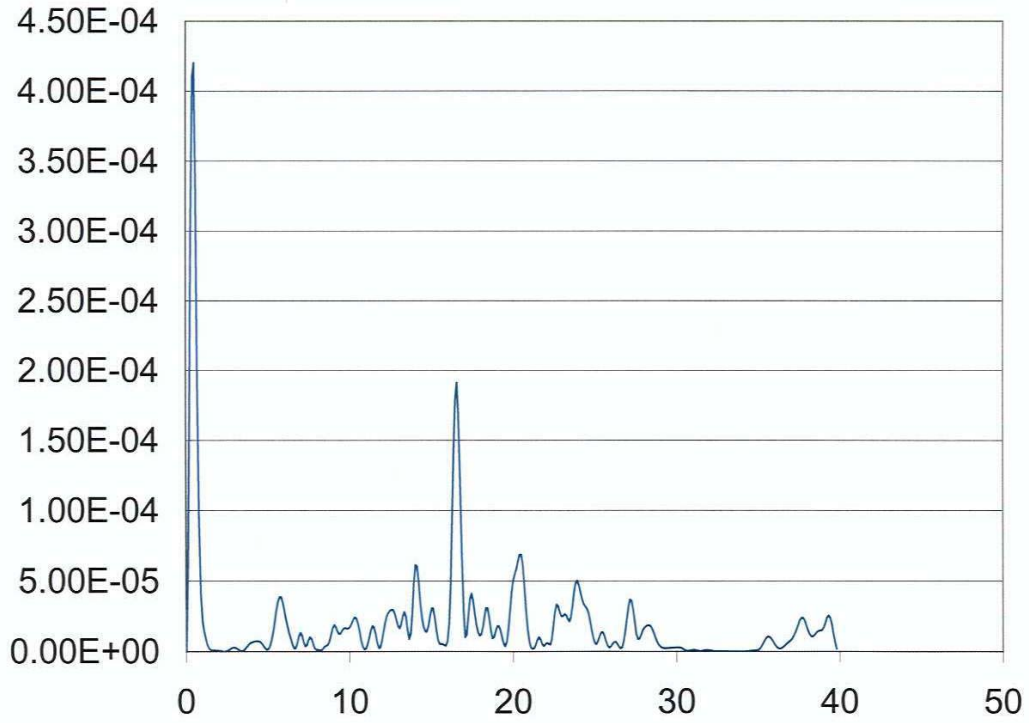


Fig. 54 - Espectro de potência das acelerações segundo Y; dt=.01s. n=3. L=10km.

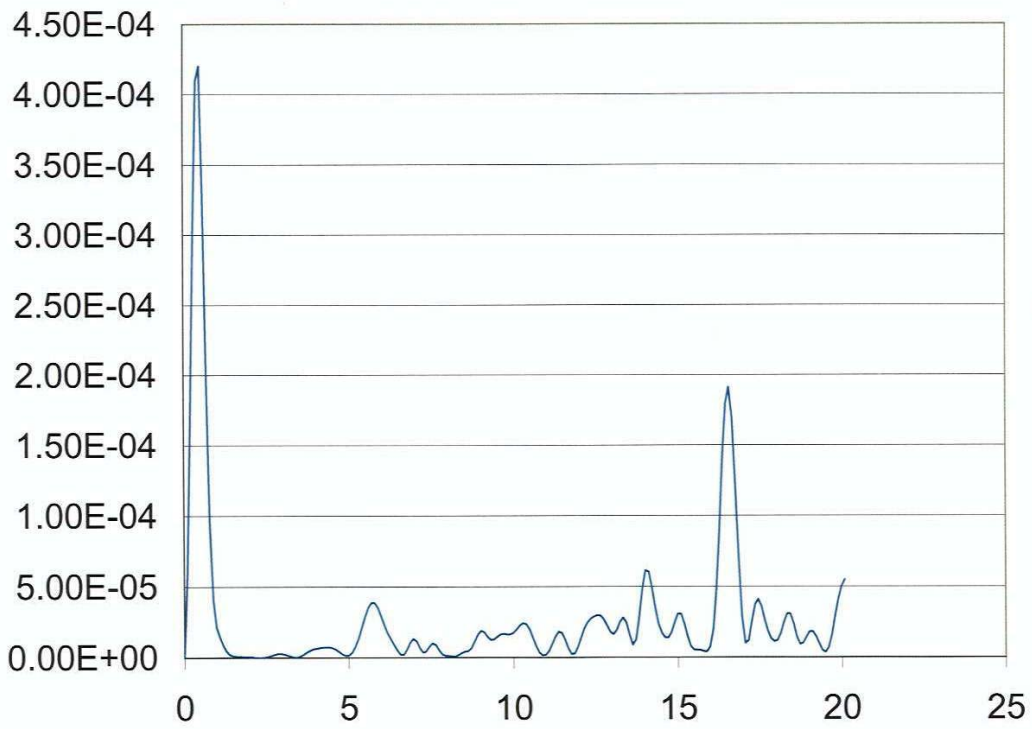


Fig. 55 - Espectro de potência das acelerações segundo Y; dt=.01s. n=3. L=10km. Escala diferente.

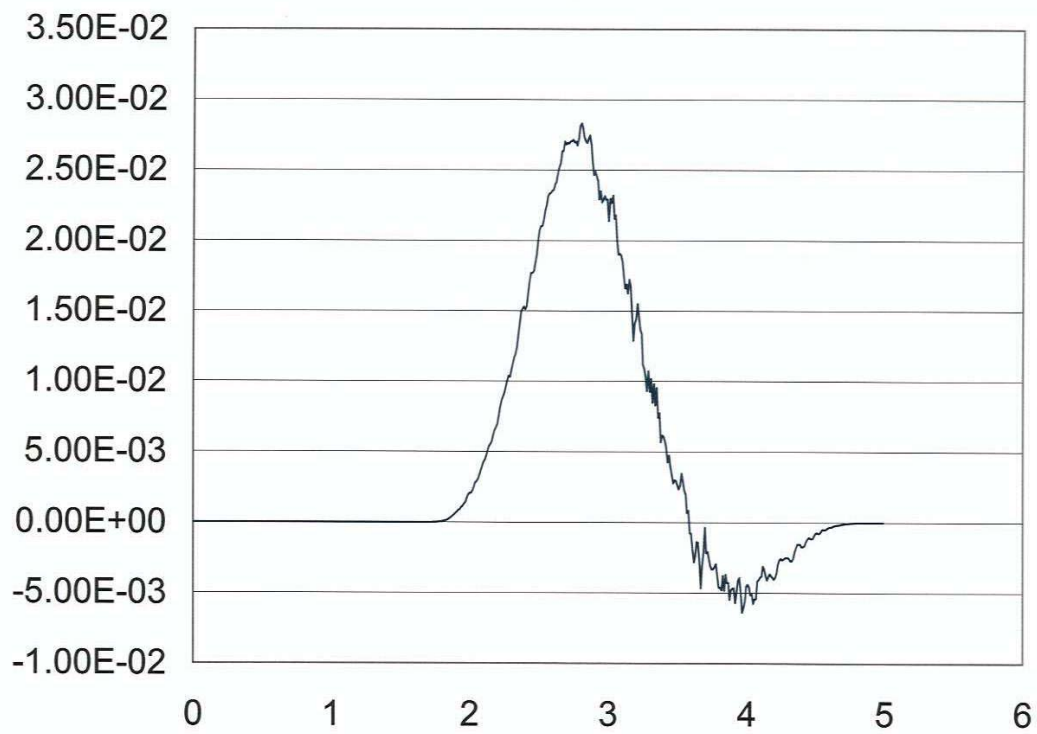


Fig. 56 – Velocigrama segundo Y;  $dt=.01s$ .  $n=3$ .  $L=10km$ .

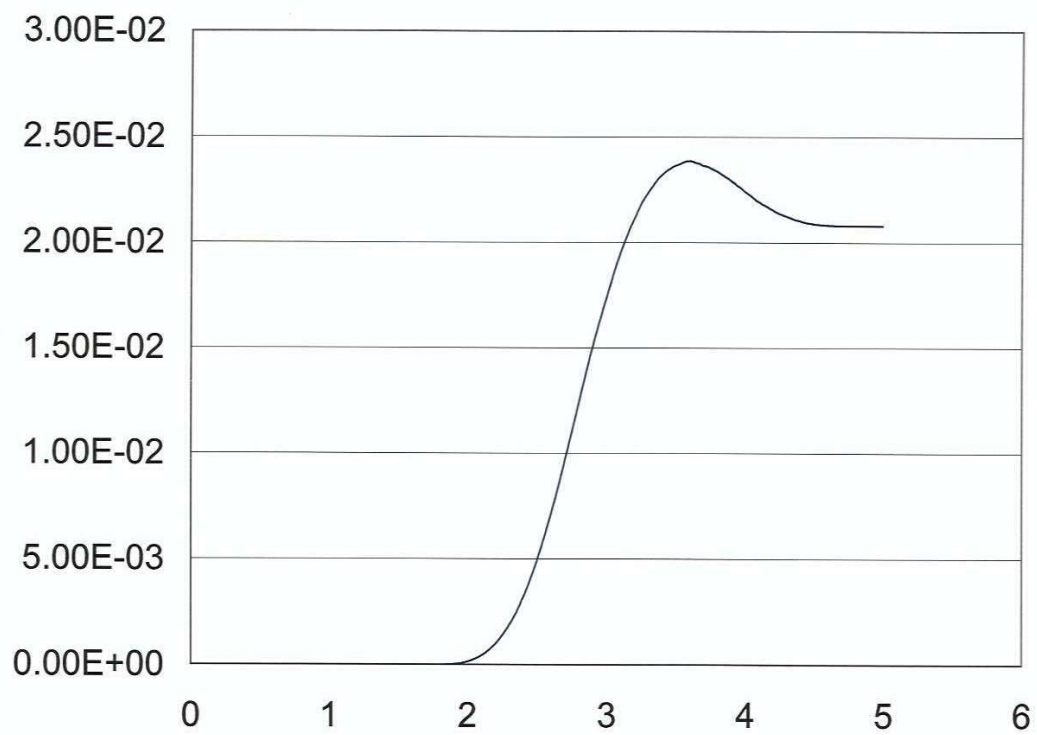


Fig. 57 – Deslocamento segundo Y;  $dt=.01s$ .  $n=3$ .  $L=10km$

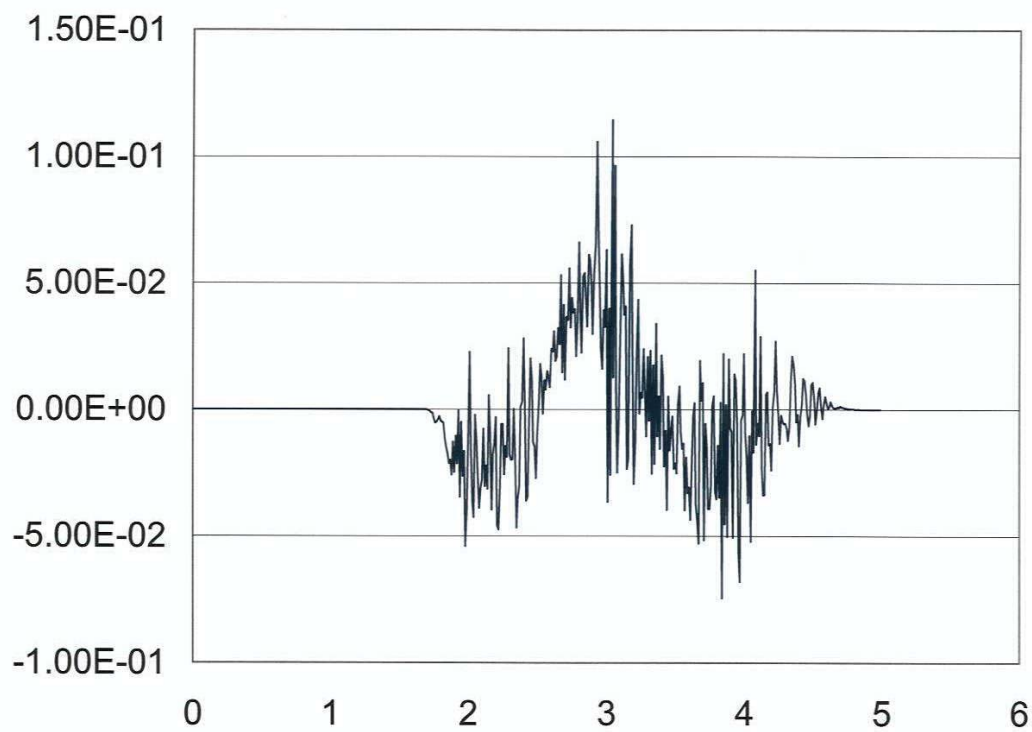


Fig. 58 - Acelerograma segundo X; dt=.01s. n=3. L=10km.

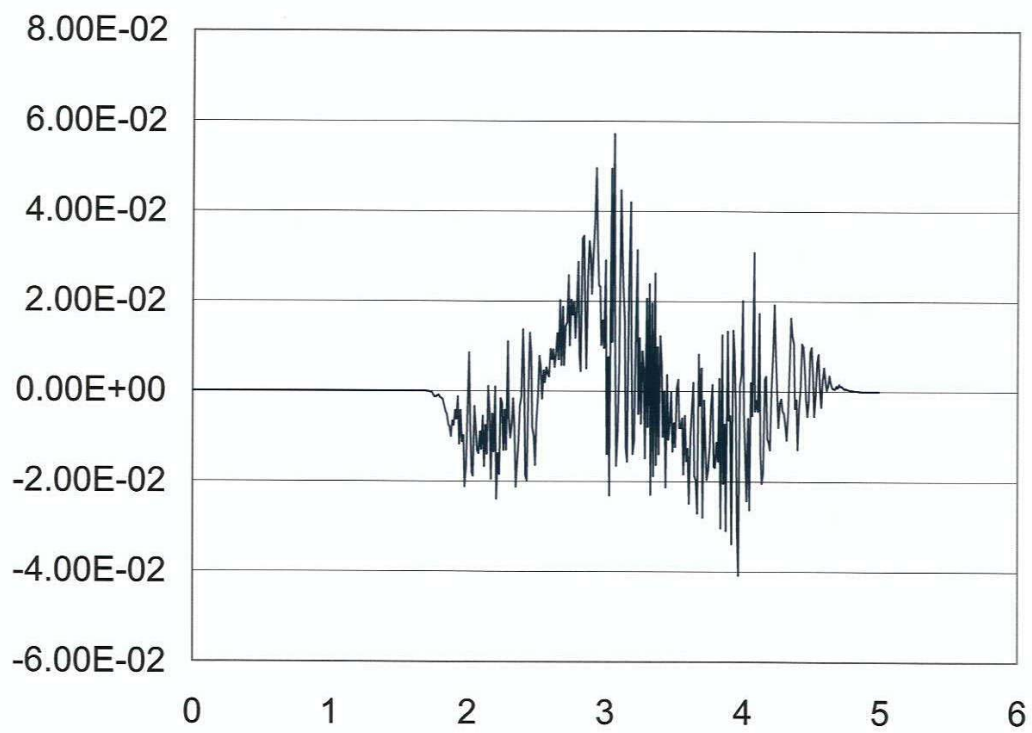


Fig. 59 - Acelerograma segundo Z; dt=.01s. n=3. L=10km.

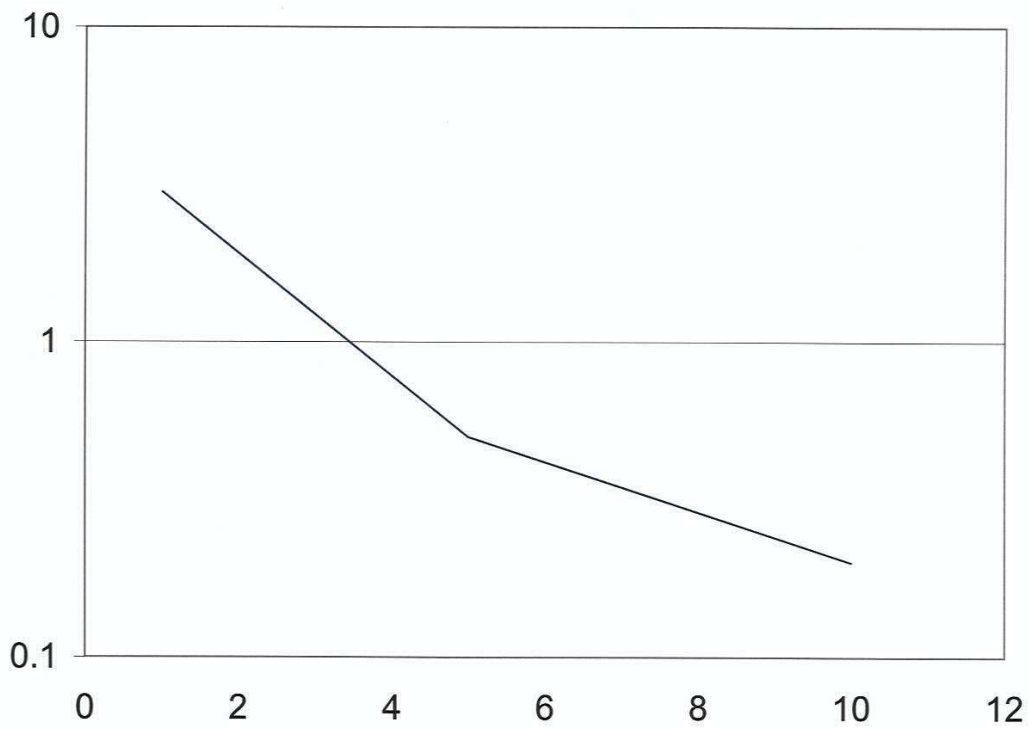


Fig. 60 – Atenuação da aceleração de pico em  $m/s^2$  com a distância epicentral em Km.

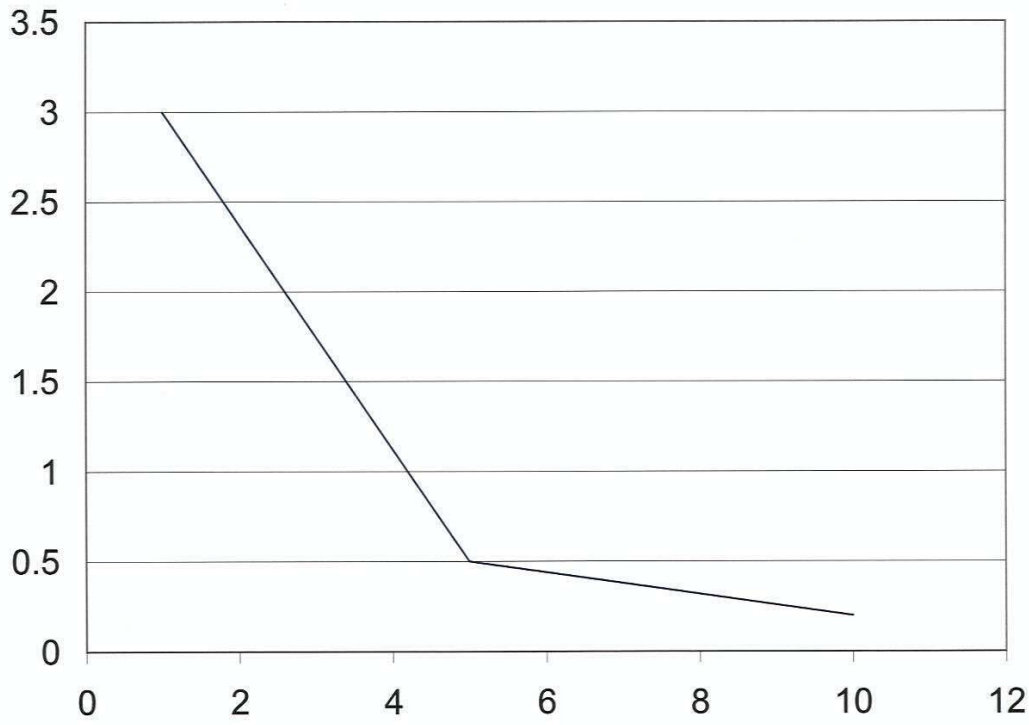


Fig. 61 – Atenuação da aceleração de pico em  $m/s^2$  com a distância epicentral em Km. Escala diferente.

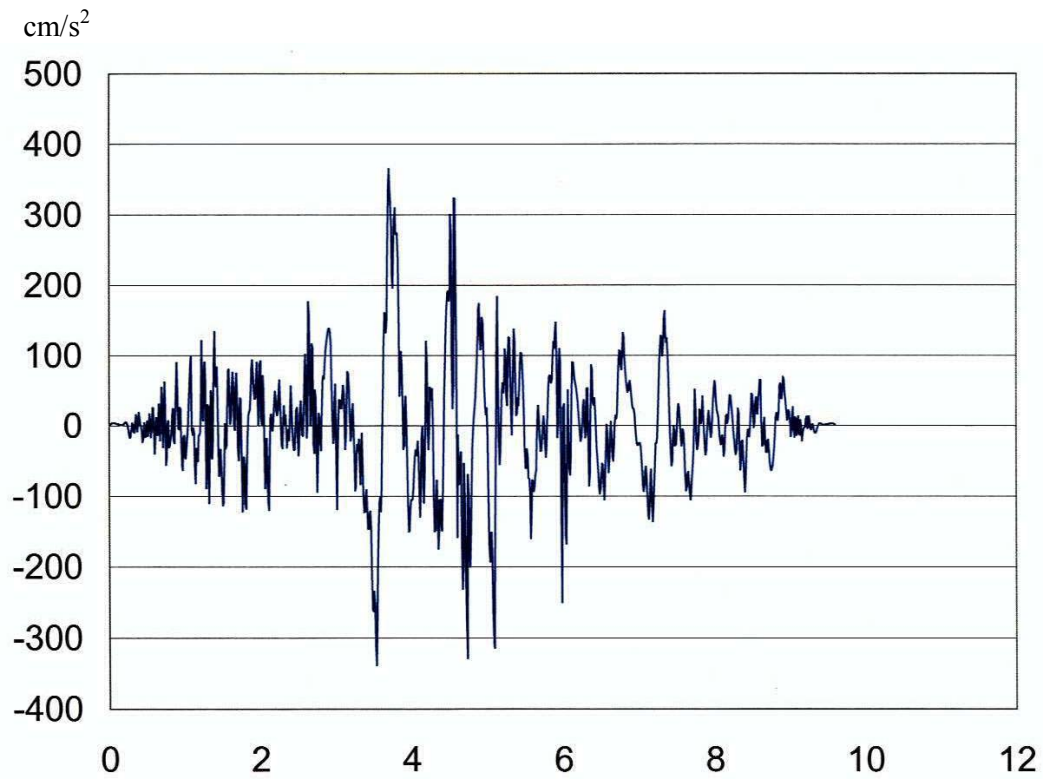


Fig. 62 – Sismo do Faial componente N-S. M=5.9 R=15km

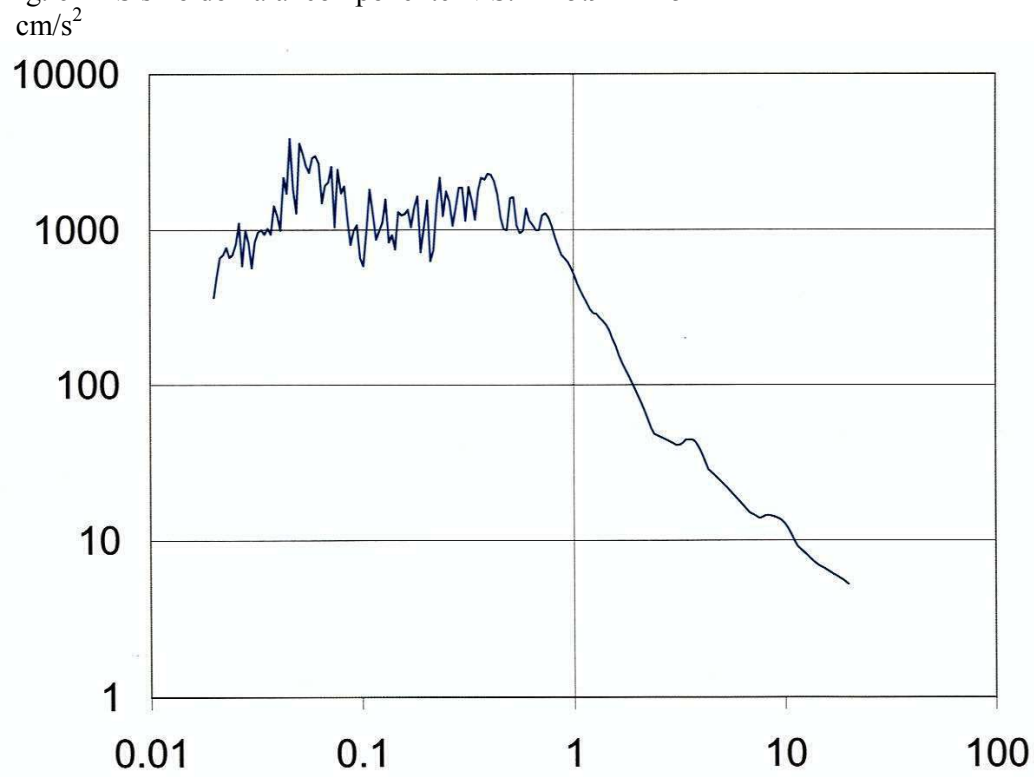


Fig. 63 – Espectro de resposta das acelerações com  $\tau = 0$ .

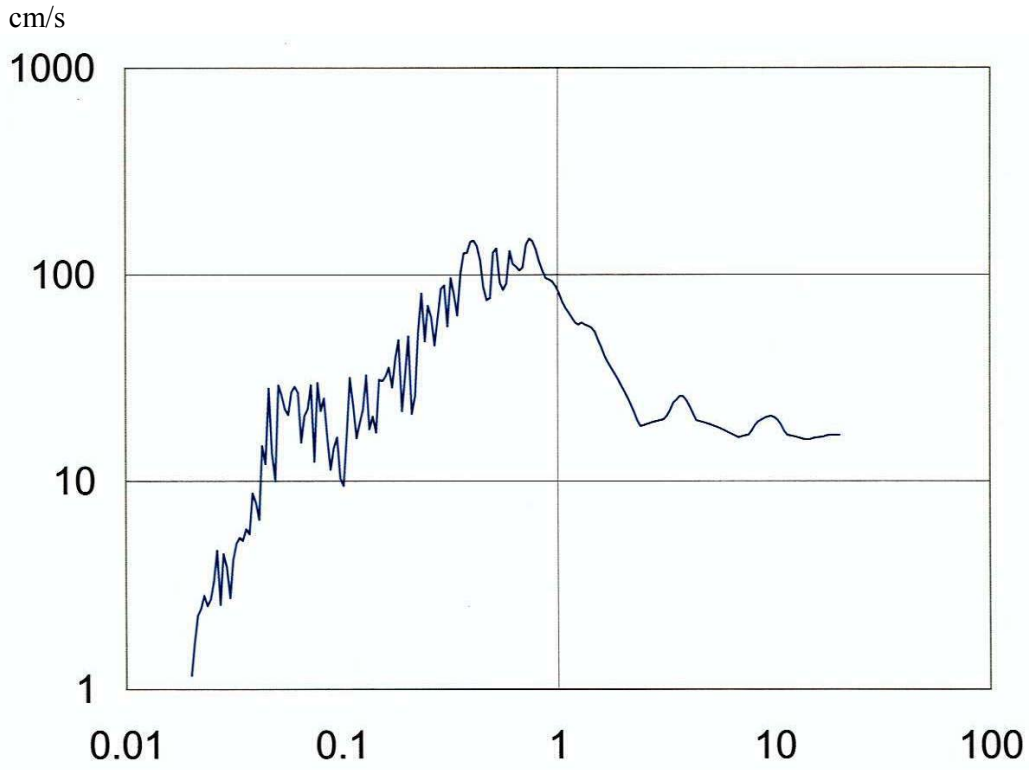


Fig. 64 – Espectro de resposta das velocidades com  $\tau = 0$ .

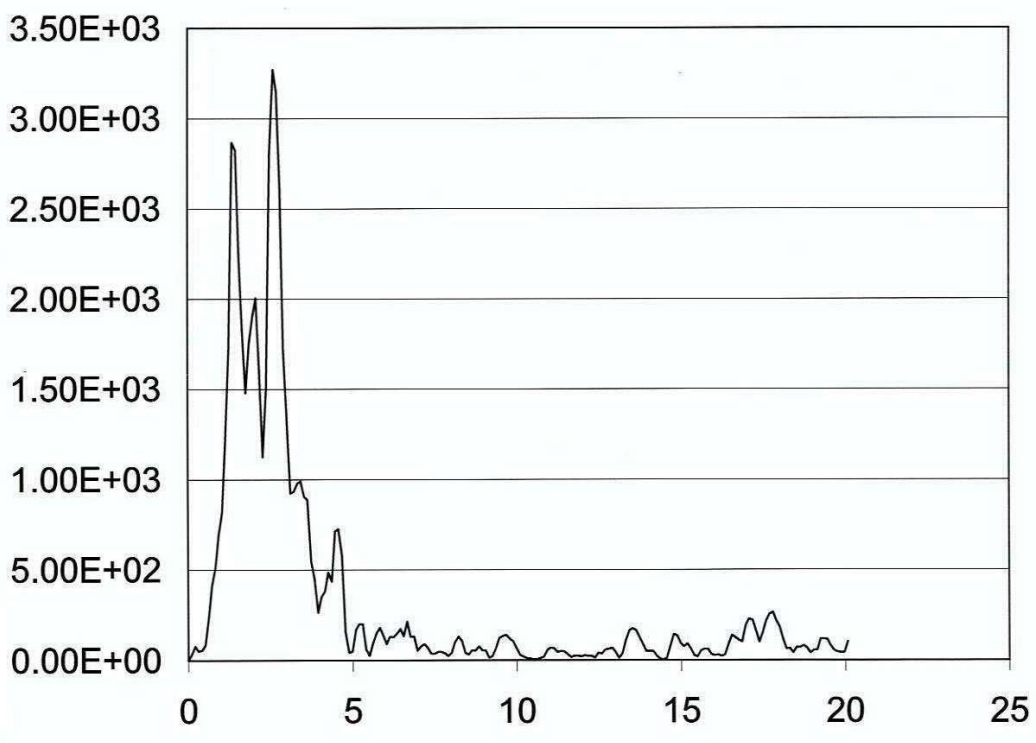


Fig. 65 – Espectro de potência das acelerações N-S do sismo do Faial.

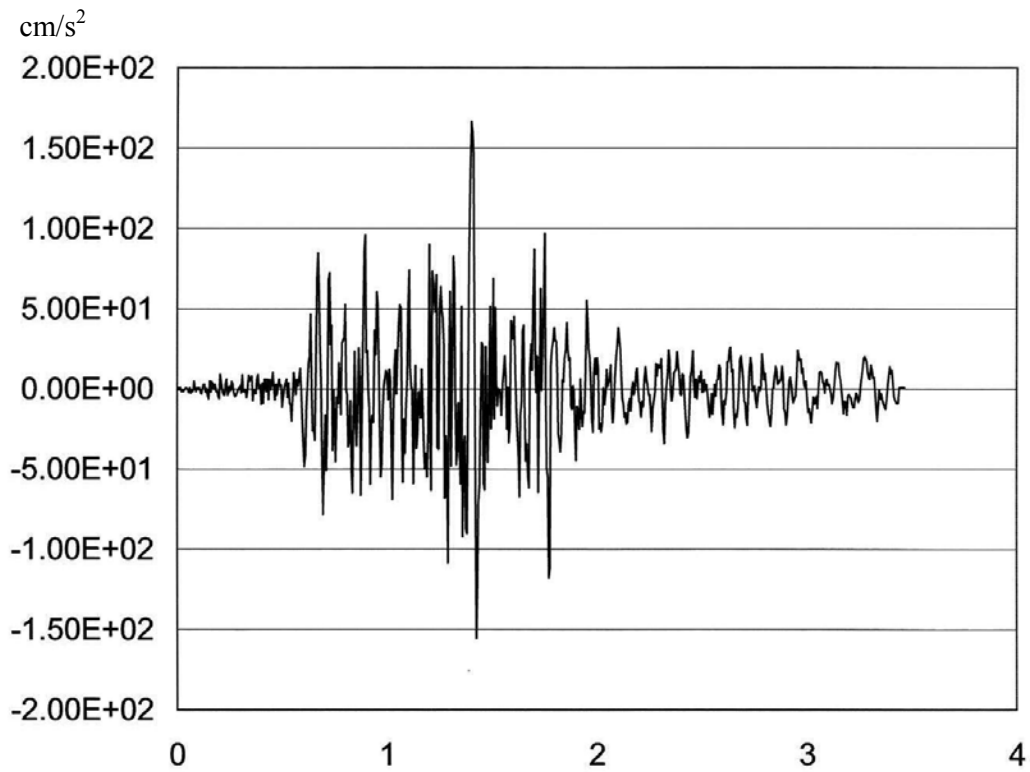


Fig. 66 – Sismo do Hawai de 2006/10/15.  $M=6.7$   $R=17\text{km}$

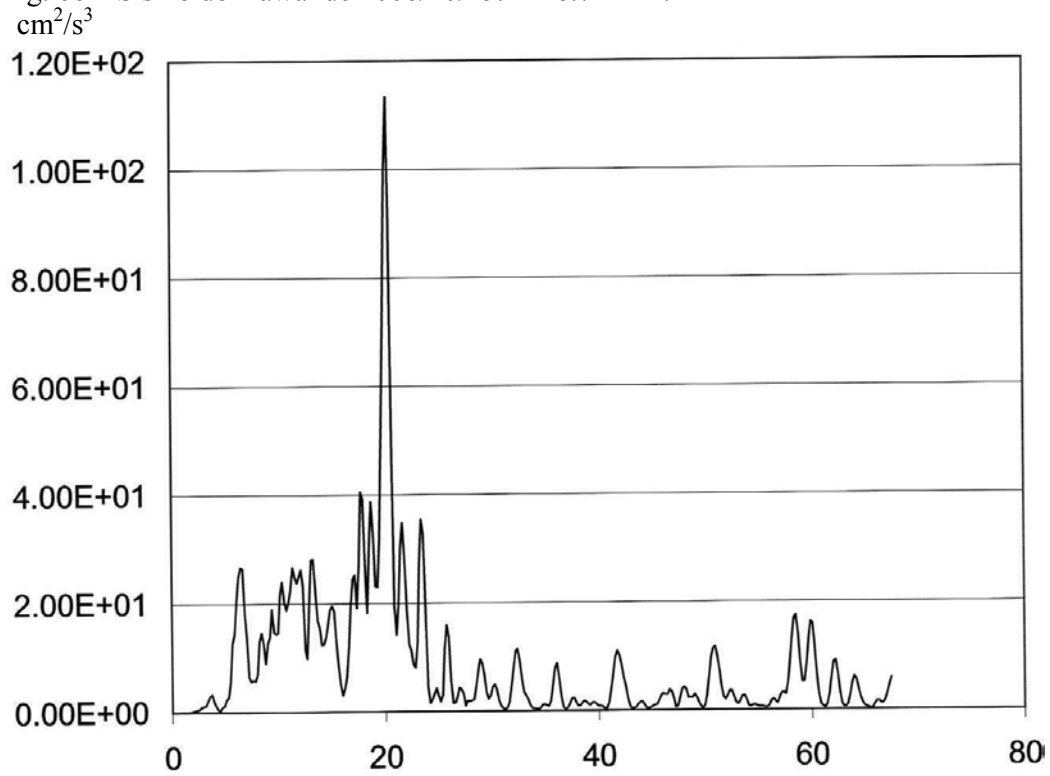



Fig. 67 – Espectro de potência das acelerações do sismo do Hawai 2006/10/15.



**VISTOS**

O Chefe do Núcleo de Modelação  
Matemática e Física



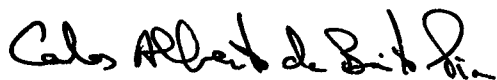
José Vieira de Lemos  
Engenheiro Civil  
Investigador Coordenador

**AUTORIAS**



Romano Jorge Calhau Câmara  
Engenheiro Civil  
Investigador Coordenador

O Director do Departamento de  
Barragens de Betão



Carlos Alberto de Brito Pina  
Engenheiro Civil  
Investigador Coordenador

