

# **Comparação de fontes sísmicas através de ensaios de refração sísmica e multichannel analysis of surface waves (MASW)**

**S. Neves<sup>1,\*</sup>, J. Borges<sup>1</sup>, B. Caldeira<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Centro de Geofísica de Évora e Departamento de Física da Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000 - Évora. \* [sneves@uevora.pt](mailto:sneves@uevora.pt).

## Resumo

São comparados os resultados obtidos através dos ensaios de refração sísmica e MASW (Multichannel analysis of surface waves) para duas fontes sísmicas diferentes, por forma avaliar a profundidade máxima de investigação através do ensaio MASW. De modo a determinar o modelo de velocidades das ondas S foi necessário obter um modelo inicial das ondas P, o qual foi obtido a partir do método de refração sísmica. As fontes sísmicas utilizadas consistiram no tradicional martelo e na fonte sísmica AWD (*Accelerated weight drop*). Para ambas as fontes sísmicas foram testados alguns parâmetros de aquisição e registo, tais como, a utilização de *stacking* e de ganho automático. Verificou-se que a utilização da fonte sísmica AWD permite atingir maior profundidade de investigação do que com o martelo.

**Palavras-chave:** Ensaio sísmicos, Refração, MASW, Geofísica.

Abstract:

The results obtained from the seismic refraction and multichannel analysis of surface waves (MASW) surveys are compared for two seismic sources in order to assess the depth to which these surveys can be achieved. The seismic sources used were the sledge hammer and AWD (Accelerated weight drop). For both seismic sources we have changed some acquisition parameters, such as the use of stacking and automatic gain. It was possible verify that AWD seismic source achieved more depth than the sledge hammer.

**Keywords:** Seismic Survey's, Refraction, MASW, Geophysics.

## Introdução

Os ensaios sísmicos de sub-superfície de rápida execução, como a refração sísmica permitem inferir, com custos mais reduzidos, a variabilidade litológica local, envolvendo a caracterização de um maior volume de solo. No entanto, estes ensaios recorrem normalmente à aquisição de ondas P.

A utilização de métodos sísmicos de sub-superfície, que recorrem à aquisição e processamento de ondas superficiais, como meio para obter a velocidade das ondas S ( $V_s$ ), tem vindo a aumentar desde a década de 80 do passado século, após a introdução do ensaio SASW (*Spectral analysis of surface waves*) desenvolvido por Nazarin & Stokoe (1984). No decorrer da investigação do SASW, surgiu posteriormente o método MASW (*Multichannel analysis of surface waves*) desenvolvido por Park *et al.* (1999) e

Xia *et al.* (1999), que ao contrário do SASW, utiliza várias estações sismográficas/geofones em *array*. Ambos os métodos recorrem a duas ou mais estações sismográficas/geofones, e são expeditos, permitindo obter resultados em que a relação custo-benefício é bastante apelativa, daí que têm vindo a ser utilizados em variadas aplicações, tais como, na caracterização geotécnica ou na avaliação da perigosidade/risco sísmico. Com este novo método é possível ultrapassar grande parte das desvantagens da refração sísmica, quer de ondas P quer de ondas S, utilizando praticamente o mesmo equipamento.

### **Refração sísmica**

O método de refração sísmica baseia-se na geração de ondas sísmicas P que se propagam no terreno e se refratam nas interfaces dos meios com velocidades de propagação crescentes em profundidade, marcadas por características elásticas suficientemente distintas.

Ao introduzir um impulso no solo são obtidos os tempos de percurso das ondas sísmicas através dos geofones, que se encontram dispostos ao longo do terreno em *array* (em linha e espaçamento constante). Ao ajustar os tempos de percurso a segmentos de reta, utilizando por exemplo o método dos mínimos quadrados, são determinados os declives da reta, sendo que o inverso do declive é a velocidade de propagação da onda sísmica. Cada segmento de reta com declive diferente, representa diferentes camadas com diferente velocidade de propagação de onda (Fig. 1). A utilização de vários impulsos ao longo do *array* permite criar um modelo de velocidades 1.5D (Redpath, 1973).

### **MASW – Método das ondas superficiais**

O método MASW baseia-se no estudo do fenómeno da dispersão das ondas superficiais em meio verticalmente heterogéneo, isto é, diferentes frequências propagam-se com velocidades diferentes, designadas por velocidade de fase (Fig. 2). Estes parâmetros são utilizados como base para construir uma curva, que relaciona a velocidade de fase com a frequência, designada por curva de dispersão.

O objetivo principal do método é determinar a distribuição em profundidade da velocidade de propagação das ondas S. As ondas superficiais adquiridas são normalmente as ondas de Rayleigh, (ondas presentes unicamente na componente

vertical do registo sísmico) que correspondem a cerca de dois terços da energia produzida por uma fonte pontual (Richart *et al.*, 1970). São conhecidas diversas metodologias, em que se faz variar, por exemplo, o número, o tipo de geofones utilizados, a geometria do *array* e o processo para obter a curva de dispersão e/ou o algoritmo de inversão (Nazarian & Stokoe, 1984; Stokoe *et al.*, 1988; Park *et al.*, 1998-b, 1999; Xia *et al.*, 1999, 2000). Após o processamento, são criados os modelos de velocidades das ondas S 1D. Segundo Xia *et al.* (2000) é possível determinar, através de uma determinada geometria em *array*, o modelo de velocidades das ondas S 1.5D tendo em conta vários modelos de velocidades 1D.

### **Descrição geral dos ensaios**

Os ensaios foram realizados no *campus* da Mitra, espaço que integra a Universidade de Évora, com as seguintes coordenadas:  $N38^{\circ} 31.922$ ,  $W8^{\circ} 00.723$  (Fig. 3). A Fig. 4 apresenta a geologia da região onde se insere o local de realização dos ensaios. Os litótipos representados cartograficamente no referido espaço, correspondem a rochas ígneas, nomeadamente granitos e granodioritos do Carbónico (Pereira *et al.*, 2013).

O equipamento utilizado foi um sismógrafo (P.A.S.I. 16SG24), 24 geofones verticais (frequência própria de 4,5 Hz, para MASW, e 10 Hz, para a refração sísmica), martelo de 9,0 Kg e fonte sísmica AWD (Fig.5). Os perfis de MASW e a refração sísmica têm origem no Ponto P. O espaçamento entre geofones é de 0,50 m, e no caso do MASW, o *trigger* foi colocado a 2,00 m do primeiro geofone (distância que permite o desenvolvimento de ondas superficiais logo a partir do primeiro geofone). Os parâmetros de registo utilizados na refração sísmica foram intervalo de amostragem de 0,125 ms e janela temporal de registo de 250 ms. Para o MASW, o intervalo de amostragem adotado foi de 0,250 ms e a janela temporal de registo de 1024 ms (Park *et al.*, 2002). O ganho (definido automaticamente a partir de testes com a fonte) e o *stacking* (soma de registos redundantes para aumentar a razão sinal ruído) foram definidos de acordo com a Tabela 1, sendo adotado *stacking* com 3 impulsos. O plano de trabalhos para ambos os ensaios é apresentado na Tabela 1, onde o símbolo E1 representa o número do ensaio, neste caso o primeiro.

## Resultados

O software utilizado para processar os dados da refração sísmica foi o *WinSism V.14*, e o *Surfseis V2.05* para o MASW. Após o processamento dos dados da refração, foram determinadas as velocidades de propagação das ondas P para a maioria dos ensaios, exceto o ensaio E7, devido a problemas técnicos nos ficheiros de aquisição. Verificou-se que o local em estudo apresenta duas camadas de solo com características geológicas distintas (velocidades  $V_p$  distintas) e que a interface se situa aproximadamente a 1,00 m abaixo da superfície do solo. As Figs. 6 e 7 apresentam velocidades de propagação das ondas P nas camadas 1 e 2, respetivamente, para os diversos ensaios realizados, e tendo em consideração a posição onde foram realizados os tiros.

Comparando as velocidades apresentadas nas Figs. 6 e 7 com os valores médios e os respectivos desvios padrões (Tabela 2), verificou-se que o ensaio (E6) é o mais próximo do valor médio. A Tabela 2 apresenta a velocidade média e o desvio padrão das velocidades das ondas sísmicas P dos vários ensaios. Assim, o ensaio (E6) foi adotado como modelo inicial de velocidades para o processamento do MASW (Fig.8).

Para realizar a inversão do perfil de velocidades S ( $V_s$ ) foi necessário adotar o modelo inicial de velocidades da refração sísmica (modelo *a priori*), onde se definiu 2 camadas em que a primeira tem espessura de 1 metro e a segunda camada corresponde ao meio semi-infinito. Neste processo foi necessário estimar inicialmente a velocidade das ondas S ( $V_{s, inicial}$ ) através da seguinte condição:  $V_{s, inicial} \approx V_{p, Re\ fração} \cdot \sqrt{(1 - 2\mu)/(2(1 - \mu))}$ , para além de ter em consideração a proposta de Xia *et al.* (1999). Neste modelo, o coeficiente de poisson adotado foi  $\mu=0.3$  (Shearer, 2009).

Após a inversão dos modelos iniciais de velocidades, foram determinados e modeladas as velocidades de propagação das ondas S 1D. Obtidos todos os modelos de ondas S 1D, foram determinados os perfis 1.5D das ondas S segundo os procedimentos e cálculos de Xia *et al.* (2000). As Figs. 9 e 10 apresentam os resultados do MASW em posição idêntica às dos tiros da refração sísmica. Tendo-se verificado que não ocorreram significativas variações de velocidades nas ondas S em todos os ensaios, constatou-se que as fontes sísmicas não apresentaram diferenças expressivas na determinação das velocidades das ondas S. A Tabela 3 apresenta a média e o desvio padrão da velocidade das ondas sísmicas S para cada tiro e camada de solo. A Fig. 11 mostra o modelo de velocidades das ondas S relativo ao ensaio E6. Note que, não existe

variabilidade lateral de velocidade das ondas S e que a oscilação de velocidade apresentada na interface das camadas deve-se ao algoritmo de interpolação (*Krigging*). No processamento dos dados dos ensaios MASW verificou-se que a fonte sísmica AWD obteve uma frequência mínima, aproximadamente de 17 Hz (Fig.12), enquanto que para o tradicional martelo alcançou-se uma frequência mínima, aproximadamente de 19 Hz (Fig.13). A partir dos resultados apresentados, concluiu-se que a fonte sísmica AWD é a mais indicada para realizar o ensaio MASW, dado que atinge maiores profundidades de investigação.

### **Conclusão**

Os ensaios da refração sísmica e MASW tiveram como objetivo comparar os resultados obtidos através da fonte sísmica AWD e o martelo, de forma a avaliar a profundidade máxima atingida pelo ensaio MASW. Para tal utilizou-se, um modelo *a priori* no processo de inversão, obtido através do método da refração sísmica das ondas P.

Em relação aos ensaios de refração sísmica, verificou-se que não ocorreu divergência significativa nas velocidades de propagação das ondas P. No entanto, nos ensaios E5, E6 e E8, as velocidades de propagação das ondas P aumentaram ligeiramente na camada 1 para os tiros 3 e 4.

Relativamente ao MASW, constatou-se que não ocorreram elevadas variações de velocidades das ondas S em todos os ensaios, sendo possível concluir que o martelo e a fonte AWD não divergem muito no processo de determinação da velocidade. Contudo, a fonte sísmica AWD permitiu obter frequências mais baixas do que o martelo e através deste indicador aferiu-se que a fonte sísmica AWD atinge maiores profundidades de prospeção que o martelo.

Em suma, os resultados obtidos são bastante encorajadores para que o método MASW em conjunto com a fonte AWD seja aplicado a prospeções sub-superficiais profundas, avaliando assim, mais em profundidade, o comportamento do solo a ações dinâmicas.

Para avaliar o desempenho do MASW com a fonte sísmica AWD é necessário realizar outros ensaios, porém em litologias distintas, caracterizadas por idades diferentes.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o financiamento concedido através do projeto “NEFITAG – Movimentos Sísmicos intensos e efeitos locais na Região do vale Inferior do Tejo” - “PTDC/CTE-GIX/102245/2008” e do projeto ATESTA (Active Tectonics and Earthquake Scenarios for the Lower Tagus Valley – PTDC/CTE-GIX/099540/2008 . Agradecem ainda aos colaboradores Rui Oliveira, João Casação e ao Óscar Lopez pela cooperação na aquisição dos dados no campo.

## **Bibliografia**

- Carvalhosa, A., Galopim de Carvalho, A. M., Matos Alves, C. A. & Pina, H. L. (1969) - *Carta Geológica de Portugal, Notícia Explicativa da Folha 40-A (Évora)* na escala 1:50 000. Serviços Geológicos de Portugal, 26.
- Nazarian, S. & Stokoe, II K. H. (1984) - In situ shear wave velocity from spectral analysis of surface waves. *Proc. 8th Conf. on Earthquake Engineering*, S. Francisco, Prentice Hall, 3: 31-38.
- Park, C. B., Xia, J. & Miura, H. (2002) - Optimum field parameters of an MASW survey. Expanded abstracts, *SEG-J*, Tokyo, 6.
- Park, C. B., Miller, R. D. & Xia, J. (1999) - Multichannel analysis of surfaces waves. *Geophysics*, 64(3): 800-808.
- Park, C. B., Xia, J. & Miller, R. D. (1998-b) - Imaging dispersion curves of surfaces waves on multichannel record. *68<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys.* Expanded Abstracts, 1377-1380.
- Pereira, M. F., Chichorro M., Moita, P., Silva, J. B. & Santos, J. F. (2013) – *Maciço de Évora. Geologia de Portugal*, Escolar Editora, 551-575.
- Redpath, B. B. (1973) - *Seismic Refraction Exploration for Engineering site investigations*. Explosive Excavation Research Laboratory Livermore, California, 51.
- Richart, F. E., Hall, J. R. & Woods, R. D. (1970) - *Vibration of soils and foundations*. Prentice-Hall, 414
- Shearer, P. M. (2009) - *Introduction to Seismology*, 2<sup>o</sup> Edition, Cambridge University Press, 30-33.

- Stokoe, K. H. Li, Nazarian, S., Rix, G. J., Sanchez-Salinero, I., Sheu, J-C. & Mok, Y-J. (1988) - In situ seismic testing of hard-to-sample soils by surface wave method. *Earthquake Eng. & Soil Dynamics II, Recent Advances in ground-motion evaluation*, ASCE, Park City, 264-278.
- Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B. & Ivanov, J. (2000) - Construction of 2d vertical shear-wave velocity field by the multichannel analysis of surface wave technique. *Proc. of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems. Arlington, Va., 1197-1206.*
- Xia, J., Park, C. B. & Miller, R. D. (1999) - Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 64(3): 691-700.

## Legendas das Figuras e Tabelas

### **Em português**

Figura 1 – Determinação das camadas de solo e respectivas velocidades de propagação.

Figura 2 – Propagação das ondas sísmicas.

Figura 3 – Localização dos ensaios.

Figura 4 – Mapa geológico com a representação do local dos ensaios no *campus* da Mitra (Pereira *et al.*, 2013).

Figura 5 – Martelo e fonte baseada na queda de um corpo acelerado por elásticos AWD “Accelerated weight drop”.

Figura 6 – Velocidades das ondas P na camada 1.

Figura 7 – Velocidades das ondas P na camada 2.

Figura 8 – Perfil de velocidades de propagação das ondas P, relativo ao ensaio E6 (m/s).

Figura 9 – Velocidades das ondas S na camada 1.

Figura 10 – Velocidades das ondas S na camada 2.

Figura 11 – Modelo de velocidades de propagação das ondas S, relativo ao ensaio E6 (m/s).

Figura 12 – Curva de dispersão do E1, tiro 1.

Figura 13 – Curva de dispersão do E5, tiro 1.

Tabela 1 – Resumo da tipologia dos ensaios realizados.

Tabela 2 - Análise estatística das velocidades das ondas sísmicas P.

Tabela 3 - Análise estatística das velocidades das ondas sísmicas S.

## **In English**

Figure 1 – Determination of soil layers and seismic waves' velocities.

Figure 2 – Propagation of seismic waves.

Figure 3 – Seismic survey's location.

Figure 4 – Geological map of survey field inside the Mitra *campus*(Pereira *et al.*, 2013).

Figure 5 – Sledge hammer and Accelerated weight drop seismic source.

Figure 6 – Velocity of seismic P waves, layer 1.

Figure 7 – Velocity of seismic P waves, layer 2.

Figure 8 – Velocity model of P waves, concerning the E6 survey (m/sec).

Figure 9 – Velocity of seismic S waves, layer 1.

Figure 10 – Velocity of seismic S waves, layer 2.

Figure 11 – Velocity model of S waves, concerning the E6 survey (m/sec).

Figure 12 – Dispersion curve of the E1 survey, shot 1.

Figure 13 – Dispersion curve of the E5 survey, shot 1.

Table 1 – Summary of the testing type.

Table 2 – Statistical analysis of seismic P waves' velocities.

Table 3 – Statistical analysis of seismic S waves' velocities.

Tabela 1 – Resumo da tipologia dos ensaios realizados.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
Martelo	x	x	x	x				
<i>AWD</i>					x	x	x	x
Sem stacking	x		x		x		x	
Com stacking		x		x		x		x
Sem ganho*	x	x			x	x		
Com ganho*			x	x			x	x

Tabela 2 - Análise estatística das velocidades das ondas sísmicas P.

	Tiro 2		Tiro 3		Tiro 4	
	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão
Vp, camada1 (m/s)	436.4	28.0	441.9	78.1	355.0	105.2
Vp, camada2 (m/s)	783.7	60.0	697.1	105.3	772.7	35.2

Tabela 3 - Análise estatística das velocidades das ondas sísmicas S.

	Tiro 2		Tiro 3		Tiro 4	
	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão
Vs, camada1 (m/s)	100.0	0	100.0	0	92.9	18.9
Vs, camada2 (m/s)	600.0	0	584.3	41.6	585.7	76.8

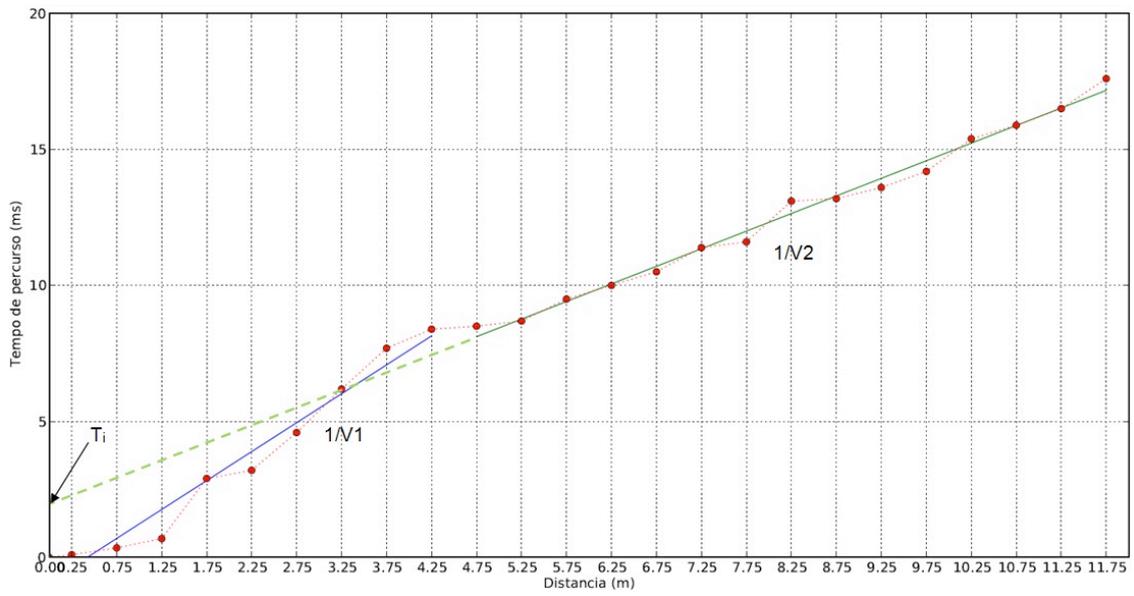


Figura 1

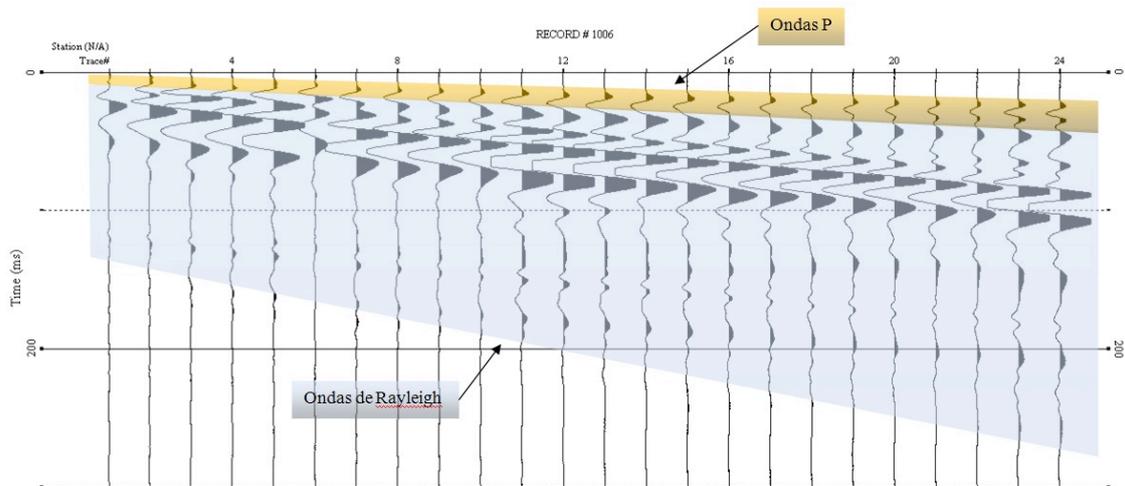


Figura 2

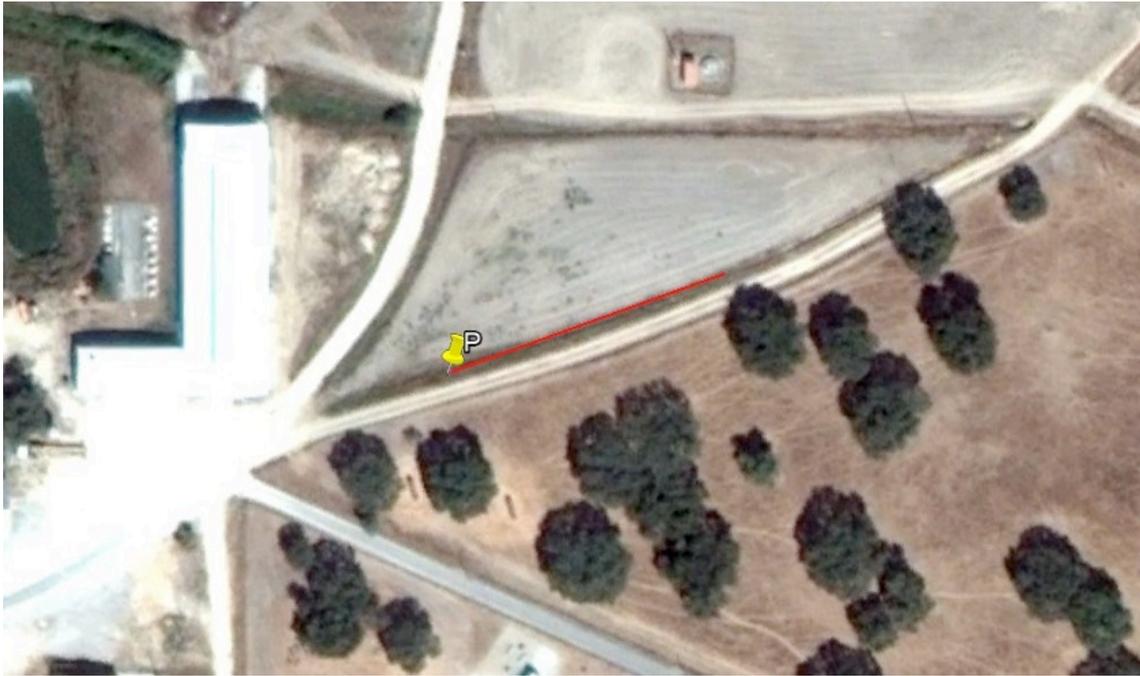


Figura 3

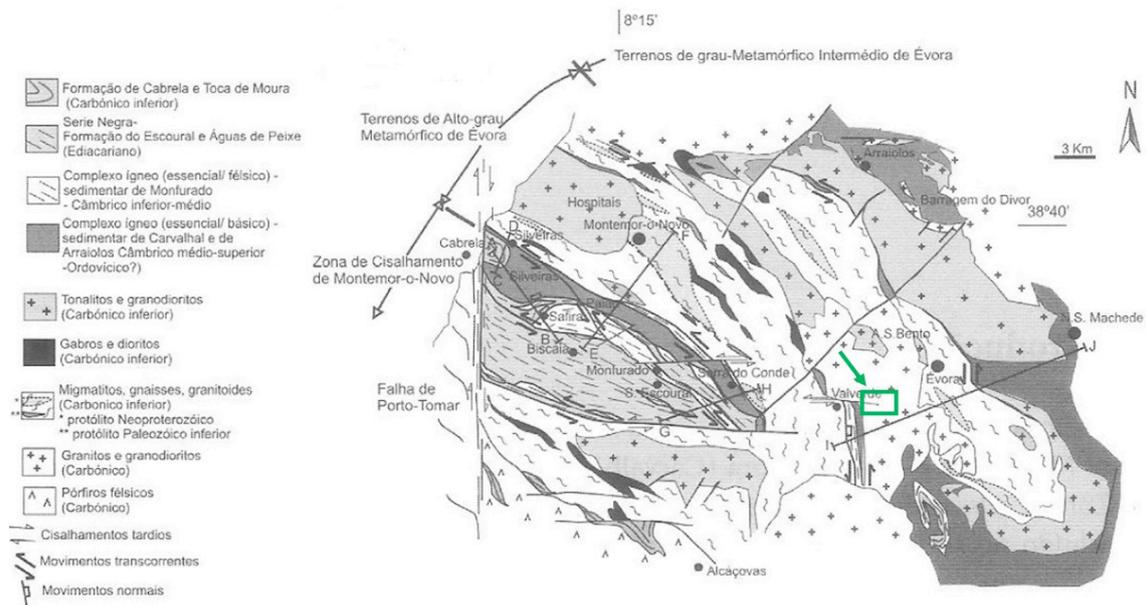


Figura 4



Figura 5

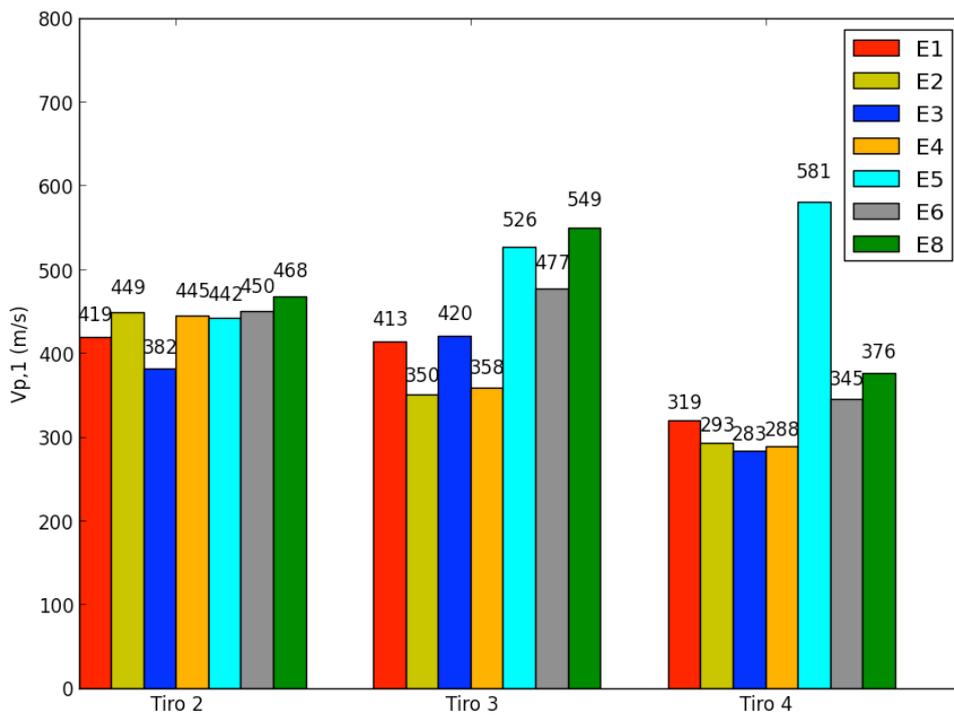


Figura 6

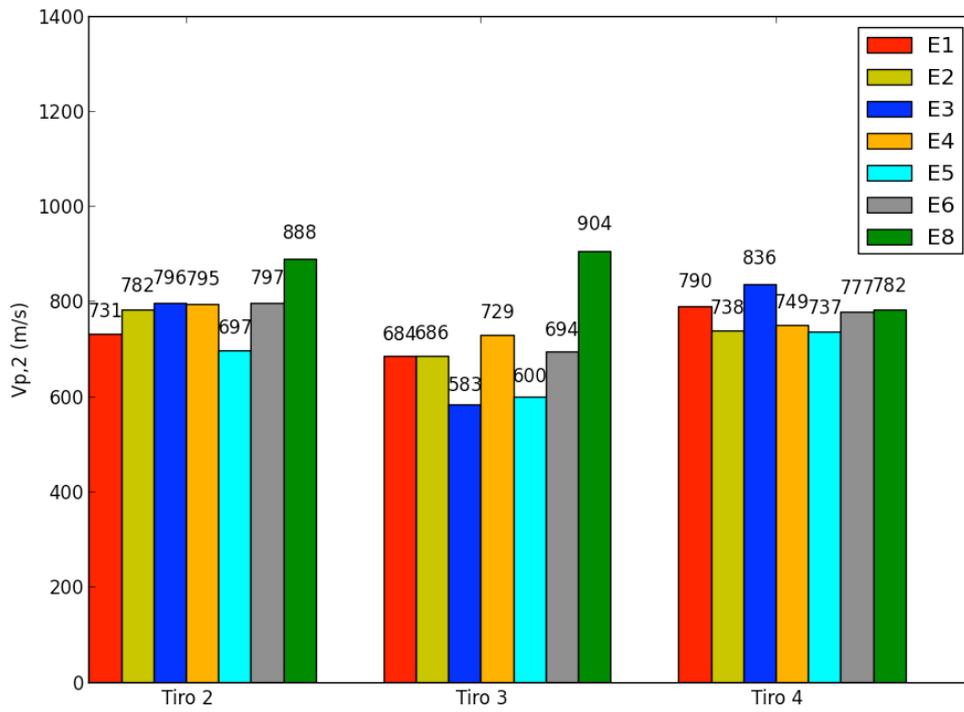


Figura 7

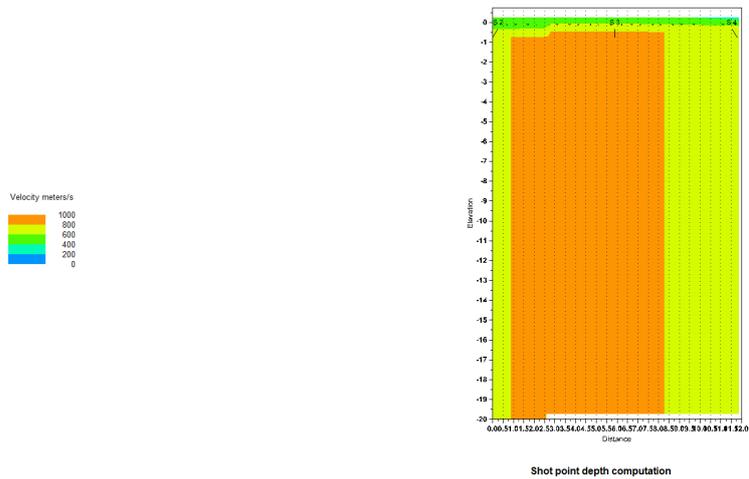


Figura 8

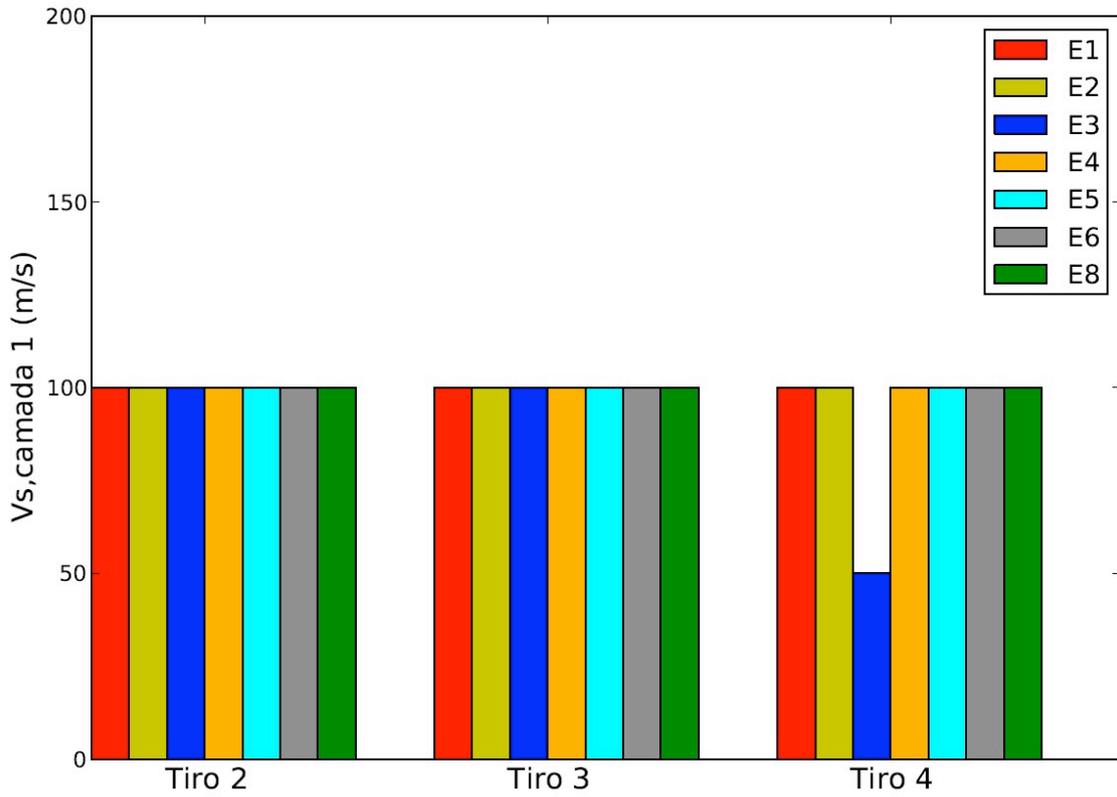


Figura 9

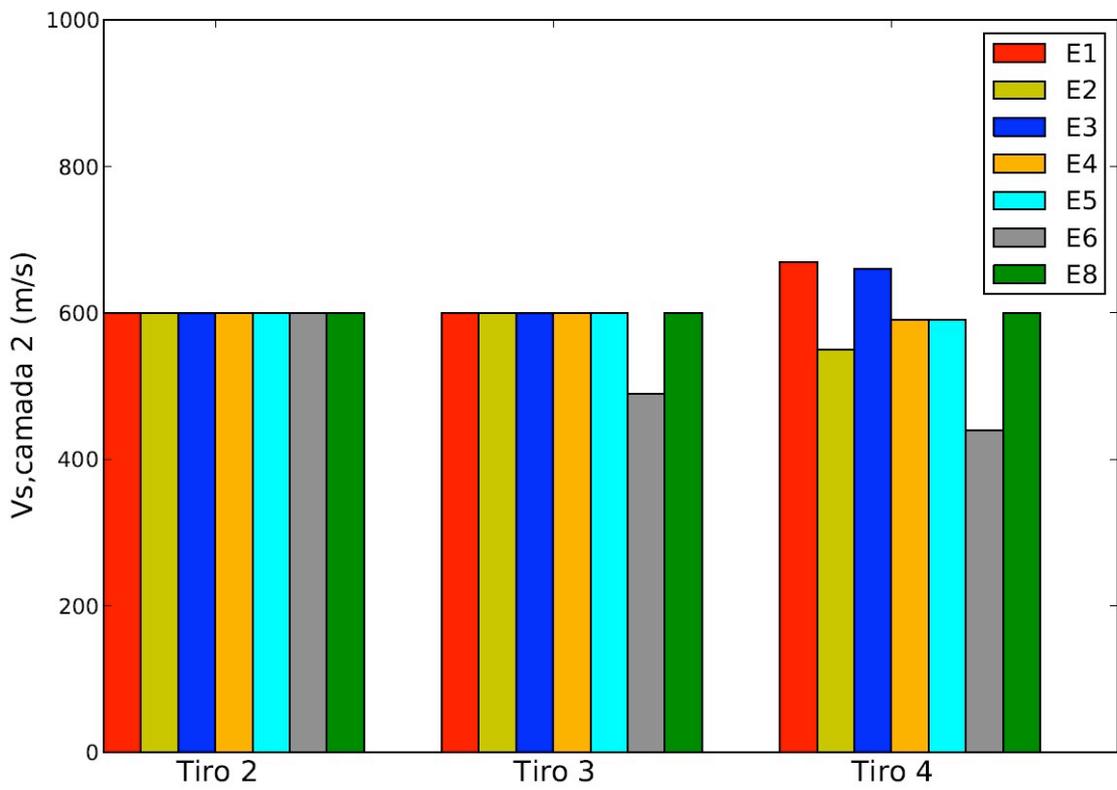


Figura 10

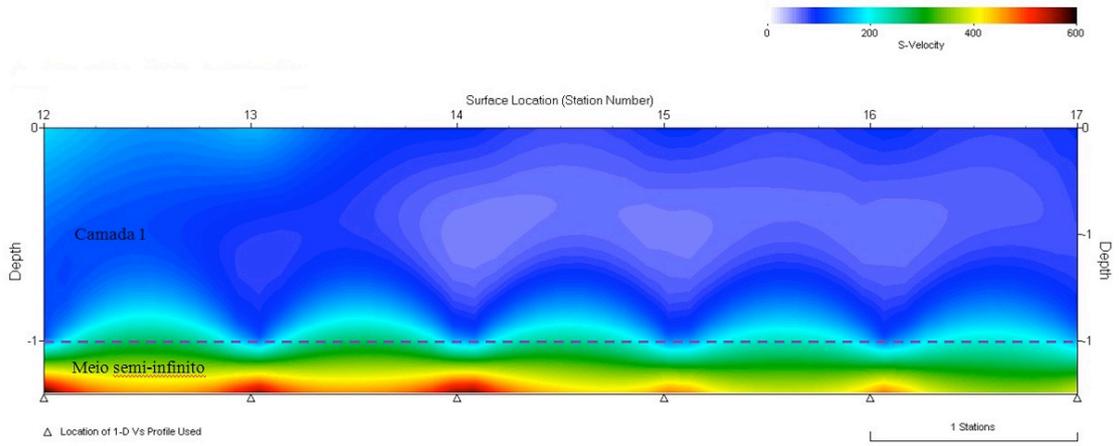


Figura 11

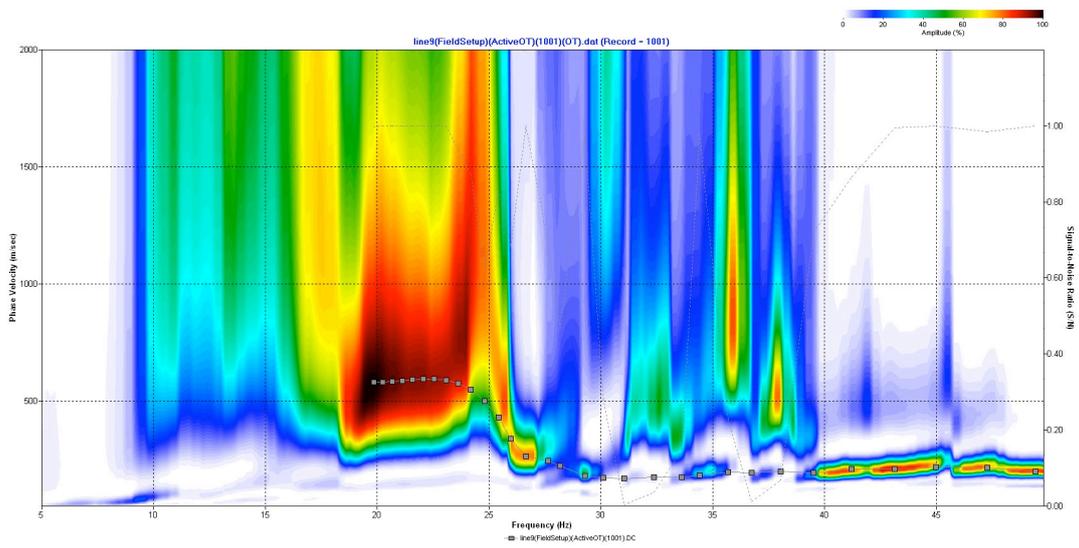


Figura 12

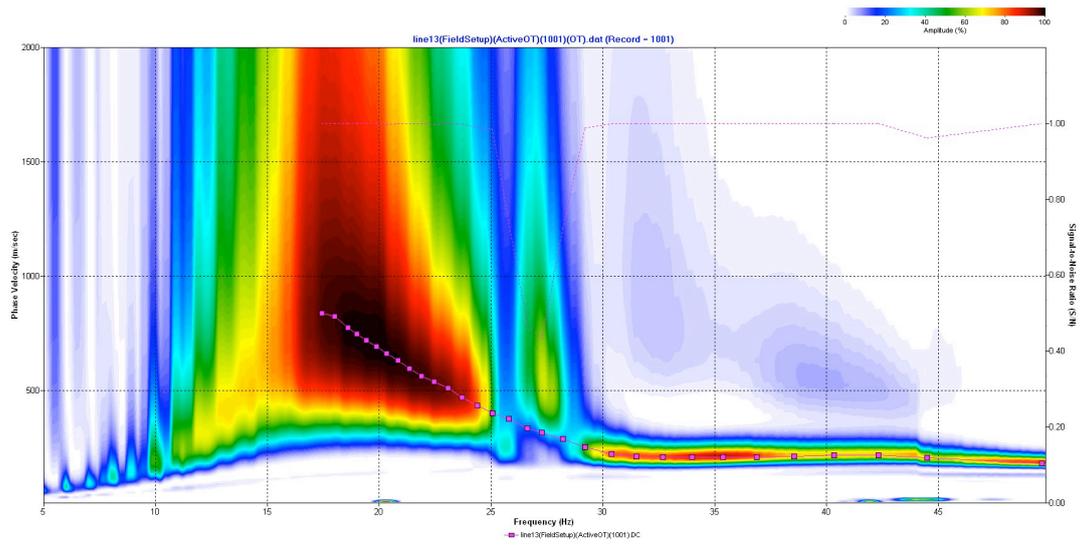


Figura 13