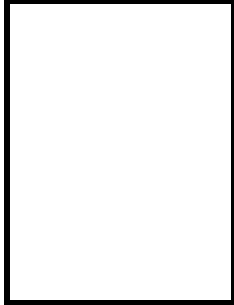
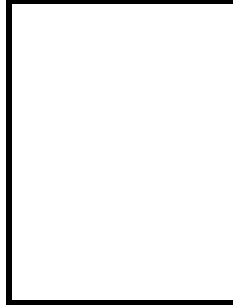




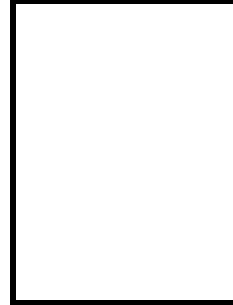
Fernando Almeida
Prof. Associado
Univ. Aveiro
Aveiro



Rui Moura
Assistente
Univ. Porto
Porto



Paula Teves Costa
Prof. Auxiliar
FCUL / CGUL
Lisboa



C. S. Oliveira
Prof. Catedrático
DECivil – IST
Lisboa

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DAS AREIAS DE FARO ATRAVÉS DE ENSAIOS SÍSMICOS

Resumo

Uma caracterização geotécnica das camadas superficiais da cidade de Faro, constituídas essencialmente por “Areias de Faro-Quarteira”, foi feita a partir da determinação das velocidades das ondas sísmicas (P e S refractadas) geradas “in situ” por um impacto tangencial sobre uma placa de madeira. Esta determinação, que permitiu também aferir o valor do coeficiente de Poisson, é fundamental para a modelação matemática do comportamento sísmico dos solos na ocorrência de um sismo forte.

Abstract

The geotechnical characterization of the surface sandy layers “Areias de Faro-Quarteira”, covering most of the town of Faro, was obtained using refracted P and S waves generated by “in situ” tangential impact through a wooden plate. Poisson coefficient was validated. This information is needed for modeling soil behaviour under strong seismic events.

INTRODUÇÃO

O território de Portugal Continental é caracterizado por uma sismicidade moderada, que se revela pela ocorrência mais frequente de sismos de magnitude 5.0 e inferior e, esporadicamente, de grandes sismos com magnitude 7.0 ou superior. As zonas mais afectadas têm sido a região de Lisboa e a costa setentrional do Algarve. Nesta última região há relatos históricos que referem a ocorrência de sismos fortes desde o ano 382. Para a cidade de Faro, em particular, não existem muitas referências à ocorrência de sismos fortes, com excepção das do sismo de 1755, que produziu uma intensidade X (Escala de Mercalli Modificada) em praticamente toda a região algarvia. Contudo, devido à sua localização e à forte concentração populacional (sobretudo na época estival), considera-se que esta cidade possui um elevado risco sísmico que deve de ser tomado em consideração em todos os estudos técnicos e de planeamento que venham a ser efectuados [1].

Em Faro predomina a formação geológica “Areias de Faro-Quarteira”, que cobre quase toda a cidade. Atendendo ao elevado risco sísmico existente no local, é de todo o interesse caracterizar o comportamento sísmico destas areias.

Sabe-se, desde há muito, que a resposta sísmica de determinado local é condicionada pelas condições geológicas e geotécnicas das formações superficiais existentes no local. Apesar da cidade estar praticamente toda coberta pela mesma formação geológica, as diferenças de espessura, assim como o nível freático e outros parâmetros físicos, podem modificar a sua resposta sísmica. Por outro lado, é possível prever do ponto de vista teórico a resposta sísmica da cidade, utilizando uma modelação matemática adequada. Para tal torna-se necessário conhecer os vários parâmetros físicos associados às camadas geológicas e, em particular, a velocidade de propagação das ondas S, tanto no interior das camadas mais profundas, como nas camadas superficiais. Em muitos casos, as formações geológicas superficiais encontram-se cobertas por depósitos superficiais espessos (aterros e depósitos de vertente), pelo que também é muito importante determinar as características geotécnicas destes depósitos.

A caracterização sísmica do meio físico pode fazer-se através da propagação das ondas sísmicas. Essa propagação traduz-se na solicitação dos materiais a tensões dinâmicas que resultam em deformação dos mesmos. Nesse sentido as constantes elásticas dos materiais estão ligados às velocidades de propagação das ondas compressionais (P) e de corte (S). Segundo Lankston [2] a razão das velocidades das ondas S e P depende exclusivamente da razão de Poisson e Nolet [3] refere que a velocidade das ondas S é uma função do módulo dinâmico de corte e da densidade.

As ondas P e S refractadas podem ser utilizadas na determinação das respectivas velocidades de propagação num meio e o coeficiente de Poisson pode ser aferido. As medidas laboratoriais estão afectadas pelo problema da representatividade da amostra e da dificuldade em criar as condições reais existentes na natureza (textura, humidade, pressão, escala, etc.). A solução dos ensaios “in situ” resolve estes problemas mas requer gerar ondas de corte. Por outro lado, as estruturas geológicas geralmente não são homogéneas e muitas vezes ocorre a descompressão

da camada superficial o que coloca novos problemas experimentais.

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

No início da era cristã a cidade de Faro e sua região envolvente estavam cobertas por água existindo apenas 3 ilhas correspondentes às terras mais altas: Alto de Rodes e Colinas da Sé e de Santo António. Hoje em dia, grande parte desta região já se encontra “seca”, se bem que existam muitos terrenos aluvionais e uma extensa área “inundada”, coberta por sapais.

De acordo com a Carta Geológica de Portugal 1:50 000, Folha 53-A, a cidade de Faro assenta quase totalmente sobre a formação “Areias de Faro-Quarteira”, apresentando terrenos aluviais a SW, e um pequeno afloramento Miocénico (a NE), do Tortoniano Superior, “Siltes Glauconíticos da Campina de Faro”. À frente da cidade, na direcção do mar, estende-se uma vasta área de aluviões e sapais [4].

Deste modo, a formação predominante é a designada “Areias de Faro-Quarteira”, constituída por areias de grão médio, feldspáticas, com quantidades variáveis de argilas, em regra muito rubeficadas, e que deverá ser estudada em pormenor.

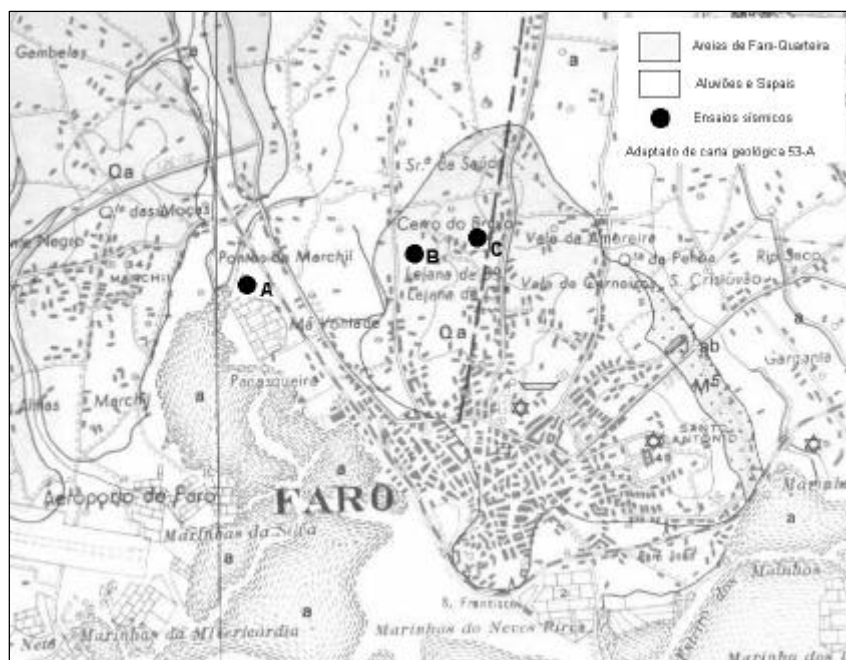


Fig. 1 : Extracto da carta geológica folha 53-A e localização dos ensaios sísmicos

Na caracterização das areias de Faro (Fig. 1) foram escolhidos locais em que a formação era

aflorante por ter sido removida a camada superficial devido quer à construção de um edifício (B) quer à exploração de um areeiro (C) agora abandonado. Foram também executados ensaios no perímetro lagunar (A).

PRINCÍPIOS TEÓRICOS

Quando se aplica um impulso ao terreno, ocorrem várias formas de vibração que se propagam de maneira distinta no que se refere à velocidade, polarização da vibração, atenuação e trajecto. A energia relativa entre essas formas de vibração é função do tipo de fonte, da geometria e da natureza do terreno. Na prospecção sísmica são reconhecidos genericamente as seguintes formas de vibração: P (compressionais), S (corte) e ondas de superfície (Rayleigh). Considerando o modelo de uma interface entre o ar e um meio homogéneo a relação entre as velocidades das ondas referidas [5] é:

$$\frac{c^6}{\beta^6} - 8 \frac{c^4}{\beta^4} + c^2 \left(\frac{24}{\beta^2} - \frac{16}{\alpha^2} \right) - 16 \left(1 - \frac{\beta^2}{\alpha^2} \right) = 0 \quad (1)$$

em que α é a velocidade das ondas P, β a das ondas S e c a das ondas de Rayleigh.

Por outro lado a relação de Poisson (σ) variável entre 0 e 0,5 estabelece a dependência entre as velocidades das ondas P e S.

$$\left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^2 = 2 \left(\frac{1 - \sigma}{1 - 2\sigma} \right) \quad (2)$$

As equações (1) e (2) permitiram testar a consistência dos resultados e simular os registos tempo/distância para as condições experimentais utilizadas no ensaio. Da conjugação dessas equações e dados [6] foi possível construir o diagrama da Fig. 2 que traduz o comportamento elástico de materiais semelhantes aqueles experimentados na cidade de Faro.

A Fig. 2 permite concluir sobre dificuldades experimentais inerentes à separação das velocidades de Rayleigh (c) e de corte (β) nos registos tempo/distância. Verifica-se que a taxa de variação entre a velocidade de Rayleigh e a velocidade da onda S varia em argilas entre 91% a 95% enquanto nas areias varia entre 89% e 93%.

Por outro lado no que se refere às taxas de variação entre as velocidades das ondas S e P verifica-se que essa razão varia aproximadamente entre 30% e 60% para argilas e 48% a 68% no caso de se tratarem de areias.

Na Fig. 3 simularam-se registos de tempo-distância para primeiras chegadas referentes a uma velocidade α arbitrada de 455 m/s e obtiveram-se as velocidades β e c com base nas equações teóricas referidas anteriormente relativas a $\sigma = 0,45$ e $0,1$. Os registos apresentados, para pequenas distâncias entre a fonte e os geofones, garantem uma investigação do meio superficial minimizando deste modo a ocorrência de ondas refractadas quando os volumes homogéneos

subjacentes são suficientemente espessos.

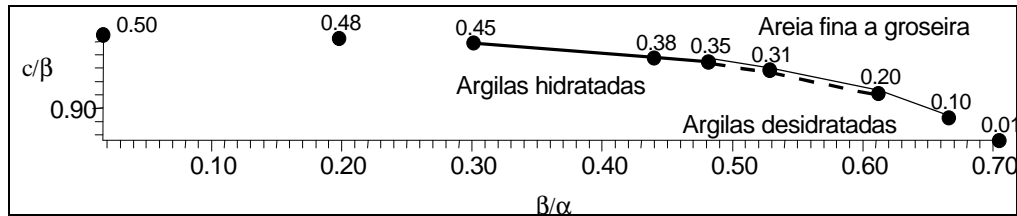


Fig. 2 : Diagrama dos coeficientes de Poisson em função das razões de velocidades β/α contra c/β , mostrando o campo de estabilidade do parâmetro σ em argilas hidratadas e desidratadas assim como em areias de granulometria e grau de compactação variáveis

Desta forma, para coeficientes de Poisson baixos (areias) a dificuldade reside em separar os tempos referentes às três formas de vibração enquanto para coeficientes de Poisson elevados a onda P sobressai dos registos e a S acompanha a onda de Rayleigh. Uma outra dificuldade quando se utilizam estas pequenas distâncias reside na distinção entre os grupos de ondas S e Rayleigh uma vez que a separação temporal exibida na figura 3 (aproximadamente entre 0,001 e 0,004 segundos) é inferior aos períodos dominantes nos registos experimentais (aproximadamente entre 0,01 e 0,005 seg.).

A análise das figuras 2 e 3 permite verificar que a indeterminação S versus Rayleigh não produzirá erro significativo (inferior a 10%) relativamente à velocidade da onda P. De qualquer modo a determinação dos tempos das primeiras chegadas estará sempre desviada para a onda S que aparecerá primeiro quando o seu grupo de onda ocorre sobreposto ao da onda de Rayleigh.

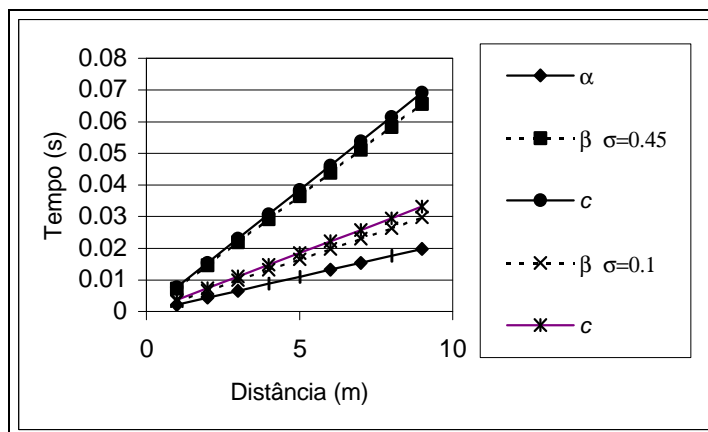


Fig. 3 : Registos tempo-distância para coeficientes de Poisson nos extremos experimentais para velocidade P ($\alpha = 455$ m/s).

Tendo em consideração a geometria da propagação de ondas, planificaram-se metodologias de

aquisição e geração das vibrações no sentido de potenciar a individualização dos vários tipos de ondas referidos. Assim, os geofones verticais são mais sensíveis ao impacto vertical da fonte que gera P e Rayleigh enquanto os geofones horizontais, transversais à direcção da propagação, registam predominantemente ondas SH cuja intensidade é beneficiada quando a fonte utilizada imprime impulsos horizontais e perpendiculares à direcção de propagação. No caso destas fontes tangenciais ao terreno, a utilização da técnica correspondente à soma em fase de vários impulsos de polaridade inversa e directa, em combinação com idêntica troca de sinal no sistema de aquisição, permite realçar as vibrações SH minimizando as ondas de Rayleigh e as ondas P.

CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

A técnica utilizada consistiu em distribuir paralelamente, de metro a metro, geofones Geospace de 28 Hz horizontais (S) e verticais (P). Os geofones S foram orientados perpendicularmente à direcção do perfil sendo as ondas S geradas por impacto tangencial sobre as superfícies laterais de uma placa de madeira (com cerca de 20 kg) e cujo eixo maior se orientou perpendicularmente à direcção do perfil (Fig. 4). O sistema de aquisição utilizado foi um sismógrafo EG&G 2401 de 24 canais.

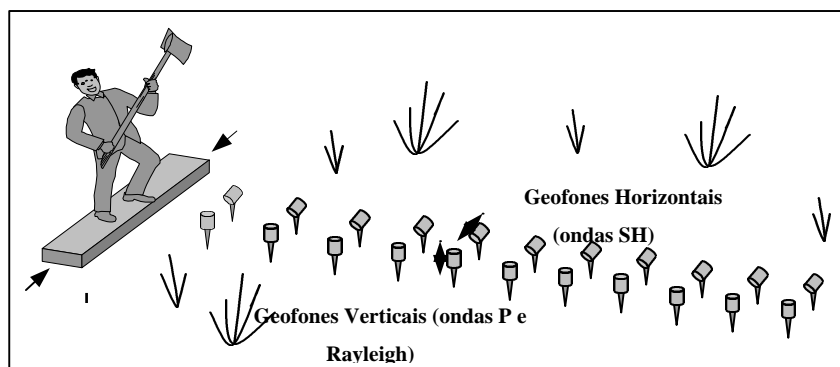


Fig. 4 : Arranjo de geofones e fonte sísmica tangencial utilizados em Faro

A aquisição dos sinais foi feita durante o mês de Dezembro de 1998 procurando janelas de tempo de menor ruído ambiental. Na zona A os ensaios foram feitos no período diurno coincidindo com a maré baixa, pelo que o ruído da ondulação foi diminuído. Na zona B foi possível trabalhar no período nocturno entre a 0:00 e as 02:00 da manhã no interior de uma obra de construção civil, fora do período laboral e beneficiando da circulação de trânsito reduzida. Na zona C, dada a sua periferia, foram apenas tomadas as precauções usuais de modo a escolher os melhores momentos de silêncio. O controlo de qualidade de dados foi efectuado, seccionando o ecrã em dois (canais P e S) à medida que se ia adquirindo o sinal por empilhamento sucessivo (“stacking”) da seguinte forma:

1. Aquisição de impulso positivo, polaridade dos canais positiva e com número de pancadas

suficiente para a individualização de primeiras chegadas nas secções P e S seguida da gravação do ficheiro de dados.

2. Aquisição de impulso negativo sobre o 1º com polaridade dos canais negativa, procurando observar o cancelamento das chegadas na secção P (geofones verticais) à medida que o número de impulsos se aproxima do número efectuado em 1; gravação do ficheiro de dados.
3. Aquisição de impulso negativo, polaridade dos canais negativa e com número de pancadas idêntico a 1 seguida da gravação do ficheiro de dados.

O processo pré-interpretativo efectuou-se no terreno sobre as duas secções (P- geofones verticais e SH geofones horizontais) de acordo com um ganho constante. A determinação dos tempos das primeiras chegadas foi feito comparando os registos disponíveis nos dois ficheiros (impulso positivo e impulso positivo + impulso negativo) de modo a garantir a fiabilidade dos resultados.

A análise posterior dos registos amplificados com ganho AGC (“Automatic Gain Control”) leva a uma identificação das formas de vibração mais fiável. Este ganho actua em cada amostra em função da amplitude máxima do sinal contida numa janela temporal predeterminada; esta janela “desliza” para calcular o ganho da amostra seguinte. Deste modo, apresenta-se na Fig. 5 a sobreposição dos registos das etapas de aquisição 1 e 3 referidas anteriormente, que exhibe no sector S a coincidência de polaridade das ondas S enquanto no Sector P se observa a inversão de polaridades. A falsa inversão de polaridades das ondas P resulta da troca de polaridade na aquisição; esta metodologia permite uma melhor visualização da sobreposição das ondas S.

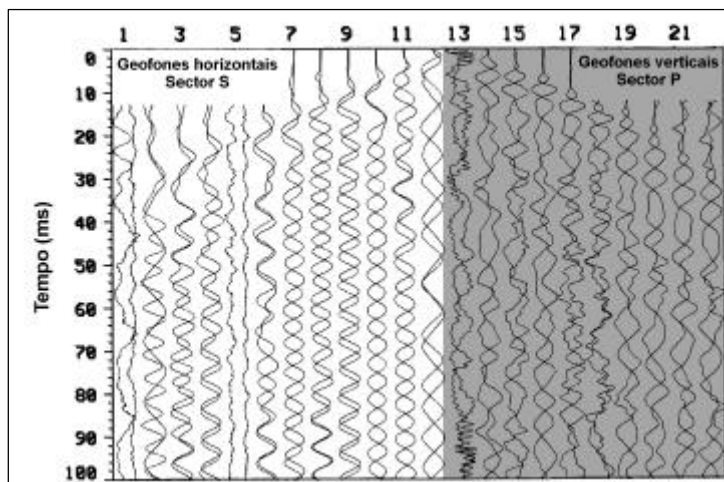


Fig. 5 : Sobreposição dos registos de polaridades inversas da aquisição e do impulso (Local B) em representação com ganho AGC

INTERPRETAÇÃO DOS DADOS E RESULTADOS

A interpretação efectuada no gabinete levou em consideração os registos obtidos nas três fases de aquisição. Apresentam-se nas Figs. 6 a 8 registos tipo obtidos nos locais A B e C a par da interpretação das primeiras chegadas. A validade dos tempos foi cuidadosamente avaliada através de: cruzamento estreito entre registos de polaridades inversas; assinatura dos grupos de onda (P e S) e velocidades (P e S) obtidas por ajuste de mínimos quadrados em face do coeficiente de Poisson e das chegadas da onda de Rayleigh resultantes (sombreado escuro no sector P das Figs. 6 a 8).

No quadro I apresentam-se os resultados das velocidades P, S e Rayleigh teórica assim como do coeficiente de Poisson derivado.

Para o local A (Lodos), verificam-se velocidades de ondas S extraordinariamente baixas com coeficientes de Poisson nos limites de liquidez.

Nas areias (locais B e C) os valores do coeficiente de Poisson são idênticos mas as velocidades são francamente distintas. O facto deve-se, provavelmente, por no local B o ensaio ter sido realizado numa obra, em fase de construção, sobre uma superfície desaterrada recentemente, enquanto no local C as velocidades são mais baixas devido à descompressão do terreno se ter iniciado há mais tempo. Se as variações laterais de fácies não forem responsáveis por essa variabilidade, pode supor-se que a gama de variação dos valores corresponderá a um gradiente crescente da velocidade em profundidade. Esta interpretação pode ser suportada quando se analisa a projecção do coeficiente de Poisson no diagrama da Fig. 2. Nesse sentido, como o coeficiente 0,21 foi obtido nos locais B e C e é lícito interpretar no diagrama a dependência do parâmetro com a dimensão granulométrica e grau de humidade, infere-se que o grau de compactação/descompressão seja o factor condicionante das velocidades obtidas.

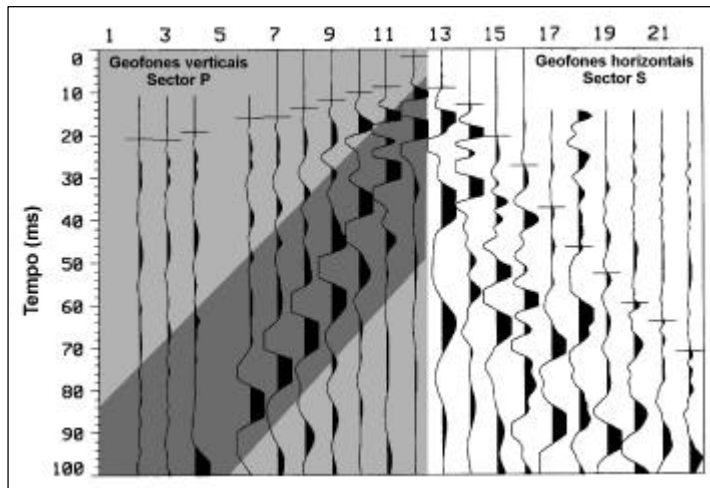


Fig. 6 : Registos processados com AGC e primeiras chegadas (local A)

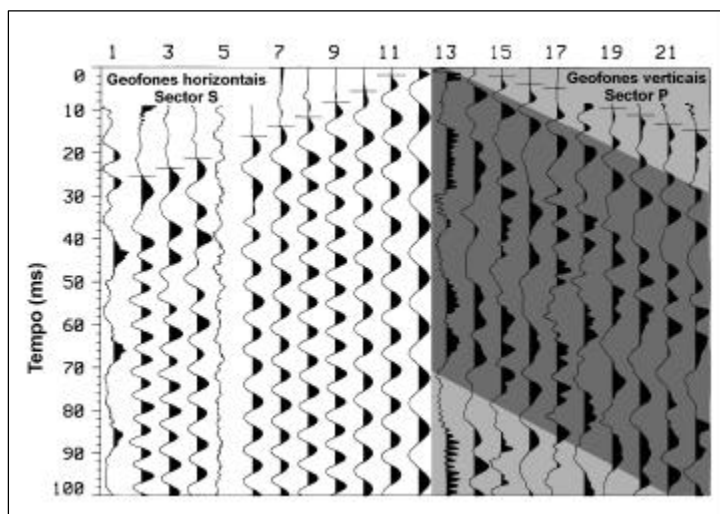


Fig. 7 : Registos processados com AGC e primeiras chegadas (local B)

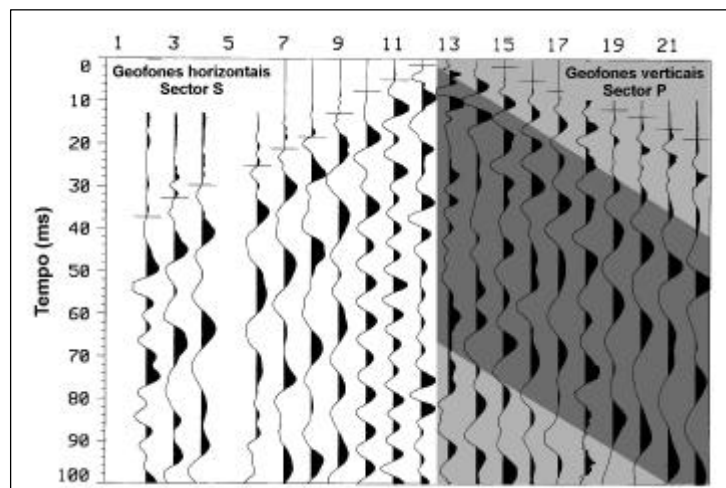


Fig. 8 : Registos processados com AGC e primeiras chegadas (local C)

Quadro I - Velocidades P, S e Rayleigh teórica; coeficiente de Poisson derivado.

a m/s	b m/s	c m/s	s	Local - Formação
666	133	127	0.47	A – lodos
641	386	353	0.21	B– Areias Faro/Quarteira
458	277	253	0.21	C– Areias Faro/Quarteira

CONCLUSÕES

Apesar das dificuldades inerentes ao processo experimental decorrido em ambiente urbano, foi possível através da metodologia desenvolvida obter velocidades coerentes no que se refere quer ao parâmetro elástico (σ) derivado das velocidades interpretadas, quer ao tipo de formação sedimentar ensaiada. Refira-se que nos lodos o coeficiente de Poisson é muito elevado, próximo do limite de liquidez, dado que a velocidade da onda S é muito inferior à da onda P. É ainda possível admitir que os valores das velocidades dependam do grau de compactação/descompressão da formação geológica “Areias de Faro-Quateira”.

Os resultados das velocidades de propagação contribuem, de um modo importante, para a caracterização geotécnica da cidade que, incluindo o conhecimento do comportamento para grandes amplitudes, permitirá efectuar uma modelação matemática para estimar, do ponto de vista teórico, o comportamento sísmico da cidade na ocorrência de um sismo forte.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Lic. Carlos Grangeia a dedicação com que se empenhou na edição final deste texto e ao Lic. Carlos Modesto pelo apoio dado no trabalho de campo. Finalmente, agradece-se à JNICT pelo financiamento, através do Projecto PRAXIS n.º 2/2.1/CTA/118/94.

REFERÊNCIAS

- [1] ICTE, 1997. “*Primeiro relatório de progresso do projecto ECARISCOPO*”, Praxis XXI, n.º 2/2.1/CTA/118/ 1994.
- [2] Lankston, Robert W.; “*High-resolution refraction seismic data acquisition and interpretation*”; Ward, Stanley H, Soc. Expl. Geophys, 1990.
- [3] Nolet, G.; “*In-situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves*”; Journal Geophys. Prosp., 1987.
- [4] Manuppella, G.; Ramalho M.; Telles Antunes, M. e Pais, J.; “*Carta Geológica de Portugal 1/50 000: Notícia Explicativa da Folha 53-A – FARO*”; Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 1987
- [5] Grant & West; “*Interpretation Theory in Applied Geophysics*”; McGraw-Hill, Inc., 1965.
- [6] Meidav, Tsvi, “*Shear wave velocity determination in shallow seismic studies Geophysics*”, Vol. 32, p. 1041-1046, 1967.