

APLICAÇÕES DO MÉTODO SÍSMICO DE PROSPECÇÃO GEOFÍSICA NO ESTUDO DE ESTRADAS

The Seismic Method of Geophysical Exploration as Applied to Road Studies

por

JOAQUIM MOURA ESTEVES *

RESUMO – São apresentados os princípios do método da refração-sísmica bem como as técnicas e o equipamento normalmente utilizados na sua aplicação ao estudo de estradas. Além disso apresentam-se aspectos especiais do método sísmico de prospecção ainda não suficientemente divulgados, com interesse para aquele estudo.

SYNOPSIS – The principles of the seismic refraction method are presented as well as the techniques and equipment currently in use for its application in road studies. In addition the author reports some special features of the seismic exploration method which are of interest for these studies and have not yet been sufficiently made known.

1 – INTRODUÇÃO

No estudo do traçado duma estrada é fundamental o conhecimento das características geotécnicas dos terrenos, solo e rochas, que serão interessados por esse traçado.

Duma forma genérica, pensando nas aplicações do método sísmico de prospecção geofísica, é necessário conhecer:

- 1.1 – A natureza dos terrenos a escavar
- 1.2 – A facilidade de desmonte desses terrenos, por exemplo a sua ripabilidade.
- 1.3 – As características de resistência das formações que constituirão a fundação do pavimento e das obras de arte – quer em escavações quer em aterro – e em

* Engenheiro Civil, Especialista em Geotecnia do LNEC

certos casos também as suas características dinâmicas com vista ao dimensionamento anti-sísmico de pontes ou outras estruturas

1.4 – As características dos locais de pedreira ou de empréstimo de terras.

1.5 – Os níveis de vibrações, especialmente em construções, túneis, etc., originadas pelo desmonte a fogo.

Para estes estudos pode o método sísmico dar uma informação geral do maior interesse para o ante-projecto das obras e contribuir para uma melhor programação dum plano de prospecção mecânica, destinado a estudos de pormenor, no que respeita ao número, localização e profundidade das sondagens.

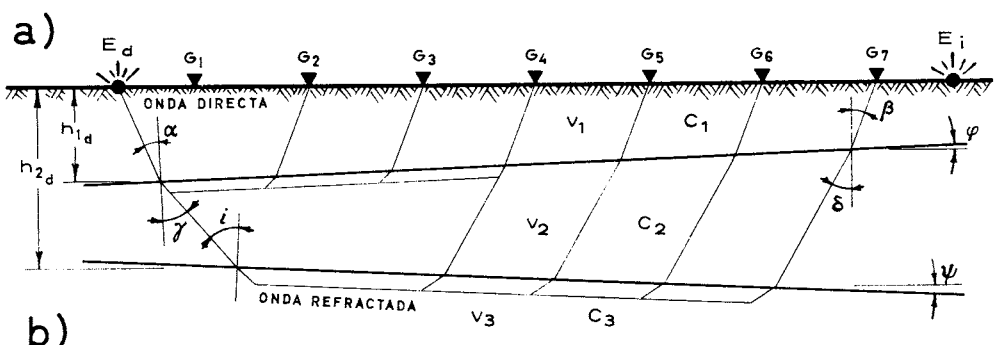
Para as questões apontadas nos itens 1.1 a 1.4 aplica-se o método da refração-sísmica com determinação das velocidades de propagação das ondas elásticas ou sísmicas criadas artificialmente. A questão número 1.5 é estudada a partir de medição de velocidades de vibração das partículas do solo ou da rocha onde está implantada a construção.

Apresenta-se a seguir os princípios do método da refração sísmica para se chamar a atenção para casos singulares que convém atender. Na bibliografia apresentada pode encontrar-se uma apresentação mais pormenorizada e mais vasta [1; 2].

2 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

2.1 – O método de refração-sísmica baseia-se no estudo comparativo das velocidades de propagação de ondas elásticas ou sísmicas refractadas em diversos terrenos. Estas ondas sísmicas são originadas pela queda duma massa ou pela detonação dum explosivo, que ao propagarem-se nas diferentes camadas (C_1 , C_2 e C_3 da figura 1) com velocidades V_1 , V_2 e V_3 , são recebidas à superfície por captadores ou geofones colocados em pontos bem determinados. Conhecidas as distâncias e os tempos de percurso das ondas sísmicas entre o ponto de explosão e os geofones, traça-se em regra uma curva tempos-espacos, designada por dromocrónica, que permite calcular as velocidades de propagação das ondas nas diferentes camadas e as respectivas espessuras.

O equipamento normalmente empregado é constituído por uma unidade de 12 canais (Fig. 2) e por vezes de 24, de modo que é possível prospectar duma só vez perfis com dezenas de metros de comprimento e interessando profundidades da ordem de um quarto desse comprimento. Define-se assim um perfil sísmico. Por vezes utilizam-se equipamentos dum só canal, em regra em trabalhos abrangendo zonas de reduzidas dimensões.



$$h_{1d} = \frac{x_{1d}}{2} \sqrt{\frac{v_{2d} - v_{1d}}{v_{2d} + v_{1d}}} \dots\dots (1)$$

$$h_{2d} \approx \frac{5}{6} h_{1d} + \frac{x_{2d}}{2} \sqrt{\frac{v_{3d} - v_{2d}}{v_{3d} + v_{2d}}} \dots\dots (2)$$

$$v_{1d} = v_{1i} \dots\dots (3)$$

$$v_2 \approx \frac{2 v_{2d} v_{2i}}{v_{2d} + v_{2i}} \dots\dots (4)$$

$$v_3 \approx \frac{2 v_{3d} v_{3i}}{v_{3d} + v_{3i}} \dots\dots (5)$$

Fig. 1 - Método sísmico de refração [1]

Para cada explosão ou queda de massa obtém-se um sismograma, do tipo do apresentado na figura 3, que dá os tempos correspondentes aos percursos das ondas sísmicas desde o instante da explosão até à sua chegada aos geofones.

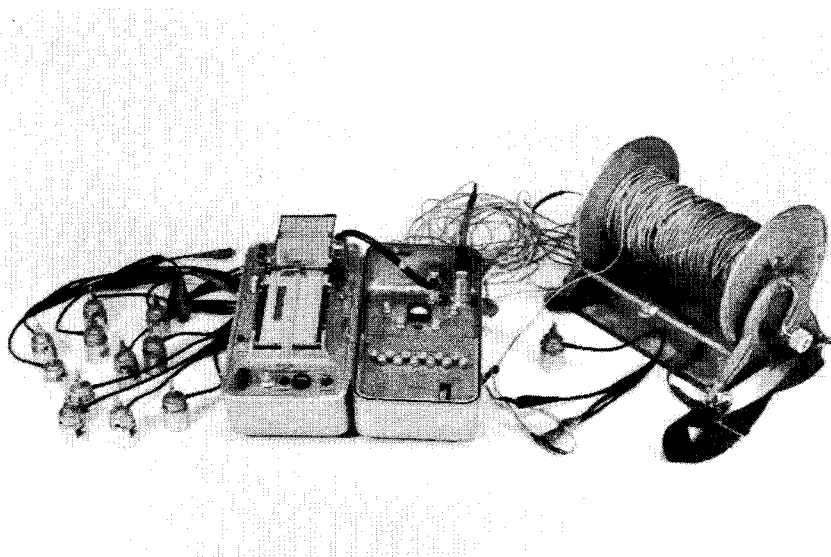


Fig. 2 – Equipamento de refração sísmica

A figura 1 exemplifica o princípio do método para o caso de existirem três camadas de terrenos, de superfícies de separação inclinadas, com velocidades de propagação crescentes com a profundidade conforme é exigência da refração. Se a velocidade cresce com a profundidade segundo lei linear, como acontece muitas vezes, por exemplo numa formação rochosa com alteração progressiva para a superfície, a dromocrónica será definida por uma linha curva de concavidade voltada para o eixo das abcissas.

Por outro lado, se um dado estrato apresenta uma velocidade inferior à do estrato que lhe está sobrejacente não haverá nele refração das ondas sísmicas, não se propagando então energia ao longo do estrato, e portanto não aparecerá na dromocrónica qualquer ponto ou segmento que lhe corresponda. Da sua interpretação resultará uma maior profundidade para o estrato de maior velocidade que se lhe segue; é o que mostra a figura 4. A utilização doutros métodos de prospecção, directa ou indirecta como o método da resistividade eléctrica, permite corrigir aqueles resultados. Fica assim bem evidenciado a necessidade do reconhecimento, embora genérico, da geologia dos locais a prospectar para uma aplicação criteriosa do método da refração sísmica.

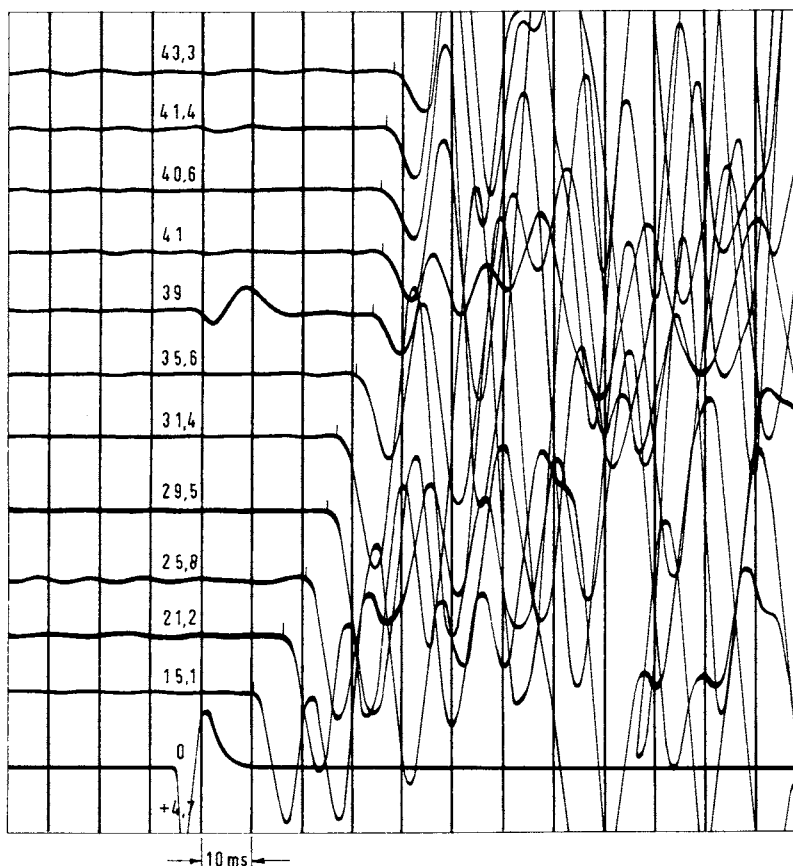


Fig. 3 – Sismograma tipo

O cálculo das velocidades de propagação das ondas sísmicas e das espessuras das diversas formações ou camadas é feito a partir das expressões matemáticas indicadas na figura 1, empregando-se fórmulas simplificadas quando as superfícies de separação não apresentem inclinações superiores a 10° .

2.2 – Conhecidas as velocidades de propagação nas diversas formações ou camadas pode-se programar duma forma mais objectiva a execução das escavações previstas e o tipo do equipamento a empregar, utilizando para isso correlações entre velocidades sísmicas e ripabilidade (ou escavabilidade), de que se apresenta um exemplo da Caterpillar Company pioneira nestes trabalhos (Fig. 5). Convirá obter para

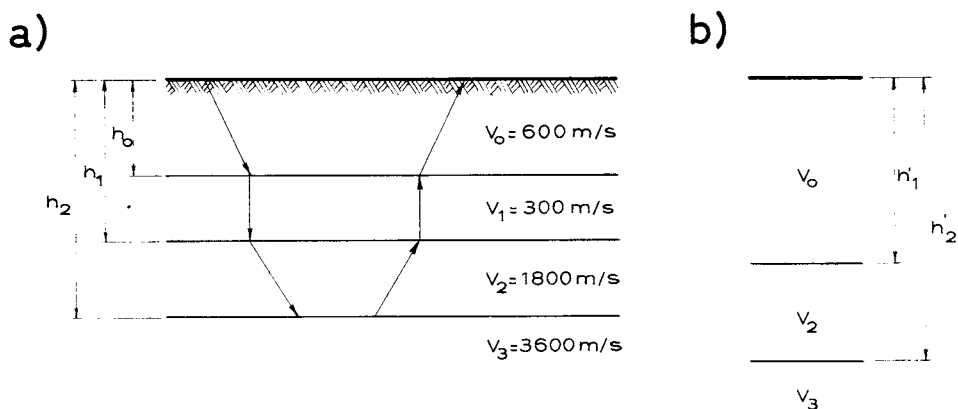


Fig. 4 – Um estrato intercalado noutros de maior velocidade de propagação duma onda sísmica a) pode ser causa de erro por excesso, na determinação de profundidades b) [3]

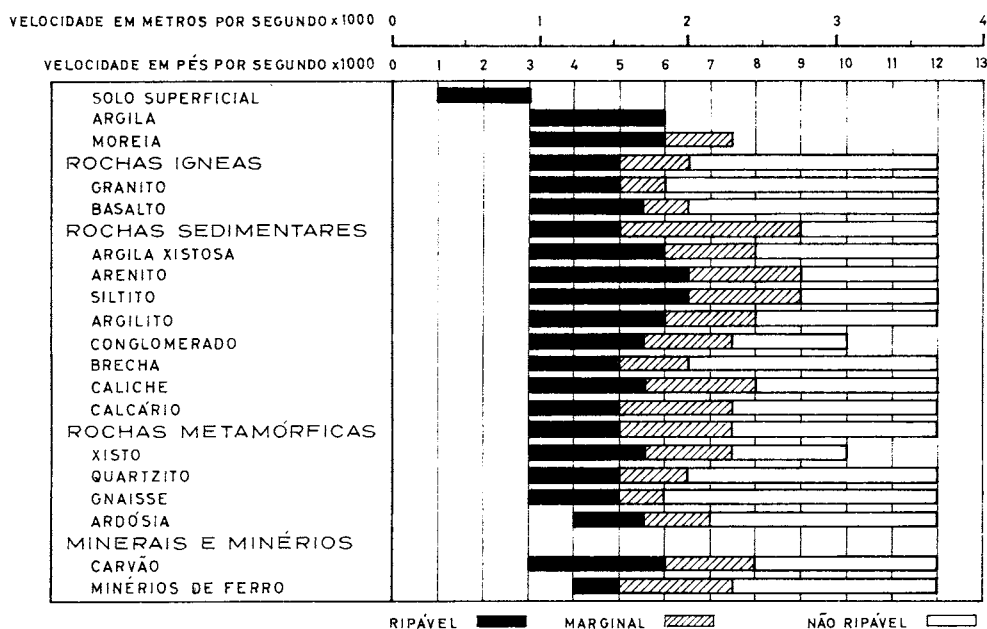


Fig. 5 – Carta de ripabilidade para «Hinge Type Ripper N.º 9 – Caterpillar»

cada área interessada pelo estudo a correlação velocidade-ripabilidade para o equipamento de escavações que se prevê aplicar.

Na utilização duma carta de ripabilidades, como a da figura 5, terá que estar presente a atitude e grau de fracturação das formações, especialmente das sedimentares e das metamórficas, para assim se alcançar um melhor aproveitamento do equipamento disponível por redução das manchas de valores de indeterminação (mancha marginal) daquela carta.

As zonas a escavar que apresentem velocidades sísmicas superiores aos limites de possibilidade de ripagem, terão de o ser com a aplicação de explosivos. Não é aqui o lugar para abordar esta técnica de desmonte; porém, como a sua aplicação pode criar problemas de natureza dinâmica a estruturas existentes nas proximidades, será feita mais adiante referência aos níveis de vibração originados por explosões (Ítem 1.5).

2.3 – Numa prospecção sísmica pelo método da refração é corrente determinar-se apenas as velocidades das ondas longitudinais (V_L) de propagação. Porém, manifesta-se cada vez mais o maior interesse em determinar também as velocidades das ondas transversais (V_T) para assim se calcular o coeficiente de Poisson e

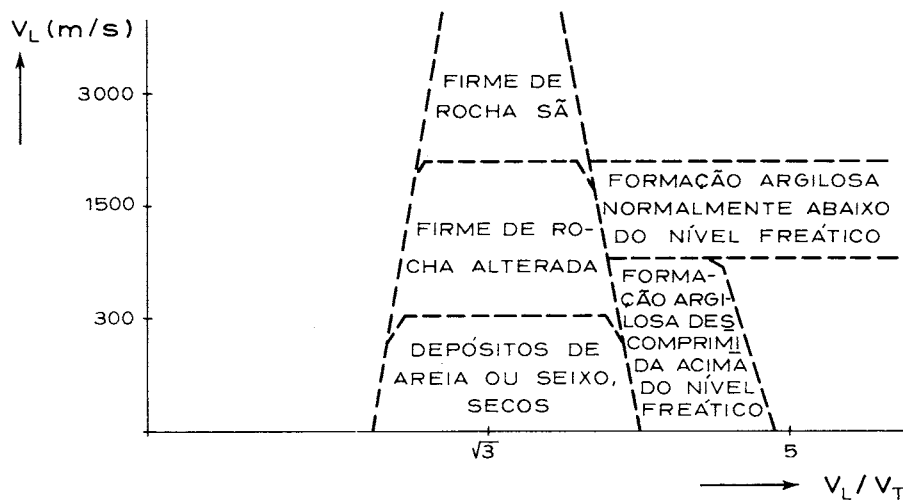


Fig. 6 – Relações, aproximadas, entre diversas formações geológicas e o cociente V_L/V_T das velocidades longitudinal V_L e transversal V_T e a grandeza da velocidade longitudinal V_L . [3]

portanto conhecer as características dinâmicas de resistência das formações, a partir da determinação do seu módulo de elasticidade dinâmico. Esta é no entanto matéria que se encontra ainda insuficientemente estudada com vista às suas aplicações práticas, como por exemplo no estudo do traçado de túneis, da estabilidade de taludes, etc.

A determinação da velocidade das ondas transversais (V_T) pode, em princípio, fazer-se tal como para as ondas longitudinais desde que se disponha de geofones apropriados. No entanto, como estas últimas são mais rápidas do que aquelas, constata-se que são relativamente mal definidas com o equipamento corrente, as chegadas das ondas transversais; a existência de ruído de fundo dificulta ainda mais a sua definição no sismograma.

O conhecimento das velocidades destes dois tipos de ondas sísmicas pode conduzir à classificação de terrenos desde que se verifiquem correlações como a apresentada na figura 6, do maior interesse em todos os trabalhos de engenharia civil [3].

O valor da velocidade de propagação das ondas elásticas é já um índice de resistência mecânica das formações, e a sua determinação a partir do método de refração integra já, por exemplo, o diaclasamento, o esmagamento e até acidentes geológicos que ocorrem nas formações interessadas pelo trajecto das ondas.

2.4 – Tendo por objectivo o dimensionamento anti-sísmico de pontes e outras estruturas é necessário conhecer as características de propagação das ondas sísmicas nas formações interessadas pelas obras, e o conhecimento das velocidades de propagação leva ao estabelecimento de coeficientes a considerar naquele dimensionamento, como é o caso da norma espanhola [4] «Norma Sismoresistente P.G.S-1» donde se retirou o quadro I.

2.5 – Outro aspecto da aplicação do método sísmico de refração no estudo de estradas é o que se refere à prospecção e caracterização de locais de pedreiras ou de empréstimo de terras, assunto que constitui o ítem 1.4. Para o seu estudo convirá aplicar além das técnicas já referidas a técnica do leque-sísmico, que consta da recepção das ondas sísmicas em pontos dispostos em leque em torno do ponto de explosão, o que permite a localização duma eventual caverna, especialmente em formações calcárias. Se no local existem já furos de sondagens mecânicas a determinação de velocidades sísmicas entre eles contribuirá para uma melhor caracterização mecânica do maciço rochoso em profundidade.

No caso de manchas de empréstimo de terras poderá definir-se o andamento do firme rochoso, e correlações do tipo apresentado na figura 6 poderão como se referiu, contribuir para uma caracterização litológica.

2.6 – Quanto ao problema indicado no item 1.5 salienta-se o interesse em conhecer os níveis de vibrações das partículas dos terrenos originadas pelas explosões de desmonte das rochas, medidos nas vizinhanças de obras de arte, túneis e de outras obras próximas. Tal nível de vibração é função não só da carga explosiva e da distância do ponto de detonação ao de observação mas também das características dinâmicas dos terrenos envolventes. No quadro II estão indicados os valores de níveis de vibração, expressos em mm/s, que originam ou não danos em estruturas tipo moradia edificadas sobre diversos terrenos [5; 6]. Está pouco explorada ainda esta matéria mas ela foi já aplicada, por exemplo, em França durante a construção da auto-estrada do sul.

O conhecimento prévio das condições de propagação das ondas sísmicas permite pois elaborar um criterioso plano de desmonte a fogo, de forma a não induzir danos em estruturas próximas. Na figura 7 pode apreciar-se o equipamento que o LNEC possui para a realização deste tipo de observações.

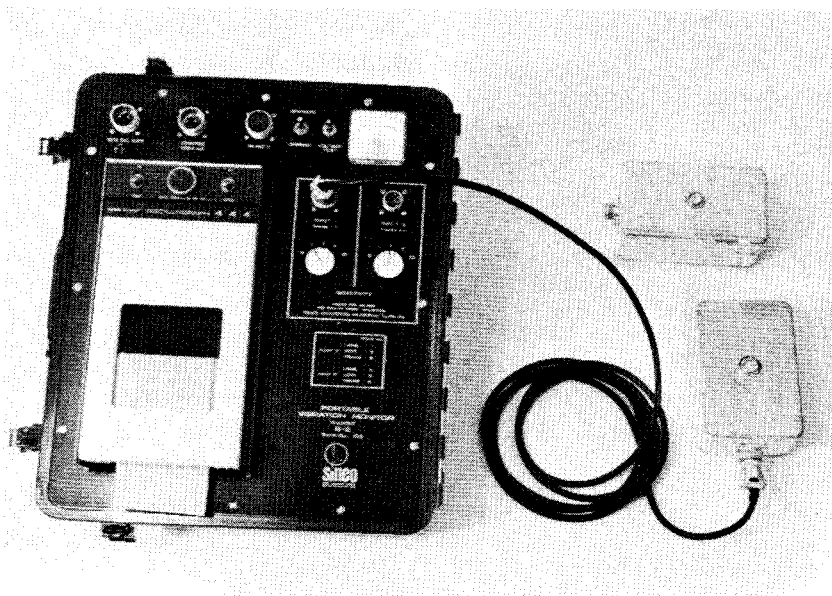


Fig. 7 – Equipamento medidor de velocidades de vibração

QUADRO I

TABELA VI – VALORES DO FACTOR DE FUNDAÇÃO [4]

Classe de terreno Tipo de fundação	(1) Lodos $c < 300$	(2) Areias e seixos $300 < c < 1000$	(3) Rochas brandas, seixos e areias consolidadas $1000 < c < 2000$	(4) Rochas compactas $2000 < c < 4000$	(5) Rochas muito compactas $c < 4000$
Estacas flutuantes	2,0	1,0	0,7	–	–
Estacas de ponta	1,8	0,9	0,6	–	–
Sapatas isoladas	2,2	1,1	0,8	0,4	0,3
Sapatas corridas	2,1	1,0	0,7	0,4	0,3
Ensoleiramentos	1,4	0,7	0,5	0,3	0,2

c = velocidade de propagação de ondas elásticas de compressão, em metros por segundo.

Observações

- i) Para utilizar o conceito de rochas muito compactas, a superfície deve estar situada abaixo da zona descomprimida ou alterada.
- ii) Se a superfície de fundação está situada abaixo do nível freático, no caso (3) tomar-se-ão os valores correspondentes ao (2); no caso (2), os correspondentes ao (1).
- iii) O melhor critério para definição do terreno é o emprego da velocidade das ondas elásticas, segundo os valores incluídos na tabela VI.

QUADRO II

TIPO DE DANO EM RESIDÊNCIAS GÊNERO MORADIA IMPLANTADAS EM DIFERENTES TERRENOS [5]

Natureza do terreno	Areia, cascalheira, argila abaixo do nível freático	Moreia, xisto, calcário brando	Calcário duro, grés quartzítico, gnaise, granito, diabase	Tipo de dano
Velocidade de propagação c (m/s)	1000-1500	2000-3000	4500-6000	
Velocidade de vibração V (mm/s)	18	35	70	Não se observam fendas Fendas insignificantes Fendilhação Grandes fendas
	30	55	110	
	40	80	160	
	60	115	230	

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - HEILAND - Geophysical Exploration. Prentice-Hall, Inc. New York. 1951.
- 2 - PARASNIS, D. S. - Principles of applied geophysics. Methuen & Co. London. 1962.
- 3 - PATERSON, N. R. and MEIDAV, T. - Geophysical Methods in Highway Engineering. Huntco Ltd. Toronto. Canadá. 1965.
- 4 - Norma Sismoresistente P.G.S-1. Madrid. 1968. Earthquake Resistant Regulations. A World List. 1970. Compiled by the International Association for Earthquake Engineering.
- 5 - LANGEFORS, U., & KIHLSSTROM, B. - The Modern Technique of Rock Blasting. Almqvist and Wiksell. Stockholm. 1967.
- 6 - ESTEVES, J. M. - Nota sobre a influência nas construções das vibrações dos terrenos provocadas por explosões. 2.^{as} Jornadas de Engenharia e Arquitectura do Ultramar. Luanda. 1969. Memória n.º 348 do LNEC. 1970.