

# A TÉCNICA DE REFRAÇÃO SÍSMICA APLICADA À CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO MACIÇO ROCHOSO DA JAZIDA CACHOEIRA - CAETITÉ - BA

WALTER MALAGUTTI FILHO  
TANIA DE OLIVEIRA BRAGA

Geólogos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT.  
Trabalho executado para as Empresas Nucleares Brasileiras S.A. - NUCLEBRAS.

## RESUMO

Com a finalidade de subsidiar a caracterização geotécnica realizada com vistas aos projetos de implantação do Complexo Mineiro - Industrial nas jazidas uraníferas de Lagoa Real, Município de Caetité - BA, foi efetuado um levantamento geofísico no maciço da Jazida Cachoeira.

Neste trabalho apresenta-se a metodologia utilizada no levantamento geofísico, os resultados obtidos e a integração dos mesmos à caracterização geotécnica como um todo.

## INTRODUÇÃO

A integração bem elaborada de vários estudos do campo da geotécnica, possibilita a execução de uma caracterização geotécnica realista. O levantamento geofísico, como um destes estudos, tem sido bastante empregado, o que permite o aprimoramento de sua metodologia, tornando-o assim uma ferramenta de grande importância.

No caso da caracterização geotécnica do maciço da Jazida Cachoeira pertencente ao Complexo Mineiro-Industrial de Lagoa Real, os estudos geofísicos colaboraram de maneira inequívoca. Para tanto, foram executados ensaios de refração sísmica na superfície da área de interesse, obtendo-se a:

- determinação do posicionamento e geometria do topo rochoso;
- indicação das espessuras do solo.

## METODOLOGIA E MÉTODO DE TRABALHO

### . A Técnica de refração sísmica

A técnica de refração sísmica é baseada na medida e análise das primeiras chegadas de ondas geradas na superfície, refratadas em sub-superfície e registradas novamente na superfície por receptores bastante sensíveis chamados geofones.

Essa técnica consiste basicamente em se gerar ondas sísmicas (pequenos sismos) artificiais por meio, geralmente, de cargas explosivas enterradas no solo. As ondas geradas pela explosão se propagam em todas as direções e quando encontram, em profundidade, um meio com propriedades físicas distintas, sofrem, entre outros, o fenômeno da refração.

Quando esse meio mais profundo tiver uma velocidade de propagação de onda maior que o anterior, uma parte da energia refratada sofrerá o que se chama de refração total, ou seja, propaga-se pelo contato en

tre os meios e retorna à superfície de acordo com o princípio de Huygens.

Baseando-se nesse fato, a técnica da refração sísmica utiliza-se de equipamentos e técnicas de campo adequadas para a captação das ondas refratadas. As Figuras 1 e 2 ilustram o fenômeno da refração para os casos de duas e três camadas.

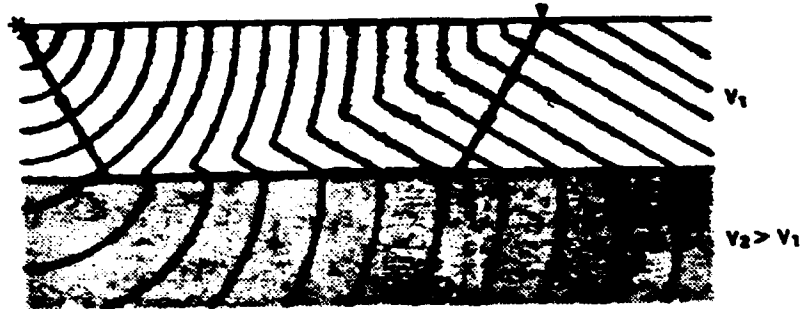


Figura 1 - Fenômeno da refração sísmica para o caso de duas camadas.

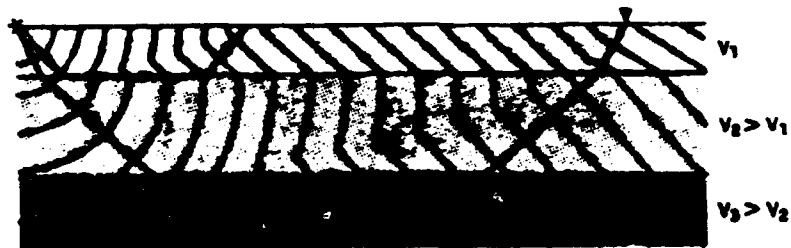


Figura 2 - Fenômeno da refração sísmica para o caso de três camadas.

#### . Metodologia de campo

Para os trabalhos de campo de sísmica de refração utiliza-se um conjunto de equipamentos compostos das seguintes partes principais:

- . fonte de energia;
- . sistema de detonação;
- . sismógrafo registrador, composto por um conjunto de amplificadores e um conjunto de oscilógrafos gravadores;
- . geofones, e
- . cabos de ligação multicondutores.

A técnica de campo mais empregada consiste em se dispor os geofones (12 ou 24) segundo uma reta distanciados entre si de 10 metros. Quando se desejar atingir profundidades maiores, o espaçamento entre os geofones poderá ser de 15 m.

O número e a posição dos tiros variam com o número e o espaçamento entre os geofones. Chama-se de base sísmica ao arranjo de geofones e seus pontos de tiro. Assim, como mostram as Figuras 3 e 4, nos casos em que se usar 12 geofones a base sísmica terá 5 tiros e quando se usar 24 geofones serão dados 7 tiros.

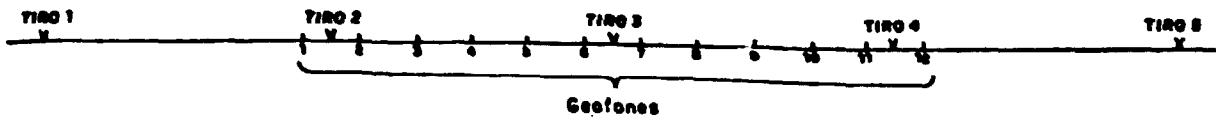


Figura 3 - Base sísmica com equipamento de 12 canais.

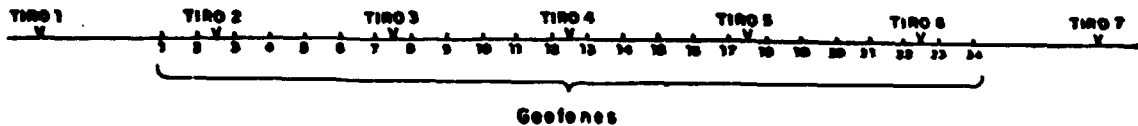


Figura 4 - Base sísmica com equipamento de 24 canais.

Metodologia de interpretação

A técnica de interpretação dos dados de sísmica de refração consiste em se construir curvas tempo x distância (dromocrônicas) que representam para cada geofone, o tempo de chegada das ondas sísmicas (em ordenadas) em função da sua respectiva distância à fonte (em abcissas).

Ao se propagarem ondas sísmicas numa fonte F colocada na superfície, serão registradas nos geofones G aquelas que se propagam diretamente na camada superior de velocidade  $V_1$  (ondas diretas), e aquelas que, depois de se propagarem até o topo da segunda camada com um ângulo de incidência crítica ( $i_c$ ), sofrem refração total ao longo da interface com a velocidade do segundo meio ( $V_2$ ) e voltam para a superfície.

Geralmente, os tempos de chegada aos primeiros geofones são de ondas diretas que vão definir um ramo da dromocrônica cuja inclinação é o inverso da velocidade de propagação da camada superior (vide Figura 5)

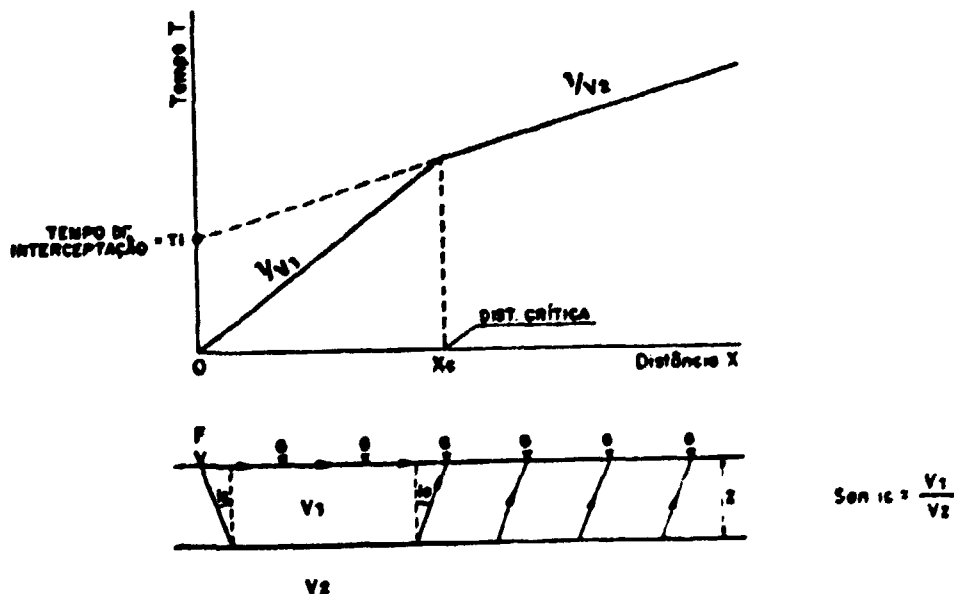


figura 5 - Gráfico tempo x distância

A partir de uma determinada distância, denominada de distância crítica ( $X_c$ ), começam a chegar primeiro nos geofones as ondas refratadas, cujos tempos de chegada vão definir um ramo da dromocrônica onde a inclinação será o inverso da velocidade de propagação do meio inferior. Esse ramo da dromocrônica irá interceptar o eixo dos tempos num ponto denominado de tempo de interceptação ( $T_i$ ). Com base no tempo de interceptação, na distância crítica e na velocidade de propagação dos diferentes estratos foram estabelecidas fórmulas que permitem calcular a espessura das camadas abaixo de cada geofone.

As fórmulas usadas para os cálculos de até 4 camadas são as seguintes:

$$h_1 = \frac{V_1}{\cos \theta \sin \frac{V_1}{V_2}} \times \frac{T_{i1}}{2} \quad h_1 = \text{espessura da 1.ª camada}$$

$$h_2 = \frac{V_2}{\cos \theta \sin \frac{V_2}{V_3}} \times \frac{T_{i2}}{2} - \frac{T_{i1}}{2} \left( \frac{\cos \theta \sin \frac{V_1}{V_3}}{\cos \theta \sin \frac{V_1}{V_2}} \right) \quad h_2 = \text{espessura da 2.ª camada}$$

$$h_3 = \frac{\frac{T_{i3}}{2} - \frac{h_1}{V_1} \times \cos \theta \sin \left( \frac{V_1}{V_4} \right) - \frac{h_2}{V_2} \cos \theta \sin \left( \frac{V_2}{V_4} \right) \times V_3}{\cos \theta \sin \left( \frac{V_3}{V_4} \right)} \quad h_3 = \text{espessura da 3.ª camada}$$

A dedução dessas fórmulas pode ser encontrada nos textos básicos de sismica de refração.

### TRABALHOS EXECUTADOS

Os ensaios de sismica de refração na jazida da Cachoeira foram realizados ao longo de quinze linhas, a saber: L-01, L-02, L-03, L-04, L-05, L-06, L-07, L-08, L-09, L-10, L-11, L-12, L-13, L-14 e L-15. A localização dessas linhas em planta é mostrada no DESENHO Nº 1 (Planta de localização das linhas sísmicas).

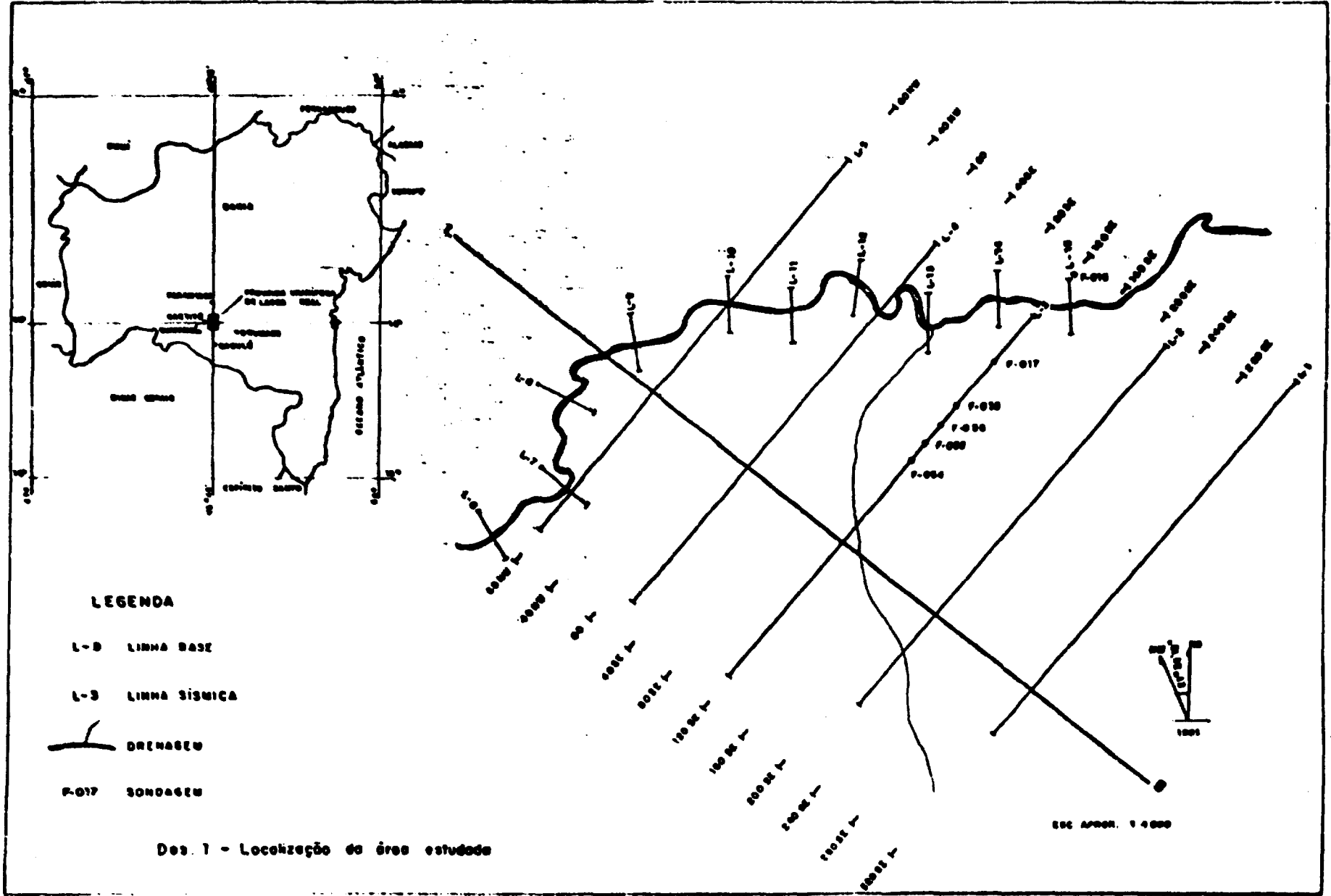
As linhas 01, 02, 03, 04 e 05 tiveram extensão de 400 m sendo realizadas em cada uma duas bases sísmicas com 24 geofones. As demais linhas tiveram extensão de 50 m cada uma, todas cruzando a drenagem principal da área. Portanto, um total de 2.500 m de levantamento geofísico.

Os dados de topografia necessários para o desenvolvimento do trabalho, foram fornecidos pela NUCLEBRÁS.

### INTEGRAÇÃO DOS DADOS SÍSMICOS AOS DADOS DE SONDAGEM MECÂNICA

#### Nomenclatura e características dos estratos sísmicos

Observando-se as velocidades de propagação de ondas sísmicas



LEGENDA

L-B LINHA BASE

L-S LINHA SISMICA

DRENAGEM

P-017 SONDAAGEM

Des. 1 - Localização da área estudada

ESC. APROX. 1:4000

obtidas nos locais ensaiados, foi possível agrupá-las em três faixas distintas de variação. Considerando-se os padrões de correlacionamento entre essas velocidades e o modelo geológico-geotécnico proposto inicialmente para a área, pode-se relacionar as diferentes camadas que ocorrem nos locais dos ensaios com as faixas de variação de velocidades, denominando-as de estrato sísmico. A correlação estabelecida encontra-se resumida no Quadro I.

QUADRO I

Estrato Sísmico	Velocidade (km/s)
solo coluvionar e/ou aluvionar e/ou de alteração	0,4 a 0,8
solo de alteração e/ou rocha muito alterada e/ou muito fraturada	1,3 a 2,2
rocha sã	4,3 a 5,2

#### Considerações gerais sobre os estratos sísmicos obtidos

Para a correlação com os dados das sondagens mecânicas visando o apoio à caracterização geotécnica do maciço, foram utilizados principalmente as informações das linhas sísmicas 01, 02, 03, 04 e 05 por existirem nessas linhas várias sondagens mecânicas além do fato de coincidirem com seções geotécnicas.

A partir da análise conjunta dos dados fornecidos pelas seções sísmicas e pelas sondagens mecânicas disponíveis pode-se fazer as seguintes considerações a respeito dos estratos sísmicos determinados na área em estudo:

##### - Sobre o solo coluvionar e/ou aluvionar e/ou de alteração

Este estrato, que foi designado de forma abrangente de solo coluvionar e/ou aluvionar e/ou de alteração, está caracterizado na área por velocidades de propagação de ondas sísmicas que variam de 0,4 a 0,8 km/s.

Como pode ser observado por essa variação de velocidades, esse estrato deve se apresentar com um comportamento litológico bastante heterogêneo englobando solos de origem transportada (coluvionares), solos aluvionares nas zonas em que as linhas sísmicas cortam o Córrego da Cachoeira e solos de alteração de rocha.

Encontra-se distribuído na área de forma irregular com consideráveis variações de espessura. Os baixos valores de velocidades sísmicas indicam o seu baixo grau de compactação.

Existem locais na área onde esse estrato encontra-se situado diretamente sobre a rocha sã. Nessas zonas suas velocidades sísmicas são maiores (em torno de 0,7 a 0,8 km/s) evidenciando um grau de compactação um pouco maior.

##### - Sobre o solo de alteração e/ou rocha muito alterada e/ou muito fraturada

Este estrato, que também de forma ampla foi designado por solo de alteração e/ou rocha muito alterada e/ou muito fraturada está caracterizado na área por velocidades sísmicas que variam na faixa entre 1,3 km/s a 2,2 km/s.

Sob o ponto de vista geotécnico, esse estrato pode se apresentar bastante heterogêneo, englobando desde um solo de alteração com grau de compactação maior do que o primeiro estrato, até porções de rocha bastante alterada ou ainda porções de rocha menos alterada mas muito fraturada.

Em alguns locais da área ensaiada não foi possível detectar a presença desse estrato sísmico. Isso pode ser explicado pela passagem brusca do solo coluvionar e/ou aluvionar e/ou de alteração para a rocha sã. Outro motivo que pode justificar a ausência do segundo estrato seria sua pequena espessura em relação ao primeiro, o que faria com que não fosse detectado pelo método sísmico, ou ainda poderiam ocorrer zonas bastante heterogêneas em que porções de rocha com velocidades sísmicas próximas às da rocha sã estariam sobre porções de rocha com velocidades sísmicas menores, fato este que ocasionaria o total mascaramento destas últimas.

Este estrato se encontra distribuído de forma bastante irregular na área, uma vez que apresenta grandes variações na sua espessura.

#### - Sobre a rocha sã

O substrato rochoso sã na área está representado por rochas que apresentam velocidades de propagação de ondas sísmicas variando na faixa entre 4,3 a 5,2 km/s. Essas variações estão associadas a mudanças litológicas e/ou mudanças nas características geotécnicas do maciço, tais como grau de fraturamento e/ou grau de alteração.

O topo da rocha sã apresenta-se com alguma complexidade morfológica, uma vez que mostram variações significativas nas suas cotas de ocorrência.

Neste estrato sísmico, com os valores elevados de velocidades de propagação de ondas sísmicas, o maciço rochoso em geral apresenta-se com boa qualidade.

#### Um exemplo de correlação entre estratos sísmicos e horizontes geotécnicos

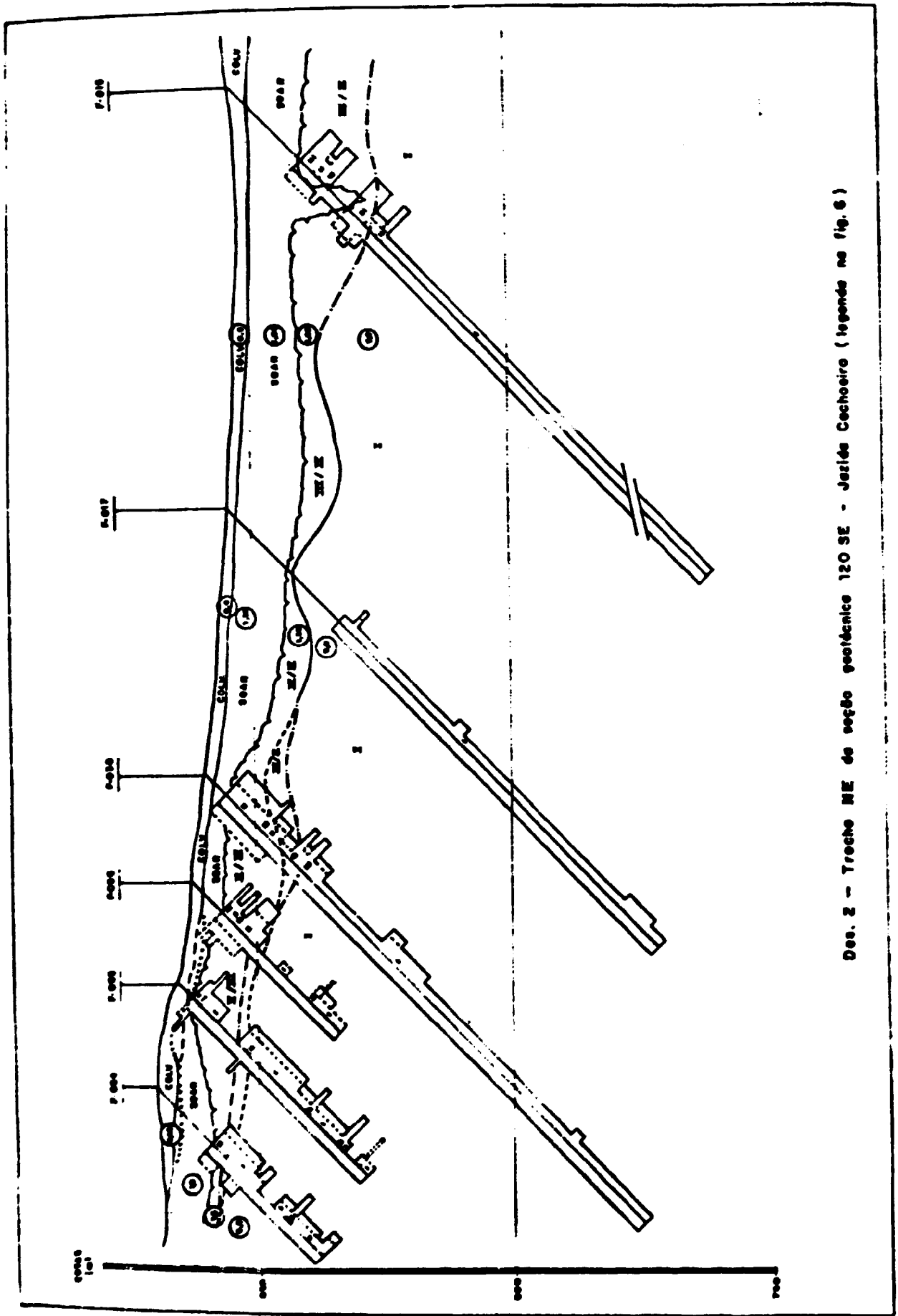
A partir da seção apresentada no Desenho nº 2, que representa o trecho NE da seção 120 SE, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- O estrato sísmico correspondente a coluvião (velocidades variando de 0,4 a 0,5 km/s) foi facilmente correlacionado aos dados obtidos nas sondagens mecânicas.
- As porções do maciço com velocidades variando na faixa 1,35 a 1,85 km/s, englobam solo de alteração e rocha classe III e II. Para o traçado do topo rochoso o critério principal foi a análise dos dados de sondagem. Onde não há dados de sondagem a separação foi qualitativa, integrando-se valores de velocidade com espessura do estrato sísmico. Isto pode ser observado na zona entre os furos 38 e 15.
- O estrato sísmico com velocidade de 5 km/s é correlacionável com a classe de rocha I, como pode ser observado na seção. Isto serviu como critério para o traçado da interface correspondente ao topo da classe I, nos locais onde não há informações de sondagem.

#### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos mostram que uma boa integração entre dados sísmicos e geotécnicos, acuram os critérios para o traçado dos diferentes estratos, na caracterização geotécnica do maciço.






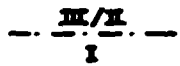
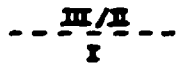

Estas correlações podem ser ainda mais aprimoradas, na medida em que aumente a experiência de aplicação integrada de dados sísmicos, na elaboração de seções geotécnicas.



Des. 2 - Trecho NE de seção geotécnica 120 SE - Jezida Cechoeira (legenda no fig. 6.)



## LEGENDA

-  Superfície natural
-  Interface coluvião e solo de alteração por dados de sondagem
-  Coincidência de interfaces obtidas por dados de sondagem e por sísmica de refração
-  Interface coluvião e solo de alteração por dados de refração sísmica
-  Topo rochoso
-  Interface entre classes de maciço rochoso
-  Interface sísmica entre classes de maciço rochoso
-  Velocidade de ondas sísmicas em km/s
- COLV.** Coluvião
- SOAR.** Solo de alteração

Escala aproximada 1:960 (EV = EH)

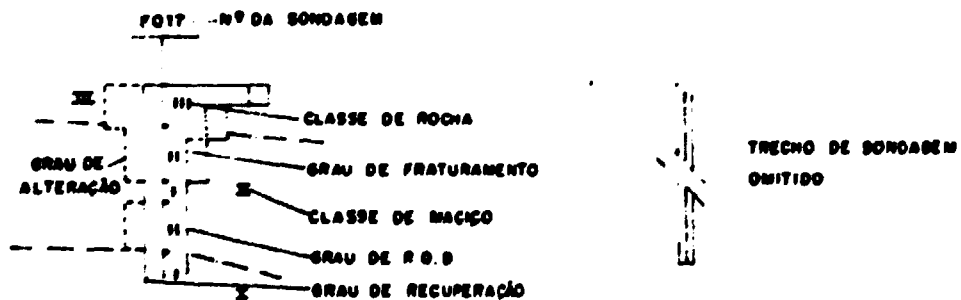


Fig. 6 - Legenda do desenho 2

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às Empresas Nucleares Brasileiras S.A. - NUCLEBRÁS, pela autorização para a publicação desse trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOTTURA, J.A.; ALBUQUERQUE FQ, S.L.; OJIMA, L.M. - no prelo - Caracterização hidrogeológica do maciço rochoso no local da Jazida Cachoeira - Caetité-BA (a ser publicado no CONGRESSO BRASILEIRO de GEOLOGIA de ENGENHARIA, 4, Belo Horizonte, 1984).
- CANTOS, F.J. - 1974 - Tratado de geofísica aplicada. Madri. 520 p., il.
- COSTANZO Jr., J. - 1982 - Síntese metodológica dos estudos geológico-geotécnicos aplicados ao projeto de taludes de mineração. São Carlos. 151 p. (tese de mestrado apres. Escola de Engenharia de São Carlos).
- DOBRIN, M.B. - 1960 - Introduction to geophysical prospecting. New York, McGraw Hill Book Co. Inc. v. 1, il.
- FIALHO, R.L. - 1979 - Método de prospecção sísmica em geologia de engenharia. A importância da onda de corte. Lisboa. 240 p. (tese para especialista do Laboratório de Engenharia Civil).
- GURVICH, I. - 1972 - Seismic prospecting. Moscow, Mir Publishers. v. 1. 464 p., il.
- HAMZA, V.M. & COSTANZO Jr., J. - no prelo - Estudos de geotermia no maciço rochoso do local da Jazida Cachoeira - Caetité-BA (a ser publicado no CONGRESSO BRASILEIRO de GEOLOGIA de ENGENHARIA, 4, Belo Horizonte, 1984).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. - 1983 - Estudos geológicos, geotécnicos e geomecânicos para projetos de implantação do Complexo Minerio-Industrial nas Jazidas Uraníferas de Lagoa Real - Jazida Cachoeira, município de Caetité-BA. São Paulo (IPT Relatório nº 18.106).
- TOGNON, A.A. & PEREIRA Jr., G.G. - no prelo - Elaboração de perfis de sondagens rotativas por meio de computação gráfica (a ser publicado no CONGRESSO BRASILEIRO de GEOLOGIA de ENGENHARIA, 4, Belo Horizonte, 1984).