PROCESSAMENTO INTERATIVO DE SÍSMICA POR REFRAÇÃO E SUA APLICAÇÃO AO ESTUDO DE EIXOS DE BARRAGENS

OLIVAR A. L. DE LIMA*

ABSTRACT INTERACTIVE PROCESSING OF SEISMIC REFRACTION AND ITS APPLICATION TO THE STUDY OF DAM AXIS Seismic refraction investigations were extensively used for geotechnical evaluation of earth dam sites in the Jacuípe river valley, São José district (BA). The results were processed and interpreted using an integrated software, developed in Basic for PC-compatible microcomputers. This system combines the conventional velocity and time-intercept analysis with the operational advantages of the Generalized Reciprocal Method-GRM, for the interpretation of in-line refraction profiles consisting of forward and reversed shotpoints. Through this procedure, it was possible to map the general underground configuration of the bedrock topography and to infer its geotechnical conditions, along three geological traverses normal to the river valley. The P-wave velocity in the migmatitic bedrock changes from 3,000 to 7,400 m/s, being lower within the more densely fractured and altered zones. The soil and/or colluvium layer has velocities between 500-1,800 m/s, depending also on coesion and water saturation conditions. These results, supported by drilling data, attest the performance of the technique and were useful to select the site for assessing the São José dam.

RESUMO Pesquisas com refração sísmica foram usadas extensivamente na avaliação geotécnica de locais de barragens de terra no vale do rio Jacuípe, distrito de São José (BA). Os resultados foram processados e interpretados com "software" integrado, desenvolvido em "Basic" para microcomputador PC-compatível. Este sistema combina o método das velocidades e tempos de intersecção com as vantagens operacionais do método recíproco generalizado, na interpretação de perfis de refração sísmica com pontos de tiro diretos e reversos. Com este procedimento, foi possível mapear a configuração geral do topo rochoso e inferir suas condições geotécnicas, ao longo de três seções geológicas perpendiculares ao vale do rio. A velocidade das ondas P no embasamento migmatítico varia de 3000 a 7400 m/s, sendo mais baixas nas zonas mais intensamente fraturadas e alteradas. A camada de solo e/ou colúvio tem velocidades entre 500 e 1800 m/s, dependendo ainda das condições de coesão e saturações. Estes resultados, suportados por dados de sondagem, atestam o desempenho desta técnica e foram úteis na seleção do local de implantação da barragem São José.

INTRODUÇÃO O método de refração sísmica é normalmente aplicado em estudos de geologia de subsuperfície relacionados com exploração de petróleo, de água subterrânea e em investigações geotécnicas (Musgrave 1967). Ele tem sido empregado, com grande sucesso, na caracterização do substrato de eixos de barragens (Dutta 1984, Hatherly & Neville 1986), fornecendo informações úteis sobre a distribuição de propriedades físicas das rochas (elasticidade, densidade e porosidade) e sobre suas condições geológicas (composição litológica, grau de intemperismo, fraturamento etc.).

Neste trabalho são discutidos os resultados de um levantamento por refração sísmica executado com o fim de avaliar a configuração topográfica e as condições geotécnicas do substrato cristalino ao longo de três eixos favoráveis à implantação de barragens no vale do Rio Jacuípe (BA). O trabalho, em sua forma original, foi apresentado em Relatório Técnico à Companhia de Engenharia Rural da Bahia (CERB) como parte de um programa de cooperação entre o Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica da UFBA (PPPG/UFBA) e aquela empresa (Lima 1981). Na versão atual, revisada e ampliada, é dada uma ênfase especial à sistemática utilizada no processamento e na interpretação dos dados sísmicos, que é direcionada para uso em microcomputadores.

Os procedimentos utilizados incluem a edição e a correção dos dados das linhas sísmicas e a interpretação quantitativa dos perfis, empregando o método das velocidades e tempos de intersecção e/ou método recíproco generalizado (Dobrin 1976, Palmer 1980). O trabalho inclui uma breve revisão da teoria desses métodos assim como uma análise dos algoritmos e da estrutura usada no processamento. Além disso, apresenta uma

análise comparativa dos resultados obtidos com esses dois procedimentos de interpretação, enfatizando as vantagens e limitações de cada um deles, em função do padrão de arranjo de geofones e tiros utilizados na aquisição dos dados. Os modelos geofísicos obtidos, comparados às informações de perfurações, confirmam a adequabilidade do método e serviram de apoio na escolha do sítio da barragem de São José.

GEOLOGIA REGIONAL E PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS

A área estudada situa-se na divisa dos municípios de Várzea do Poço e Mairi, próxima à localidade de São José do Jacuípe (Fig. 1). Geomorfologicamente, é caracterizada por um conjunto de morros alongados e sulcados na direção NW, com elevações em torno de 40-70 m acima do vale do rio.

As rochas do escudo cristalino que afloram esporadicamente ao longo do vale do rio constituem um complexo migmatítico do Arqueano/Eoproterozóico do Cráton do São Francisco (Mascarenhas & Sá 1982). São constituídas por alternâncias de zonas de gnaisses graníticos com granulitos básicos (chamokitos) e faixas anfibolíticas que chegam a atingir algumas dezenas de metros de espessura. Essas unidades litológicas dispõem-se como camadas ou lentes subverticais com direção N20W, em conformidade com a orientação geral da foliação metamórfica. Todo esse substrato é seccionado por falhas e megafaturas formando dois conjuntos quase ortogonais, nas direções principais NNW e ENE. Na escala de afloramentos, essas direções também correspondem às de maior frequência de fraturamentos. As zonas de composição granítica, mais resistentes ao intemperismo, são as mais comumente aflorantes no vale e em suas vertentes.

* PPPG/UFBA, Instituto de Geociências. Rua Caetano Moura, 123, Federação, CEP 40210, Salvador, Bahia, Brasil

Figura 1 – Mapa topográfico da área estudada, contendo a indicação das linhas do levantamento sísmico

Figure 1 – Topographic map with seismic refraction surveys

No levantamento sísmico de campo utilizou-se a técnica da perfilagem em linha (Dobrin 1976), na qual pontos de tiros e geofones equiespaçados são alinhados numa reta. Em geral, cada expansão linear consistiu em 24 geofones separados 5 m entre si, com pontos de tiros a 2,5 m e a 25 m de cada extremidades da linha, e um no centro da expansão. O equipamento utilizado, o sismógrafo Abem-Trio modelo 5352, opera com até 24 geofones de frequência natural igual a 4,0 Hz, com o registro dos sinais sendo feito em papel fotográfico especial.

No total, ao longo dos três eixos, foram executadas 14 seções sísmicas, a maioria orientada na direção do curso do rio. Tal orientação, transversal à estrutura geológica regional, possui a vantagem adicional de ser também a de menor variação topográfica, na extensão coberta por uma linha sísmica (Fig. 1). Não obstante, todos os perfis foram acuradamente nivelados nas estações de geofones de modo a se obter o controle topográfico das linhas levantadas. Como fontes sísmicas foram usadas cargas moldadas de explosivo Britaseis soterradas de 0,7 a 1,2 m de profundidade.

Em geral, para o arranjo utilizado de fontes e geofones, os registros sísmicos apresentam ótima qualidade, não havendo dificuldade em identificar as primeiras chegadas das ondas elásticas produzidas nas explosões e as leituras de tempo podem ser determinadas com até 0,5 m de precisão.

PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE REFRAÇÃO As técnicas de processamento e interpretação utilizadas neste trabalho foram desenvolvidas e/ou adaptadas com o objetivo de obter máximo proveito da informação disponível em levantamento de perfis sísmicos por refração.

O passo inicial no processamento iterativo, após a edição dos dados sísmicos, envolve a correção dos efeitos da topografia das estações de geofones e pontos de tiros nos tempos de percurso das ondas primárias. Para isso, utilizou-se o procedimento de reduzir os dados observados para uma superfície de referência plana de inclinação uniforme, definida no perfil pela reta de melhor ajuste topográfico, no sentido dos mínimos quadráticos. Isso significa colocar geofones e

pontos de tiros numa mesma superfície situada acima do primeiro refrator, usando a mínima transformação dos dados originais. O procedimento utiliza ainda o conhecimento das velocidades sísmicas na camada superficial (V_0) e no refrator subjacente (V_1), normalmente determinadas em levantamentos especiais obtidos com pequena separação de geofones. Essa correção de topografia é realizada subtraindo ou adicionando aos tempos observados o fator.

$$C_j = (e_i - h_i + E_j - d_j) \frac{\sqrt{(V_1^2 - V_0^2)}}{V_0 V_1} \quad (1)$$

em que e_i e d_j representam as elevações do terreno e da reta ajustada na posição do tiro; h_i , a profundidade do tiro i ; e E_j e d_j , as elevações do terreno e da reta ajustada na posição do j -ésimo geofone, respectivamente. A correção segundo esse procedimento é efetuada por um programa do sistema denominado Syscor.

Nas análises de velocidades nos refratores utilizou-se também um procedimento de mínimos quadráticos, numa forma de parametrização por segmentos lineares, conforme proposto por Gelchinsky & Shtivelman (1983). O procedimento envolve, de partida, o ajuste linear dos primeiros m pontos de um gráfico tempo-distância, pelo qual são obtidos a inclinação $\bar{P}_m$ e o intercepto $\bar{t}_m$ da reta e suas respectivas variâncias, $\sigma(\bar{P}_m)$ e $\sigma(\bar{t}_m)$. Em seguida, testa-se se o ponto seguinte de índice $m + 1$ faz ou não parte desse conjunto pela condição

$$\sigma(\bar{t}_{m+1}) \leq \sigma(\bar{t}_m) \text{ e } \sigma(\bar{P}_{m+1}) \leq \sigma(\bar{P}_m) \quad (2)$$

em que as variâncias $\sigma(\bar{t}_{m+1})$ e $\sigma(\bar{P}_{m+1})$ são agora da amostra $m + 1$ pontos. A relação (2) não será satisfeita quando o ponto de índice $m + 1$ constitui uma flutuação estatística ou, efetivamente, não pertence àquela população em questão. A distinção entre essas duas condições é feita por

um teste adicional similar à relação (2), só que a amostragem de $m + 1$ pontos passa a incluir o ponto seguinte de ordem $m + 2$ em lugar do ponto $m + 1$. O sistema testa, portanto, a possibilidade de apenas duas flutuações aleatórias. A extensão inicial de amostragem em cada intervalo linear é tomada pelos três primeiros pontos dos intervalos, sempre que o erro relativo na estimativa de $\bar{P}$ for inferior a 10%. Os programas Sysvel e Sysgrm utilizam esse procedimento no ajustamento das retas de velocidades nos refratores.

Figura 2 - Estrutura e trajetórias de raios num modelo de n-camadas usadas nos métodos dos tempos de interseção e recíproco generalizado

Figure 2 - Ray path and structure for a n-layer model in the intercept time and generalized reciprocal method

O MÉTODO DOS TEMPOS DE INTERSEÇÃO A análise do problema da refração sísmica em estruturas contendo n -interfaces refratoras planas e mergulhantes foi formulada, de um modo conveniente para computação, por Mota (1954), usando a teoria do raio. Na figura 2 têm-se ilustrada a geometria, o percurso de alguns raios refratados e a notação utilizada na descrição do problema geral de n -interfaces refratoras, conforme descreveu Mota (1954) e revisou Guimarães (1983). Os ângulos de mergulho das interfaces (θ_j) são considerados positivos quando marcados acima da horizontal, no sentido anti-horário. A espessura da j -ésima camada, medida sob o ponto de penetração do raio criticamente refratado na interface n , é designada por $z_{i,j}$ sob o tiro direto A, e por $y_{i,j}$ sob o tiro reverso B. Os ângulos de incidência na base da camada j , correspondentes à refração crítica no n -ésimo refrator, são designados por $\alpha_{j,n}$ e $\beta_{j,n}$, respectivamente para os tiros direto e reverso. Para o esquema representado, os interceptos de tempo das retas dos refratores nas posições dos pontos de tiros ($T_{A,j}$ e $T_{B,j}$) são dados pelo seguinte sistema de equações recursivas

$$T_{A,j} = \sum_{i=0}^{j-1} \frac{z_{i,j} [1 + \cos(\alpha_{i,j} + \beta_{i,j})]}{V_i \cos \alpha_{i,j}}, j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$T_{B,j} = \sum_{i=0}^{j-1} \frac{y_{i,j} [1 + \cos(\alpha_{i,j} + \beta_{i,j})]}{V_i \cos \beta_{i,j}}, j = 1, \dots, n \quad (4)$$

em que, V_i é a velocidade sísmica em cada camada. Os ângulos

de incidência na base da camada superficial, correspondentes às refrações críticas nas diferentes interfaces, são dados por

$$\alpha_{0,j} = \arcsen \left(\frac{V_0}{V_{jA}} \right) - \theta_1 \quad (5a)$$

$$\beta_{0,j} = \arcsen \left(\frac{V_0}{V_{jB}} \right) + \theta_1 \quad (5b)$$

com $j = 1, \dots, n$ e V_{jA} e V_{jB} como as velocidades aparentes para os tiros a favor e contra o mergulho das camadas. Nas interfaces subjacentes, de índices $j = 3, \dots, n$, as refrações críticas ocorrem para ângulos incidentes na base da camada i ($i = 1, \dots, j-2$) dados por

$$\alpha_{i,j} = \arcsen \left(\frac{V_i \sin \alpha_{i-1,j}}{V_{i-1}} \right) - \theta_{i+1} + \theta_i \quad (6a)$$

$$\beta_{i,j} = \arcsen \left(\frac{V_i \sin \beta_{i-1,j}}{V_{i-1}} \right) + \theta_{i+1} - \theta_i \quad (6b)$$

Em particular, os ângulos de incidência na interface j que resultam em refrações críticas ao longo de sua base são

$$\alpha_{j-1,j} = \beta_{j-1,j} = (1/2) \left[\arcsen \left(\frac{V_{j-1} \sin \alpha_{j-2,j}}{V_{j-2}} \right) + \arcsen \left(\frac{V_{j-1} \sin \beta_{j-2,j}}{V_{j-2}} \right) \right] \quad (7)$$

O mergulho de cada interface é calculado usando as relações

$$\theta_1 = (1/2) \left[\arcsen \left(\frac{V_0}{V_{1A}} \right) - \arcsen \left(\frac{V_0}{V_{1B}} \right) \right] \quad (8)$$

$$\theta_j = (1/2) \left[\arcsen \left(\frac{V_{j-1} \sin \alpha_{j-2,j}}{V_{j-2}} \right) - \arcsen \left(\frac{V_{j-1} \sin \beta_{j-2,j}}{V_{j-2}} \right) + \theta_{j-1} \right] \quad (9)$$

para $j = 2, \dots, n$. Na equação (8), V_{1A} e V_{1B} são as velocidades aparentes no primeiro refrator.

Nas relações (3) e (4), fatores de correção das espessuras dos refratores sob os pontos de incidência de raios criticamente refratados na camada j são dados por

$$z_{0,j} = \frac{z_{0,1}}{\cos(\theta_j - \theta_1)}, y_{0,j} = \frac{y_{0,1}}{\cos(\theta_j - \theta_1)} \quad (10)$$

$$z_{i,j} = \frac{z_{i,j-1}}{\cos(\theta_j - \theta_{j-1})}, y_{i,j} = \frac{y_{i,j-1}}{\cos(\theta_j - \theta_{j-1})} \quad (11)$$

O sistema de equações de (3) a (11) constitui a base do programa denominado Sysdip para cálculo das espessuras e

mergulhos para qualquer número de refratores planos uniformemente inclinados.

O MÉTODO RECÍPROCO GENERALIZADO

O método recíproco generalizado (GRM), conforme propôs Palmer (1980, 1981) para a interpretação de perfis sísmicos em linha sobre estruturas irregulares e com variações laterais de velocidades, baseia-se na existência de uma distância de observação ótima para tiros diretos e reversos, na qual os raios sísmicos atingem os geofones emergindo aproximadamente do mesmo ponto do refrator. Esse método utiliza os tempos de propagação dos pontos de tiros extremos de uma expansão linear, a dois geofones quaisquer separados de uma distância XY (tempos referidos como t_{AX} e t_{BY}) e o tempo recíproco (tempo de percurso entre os pontos de tiros), na construção de duas funções denominadas análise de velocidade e tempo-profundidade. Na condição de distância ótima, essas duas funções são, entre todas, as mais ricas de detalhes, pois o refrator precisa ser plano apenas ao longo de um pequeno trecho subsuperficial (Palmer, 1980).

Usando os símbolos indicados na parte superior da figura 2, a função análise de velocidade é definida como

$$t_v = (t_{AY} - t_{BX} + t_R)/2 \quad (12)$$

em que t_R é o tempo recíproco requerido para uma onda P se propagar de um ponto de tiro ao outro. O valor de t_v assim calculado é atribuído ao ponto G , intermediário dos pontos X e Y . Se o tempo t_{EX} não diferir muito de t_{FY} , t_v será equivalente ao tempo de percurso de A até o refrator, mais o tempo de percurso ao longo do refrator até o ponto H , situado entre os pontos de emergência dos raios direto e reverso. Para tempos maiores que t_{AC} , a inclinação de t_v representa o inverso da velocidade aparente no refrator, entre os pontos E e F . Na separação XY ótima, os raios EX e FY praticamente emergem do mesmo ponto no refrator e a inclinação de t_v é aproximadamente igual ao inverso da velocidade no refrator dividido pelo co-seno do mergulho (Palmer 1980). Por uma série de testes qualitativos, é possível selecionar um valor ótimo de XY no qual a velocidade no refrator é determinada pela inclinação da reta ou, das retas, no caso de variação lateral no refrator.

A outra função usada na interpretação GRM é o tempo-profundidade relativo à posição G , definida como

$$t_G = (t_{AY} + t_{BX} - t_R - XY/V_m)/2 \quad (13)$$

em que V_m é a velocidade média no refrator, determinada a partir da função análise de velocidade (Palmer 1980, Hatherly & Neville 1986). Como se esquematiza na figura 2, t_G representa o tempo para o percurso da energia ao longo do raio EX (ou FY) menos o tempo associado à projeção GX (ou GY) sobre a superfície refratora. Admitindo que o refrator seja plano entre E e F , a lei de Snell permite mostrar que t_G corresponde ao tempo de percurso de um raio que emerge perpendicularmente ao refrator e atinge o ponto G na superfície.

A distância XY ótima pode ser calculada analiticamente caso se conheçam, de alguma maneira, as velocidades e espessuras das camadas. Pode também ser estimada diretamente dos dados sísmicos corrigidos, computando-se t_v e t_G para um conjunto representativo de valores XY . Pode-se mostrar que o valor ótimo é aquele que produz a função t_v mais regular e suave, e a função t_G com maior grau de detalhamento estrutural (Palmer 1980).

A partir da função t_G e da determinação da velocidade média no pacote acima do refrator de interesse, é possível calcular a profundidade até seu topo sob cada posição G . Essa profundidade é computada pela equação.

$$H_G = t_G V / \cos i \quad (14)$$

com $i = \arcsen(V/V_m)$ e V a velocidade média no pacote acima do refrator. Essa velocidade, para XY ótimo, em muitas situações pode ser computada como (Palmer 1981)

$$V = \sqrt{\frac{V_m^2 XY}{(XY + 2t_G V_m)}} \quad (15)$$

A profundidade H_G é independente das anomalias de velocidade no pacote superior ao refrator e o fator de conversão de t_G para profundidade é praticamente insensível ao mergulho até ângulos de 20° . O perfil final obtido com essa técnica representa assim uma profundidade mínima na qual o refrator considerado produz a relação tempo/distância observada.

As equações (12) a (15) são os algoritmos do programa denominado Sysgrm, que inclui entre suas características apresentações dos gráficos auxiliares de t_v e t_G usados na interpretação.

FORMAS DE APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O sistema de processamento e interpretação utilizado nesse trabalho consiste em cinco programas escritos em Basic pelo autor e denominados Sysdat, Syscor, Sysvel, Sysdip e Sysgrm, cujas finalidades são armazenar, corrigir, representar e interpretar quantitativamente os dados de levantamentos sísmicos por refração. Esses programas operam em microcomputadores PC-compatíveis, com um mínimo de 64 kb de memória Ram. O sistema usa um menu de acesso no qual a seleção de um programa é feito por seu número de identificação. Cópias desse sistema poderão ser obtidas por solicitação direta ao autor.

Os dados das linhas sísmicas do vale do Rio Jacuipé foram editados e armazenados em arquivos de formato apropriado pelo programa Sysdat; em seguida, reduzidos dos efeitos topográficos e plotados em gráficos tempo-distância, usando-se o programa Syscor. Os dados corrigidos e os gráficos confeccionados podem também ser arquivados em disco para posterior utilização. A figura 3 mostra um exemplo típico da saída gráfica desses programas, onde se observam as modificações introduzidas pelo esquema de correção. As principais melhorias dessa correção são a redução ou eliminação de mudanças de inclinação nas retas de velocidade aparente nos refratores, induzidas por variações no relevo, assim como a redução na dispersão dos pontos em torno dessas retas.

Como procedimentos na interpretação dos perfis adotou-se uma das seguintes alternativas, ou a combinação delas, dependendo das características observadas nos gráficos tempo/distância: 1. os dados relativos a cada ponto de tiro foram multissegmentados e linearmente ajustados para interpretação usando modelos de camadas planas uniformemente inclinadas, no método chamado de tempos de interseção (Dobrin, 1976); e 2. os dados relativos aos pares de pontos de tiros externos às expansões foram combinados na construção de funções auxiliares para descrição de refratores com topografia irregular, usadas no método recíproco generalizado-GRM (Palmer 1980).

As determinações das velocidades aparentes dos refratores pelo Sysvel apresentam duas formas de resultados. Na

Figura 3 - Seção topográfica e gráfico tempo/distância dos dados observados e corrigidos de acordo com o programa Syscor

Figure 3 - Topographic section and time/distance diagram for observed data; corrections made using Syscor program

primeira, o ajuste é processado seguindo a orientação do intérprete quanto à posição provável dos pontos de mudança de inclinação nas curvas tempo/distância. Essa orientação é facilitada por uma apresentação do gráfico tempo/distância de cada ponto de tiro. Na segunda forma, o ajuste é realizado automaticamente usando os testes estatísticos descritos anteriormente. A figura 4 contém um exemplo das informações de saída do Sysvel. O programa Sysdip permite o cálculo das espessuras e dos mergulhos das camadas, usando as velocidades aparentes e os tempos de interseção obtidos do ajustamento com Sysvel.

Figura 4 - Exemplo da saída dos resultados do programa Sysvel

Figure 4 - Output of results from Sysvel program

Na interpretação GRM, deve-se inicialmente identificar numa expansão limitada por pontos de tiros os geofones cujos tempos diretos e reversos resultam de propagações provenientes do mesmo refrator, os quais são usados nos cálculos das funções análise de velocidade e tempo-profundidade. Essa informação é requerida por Sysgrm que, numa etapa intermediária do processamento, esboça gráficos de funções t_v para até sete valores progressivos de XY tomados como múltiplos inteiros da separação de geofones. Após a escolha e a introdução do valor de XY ótimo, o programa calcula a(s) velocidade(s) no refrator, as funções t_G , a velocidade média no pacote sobrejacente (se $XY \neq 0$) e a profundidade ao refrator sob cada posição de geofone. Esses resultados são também apresentados de forma gráfica, podendo ser gravados em disco para posterior recuperação.

A figura 5A ilustra o comportamento da função t_v da linha RJC-5 para vários valores de XY. As curvas sofreram pequenos deslocamentos relativos no tempo em relação a $XY = 0$ apenas para facilitar a visualização. O valor de XY ótimo para essa situação foi selecionado em 5 m, usando a análise visual das funções t_v e t_G , conforme sugere Palmer (1980). A adequação dos valores de XY ótimo foi avaliada por comparação de resultados obtidos com os dois métodos e com dados de uma perfuração. A velocidade aparente no refrator, nesse caso, varia lateralmente entre 3.300 e 7.400 m/s. A figura 5B mostra as funções tempo-profundidade computadas para o mesmo conjunto de valores de XY, assim como o perfil da topografia do refrator calculado pela conversão de t_G no valor de XY ótimo.

Figura 5 - Gráfico de funções análise de velocidade e tempo-profundidade para a linha RJC-5

Figure 5 - Velocity-analysis and time-depth functions diagram for the RJC-5 line

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS O arranjo básico de geofones e tiros utilizado no levantamento foi, em geral, satisfatório para detectar trajetórias refratadas no topo da rocha cristalina sã. De fato, em muitas dessas linhas a refração do substrato representa mais de 70% do comprimento da expansão. A estrutura normalmente observada nos perfis

envolve, pelo menos, quatro meios de velocidades contrastantes: 1. um nível superficial de pequena espessura e baixa velocidade entre 450 e 600 m/s; 2. uma zona intemperizada, ou eluvionar aerada, com velocidade de 1.000 a 1.600 m/s; 3. a rocha cristalina parcialmente alterada e fraturada com velocidades no intervalo de 2.200 a 3.000 m/s, dependendo do grau de alteração; e 4. a rocha sã de maior velocidade (> 3.000 m/s), mas com variações em função da composição litológica e do grau de fraturamento.

Na multissegmentação linear utilizada no método dos tempos de interseção há sempre uma incerteza em distinguir se uma inflexão no gráfico tempo/distância reflete a presença de um refrator em profundidade ou resulta da manifestação de uma variação geológica lateral. No sentido de reduzir essa ambigüidade, foram geralmente aplicadas as seguintes regras de controle envolvendo os tempos de interseção, os tempos recíprocos e o número de refratores, conforme sugerem Ackermann *et al.* (1986):

a. Para tiros simétricos nos extremos de uma expansão procurou-se fazer coincidir graficamente os tempos recíprocos extrapolados relativos a cada refrator. Ao mesmo tempo, em cada tiro tentou-se indentificar o mesmo número de refratores.

b. Nos tiros de mesmo lado da expansão, mas a diferentes

distâncias, o paralelismo entre segmentos foi usado para identificar trajeteto no mesmo refrator enquanto as mudanças de inclinação refletiriam diferentes refratores. Sob condições normais, os pontos críticos de variações de velocidades deslocam-se com a posição do tiro, mas as inflexões devidas a variações geológicas laterais permanecem fixadas. No tiros de maior distância, foram rejeitados os ajustes com velocidades aparentes menores que as observadas no tiros mais próximos.

c. Para os tiros centrais do arranjo, os tempos de interseção dos segmentos correspondentes a cada lado da expansão deveriam ser também praticamente coincidentes.

Quando essas regras foram obedecidas, o perfil sísmico pôde ser satisfatoriamente interpretado usando o método dos tempos de interseção. Todavia, quando as interfaces refratoras se afastaram da condição planar ou apresentaram fortes variações laterais de velocidade, tais regras foram violadas e o método não pôde mais ser aplicado.

A figura 6 contém o gráfico tempo/distância da linha B-B', transversal ao eixo 1 e o modelo geológico resultante de sua interpretação usando parcialmente os dois esquemas de interpretação descritos. Nos dois ramos do perfil estão claramente identificados, por trechos lineares, os quatro níveis geológicos anteriormente definidos. O perfil revela uma estrutura de camadas inclinadas, na qual a profundidade do

RIO JACUIPE - EIXO Nº 1/ LINHA B-B'

Figura 6 - Seção geológica comparativa dos resultados obtidos usando os dois métodos de interpretação para o perfil B-B'

Figure 6 - Geologic section and data obtained from two interpretation methods

substrato de rocha sã varia de 9,0 m no extremo oeste, a 20,5 m no leste, correspondente à parte mais elevada do perfil. A velocidade relativamente constante em torno de 5.400 m/s reflete a homogeneidade litológica e o baixo grau de fraturamento do cristalino nessa zona. A camada intermediária de velocidade entre 2.700 e 3.300 m/s representa o cristalino fraturado, algo mais alterado na parte leste do perfil. O método GRM só pôde ser aplicado ao mapeamento da segunda interface refratora correspondente ao cristalino parcialmente alterado, para a qual seguramente estão representados trajetos criticamente refratados a partir dos tiros extremos das expansões. Verifica-se, na figura 6, uma boa concordância nos resultados obtidos com os dois métodos nesse perfil.

Nas situações geofísicas mais complexas e mais frequentes na área, como as representadas nas figuras 5 e 7, a aproximação planar e o método dos tempos de interseção tornam-se praticamente inaplicáveis. As curvas tempo/distância mostram fortes discontinuidades e inversões de velocidade, incompatíveis com a hipótese de camadas nas quais as velocidades crescem com a profundidade. Para essas situações, todavia, o método GRM permite realizar uma interpretação estrutural adequada da linha, consistente com o conjunto de dados geológicos e geofísicos da área. O perfil interpretado para a linha RJC-7 (Fig. 7) mostra que o substrato possui uma topografia irregular com um desnível de 8 m entre as profundidades de 6,9 a 15,2 m. Há também a presença de uma variação abrupta de velocidade de cerca de 3.500 m/s no lado leste do perfil para 7.400 m/s no lado oeste, refletindo mudança litológica e, certamente, uma variação apreciável no grau de fraturamento da rocha ao longo desse perfil.

CONCLUSÕES A figura 8 resume em perfis as condições geológicas subsuperficiais pelos três eixos considerados no estudo, construídas com base nos dados obtidos nas linhas sísmicas. Confrontados aos dados de perfurações disponíveis, pode-se estimar um limite de erro

Figura 7 – Seção tempo/distância da linha RJC-7 interpretada usando o método GRM

Figure 7 – Time/distance section of RJC-7 line as interpreted using GRM method

Figura 8 – Perfis geológicos transversais aos eixos estudados construídos com base em perfilagens sísmicas

Figure 8 – Transversal geological profiles to the studied axis dams based on seismic profiling

inferior a 15% nas profundidades determinadas sismicamente. A figura revela que, abaixo do solo superficial, a velocidade no manto de alteração, ou colúvio, varia de 1.000 a 1.600 m/s, enquanto no substrato cristalino situa-se no intervalo de 2.700 a 5.400 m/s, dependendo do grau de fraturamento e da alteração por intemperismo. Inferências apoiadas em observações geológicas de superfície e em dados de perfurações indicam que os valores mais elevados correspondem a gnaisses graníticos com pequena densidade de fraturamento. Velocidades sísmicas de até 7.400 m/s foram determinadas em algumas das linhas, como se discutiu. Esses valores, provavelmente, estão associados a faixas de granulitos charnokíticos, muito frequentes na área.

Os resultados da interpretação mostram boa concordância quando as condições do subsolo se ajustam à aproximação de interfaces planas entre os pontos de tiros. Todavia, em função da existência de fortes variações na topografia e na velocidade do substrato, o método GRM mostrou-se mais adequado na

maioria das situações encontradas. Apenas nos casos em que o esquema de levantamento não foi suficiente para cobrir extensões adequadas de refrações do substrato nos dois sentidos de tiros, o método do tempo de interseção foi usado como alternativa isolada de interpretação.

Os dados geofísicos sugerem que a condição geotécnica mais favorável, em termos de profundidade, de coesão e rigidez do substrato, como se infere da distribuição das velocidades sísmicas, corresponde à seção do eixo 1. As outras duas alternativas estudadas mostram maiores espessuras de rocha alterada nas partes topográficas mais elevadas ou a existência de zonas de fraturamento inferidas de menores valores de velocidade no substrato.

Agradecimentos Aos colegas Abílio C.S.P. Bittencourt e Hedison K. Sato, pela leitura e revisão do manuscrito e, igualmente, à CERB e ao PPPG/UFBA, que facilitaram a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERMANN, H.D.; PANKRATZ, L.W.; DANSEREAU, D. 1986. Resolution of ambiguities of seismic refraction traveltimes curves. *Geophysics*, 51(2):223-235.
- DOBRIN, M.B. 1976. *Introduction to geophysical prospecting*. 3 ed. New York, McGraw-Hill.
- DUTTA, N.P. 1984. Seismic refraction method to study the foundation rock of a dam. *Geophys. Prosp.* 32(10):1103-1110.
- GELCHINSKY, B. & SHTIVELMAN, V. 1980. Automatic pincking of first arrivals and parametrization of traveltimes curves. *Geophys. Prosp.*, 31(7):915-928.
- GUIMARÃES, P.P.D. 1983. *Métodos sísmicos de refração e eletromagnético aplicados ao estudo de um paleocanal da Ilha do Marajó, Pará Belém, UFPA*. 90p. (Tese de Mestrado, UFPA).
- HATHERLY, P.J. & NEVILLE, M.J. 1986. Experience with the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation for shallow engineering site investigation. *Geophysics*, 51(2):255-265.
- LIMA, O.A.L. 1981. Determinação de espessura do manto de alteração sobre rochas cristalinas no vale do rio Jacuípe, usando o método de refração sísmica. Salvador, PPPG/UFBA, (Rel. Téc.), 24 p.
- MASCARENHAS, J.F. & SÁ, J.H.S. 1982. Geological and metallogenic patterns in the Archean and Early Proterozoic of Bahia State, Eastern Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, 12(1-3):193-214.
- MOTA, L. 1954. Determination of dips and depths of geological layers by the seismic refraction method. *Geophysics*, 19(2):242-254.
- MUSGRAVE, A.W. (ed.) 1967. *Seismic refraction prospecting*. Tulsa Soc. Explor. Geophys.
- PALMER, D. 1980. The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. In: BURKE, K.B.S. ed. Tulsa, Soc. Explor. Geophys.
- PALMER, D. 1981. An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. *Geophysics*, 46(11):1508-1518.

MANUSCRITO 584

Recebido em 15 de dezembro de 1988

Revisão do autor em 16 de março de 1989

Revisão aceita em 17 de março de 1989

... um equívoco bastante sério é o de passar a falsa noção de que a ciência se faz através de uma sequência padronizada de procedimentos e etapas sucessivas: observar, coletar dados, problematizar, elaborar hipóteses, realizar experimentos de verificação e, finalmente, alcançar a almejada conclusão certa e verdadeira. Isto deve-se à confusão entre o método didático da redescoberta e o chamado método científico. Enquanto o primeiro representa um plano preestabelecido para conduzir o estudante a redescobrir o conhecimento já existente, o segundo representa uma incursão ao desconhecido, onde usualmente o cientista utiliza ampla variedade de procedimentos técnicos e intelectuais.

Fracalanza, H. et al., 1987, *O ensino de ciências no primeiro grau*. São Paulo, Atual.