

# CORREÇÕES ESTÁTICAS PARA LEVANTAMENTOS 3D

## STATIC CORRECTIONS IN 3-D SURVEYS

Wander Nogueira de Amorim<sup>1</sup> e Wietze Eckhardt<sup>2</sup>

**RESUMO** - Um dos principais problemas encontrados no processamento de dados sísmicos terrestres é, sem dúvida, a determinação precisa das correções estáticas que devem ser aplicadas aos dados, para eliminar os efeitos da topografia e da camada de intemperismo nos tempos de chegada dos sinais sísmicos. Dentre os diversos métodos propostos para solução desse problema, o método de tomografia de refração sísmica, apresentado por Amorim (1985), constitui um processo simples e robusto de cálculo das correções estáticas utilizando os tempos das primeiras quebras dos sismogramas de reflexão, que vem apresentando bons resultados, tanto para linhas retas quanto para linhas tortuosas. A extensão deste método para qualquer geometria de aquisição (em especial 3D) foi realizada, e testes com dados sintéticos atestam a precisão dos resultados, levando à expectativa de que as correções calculadas por este processo poderão substituir, com vantagens de custos e de precisão, os levantamentos de refração rasa, realizados para este fim. Inversões com dados reais foram realizadas em diversas linhas da PETROBRÁS, e serão apresentados resultados do 3D de Leste do Urucu (Bacia Amazônica), de uma linha tortuosa com afastamentos laterais de tiros (26-RL-1492) da Bacia do Recôncavo, e de uma linha 2D (60-RL-165). Os resultados alcançados mostram melhoria na qualidade das seções sísmicas finais tanto em linhas 2D quanto em dados 3D.

(Originais recebidos em 25.01.93).

**ABSTRACT** - One of the main problems encountered in the processing of land seismic data is without doubt the precise determination of the static corrections that have to be applied to the data in order to eliminate the effects of elevation and of the weathered layer on the arrival times of seismic signals. Among the methods proposed to solve this problem, the seismic refraction tomography technique, presented by Amorim (1985), constitutes a simple, sound process. Relying on first-break times on reflection records, the method provides good results for both straight as well as crooked lines. The method was extended to other acquisition geometries (especially 3-D), and tests with synthetic data confirmed the accuracy of results. It is expected that corrections calculated by this process can substitute shallow refraction seismic measurements, with obvious advantages in cost and precision. Inversions with real data were performed with several PETROBRÁS lines. This paper presents the results of a 3-D survey on the Leste do Urucu field in the Amazon Basin; a crooked line with lateral offset for the shots (26-RL-1492) in the Recôncavo Basin; and a normal 2-D line (60-RL-165) in the Amazon Basin. Final results show improvement in the quality of the final seismic sections for both the 2-D and 3-D data.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

### 1 – INTRODUÇÃO

A presença de um pacote de material rochoso intemperizado, denominado "Zona de Baixa Velocidade" (ZBV), de espessura variável e, em geral, lateralmente heterogêneo, na superfície da crosta terrestre, provoca grandes distorções nas ondas elásticas dos levantamentos sísmicos terrestres.

As variações laterais de espessura e velocidade da ZBV, aliadas às variações topográficas, provocam deslocamentos nos tempos de chegada das reflexões sísmicas, causando distorções nas curvas hiperbólicas desses even-

tos. Como todas as etapas de processamento posteriores assumem que as reflexões são representadas por braços de hipérbolas não distorcidas, as distorções causadas pela ZBV e topografia devem ser corrigidas, simulando-se um levantamento com fontes e receptores posicionados sobre uma superfície plana-horizonta, sem os efeitos causados por essas irregularidades superficiais.

Estas correções, denominadas correções estáticas, só serão precisas se a espessura e velocidade da ZBV e a velocidade do meio subjacente forem determinadas com precisão em cada ponto ocupado por fonte e/ou receptor. Na figura 1, mostra-se o exemplo de um sismograma de reflexão corrigido com estáticas de boa e má qualidades.

1 - Originalmente no Setor de Geofísica (SEGEF), Superintendência de Exploração e Produção (SUPEP), Centro de Pesquisas (CENPES), Cidade Universitária, Quadra 7, Ilha do Fundão, CEP 21949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Atualmente no Setor Regional de Interpretação (SERINT), Divisão Regional de Exploração e Exploração (DIREX), Distrito de Exploração da Bacia Potiguar (DEBAR), Av. Interventor Mário Câmara, 2783, Nazaré, CEP 59074-600, Natal, RN, Brasil.  
2 - Consultor no Setor de Geofísica (SEGEF), Superintendência de Exploração e Produção (SUPEP), Centro de Pesquisas (CENPES), Cidade Universitária, Quadra 7, Ilha do Fundão, CEP 21949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Na figura 1a, as estáticas aplicadas são de pouca precisão, e na 1b são de precisão boa. Observe que as curvas hiperbólicas das reflexões são muito mais facilmente identificadas na figura 1b, pois se apresentam menos distorcidas, conseqüentemente, os aplicativos de processamento subseqüentes tenderão a ser mais efetivos nestes dados, resultando em qualidade final superior.

Desde os primórdios dos levantamentos sísmicos de reflexão para prospecção de petróleo, as correções estáticas têm-se constituído num fator limitante da qualidade das seções sísmicas terrestres.

O método mais preciso de determinação das espessuras e velocidade das diversas camadas que compõem a ZBV, e da velocidade da camada subjacente é o *up-hole*. Assim, as correções estáticas obtidas por este processo são também as de maior precisão que se pode obter. Porém, como este é um levantamento de custos elevados, ele só é empregado para obter informações em pontos esparsos do levantamento sísmico e, como são necessárias informações em todos os pontos do levantamento, ocupados por fontes e/ou receptores, uma série de interpolações e extrapolações de dados devem ser realizadas, podendo causar perda de precisão das estáticas, pois as características da ZBV são, em geral, tão variáveis que nenhum método de interpolação é capaz de reproduzir seu comportamento entre dois pontos conhecidos.

Outro método empregado na determinação das características da ZBV é o de refração rasa. Embora fornecendo informações de boa precisão a respeito deste pacote superficial, ele apresenta as mesmas restrições do método de *up-hole* e tem, também, sido substituído por outros métodos precisos e menos restritivos.

Além da esparsidade entre os perfis de refração rasa, deve-se salientar que é comum a prática de definição de um lanço fixo para todo um prospecto (muitas vezes limitado pelo equipamento disponível), que pode resultar em perda de precisão dos resultados, pois a profundidade máxima de mapeamento por este método é função do *offset* máximo utilizado e, quando se tem os parâmetros predefinidos, as grandes variações de espessura da ZBV podem levar a situações onde o lanço utilizado não é capaz de mapear todo o pacote da ZBV, ficando a correção subestimada.

A interpretação dos perfis de refração rasa fornece as velocidades e espessuras das diversas camadas que compõem a ZBV e a velocidade da camada subjacente. Diversos métodos de interpretação desses perfis foram desenvolvidos e descritos na literatura geofísica. Dentre eles, merecem destaque, pelo nível de utilização, os métodos *intercept-times*, TABC e GRM (*Generalized Reciprocal Method*), todos com boas soluções para levantamentos 2D.

Santos *et al.* (1990) apresentam o problema de correções estáticas e descrevem os diversos métodos de cálculo, constituindo-se em boa referência para os interessados no assunto.

Uma vez que os dados de reflexão sísmicas são gerados a partir da emissão de energia próximos à superfície, os sinais captados nos geofones certamente contêm as informações pertinentes à ZBV. Isto significa que as informações necessárias para o cálculo das correções

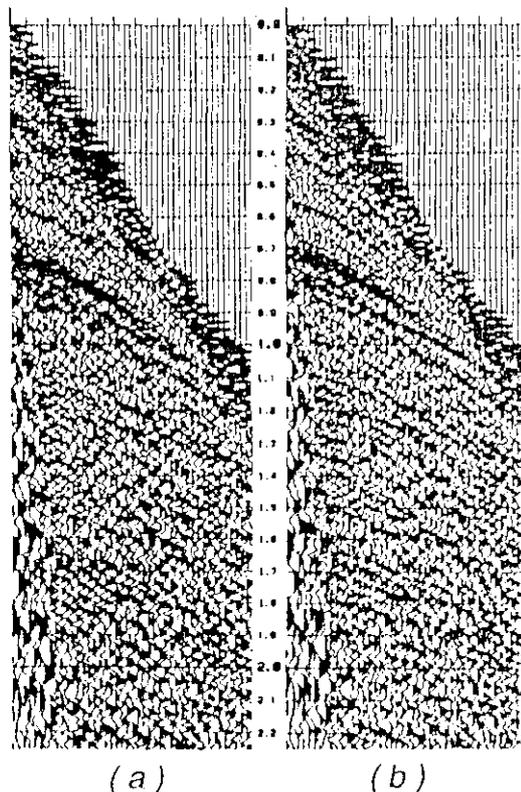


Fig. 1 - Sismograma de reflexão com correções estáticas de refração rasa (a) e de tomografia de refração sísmica (b).

Fig. 1 - Reflection record with static corrections calculated by means of (a) shallow refraction and (b) seismic refraction tomography.

estáticas podem ser extraídos dos próprios dados de reflexão, resultando em diminuição dos custos de aquisição (eliminação de levantamentos especiais: *up-hole* ou refração rasa) e aumento de precisão, pois as informações são contínuas ao longo de todo o levantamento, não sendo necessárias interpolações e extrapolações que introduzem os erros comuns nos levantamentos não-contínuos.

Como extrair informações dos dados de reflexão sísmicas?

A resposta a esta pergunta, perseguida há mais de uma década, parece estar longe de ser alcançada. Ela deve passar pela modelagem elástica a partir de um modelo matemático inicial, até atingir um modelo final cuja resposta coincida com os sismogramas de campo e representará, sem dúvidas, um grande avanço no tratamento dos dados sísmicos de reflexão terrestre.

Por ora, as tentativas têm se restringido apenas à parte cinemática (tempo de trânsito) de eventos presentes nos sismogramas de reflexão.

As ondas refratadas na base da ZBV parecem ser os sinais mais interessantes para a obtenção das características desse meio, pois propagam-se predominantemente nesta zona, não sofrendo interferência das camadas mais profundas.

Além disso, esses sinais são, em geral, os primeiros eventos captados pelos geofones (primeiras quebras), de fácil identificação e muitas vezes passíveis de ser determinados automaticamente por processos computacionais.

Diversos métodos de interpretação de refração rasa foram reformulados para tratamento dos tempos das primeiras quebras dos sismogramas de reflexão e cálculo das correções estáticas, e sua eficiência demonstrada em uma série de trabalhos publicados na literatura geofísica. Outros foram desenvolvidos especialmente para obtenção das correções a partir dos tempos das primeiras quebras. Os resultados mostram o ganho de qualidade esperado, visto que estas primeiras quebras representam refrações rasas com levantamento contínuo ao longo das linhas 2D.

Amorim (1985) apresenta um método de determinação das correções estáticas, através dos tempos, das primeiras quebras dos sismogramas de reflexão, a partir da construção de um modelo matemático compatível, no sentido dos mínimos quadrados, com os tempos das primeiras quebras. Este método, denominado Tomografia de Refração Sísmica, consiste em modificar iterativamente um modelo inicial, até que as curvas tempo-distância das ondas refratadas na base do modelo coincidam com aquelas interpretadas nos sismogramas de reflexão. A partir do modelo final, calculam-se as correções estáticas.

Amorim *et al.* (1987) faz uma descrição detalhada do método e analisa resultados da sua aplicação em dados de diversas bacias brasileiras.

Em virtude da crescente necessidade de levantamentos terrestres 3D e da baixa precisão das estáticas de reflexão rasa em regiões de ZBV heterogênea, o método de tomografia, originalmente desenvolvido para geometrias de aquisição 2D (linhas retas e tortuosas), foi reformulado através de uma análise matemática que permitiu sua generalização para qualquer geometria de aquisição.

## 2 - CORREÇÕES ESTÁTICAS

As variações de cotas topográficas e características da ZBV nos levantamentos sísmicos terrestres podem ser capazes de mascarar completamente as feições geológicas presentes em subsuperfície.

Estas variações causam deslocamentos nos tempos de chegada das reflexões sísmicas e, caso não sejam corrigidas satisfatoriamente, podem comprometer o investimento realizado, dificultando a interpretação dos resultados ou induzindo interpretações errôneas.

Quando as heterogeneidades laterais da ZBV tem extensão pequena quando comparadas à extensão do lançamento utilizado na aquisição, os erros produzidos nas correções estáticas são denominados componentes de pequeno período e causam deterioração na qualidade das seções sísmicas. Por outro lado, os componentes de longo período, ou aqueles produzidos por heterogeneidades laterais maiores que o comprimento do lançamento, causam distorções na interpretação estrutural da subsuperfície, podendo destruir estruturas verdadeiras ou criar estruturas falsas.

Qualquer que seja o método utilizado para o cálculo das correções estáticas é necessário que o mesmo seja capaz de corrigir os componentes de pequeno e longo períodos, para que a seção sísmica resultante tenha boa qualidade e represente o mais fielmente possível as estruturas de subsuperfície.

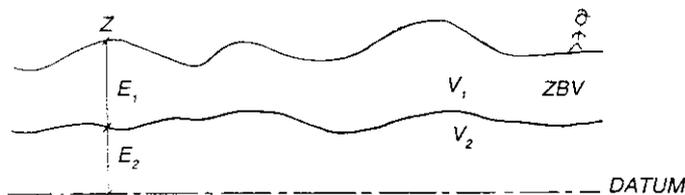


Fig. 2 - Modelo geológico representando a ZBV.

Fig. 2 - Geologic model representing low velocity layer (identified as ZBV in figure).

Desta maneira, é indiscutível a necessidade de levantamentos contínuos, capazes de detectar as variações de ZBV com qualquer comprimento de onda, evitando-se interpolações e extrapolações que não sejam capazes de retratar o comportamento desse meio. As correções estáticas representam os deslocamentos, em tempo, que devem ser aplicados aos traços sísmicos, de modo a simular o resultado que seria obtido se fontes e receptores estivessem posicionados sobre uma superfície plana-horizantal (*datum*), em pontos verticalmente acima ou abaixo de suas posições reais, num meio de velocidade igual a da rocha subjacente à ZBV. Em outras palavras, elas simulam a eliminação total dos efeitos produzidos pela topografia e ZBV nos tempos de chegada das reflexões.

Considere o modelo mostrado na figura 2.

Neste modelo, tem-se uma superfície com topografia irregular e uma ZBV com velocidade constante  $V_1$ , sobreposta a uma camada homogênea com velocidade  $V_2$ . O ponto marcado na superfície representa uma posição de fonte e/ou receptor, cuja elevação é  $Z$ , e o *datum* representa a superfície para a qual os dados serão corrigidos.

O tempo de percurso de uma onda sísmica desde o ponto marcado até o *datum* é:

$$t_d = \frac{E_1}{V_1} + \frac{E_2}{V_2} \quad (1)$$

Assim, se for necessário reduzir os dados ao *datum*, isto é, simular o efeito do deslocamento do ponto da superfície para sua projeção vertical no *datum*, será necessário retirar este tempo do traço sísmico, eliminando o efeito da topografia e ZBV. Então, o tempo de correção estática será:

$$\Delta t = -t_d = -\frac{E_1}{V_1} - \frac{E_2}{V_2} = -\frac{E_1}{V_1} + \frac{E_1}{V_2} - \frac{Z-D}{V_2} \quad (2)$$

ou seja: uma reflexão que estivesse no tempo  $t_r$ , passaria para o tempo  $t_r - t_d = t_r + \Delta t$ .

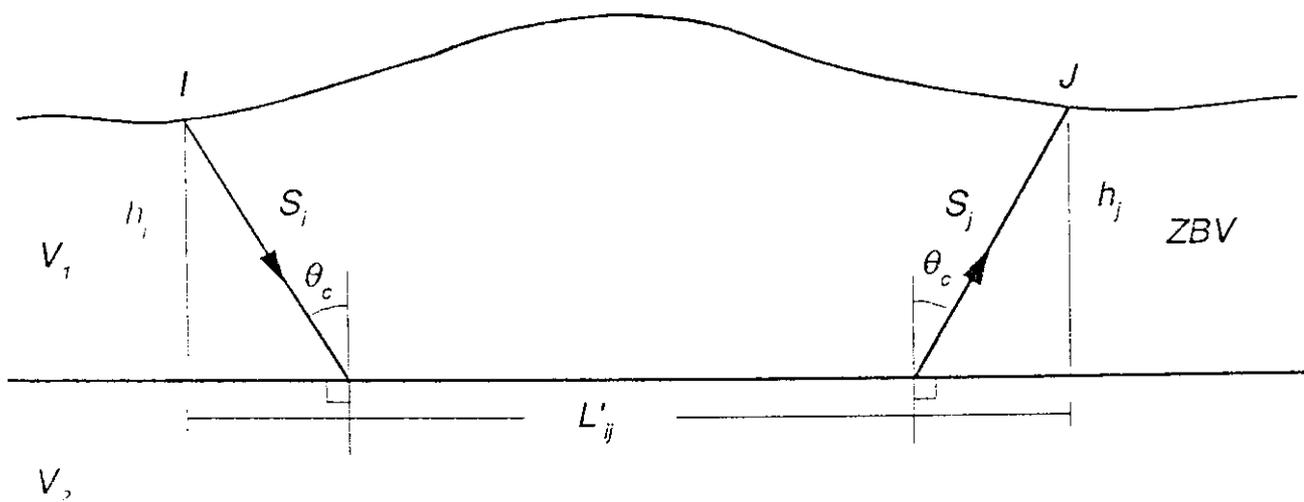


Fig. 3 - Modelo de ZBV com base plana-horizantal e velocidades constantes.  
 Fig. 3 - Model of low velocity layer with plane horizontal base and constant velocities.

Como cada traço sísmico contém o efeito de estática devido à fonte e ao receptor, a correção total que deverá ser aplicada ao traço será a soma das correções da fonte e do receptor.

Desta maneira, a determinação de correções estáticas precisas requer o conhecimento da elevação do terreno, espessura e velocidade da ZBV, velocidade do meio abaixo da ZBV e da cota topográfica do datum, para cada ponto ocupado por fonte e/ou receptor.

Utilizando-se as equações de refração, lei de Snell e relações trigonométricas básicas, a equação 2 pode ser reescrita na forma:

$$\Delta t = -\frac{t_i}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} - \frac{Z - D}{V_2} \quad (3)$$

onde:

- $\Delta t$  = correção estática,
- $t_i$  = tempo de interseção da refração na base da ZBV,
- $V_1$  = velocidade da ZBV,
- $V_2$  = velocidade da camada abaixo da ZBV,
- $Z$  = elevação do ponto,
- $D$  = elevação do datum.

### 3 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DA ZBV NA CORREÇÃO ESTÁTICA

Ao contrário do que ocorre quando se utiliza o método de refração rasa ou de *up-hole*, não é possível obter uma estimativa precisa da velocidade da ZBV através das primeiras quebras dos sismogramas de reflexão.

Qual seria o efeito de erros dessa velocidade nos valores das correções estáticas?

Em geral, tem-se pelo menos uma estimativa grosseira da velocidade da ZBV da área. Algumas vezes esta velocidade é conhecida em pontos discretos do levantamento, e as demais velocidades são obtidas por interpolações.

A derivada da correção estática em relação à velocidade da ZBV fornece a taxa da variação desta correção em relação à velocidade da camada intemperizada, dada pela equação.

$$\frac{\partial \Delta t}{\partial V_1} = \frac{t_i}{2} \frac{V_2}{\sqrt{(V_2 - V_1)(V_2 + V_1)^3}} \quad (4)$$

Usando este resultado, obtém-se a seguinte expressão para o erro médio de  $\Delta t$ ,  $m(\Delta t)$ , resultante de um erro médio de  $V_1$ ,  $m(V_1)$ :

$$m(\Delta t) = \frac{t_i}{2} \frac{V_2}{\sqrt{(V_2 - V_1)(V_2 + V_1)^3}} m(V_1) \quad (5)$$

Como exemplo numérico, considere os seguintes valores:

$$V_1 = 500 \pm 100 \text{ m/s}$$

$$V_2 = 1700 \text{ m/s}$$

então:

$$m(\Delta t) = \frac{t_i}{2} \frac{1700}{\sqrt{1200 \times 2200^3}} \times 100 \approx 0,024 t_i (\text{ms})$$

Provavelmente, para mais de 99% dos casos, o erro resultante não excede  $0,075 t_i$ , que na maioria das vezes pode ser resolvido na etapa de correções estáticas residuais.

Assim, o valor exato de  $V_1$  não é requerido, isto é, uma boa estimativa dessa velocidade pode resolver completamente o problema.

#### 4 – TOMOGRAFIA DE REFRAÇÃO SÍSMICA

O método de cálculo das correções estáticas por primeiras quebras dos sismogramas de reflexão, utilizando o princípio da Tomografia de Refração Sísmica, baseia-se na determinação de um modelo matemático capaz de reproduzir essas primeiras quebras, obedecendo a certos princípios físicos (princípio da linearização) e matemáticos (otimização linear).

Para a construção desse modelo matemático simples, capaz de substituir a ZBV real (desconhecida), no que se refere aos tempos das primeiras quebras (e, em consequência, às desejadas correções estáticas), utiliza-se, além dos tempos lidos nos sismogramas de reflexão, a topografia, a geometria de aquisição, uma estimativa da velocidade da ZBV e a cota topográfica do datum.

É importante lembrar que as primeiras quebras, cujos tempos são lidos nos sismogramas de reflexão, devem ser representativas de refrações na base da ZBV, sendo, portanto, tratadas como ondas refratadas nessa interface, e que obedecem a equação de refração.

Considere o caso de uma ZBV constituída de uma camada com velocidade constante  $V_1$ , sobreposta a uma camada com velocidade constante  $V_2$  ( $V_2 > V_1$ ), conforme ilustrado na figura 3.

O tempo de trânsito de uma onda refratada na base da ZBV, desde a fonte  $i$  até o receptor  $j$ , é dado por:

$$t_{ij} = \frac{h_i \cos \theta_c}{V_1} + \frac{h_j \cos \theta_c}{V_1} + \frac{L'_{ij}}{V_2} \quad (6)$$

onde:

- $h_i$  = espessura da ZBV no ponto  $i$ ,
- $h_j$  = espessura da ZBV no ponto  $j$ ,
- $V_1$  = velocidade da ZBV,
- $V_2$  = velocidade da sub-ZBV,
- $L'_{ij}$  = separação fonte-receptor,
- $\theta_c$  = ângulo crítico =  $\arcsen(V_1/V_2)$ .

Existe uma separação mínima entre a fonte e o receptor (distância crítica), a partir da qual a onda refratada pode ser captada na superfície. Matematicamente, porém, pode ser calculado o tempo de percurso dessa onda para a separação fonte - receptor igual a zero; basta tomar  $L'_{ij} = 0$  na equação 6.

Neste caso, o ponto  $j$  tende ao ponto  $i$  e esse tempo será dado por:

$$t_{ii} = \frac{2h_i \cos \theta_c}{V_1} \quad (7)$$

O tempo  $t_{ij}$  é conhecido como tempo de interseção (*intercept time*). Embora não tendo sentido físico, ele é bastante útil nos diversos métodos de interpretação de dados de refração.

No que se segue, é conveniente introduzir o que Amorim *et al.* (1987) definem como velocidade vertical tomográfica,  $V^*_{1i}$ , do ponto  $i$ . Esta velocidade é associada ao tempo de interseção pela relação:

$$t_{ii} = 2 \frac{h_i}{V^*_{1i}} \quad (8)$$

Note que  $V^*_{1i}$  é a velocidade hipotética que teria um raio vertical que partisse da superfície no ponto  $i$ , atingisse a base da ZBV e retornasse ao mesmo ponto, com tempo total de percurso igual a  $t_{ij}$ .

Comparando-se as equações 7 e 8, a velocidade vertical tomográfica relaciona-se com a velocidade verdadeira pela equação:

$$V^*_{1i} = \frac{V_1}{\cos \theta_c} = \frac{V_1 V_2}{(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}} \quad (8a)$$

onde foram utilizadas a lei Snell

$$\sen \theta_c = \frac{V_1}{V_2}$$

e a relação trigonométrica

$$\cos \theta_c = (1 - \sen^2 \theta_c)^{1/2} = (1 - (V_1/V_2)^2)^{1/2}$$

A condição de haver onda refratada implica  $V_2 > V_1$ , garantindo que o denominador da equação 8a não seja complexo.

A equação 8a mostra que a velocidade vertical tomográfica é independente da espessura da ZBV, sendo dependente apenas das velocidades de propagação na ZBV e da rocha subjacente. Desta forma, para o modelo de ZBV com  $V_1$  e  $V_2$  constantes, a velocidade vertical tomográfica é também constante para todos os pontos, podendo ser denotada simplesmente por  $V^*_1$ .

A relação entre  $V_1$  e  $V^*_1$  pode ser encontrada por manipulação algébrica da equação 8a.

$$V_1 = \frac{V^*_1 V_2}{(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}} \quad (8b)$$

Com o novo conceito de velocidade vertical tomográfica, a equação 6, de tempo de percurso de uma onda refratada, pode ser reescrita na forma:

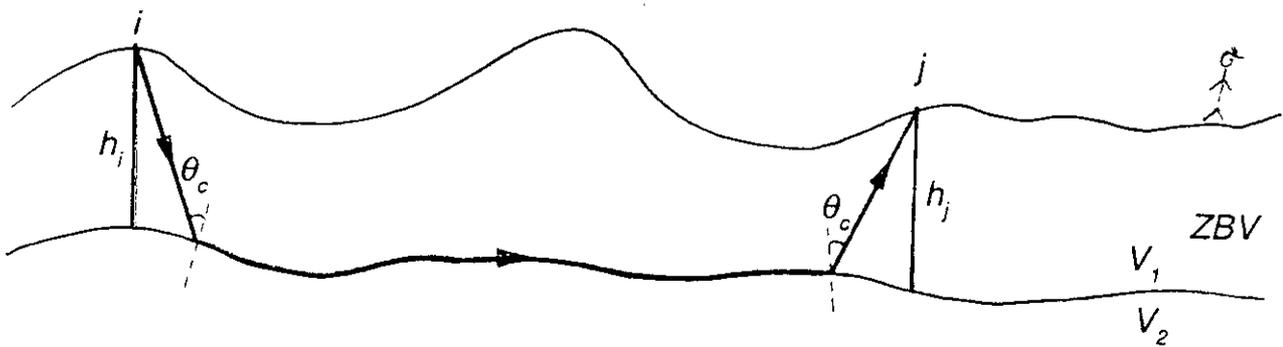


Fig. 4 - Modelo de ZBV com velocidades constantes e base ondulada.  
 Fig. 4 - Model of low velocity layer with constant velocities and wavy base.

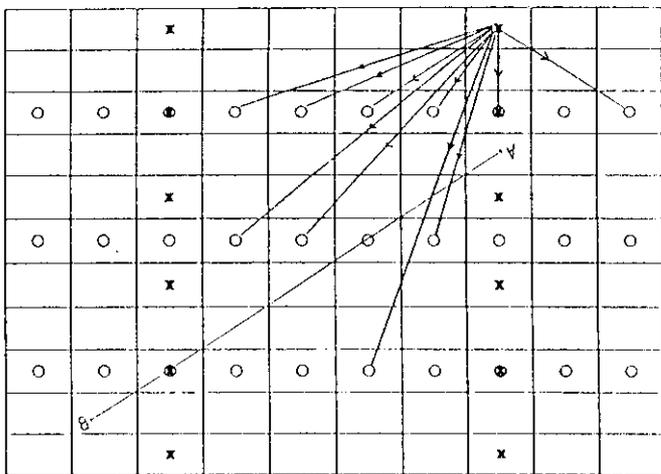


Fig. 5 - Mapa-base típico de aquisição 3D, mostrando a projeção de alguns raios partindo de um tiro.  
 Fig. 5 - Typical base map of 3D acquisition, showing projection of some rays from a shot.

$$t_{ij} = \frac{h_i}{V_1^*} + \frac{h_j}{V_1^*} + \frac{L'_{ij}}{V_2} \quad (9)$$

Esta equação é exata apenas quando a base da ZBV é plana e os raios seguem a lei de Snell. Quando não for este o caso, as primeiras quebras representarão ondas que percorrem trajetórias de tempo mínimo entre a fonte e o receptor, que não necessariamente representam ondas refratadas com ângulo crítico (*head waves*). Da mesma maneira como amplamente aceito na literatura, assume-se que as primeiras quebras correspondem a ondas que partem da fonte, atingem a base da ZBV com ângulo crítico, prosseguindo nesta interface até deixá-la também com ângulo crítico, para retornar à superfície, conforme mostra-se na figura 4.

Amorim *et al.* (1987) mostram que, embora não exata, a equação 9 ainda apresenta boa precisão para as situações da ZBV com base ondulada e pode, portanto, ser utilizada para cálculo de tempo de refração em qualquer modelo.

Considere uma geometria de aquisição conforme o modelo mostrado na figura 5. Os pontos marcados com x representam pontos de tiro e os marcados com o representam as estações receptoras. O *grid* retangular representa as células que dividem o modelo em blocos. A cada bloco, deverão ser atribuídas características constantes, espessura e velocidade da ZBV, que permitirão a geração de um modelo de ZBV heterogênea.

Um corte transversal, unindo os pontos A e B da figura 5, mostra um perfil do modelo criado para representar a ZBV. Este perfil é apresentado na figura 6. Note que a ZBV é dividida em blocos de velocidade variável  $\{V_{1k}\}$  sobreposta a um meio com velocidade variável  $\{V_{2k}\}$ . No que se segue, cada fonte-receptor é vista como sendo o par de pontos *i* e *j* de um perfil qualquer que passe por esses pontos.

Utilizando-se as equações 8 e 9 para novo modelo de ZBV heterogênea, a expressão para o tempo de trânsito da refração entre os pontos *i* e *j* é dada por:

$$t_{ij} = \frac{h_i}{V_{1i}^*} + \frac{h_j}{V_{1j}^*} + \sum_{k=i}^j \frac{X_k}{V_{2k}} = \frac{t_{ii}}{2} + \frac{t_{jj}}{2} + \sum_{k=i}^j \frac{X_k}{V_{2k}} \quad (10)$$

onde:

- $t_{ij}$  = tempo da primeira quebra (refração na base da ZBV) lida no sismograma de reflexão,
- $h_i$  = espessura da ZBV no ponto *i*,
- $t_{ii}$  = tempo de interseção no ponto *i*,

$$V_{1i}^* = \frac{2h_i}{t_{ii}} = \frac{V_{1i}V_{2i}}{(V_{2i}^2 - V_{1i}^2)^{1/2}} = \text{velocidade vertical tomográfica no bloco } i,$$

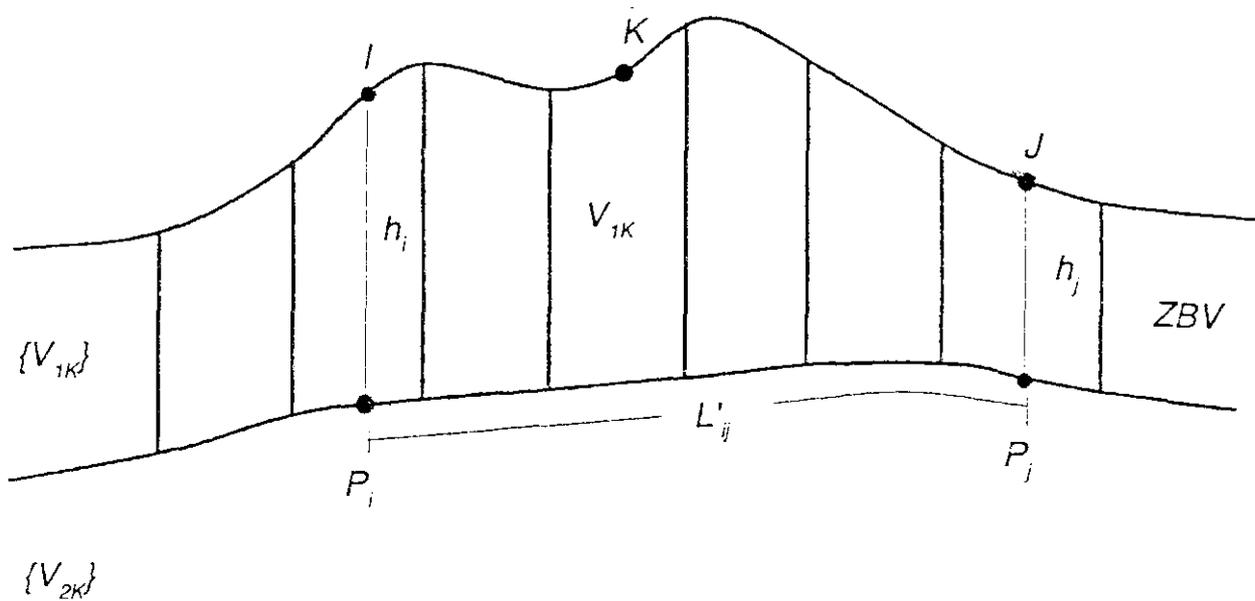


Fig. 6 - Perfil entre os pontos A e B da figura 5, mostrando a divisão do modelo em blocos e a trajetória de uma onda refratada entre os pontos  $i$  e  $j$ .  
 Fig. 6 - Profile between points A and B in figure 5, showing division of model into blocks and the path of a wave refracted between points  $i$  and  $j$ .

$X_k$  = trajetória do raio na base da ZBV ao longo do bloco  $K$ ,  
 $V_{1i}$  = velocidade da ZBV no bloco  $i$ ,  
 $V_{2i}$  = velocidade da sub-ZBV no bloco  $i$ .

onde:

$t_{ij}$  = tempos das primeiras quebras lidas nos sismogramas,  
 $\tau_{ij}$  = tempos das primeiras quebras calculadas no modelo.

A equação 10 indica que o raio viaja verticalmente da fonte  $i$  até a interface (ponto  $P_i$ ) com velocidade  $V_{1i}^*$ , segue ao longo da interface com velocidade  $V_{2k}$  até o ponto  $P_j$  (projeção vertical do ponto  $j$  na base ZBV) e retorna verticalmente com velocidade  $V_{2j}^*$  até o receptor  $j$  na superfície.

Para os diversos pontos de tiro  $i$  e receptores  $j$  dos levantamentos de reflexão (qualquer geometria de aquisição), a equação 10 representa um sistema de equações

sobredeterminado com incógnitas  $\frac{t_{kk}}{2} = \frac{h_k}{V_{1k}^*}$  e  $V_{2k}$ , que em notação matricial pode ser reescrita como:

$$Ax = t \quad (11)$$

onde:

$A$  = matriz das trajetórias dos raios,

$x$  = vetor das incógnitas,

$t$  = vetor dos tempos das primeiras quebras lidas nos sismogramas de reflexão.

Pela sua versatilidade e facilidade de uso, adota-se o critério dos mínimos quadrados para solução do sistema 11. Explicitamente, a solução do problema, agora, consiste em determinar as espessuras  $h_k$  e velocidades  $V_{1i}$  e  $V_{2i}$ , tal que os tempos das ondas refratadas,  $\tau_{ij}$ , calculadas nesse modelo, satisfaçam a condição:

$$\sum_j (t_{ij} - \tau_{ij})^2 = \text{Mínimo} \quad (12)$$

Resolver o sistema 12, no sentido dos mínimos quadrados, indicado pela equação 12, equivale a resolver o chamado sistema de equações normais:

$$A^T Ax = A^T t, \text{ o superescrito } T \text{ significa transposição da matriz} \quad (13)$$

Pela característica de esparsidade (grande quantidade de zeros) da matriz  $A$ , sugere-se a solução pelo método de fatoração de Cholesky (Lawson e Hanson, 1974), encontrando-se assim o vetor de incógnitas  $x$ .

Para a solução do problema, admite-se um modelo inicial de ZBV, por exemplo, ZBV com espessura constante  $h$ . Com este modelo resolve-se o sistema 10, determinando-se valores de  $V_{1k}^*$  e  $V_{2k}$  e calcula-se o tempo de interseção para cada bloco, conforme a equação 8. A velocidade  $V_{2k}$  pode também ser obtida com boa precisão por meio da regressão linear das curvas tempo - distância das primeiras quebras de cada tiro e distribuição dos resultados ao longo da área do levantamento.

Uma vez que, em geral, as primeiras quebras dos sismogramas de reflexão não fornecem informações diretas da velocidade da ZBV, é necessário adotar um "chute" da velocidade desse meio ( $V_{ZBV}$ ) e fornecer esta distribuição de velocidades para solução do problema. Embora, como visto anteriormente, mesmo que erros na velocidade da ZBV não representem erros exagerados nas correções estáticas, esta estimativa de  $V_{ZBV}$  deve ser tão precisa quanto possível.

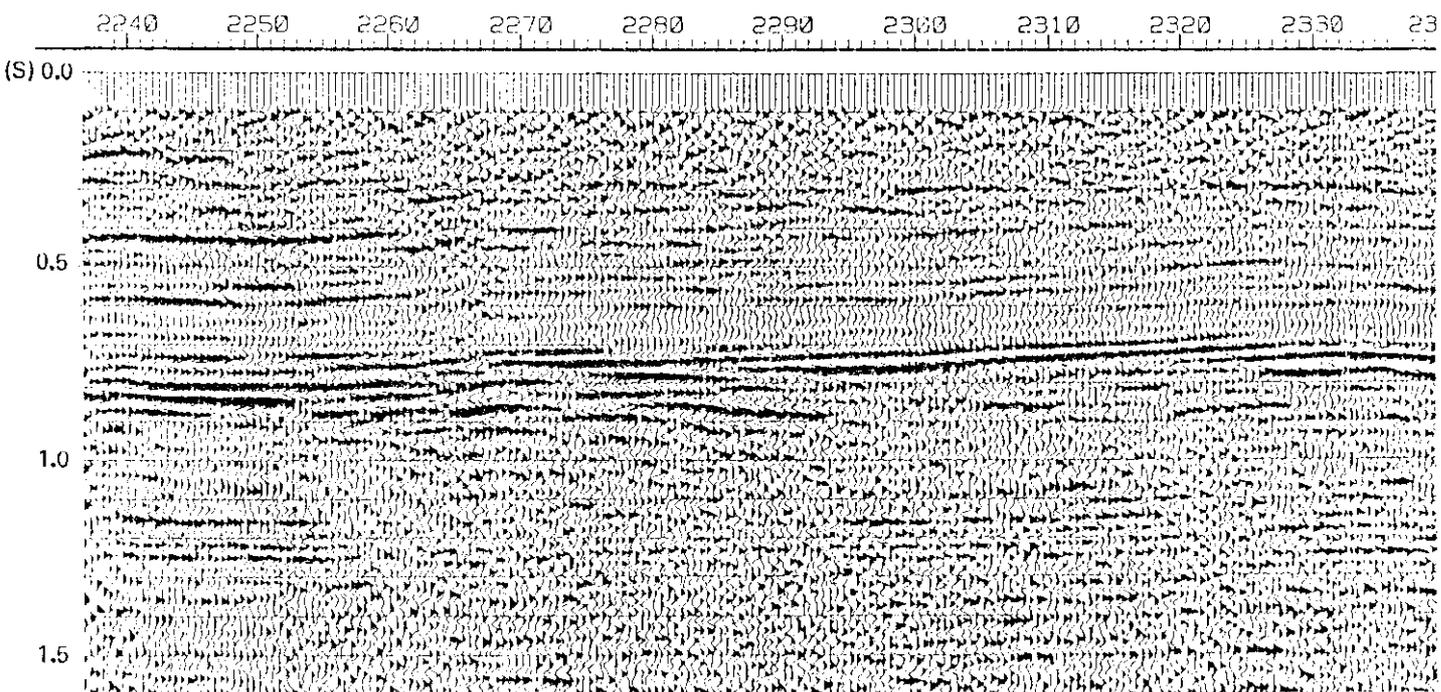


Fig. 7a - Seção sísmica processada com correções estáticas de refração rasa.  
 Fig. 7a - Seismic section, processed with static corrections calculated by means of shallow refraction.

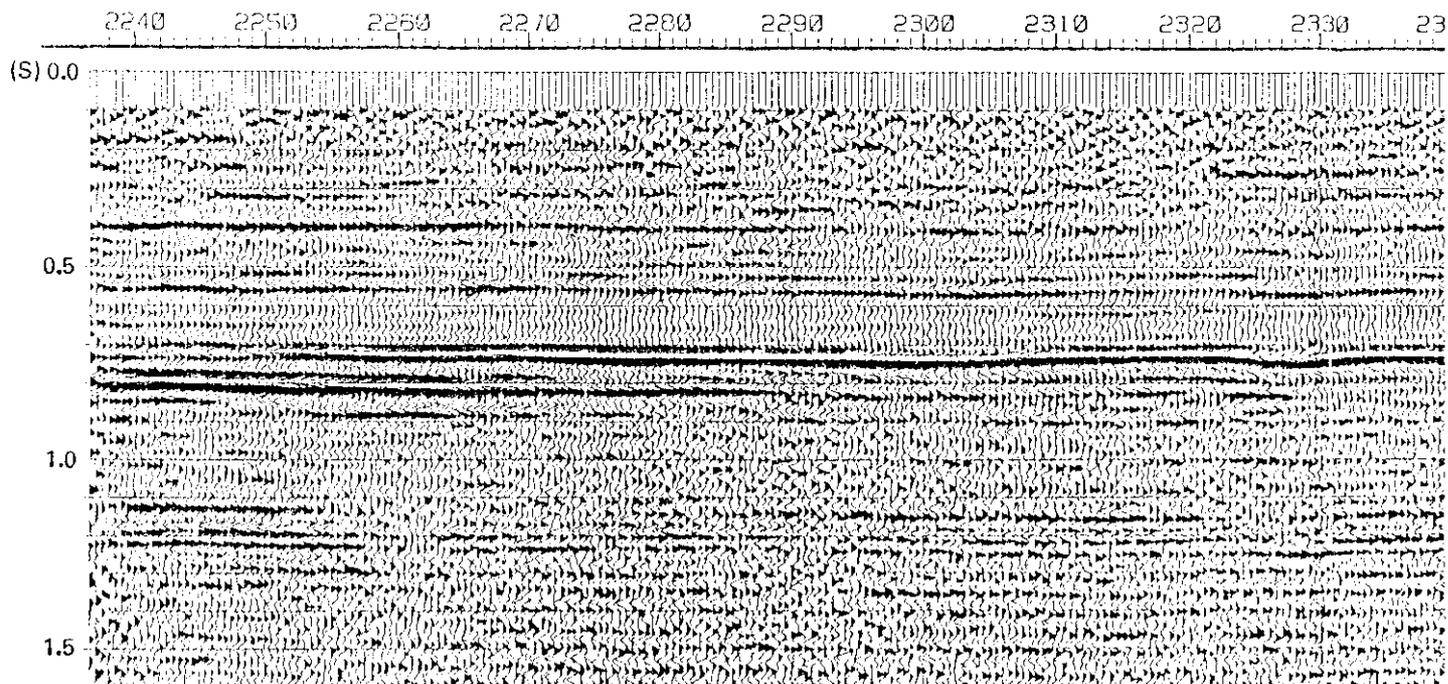


Fig. 7b - Seção sísmica da figura 7a, processada com correções estáticas de tomografia de refração sísmica.  
 Fig. 7b - Seismic section of figure 7a, processed with static corrections calculated by means of seismic refraction tomography.

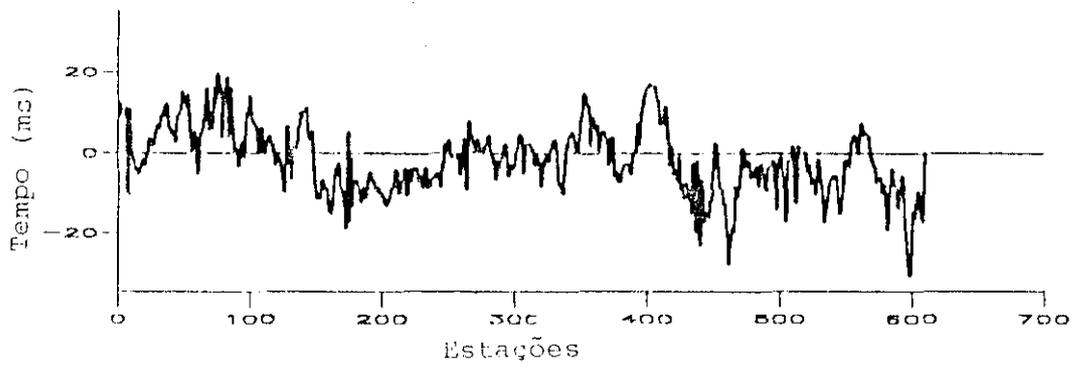


Fig. 8a - Gráfico de diferenças entre as correções estáticas convencionais e as calculadas pelo método de tomografia.  
 Fig. 8a - Differences between conventional static corrections and those calculated by means of seismic refraction tomography.

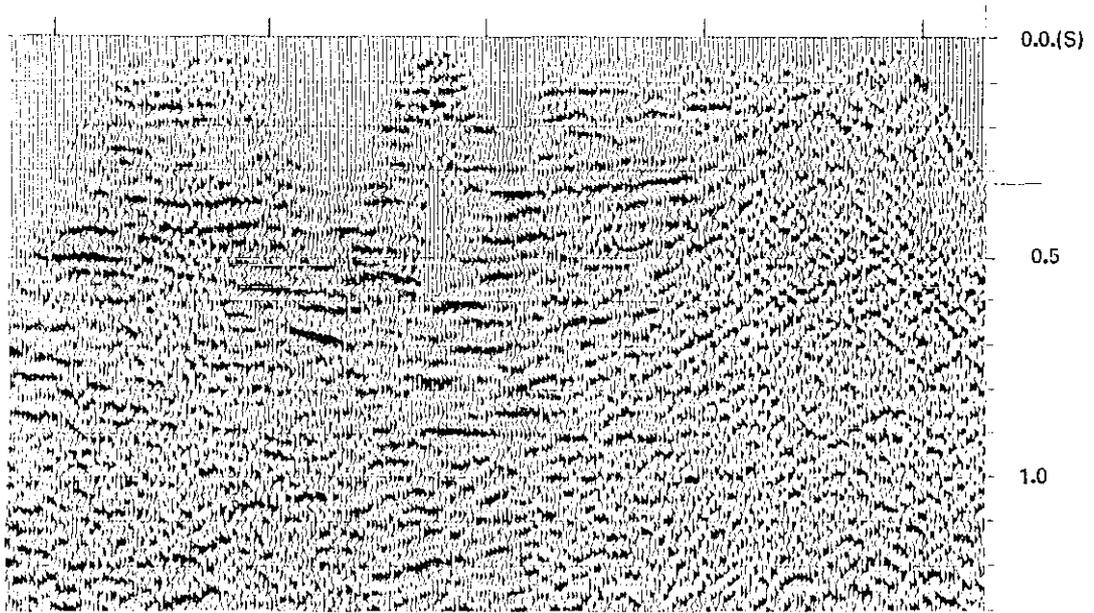


Fig. 8b - Seção sísmica processada com correções estáticas convencionais.  
 Fig. 8b - Seismic section processed with conventional static corrections.

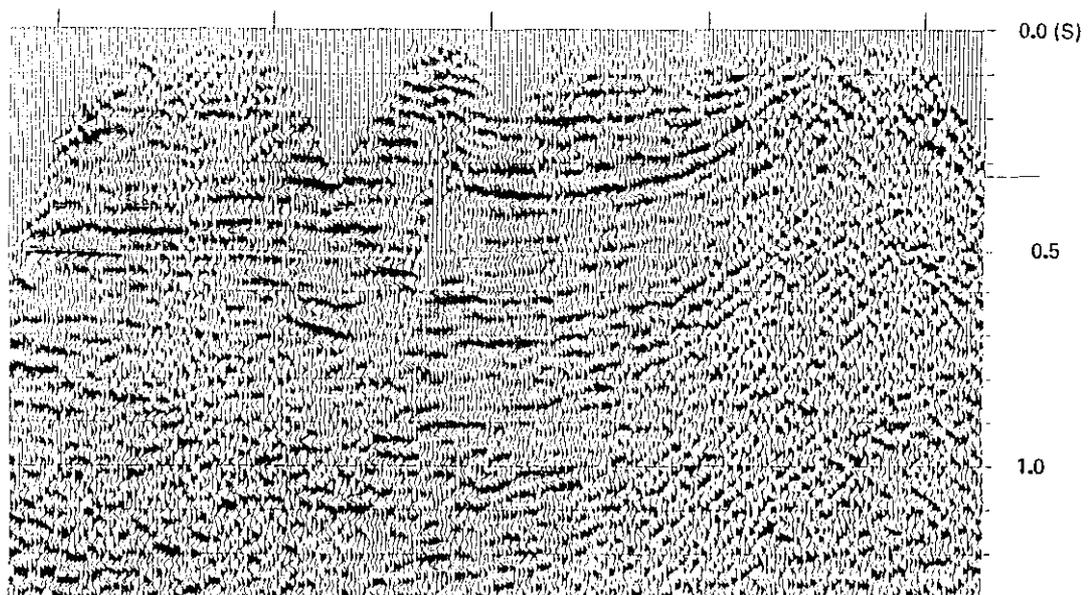


Fig. 8c - Seção sísmica da figura 8b, processada com correções estáticas de tomografia de refração sísmica.  
 Fig. 8c - Seismic section of figure 8b, processed with static corrections calculated by means of seismic refraction tomography.

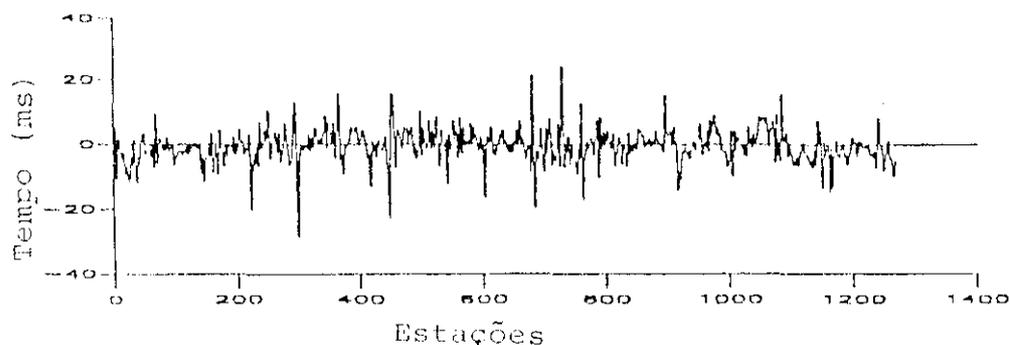


Fig. 9a - Gráfico de diferenças entre as correções estáticas convencionais e as calculadas pelo método de tomografia.  
 Fig. 9a - Differences between conventional static corrections and those calculated by means of seismic refraction tomography.

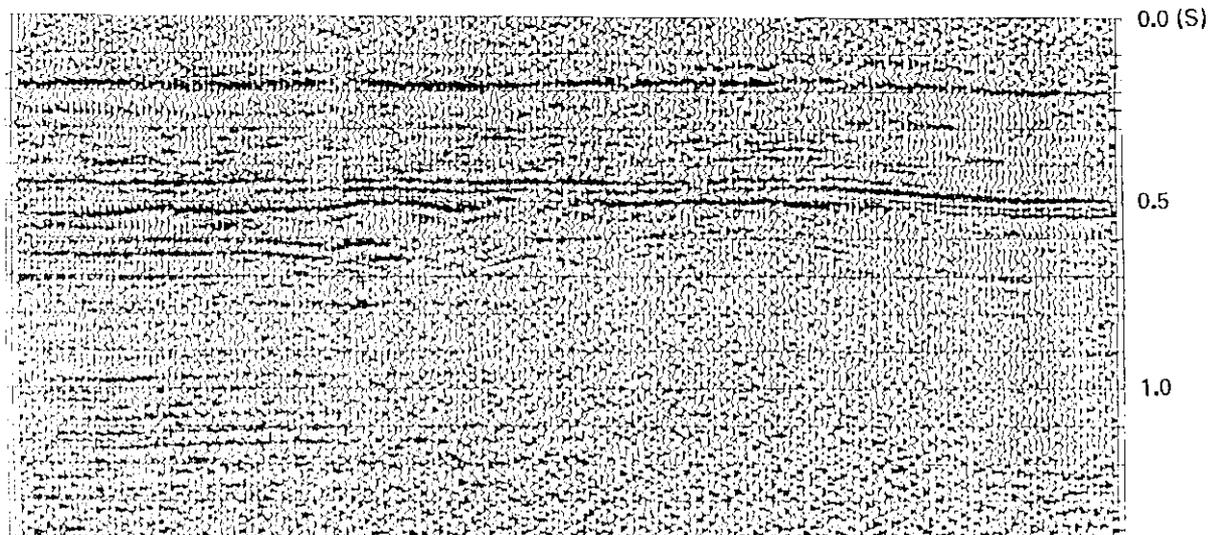


Fig. 9b - Seção sísmica 3D, processada com correções estáticas convencionais.  
 Fig. 9b - Seismic section processed with conventional static corrections.

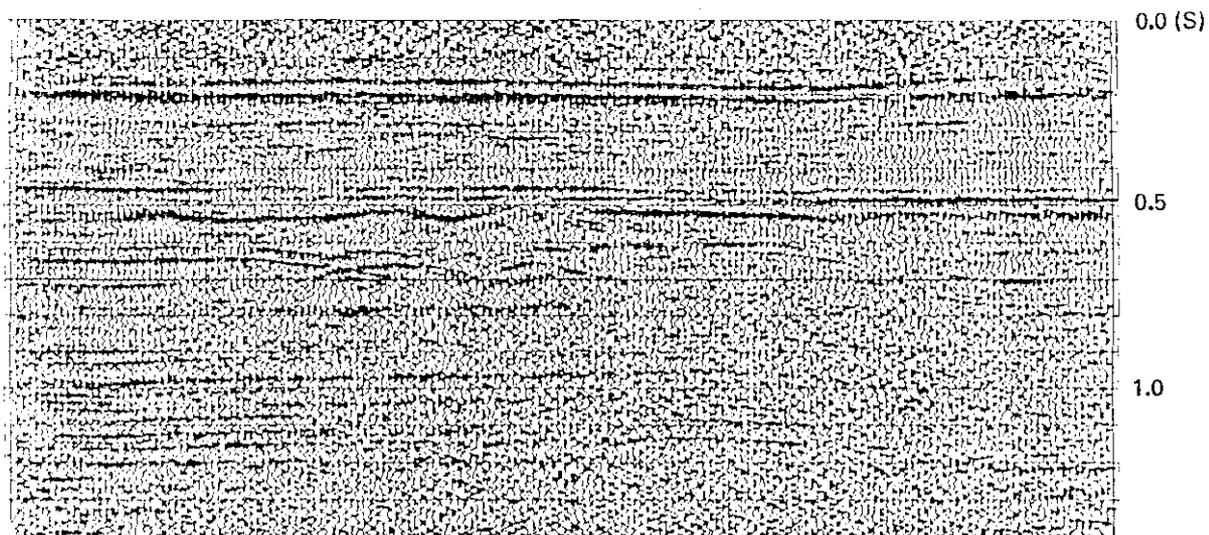


Fig. 9c - Seção sísmica da figura 9b, processada com correções estáticas de tomografia de refração sísmica.  
 Fig. 9c - Seismic section of figure 9b, processed with static corrections calculated by means of seismic refraction tomography.

Tendo-se a  $V_{ZBV}$  e  $V_{2k}$ , faz-se a determinação da velocidade vertical tomográfica da ZBV para cada bloco do modelo:

$$V_{ZBV}^* = \frac{V_{ZBV} V_{2k}}{(V_{2k}^2 - V_{ZBV}^*)^{1/2}} \quad (14)$$

e calcula-se novas espessuras para o modelo, utilizando-se os tempos de interseção já calculados:

$$h_k = t_{kk} V_{ZBV}^* \quad (15)$$

Como novo modelo de ZBV assim construído, resolve-se novamente o sistema 10, determinando-se valores finais do  $V_{1k}^*$  e  $V_{2k}$ . Transforma-se as velocidades verticais tomográficas em velocidades verdadeiras (equação 8b) e calculam-se as correções estáticas para o *datum*.

Em cada etapa do processo, os tempos de refração na base da ZBV são calculados ( $\tau_{ij}$ ) por meio do modelo e comparados com os respectivos tempos lidos nos sismogramas de reflexão ( $t_{ij}$ ). Sempre que a discrepância entre estes tempos for maior que um valor predeterminado pelo usuário, o tempo real é descartado e não mais influenciará no próximo resultado.

Este tipo de edição dos tempos das primeiras quebras é útil para evitar que leituras imprecisas das primeiras quebras causem resultados de baixa qualidade.

## 5 – APLICAÇÃO DO MÉTODO EM DADOS REAIS

O método descrito foi aplicado em dados das diversas bacias brasileiras, com resultados sempre superiores àqueles conseguidos com correções estáticas convencionais.

O primeiro exemplo refere-se a uma linha 2D da Bacia Amazônica (60-RL-165). Na figura 7a, é apresentada a seção final utilizando-se correções estáticas convencionais (refração rasa), e, na 7b, a seção obtida com correções estáticas por tomografia de refração sísmica. Observe que tanto para os refletores rasos (400 ms) quanto para os mais profundos, a continuidade e qualidade geral dos refletores é melhor quando se utilizou estáticas obtidas pelo método aqui descrito. As etapas de processamento são essencialmente as mesmas, modificando apenas as correções estáticas.

Da Bacia do Recôncavo, foi escolhida uma linha tortuosa com afastamentos laterais de tiros (26-RL-1492). Este tipo de geometria, como no caso 3D, não permite a utilização de nenhum outro método de cálculo de estática por primeiras quebras disponível na PETROBRÁS.

Na figura 8a, mostra-se o gráfico das diferenças entre as estáticas 3D (calculados pelo método de tomografia) e as estáticas convencionais. Observa-se que, embora a diferença média esteja em torno de zero, existem componentes de pequeno e médio períodos que podem modificar a qualidade da seção.

Nas figuras 8b e 8c, mostram-se os resultados finais obtidos. Na figura 8b, a seção com correções estáticas convencionais mostra menor continuidade e pior definição das reflexões, quando comparada com a da figura 8c, processada com estáticas de tomografia.

O 3D do Leste do Urucu (Bacia Amazônica) foi reprocessado utilizando-se correções estáticas de tomografia. O resultado desse reprocessamento mostrou grande ganho de qualidade nas seções sísmicas finais. Parte desse ganho deve ser atribuído ao uso de correções estáticas mais precisas.

Na figura 9a, mostra-se o gráfico das diferenças entre as estáticas 3D e as convencionais. As diferenças situam-se em torno do zero, mas existe uma forte componente de alta frequência que pode provocar grandes diferenças de qualidade no estaqueamento.

Na figura 9b, mostra-se uma linha de processamento antigo, onde foram utilizadas estáticas convencionais. Na figura 9c, é apresentada a seção com estáticas 3D. É notável o aumento da qualidade na seção de reprocessamento, permitindo interpretação dos diversos refletores com maior segurança.

## CONCLUSÕES

O método de tomografia de refração sísmica pode ser utilizado para cálculo das correções estáticas através das primeiras quebras dos sismogramas de reflexão, para qualquer geometria de aquisição dos dados.

Desde que as primeiras quebras lidas nos sismogramas de reflexão representem ondas refratadas na base da ZBV, o método pode ser utilizado em substituição aos levantamentos de refração rasa, resultando em aumento da qualidade das seções sísmicas (maior precisão das correções estáticas) e diminuição dos custos de aquisição (eliminação dos levantamentos de refração rasa).

O método proposto apresenta vantagens em relação a diversos métodos disponíveis no mercado:

- Não se restringe a levantamentos 2D, e pode ser utilizado em qualquer geometria de aquisição.
- Minimiza, de maneira eficiente, os efeitos produzidos por erros de leitura dos tempos das primeiras quebras.
- Não apresenta os efeitos de borda comuns em muitos métodos.
- Por tratar os dados como um conjunto único, é capaz de resolver problemas de estática de curto e longo períodos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, W.N. *Cálculo das correções estáticas através do princípio da Tomografia Sísmica*. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 1985. 79p.
- AMORIM, W.N., THOMAS, J. E., CARVALHO, R.D., TYGEL, M. et al. *Determinação das correções estáticas a partir dos dados de reflexão sísmica*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES/DIVEX/SEGEF, 1987. Relatório final do projeto de pesquisa.
- LAWSON, C.L., HANSON, R.J. *Solving least squares problems*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1974. 340p.
- SANTOS, R.A., CLETO, J., OLIVA, J.E., RODRIGUES, M. et al. *Projeto estática 2D*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/DEPEX/DITREX/SEGEF, 1990. 393p.

## EXPANDED ABSTRACT

*Variations in the thickness and velocity of the weathered layer, often called the low velocity layer (LVL), together with variations in elevation, cause considerable differences in the arrival times of seismic reflections at neighboring receivers in land seismic surveys, thereby producing distortions in the hyperbolic curves. As all subsequent processing steps assume that the reflections are represented by (pseudo-) hyperbolic curves, these distortions must be removed. This is achieved by applying static shifts to the traces, thus simulating a survey on a plane horizontal surface. Called static corrections, these will only be accurate if the thickness and velocity of the LVL and of the subweathered layer are determined with adequate precision at each shot and receiver position.*

*The most accurate method for accomplishing this is to measure uphole times at each shot and receiver station. Since this is relatively expensive, uphole times are only measured at a few locations and the results interpolated to obtain static corrections for the whole survey area. Interpolation does not, however, yield satisfactory results, due to the highly variable nature of both thickness and velocity.*

*Another traditional method for determining thickness and velocity is shallow refraction seismics. These measurements are also usually performed at only a few locations and the results interpolated. The intercept-time (TABC) and Generalized Reciprocal Method (GRM) are well-known examples of this technique.*

*Seismic reflection data also include the refracted waves at the bottom of the weathered layer. Amorim (1985) presents a method for determining static corrections using the first-break times on reflection records. This method, called seismic refraction tomography, entails construction of a mathematical model that is compatible with first-break times in a least squares sense. The model is iteratively modified until the time-distance curves of the model coincide with measured ones.*

*In addition to first-break times, construction of the model relies on elevation, acquisition geometry, an estimate of the velocity of the weathered layer, and the desired datum level. Although a certain minimum source-receiver separation is needed to obtain the refracted waves, one can mathematically use the zero-offset or intercept time. Amorim et al. (1987) also introduced the concept of vertical tomographic velocity, which corresponds to the velocity with which a hypothetical wave travels vertically downward to the base of the LVL.*

*Vertical tomographic velocity turns out to be independent of the thickness of the LVL, depending only on the velocities of the weathered and subweathered layers. Using this concept, a simple linear equation is obtained in which travel time is related to the thickness of the LVL and to vertical tomographic velocity at the shot and receiver positions, to the horizontal distance between the latter, and to the velocity of the subweathered layer at the intermediate positions. For a normal seismic survey, where at least some receiver and shot positions coincide, the result is an overdetermined system of equations, which is solved for unknown intercept times and the velocity of the subweathered layer by well-known least-squares methods. The thickness and velocity of the LVL, and hence the static corrections, are calculated from intercept times and the velocity of the subweathered layer.*

*The survey area is gridded so that each bin contains more or less one shot or receiver and some bins contain both a shot and a receiver.*

*An initial model is created using a constant thickness for the LVL and a guess of LVL velocity. It is shown that an error in velocity has minor influence on static shifts, which are the primary objective. Vertical tomographic velocity and the velocity of the subweathered layer are obtained for each bin using the initial model. Intercept times are then calculated and used to recalculate thickness for each bin. Using the new model, the system is solved a second time, obtaining the final values for vertical tomographic velocity and the velocity of the subweathered layer. Vertical tomographic velocities are transformed into real velocities, and static corrections for the desired datum calculated.*

*At each stage of the process, the first-break times of the model are computed and compared with measured times. If the difference between the two is greater than a user-defined value, the measured first-break time is discarded. This serves to avoid using first-break times that are picked incorrectly.*

*The method was applied to various data sets, both 2-D and 3-D. Considerable improvements over other methods were observed in the quality of the final stacked sections. The advantages of the method are: considerable cost savings, since it is not necessary to perform a separate refraction or uphole survey; applicability to any geometry; the absence of border effects; and correction for both short- and long-period statics.*