

MODELAGEM DE ATENUAÇÃO E DISPERSÃO DISSIPATIVAS COM APLICAÇÃO À BACIA DE CAMPOS

Carlos Lopo Varela⁽¹⁾

RESUMO — Os efeitos de atenuação e dispersão dissipativas participam de forma acentuada da degradação do pulso sísmico original gerado na fonte e são provocados pelo comportamento não perfeitamente elástico dos meios rochosos atravessados. Esses efeitos introduzem distorções seletivas com a frequência e variáveis no tempo, o que prejudica a qualidade dos trabalhos interpretativos e o desempenho dos métodos estatísticos de deconvolução. Neste trabalho, são apresentados os principais modelos encontrados na literatura para representação desses efeitos, bem como as dificuldades envolvidas na modelagem. O processamento de assinatura na PETROBRÁS tem dedicado até então pouca atenção à compensação dos efeitos dissipativos. A aplicação de técnicas de estimativa e compensação desses efeitos introduziu melhorias significativas em termos de resolução e estacionariedade sobre dados sísmicos da Bacia de Campos, mostrando que essas técnicas podem constituir uma ferramenta útil para aumentar a qualidade das seções sísmicas.

(Originais recebidos em 16-XII-86.)

1 — INTRODUÇÃO

Nos trabalhos sísmicos tem-se dedicado atenção crescente às informações de amplitude e forma dos pulsos registrados. A tendência atual do processamento de assinatura na PETROBRÁS é remover, de forma determinística, todas as distorções conhecidas impostas ao pulso original, deixando para a deconvolução estatística apenas a assinatura da fonte, que, no caso geral de fonte impulsiva, tem o caráter próximo ao de fase mínima. Pretende-se, assim, obter um traço final composto de pulsos de fase zero, com amplitudes relativas preservadas ao máximo ou, em outras palavras, pretende-se que o traço final seja o mais parecido possível com a função refletividade amostrada. As informações de amplitude e forma do pulso sísmico têm grande importância para a identificação de situações anômalas que forneçam indicações diretas sobre a existência de hidrocarbonetos (anomalias de amplitude), para o relacionamento entre dados sintéticos extraídos de perfis (sismogramas sintéticos) com dados reais, ou mesmo para o controle da qualidade de processamentos especiais aplicados sobre os dados (seções de impedância acústica, de velocidade intervalar e de atributos do traço complexo e análise da variação do traço complexo com o afastamento fonte-receptor).

O processamento de assinatura realizado atualmente na PETROBRÁS inclui a remoção determinística das distorções devidas ao instrumento de registro, receptor e fantasma, num processo informalmente denominado de DEFANINST, ao qual se segue a deconvolução estatística para remoção de assinatura da fonte. Todo esse processo antecede o empilhamento. Muitas outras distorções, que não são consideradas nas correções determinísticas aplicadas, influenciam a forma final dos pulsos registrados. Dentre essas destacam-se os efeitos de atenuação e dispersão, que assumem um importante papel na degradação do pulso original. Esses efeitos são provenientes do comportamento não perfeitamente elástico dos meios rochosos, o que propicia, durante a propagação, a transformação contínua de energia sísmica em calor, por processos ainda pouco conhecidos. No domínio da frequência, onde esses efeitos são melhor observados, as distorções nos espectros de amplitude e fase são respectivamente atribuídas aos efeitos de atenuação e dispersão.

No espectro de amplitude, as distorções atribuídas à atenuação são representadas por um decaimento exponencial de amplitude com aumento do tempo de percurso e da frequência considerada, dado por:

¹ - Setor de Interpretação Exploratória da Bacia de Campos, Divisão de Interpretação da Região Sul e Sudeste.

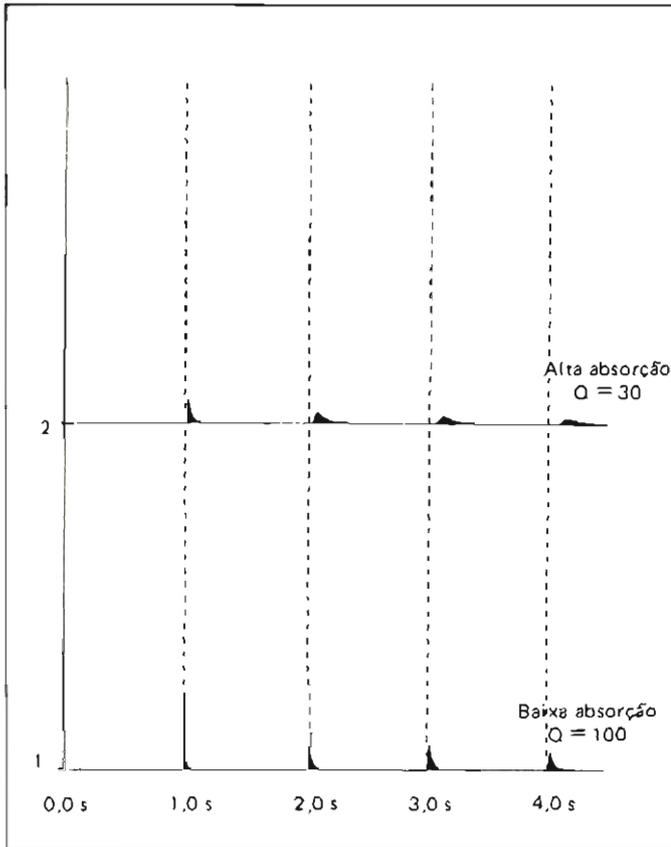


Fig. 1 - Efeitos da absorção sobre impulsos unitários gerados em $t = 0,0$ s.

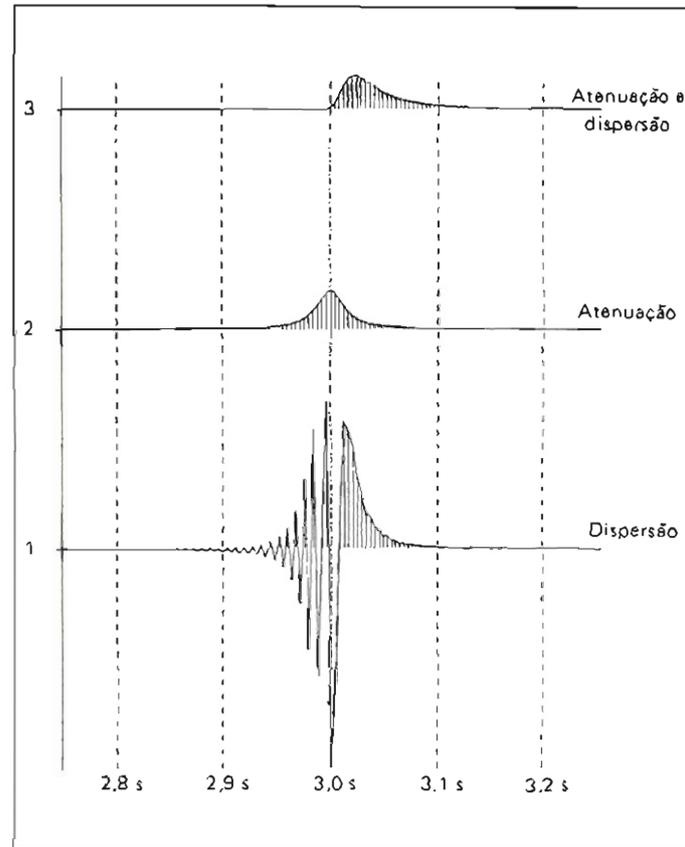


Fig. 2 - Respostas impulsivas para $Q = 100$ e $t = 3,0$ s: 1 - dispersão, 2 - atenuação e 3 - atenuação e dispersão.

$$A(t, f) = A(0, f) \exp\left(\frac{-\pi \cdot f \cdot t}{Q}\right) \quad (1)$$

onde:

- $A(t, f)$ = espectro de amplitude dos dados registrados
- $A(0, f)$ = espectro de amplitude da fonte
- f = frequência em Hertz
- t = tempo de reflexão em segundos
- Q = fator adimensional de dissipação, que é uma medida das propriedades dissipativas dos meios. Quanto menor o valor de Q maior a dissipação ($25 < Q < 300$ em rochas).

As distorções no espectro de fase, decorrentes da dispersão, são, por sua vez, provenientes da dependência da velocidade de propagação com a frequência, ou seja, frequências diferentes viajam com diferentes velocidades em um meio dispersivo. Essa dependência é tal que as altas frequências viajam mais rapidamente, ocupando a frente do pulso, enquanto as baixas ocupam a cauda. Argumentos físicos e alguns experimentos apon-

tam que essas distorções de fase devem corresponder ao espectro de fase mínima associado à equação (1) acima.

A figura 1 ilustra as distorções conjuntas de atenuação e dispersão introduzidas sobre impulsos unitários gerados no tempo zero em meios com $Q = 100$ e 30 . Nela podemos observar que, ao se propagar em meios dissipativos, o pulso original tende continuamente a perder amplitude e a se alongar no tempo. Na figura 2 podemos observar as distorções isoladas para dispersão (filtro passa tudo) e atenuação (filtro de fase zero), bem como o efeito conjunto (filtro de fase mínima), sobre um impulso unitário após três segundos de propagação em um meio com $Q = 100$. Resumindo, podemos dizer que os efeitos de atenuação e dispersão introduzem: a - um caráter não estacionário nos dados, ou seja, o pulso sísmico terá sua forma e amplitude continuamente distorcidas com o tempo; b - perda da resolução; e c - deslocamento dos eventos no tempo devido às menores velocidades de propagação dos componentes de baixa frequência que predominam no pulso com a propagação.

2 - MODELOS PARA ATENUAÇÃO E DISPERSÃO

Encontram-se, na literatura, vários modelos para representação dos efeitos de atenuação e dispersão baseados em diferentes filosofias e princípios fundamentais, que podem ser classificados em:

- 1 - Modelos baseados em relações constitutivas: obtidos através de modificações introduzidas nas relações *stress-strain* constitutivas simples.
- 2 - Modelos baseados em mecanismos físicos: gerados a partir de tentativas de melhor entender os mecanismos físicos envolvidos na dissipação.
- 3 - Modelos baseados em relações de causalidade: o princípio da causalidade diz que nenhum sinal pode ser captado em um certo ponto do trajeto do pulso antes de ter decorrido um tempo suficiente para que o pulso atinja esse ponto. Voltando à figura 2, podemos observar o comportamento não causal das respostas impulsivas para atenuação e dispersão quan-

do consideradas isoladamente, ou seja, existe energia chegando antes do tempo de 3 s. Nessa figura, ainda, pode-se observar a validade da causalidade quando atenuação e dispersão são consideradas conjuntamente. Os modelos baseados em relações de causalidade relacionam a atenuação com a dispersão de uma forma não ambígua, ou seja, ao se assumir uma forma para a atenuação, está-se automaticamente assumindo a forma correspondente para a dispersão e vice-versa. O contrário implicaria violação do princípio físico da causalidade.

- 4 - Modelos baseados em filtragem linear auto-regressiva (AR): esses modelos estabelecem que as respostas impulsivas para atenuação e dispersão podem ser representadas por um filtro AR, de fase mínima e variável no tempo. Sendo assim, a correção desses efeitos podem ser feitas por filtros inversos de comprimento finito e variável no tempo.
- 5 - Modelos baseados na teoria da comunicação: tratam da geração de sismogramas sintéticos para ondas compressoriais, normais e planas. Essas ondas se propagam em um modelo composto por interfaces plano-paralelas, que separam meios dissipativos com propriedades físicas distintas.

Embora exista um grande número de modelos para representação dos efeitos dissipativos, apenas alguns poucos possuem algum valor prático. Na maioria deles, a não estacionariedade inerente a esses efeitos é tratada de uma forma não contínua via janelamento, ou seja, divide-se o traço em um certo número de janelas dentro das quais assumem-se distorções constantes. Os trabalhos de ROBINSON (1979), para modelagem da dispersão, e de HALE (1982), para modelagem da atenuação e da dispersão, são os únicos que tratam da modelagem direta e inversa contínua desses efeitos. O algoritmo disponível na PETROBRÁS é fundamentado no trabalho de HALE (*op. cit.*) e será empregado mais adiante no tratamento de dados reais.

Como é comum a atenuação baixar os componentes de alta frequência a níveis inferiores ao do ruído de fundo, principalmente nas partes finais dos traços, pode ocorrer uma superelevação de ruídos de alta frequência associada à correção de atenuação que, nesses casos,

assume um caráter irreversível. Além disso, pode ocorrer, em dados marinhos, associado à compensação Q, um reforço de reflexões múltiplas que, por viajarem preferencialmente na lâmina d'água, que é um meio muito pouco dissipativo, possuem um conteúdo considerável de altas frequências. Esses problemas são contornados pelo emprego de filtros corta-altas ou pela utilização de valores superestimados de Q para as partes finais dos traços.

3 - OS EFEITOS DISSIPATIVOS E A DECONVOLUÇÃO ESTATÍSTICA

Os efeitos dissipativos possuem uma forte influência sobre o desempenho da deconvolução estatística voltada para a remoção da assinatura da fonte. Para discutir tal influência vamos assumir o modelo convolucional para representação do traço sísmico, dado por:

$$x(t) = w(t) * g(t) + n(t) \quad (2)$$

onde:

- x(t) = traço sísmico
- w(t) = assinatura da fonte
- g(t) = resposta impulsiva da subsuperfície

fície (incluindo os efeitos dissipativos)

$$n(t) = \text{ruídos aditivos}$$

Para o modelo convolucional simples, sobre o qual baseia-se a deconvolução estatística, g(t) corresponde à função refletividade e n(t) é desprezível. Além disso, a deconvolução estatística faz uso das seguintes premissas básicas entre outras: a - função refletividade aleatória, b - assinatura da fonte de fase mínima e c - assinatura da fonte estacionária. Quando realizamos essa deconvolução sem termos tratado adequadamente os efeitos dissipativos, estamos atribuindo esses efeitos a w(t), embora na verdade eles pertençam a g(t), já que foram introduzidos pela filtragem da subsuperfície. Desse modo, w(t) passa a ter um caráter não estacionário violando a premissa c acima, embora seu caráter de fase mínima fique preservado já que os efeitos dissipativos possuem esse caráter.

A figura 3 ilustra as dificuldades encontradas pela deconvolução estatística estacionária ou por janelas em comprimir os eventos sobre um traço de entrada ideal, composta unicamente pela resposta impulsiva para uma subsuperfície dis-

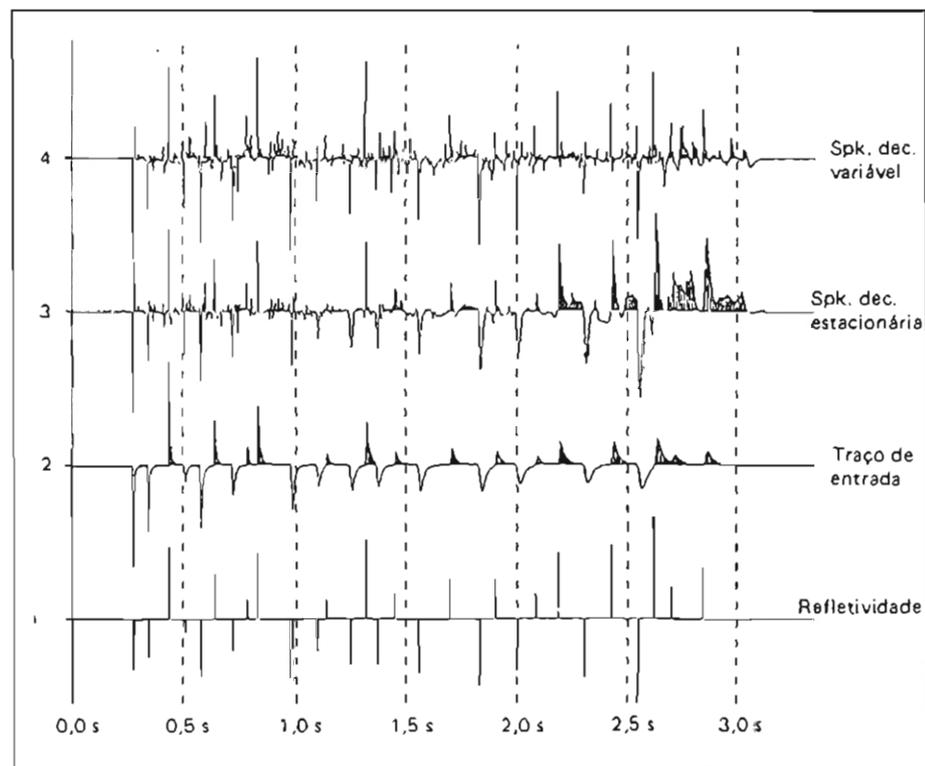


Fig. 3 - Modelamento estatístico inverso: 1 - refletividade, 2 - traço de entrada (Q = 100), 3 - traço deconvolvido por deconvolução estacionária e 4 - traço deconvolvido por deconvolução por janelas.

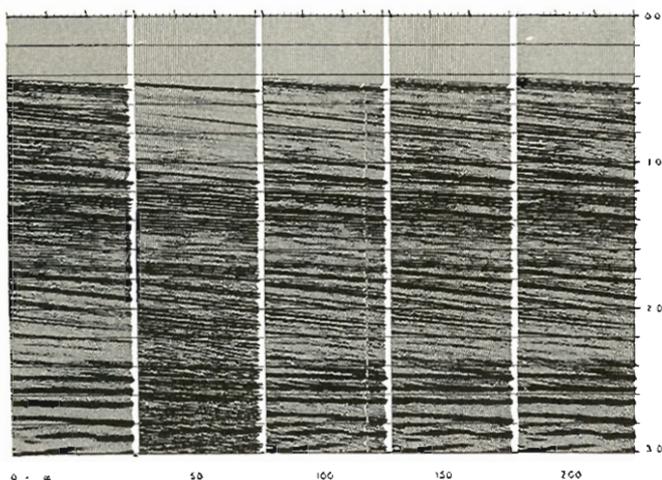


Fig. 4 - Painel de fatores Q.

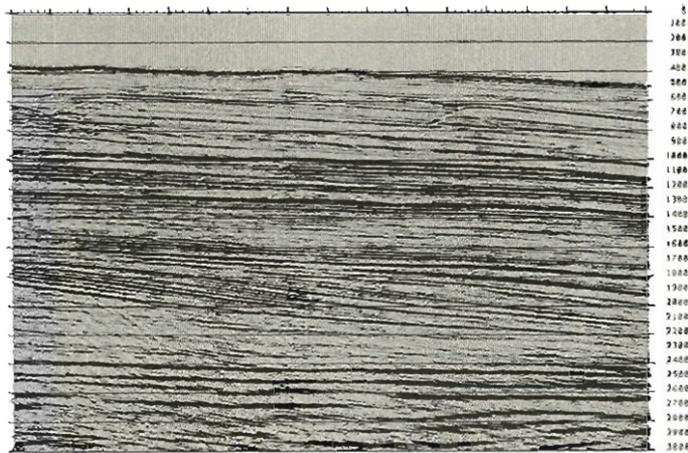


Fig. 5 - Seção com DEFANINST + deconvolução estacionária.

sipativa. Basicamente o que ocorre é que, quando empregamos um único filtro, calculado da autocorrelação de todo o traço, o traço deconvolvido conterá ainda uma dissipação residual decorrente da não-estacionariedade da assinatura da fonte, assim sendo, a autocorrelação calculada dessa forma será mais influenciada pelos eventos iniciais presentes no traço, que possuem maior amplitude e faixa de frequência mais ampla. Esse filtro terá, então, um bom desempenho apenas para a parte inicial do traço. Quando a deconvolução é feita em janelas, a estacionariedade da assinatura da fonte aumenta, mas a refletividade é segmentada, tornando-se menos aleatória, e o traço assim deconvolvido — embora seja mais estacionário — conterá distorções de amplitude e fase. Conclui-se, então que a deconvolução estatística sobre dados sem a correção prévia dos efeitos dissipativos deve ser aplicada de modo a se manter um compromisso entre a aleatoriedade da refletividade e a estacionariedade da assinatura da fonte. Idealmente, deve-se corrigir deterministicamente os efeitos dissipativos, devolvendo a estacionariedade aos dados, antes da deconvolução estatística, que deverá empregar todo o traço no cálculo do filtro para remoção da assinatura da fonte. Na PETROBRÁS, atualmente a deconvolução estatística é feita por janelas, uma vez que se sabe que os dados são não estacionários porém a não-estacionariedade é tratada estatisticamente via planejamento.

4 — ESTIMATIVAS Q

A modelagem Q determinística pressupõe o conhecimento das propriedades dissipativas da subsuperfície, ou seja, a variação dos valores de Q para os meios

atravessados. Essas estimativas para Q (t) são obtidas através de procedimentos estatísticos aplicados sobre os dados e normalmente refletem apenas de uma forma grosseira o comportamento dissipativo da subsuperfície. A depender da qualidade dessas estimativas e dos objetivos dos trabalhos interpretativos, a compensação Q é feita para uma função Q (t) constante ou variável.

O método mais comumente empregado para estimativas Q consiste em calcular espectros de amplitude em dB para janelas ao longo do traço e para cada um deles ajustar uma reta, dentro da faixa de frequências de interesse. A inclinação dessas retas fornece uma estimativa para o Q médio das camadas posicionadas acima do tempo central dessas janelas:

$$q(t) = \frac{-27,3 \cdot t}{\alpha} \quad (3)$$

onde:

t = tempo central da janela
 α = inclinações em dB/Hz

A função Q (t) também pode ser estimada através do chamado painel Q, que apresenta um conjunto de traços submetidos à compensação Q para vários valores constantes de Q. A escolha de Q (t) é feita pela análise da compressão dos eventos de interesse em relação à elevação dos ruídos de fundo ao longo do tempo e para os diferentes valores de Q analisados.

As estimativas Q obtidas de dados sísmicos são fortemente influenciadas pela atenuação não dissipativa, elástica ou aparente, gerada por reflexões múltiplas internas a camadas delgadas, limitadas

por fortes coeficientes de reflexão. A atenuação aparente age de modo a transferir a energia das altas para as baixas frequências simulando um efeito similar ao da atenuação dissipativa. Esse efeito pode representar cerca de 1/3 a 2/3 da atenuação total observada (SCHOENBERGER & LEVIN (1974), daí a dificuldade em se relacionar os valores de Q estimados com as litologias.

5 — APLICAÇÃO A DADOS REAIS

No processamento sísmico na PETROBRÁS pouca atenção se dá aos efeitos de atenuação e dispersão. Ainda como parte deste trabalho, foram aplicadas técnicas de estimativa e compensação Q na linha 213-RL-250, proveniente do levantamento 3D do Campo de Albacora da Bacia de Campos. Nessa etapa do trabalho, por facilidade operacional, procurou-se basicamente aplicar uma função Q (t) constante. As técnicas de estimativa e compensação Q foram aplicadas entre o DEFANINST e a deconvolução de fase mínima pré-empilhamento. Ajustes lineares sobre espectros de amplitude em dB ao longo de um conjunto de vinte e quatro traços e o painel Q forneceram uma estimativa de Q = 100. O painel Q empregado é mostrado na figura 4, onde podemos observar que, para Q = 100, obtemos um aumento no conteúdo de frequências sem elevar demasiadamente os ruídos de alta frequência, como acontece por exemplo com o trecho compensado para Q = 50. As diferenças observadas para os refletores rasos são resultantes de diferentes ganhos de plote.

A figura 5 mostra a seção original, onde apenas o DEFANINST e a deconvolução de fase mínima estacionária foram apli-

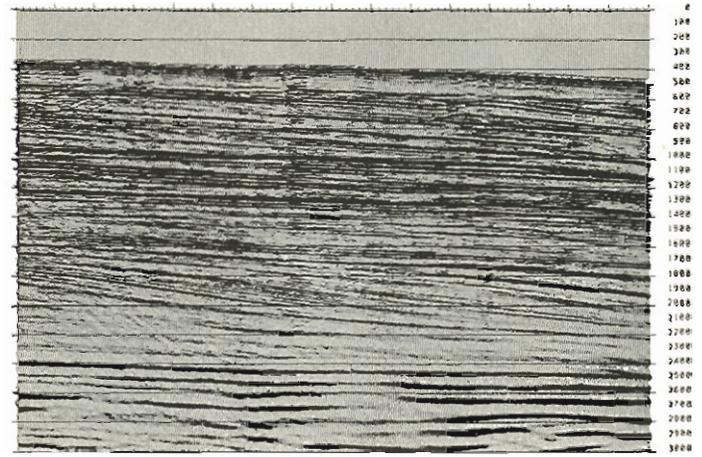
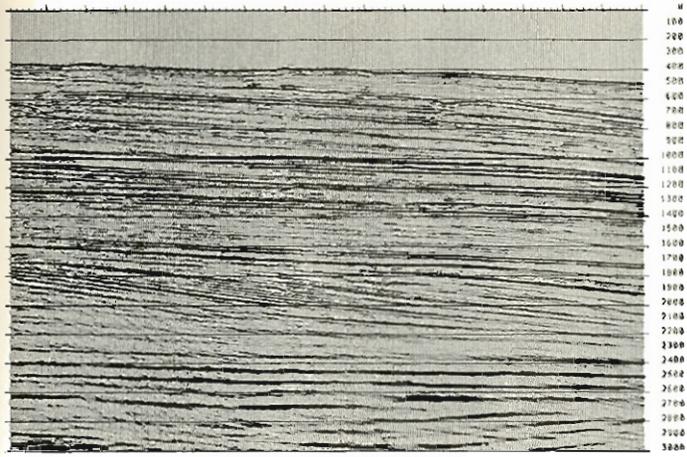


Fig. 6 - Seção com DEFANINST + deconvolução por janelas.

Fig. 7 - Seção com DEFANINST + compensação + deconvolução estacionária.

casas no processamento de assinatura. Nessa figura, podemos observar uma clara tendência de perda de altas frequências para as partes finais da seção, mostrando a ineficiência da deconvolução estacionária em compensar os efeitos dissipativos. Na figura 6, além do DEFANINST, a deconvolução de fase mínima foi feita em três janelas com 1,0 s de duração e centros em 0,5, 1,5 e 2,5 s. Podemos observar que os ganhos em termos de conteúdo de frequências não foram tão significativos. Na figura 7, é mostrada a seção cujo processamento de assinatura incluiu o DEFANINST, compensação Q para $Q = 100$ e deconvolução de fase mínima estacionária. Nessa seção, é nítido o aumento de resolução principalmente para os refletores compreendidos na seqüência progradante posicionada entre 1,5 e 2,2 s. Outra melhora significativa pode ser observada no refletor posicionado no extremo direito da seção, no tempo de 2,4 s, que cor-

responde a um corpo turbidítico produtor de óleo nesse campo. De uma maneira geral também podemos observar uma melhora significativa na estacionariedade dos dados, que agora apresentam um conteúdo de frequências mais uniforme ao longo do tempo. Na mesma seção, ainda podemos observar a ocorrência de um dos problemas associados à compensação Q, que é o reforço de reflexões múltiplas, que aqui aparecem como eventos mergulhantes, com alto conteúdo de frequências e localizados nas partes finais da seção.

Nas figuras 8 e 9, apresentam-se os espectros de amplitude em dB ao longo do tempo para os dados originais só com DEFANINST e para os diferentes processamentos de assinatura considerados. Podemos observar que os dados originais (fig. 8a) possuem um decaimento marcante de amplitude com o aumento do tempo e da frequência considerada, co-

mo decorrência dos efeitos dissipativos. O espectro para os dados com DEFANINST e deconvolução estacionária (fig. 8b) apresenta alguma recuperação no conteúdo de frequências em relação aos dados originais, porém ainda pouco significativa. Do mesmo modo, o espectro para a seção com DEFANINST e deconvolução por janelas (fig. 9a) ainda apresenta uma forte dissipação residual, mostrando que os dados ainda estão longe da estacionariedade, embora já possam ser observadas melhoras significativas no conteúdo de frequência em relação aos dois espectros anteriores. Finalmente, podemos observar que o espectro para os dados com compensação Q (fig. 9b) apresenta uma recuperação considerável de altas frequências, tornando-se mais homogêneo ao longo do tempo e evidenciando, assim, a importância da correção dos efeitos dissipativos sobre a qualidade das seções finais obtidas.

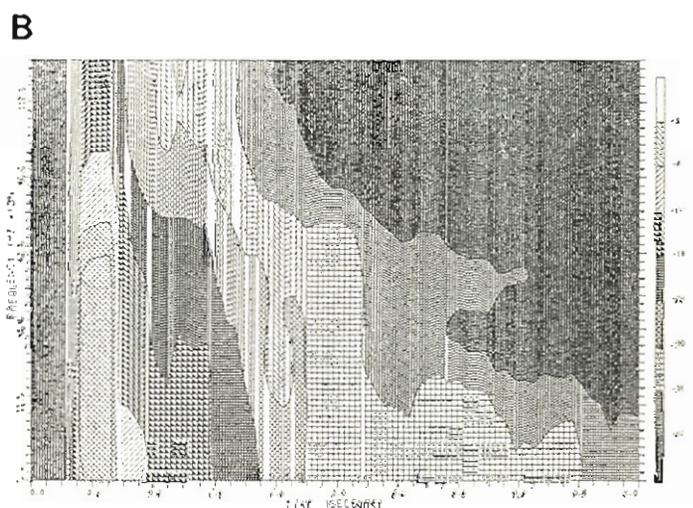
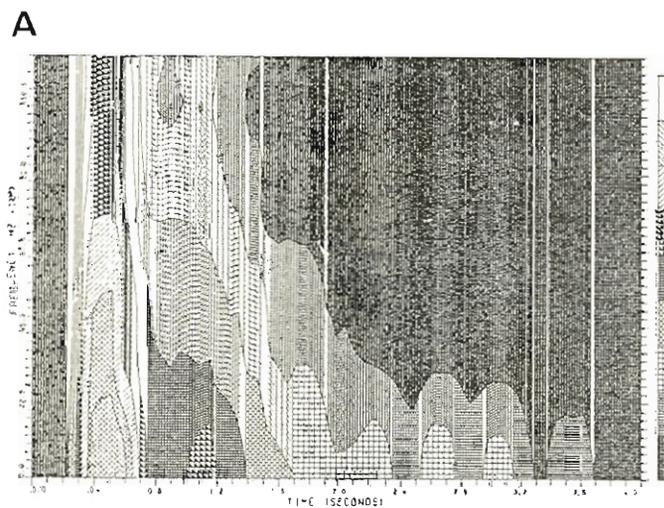


Fig. 8 - Espectros de amplitude ao longo do tempo para os dados com DEFANINST (A) e para os dados com DEFANINST e deconvolução estacionária (B).

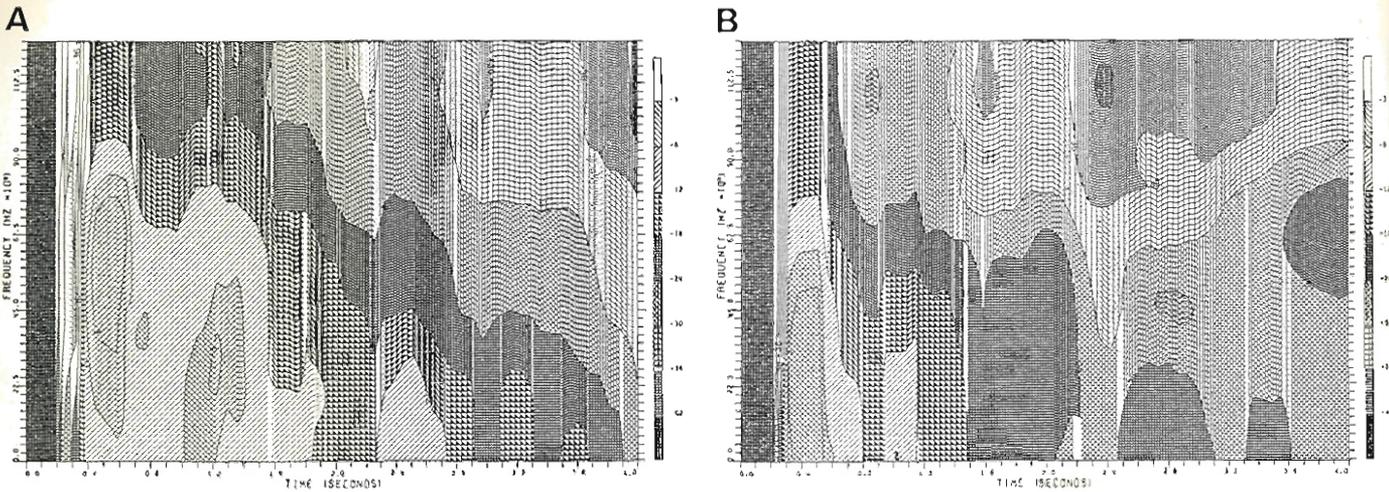


Fig. 9 - Espectros de amplitude ao longo do tempo para os dados com DEFANINST e deconvolução por janelas (A) e para os dados com DEFANINST, compensação Q e deconvolução estacionária (B).

6 - CONCLUSÕES

Maior atenção deve ser dedicada à compensação determinística dos efeitos dissipativos, que pode constituir uma ferramenta útil para aumentar a qualidade dos dados sísmicos em termos de resolução e estacionariedade, principalmente em áreas com boa relação sinal/ruído. A deconvolução estatística estacionária ou por janelas mostrou-se ineficaz - tanto em dados sintéticos como reais - para compensar a não-estacionariedade

de introduzida por esses efeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FUTTERMAN, W. I. *Dispersive body waves*. *Journal of Geophysical Research*, 67: 625-60, 1962.
- HALE, L. A. *Adaptive deconvolution*. Houston, SEG, 1982.
- McCARLEY, L. M. *An autoregressive filter model for a constant Q attenuation*. Austin, University of Texas,

1978. Thesis (Sc. M.).

- ROBINSON, J. C. A technique for continuous representation or dispersion in seismic data. *Geophysics*, 39: 278-91, 1979.
- SCHOENBERGER, M. & LEVIN, F. K. Apparent attenuation due to intrabed multiples, *Geophysics*, 39: 278-91, 1974.
- VARELA, C. L. *Um estudo sobre atenuação e dispersão: modelagem direta e inversa*. Salvador, UFBA, 1985. Tese de Mestrado em Geofísica.

ABSTRACT

Increasing attention is being directed to recorded amplitude and waveform information. In the case of seismic interpretation, it is important that the seismic trace represent the subsurface reflectivity function. One of the trends in wavelet processing is to deterministically compensate for all known distortions that affect the source signature. Dissipative attenuation and dispersion play an important role in the distortions that influence signature degradation. These effects are caused by the inelastic behavior of the earth, that continuously transforms seismic energy into heat.

Attenuation in the seismic frequency range is represented by selective frequency, varying times and exponential decay in the amplitude spectrum of given data by:

$$A(t, f) = A(0, f) \cdot \exp(-\pi f t / Q) \quad (1)$$

where:

$$A(t, f) = \text{amplitude spectrum of}$$

recorded data
 $A(0, f)$ = amplitude spectrum of source signature
 f = frequency in Hertz
 t = time in s
 Q = qualitative factor that measures the dissipative properties of the media.

Dispersion is observed in the phase spectrum and is caused by a frequency dependency on propagation velocity. Physical aspects and experiments indicate that this phase distortion corresponds to the minimum phase spectrum associated to equation 1 above.

The combined effect of dissipative attenuation and dispersion introduces a time-variable character, associated to resolution loss, into the data.

This paper presents the main models for representing absorption effects that were found in literature on this subject. Although various models - based on different fundamental principles and philosophies - to represent such effects do exist, only a few of them are of

practical value. The majority treat nonstationarity related to these effects in a discontinuous way, by means of windowing. Only the algorithms developed by ROBINSON (1979) for dispersion modelling, and by HALE (1982) for attenuation and dispersion modelling, treat the modelling of these effects in a continuous manner.

The deterministic modelling of absorption requires estimates of the earth's dissipative properties or, in other words, estimates of the $Q(t)$ function. Such estimates are obtained through statistical procedures applied to the data and generally only roughly indicate the actual $Q(t)$ function. The most common method to estimate $Q(t)$ function is by using the high frequency loss in the amplitude spectra during a determined time. The $Q(t)$ function can also be estimated by means of the Q -panel, that shows a set of traces that are compensated for various constant Q values. Such estimates are strongly influenced by apparent attenuation, as described by SCHOENBERGER & LEVIN (1974), and it is therefore difficult to relate the estimated Q values to the