



## Atributos de atenuação da onda P extraídos de um perfil sônico

Louis Dostoievsky Gomes Tabosa<sup>1</sup>, José Agnelo Soares<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Mineração e Geologia, Universidade Federal de Campina Grande.

Copyright 2010, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, Brasília, 14 a 17 de novembro de 2010. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IV SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.*

### Abstract

This work deals with the extraction of attenuation attributes from compressional waves logged in a real well. To achieve this goal, an algorithm was developed based on spectral ratio analysis of recorded waves, which replaces the traditional artificial reference by a reference sample obtained from the well log. The main attenuation attribute considered was the quality factor Q. The results showed good correlation with others petrophysical logs of the well, showing that the proposed method offers new independent information at very low additional costs, since it is derived from already available data.

### Introdução

Na propagação de ondas elásticas em um material qualquer, há dissipação de parte da energia inicial no meio, caracterizada pela redução das amplitudes de tais ondas à medida que se propagam. A partir desta atenuação de onda é possível determinar o coeficiente de atenuação do meio e o fator de qualidade Q que, ao contrário do coeficiente de atenuação, é independente da frequência da onda elástica, tornando-o mais adequado para a caracterização das rochas. O fator de qualidade Q depende, dentre outras variáveis, da intensidade de microfaturamento, da saturação, da porosidade e do estado de tensões. Baixos valores de Q estão, em geral, associados a rochas mais friáveis, enquanto valores elevados são representativos de rochas mais competentes.

Neste trabalho, os dados analisados foram obtidos através de uma ferramenta de perfil sônico de onda completa no qual as ondas elásticas são registradas por oito diferentes receptores. Nesta ferramenta a distância entre a fonte e o primeiro receptor é de doze pés (3,6576 m) e dois receptores consecutivos se encontram separados por meio pé (0,1524 m). O perfil sônico de onda completa registra dados que permitem o cálculo dos coeficientes de atenuação para as ondas compressional, cisalhante e Stoneley (Mathieu & Toksöz, 1984; Goldberg et al., 1984a; Goldberg et al., 1984b). Neste trabalho as análises foram realizadas apenas para as ondas compressionalis.

O método mais amplamente empregado para a medição da atenuação de ondas elásticas em rochas é o método da razão espectral (Bourbié et al., 1987). Este método é de fácil implementação, além de ser pouco sensível à relação sinal/ruído, tendo se mostrado adequado para utilização neste trabalho. O método da razão espectral, desenvolvido para análise de ondas registradas em laboratório, se baseia na comparação entre as ondas obtidas em uma amostra de rocha e em uma amostra de referência de mesmo comprimento. A amostra de referência deve ser de um material com atenuação desprezível, por esta razão normalmente se usa para esse fim uma amostra de alumínio. Para substituir esta amostra de referência, no ambiente do poço, desenvolvemos uma análise, baseada no método da razão espectral, que não utiliza nenhuma amostra artificial de referência, mas procura extrair os atributos de atenuação diretamente do perfil sônico de onda completa, usando como referência uma onda registrada em um trecho específico do perfil.

### Metodologia

Baseada no método da razão espectral, a análise a seguir foi realizada, diretamente, a partir dos dados registrados no perfil sônico em cada receptor.

Foram analisadas as ondas registradas, para um determinado receptor, em diferentes profundidades. A onda que apresenta maior amplitude no primeiro período é aquela que sofre a menor atenuação, constituindo-se, esse primeiro período, na amostra de referência. Essa amostra de referência, juntamente com o primeiro período de uma onda registrada em uma segunda profundidade forma o par de amostras necessário à análise dos atributos de atenuação pelo método da razão espectral, na segunda profundidade. Neste caso as amostras apresentam o mesmo comprimento ( $x_1 = x_2$ ), pois a distância fonte-receptor é fixa, e como correspondem a profundidades diferentes, apresentam diferentes coeficientes de atenuação no intervalo analisado. No intervalo das frequências utilizadas (dezenas de KHz) o coeficiente de atenuação varia linearmente com a frequência (Toksöz et al., 1979):

$$\alpha(f) = \gamma f \quad (1)$$

A constante de atenuação (ou decremento logarítmico)  $\gamma$  se relaciona ao fator Q por:

$$Q = \frac{\pi}{\gamma V} \quad (2)$$

onde  $V$  é a velocidade de propagação da onda. Assim, de acordo com a equação (1), a razão entre os logaritmos das amplitudes das ondas registradas por um par de receptores é dada por:

$$\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = (\gamma_2 - \gamma_1)x f + \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right) \quad (3)$$

onde  $G_1$  e  $G_2$  representam fatores geométricos do meio em que as ondas se propagam,  $x$  é a distância entre fonte e receptor e  $f$  a frequência. Os valores de  $G_1$  e  $G_2$  não interferem na análise da atenuação, pois para a determinação do fator de qualidade  $Q$  é necessário, de acordo com as equações (1) e (2), apenas o coeficiente angular da reta definida pela equação (3). Obtém-se, assim, o termo  $(\gamma_2 - \gamma_1)$  diretamente do gráfico do logaritmo natural da razão espectral das amplitudes contra a frequência. A partir daí, considerando que a amostra de referência apresenta atenuação mínima, e após o cálculo da velocidade diretamente da curva de tempo de trânsito, calcula-se o fator de qualidade de acordo com a equação (3).

**Resultados**

A metodologia adotada neste trabalho foi aplicada para a investigação dos atributos de atenuação da onda compressional do perfil sônico de onda completa registrado em um poço produtor de petróleo. Especial ênfase é dada na quantificação do fator  $Q$ .

Inicialmente foi realizada a seleção do trecho das ondas correspondentes ao primeiro comprimento de onda, para todas as ondas investigadas, garantindo que o trecho analisado corresponda à primeira chegada da onda compressional. Em seguida foram calculados os espectros de amplitude e de fase dos trechos selecionados, utilizando a transformada de Fourier. A Figura 1 apresenta os trechos selecionados de duas ondas, além dos respectivos espectros de amplitude e de fase.

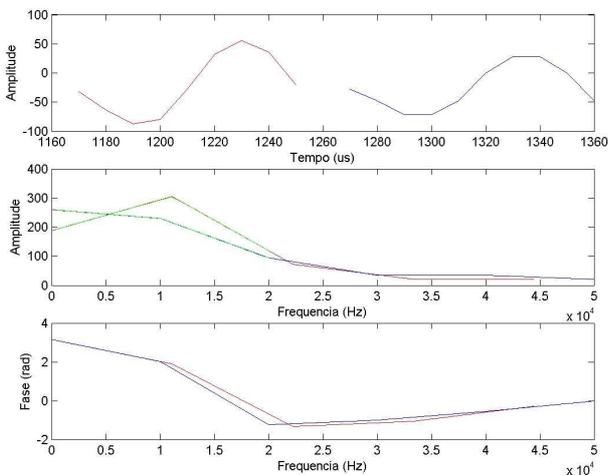


Figura 1 – Trechos selecionados correspondentes ao primeiro período de duas ondas com seus respectivos espectros de amplitude e de fase.

No intervalo selecionado, calculou-se o logaritmo neperiano da razão entre os espectros de amplitude do trecho da onda em análise e do trecho da onda de referência. A partir daí, ajustou-se uma função linear ao gráfico do logaritmo neperiano da razão entre os espectros das amplitudes contra a frequência, conforme apresentado na Figura 2, para uma dada profundidade do poço.

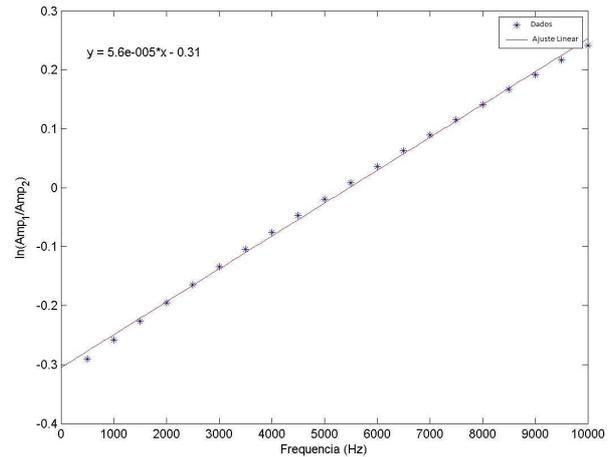


Figura 2 – Ajuste linear no gráfico do logaritmo neperiano da razão dos espectros de amplitude versus frequência.

De acordo com a equação (3) o coeficiente angular dessa função de ajuste corresponde ao produto entre a constante  $\gamma$  e o comprimento da amostra. A velocidade entre cada par de receptores foi obtida pela razão entre a distância que os separa e a diferença entre os tempos de primeira quebra da onda. Assim, obtém-se o fator  $Q$  através da equação (2) para cada profundidade. O resultado obtido está ilustrado na Figura 3.

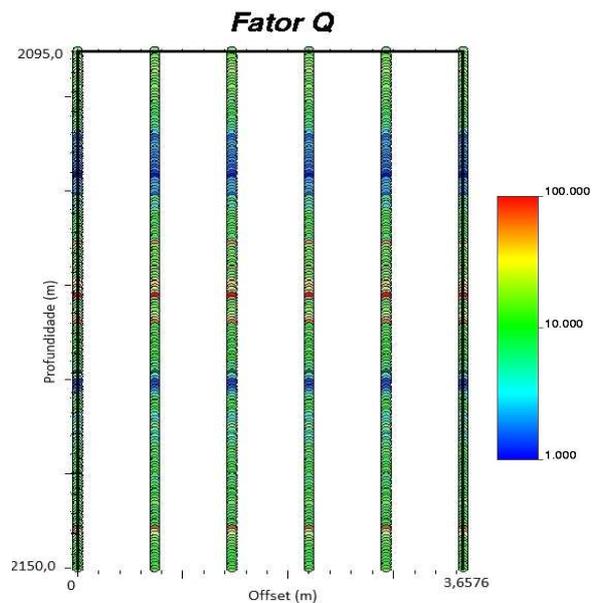
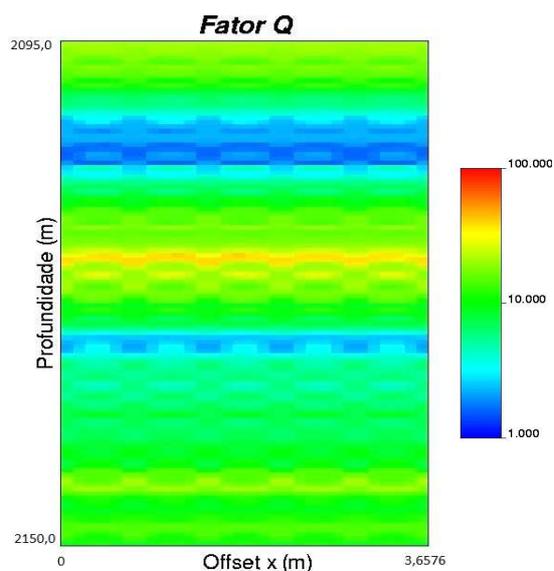


Figura 3 – Fator  $Q$  calculado para o primeiro receptor.

Na realidade o resultado apresentado na Figura 3 é apenas uma das seis linhas verticais apresentadas. A representação foi modificada para ressaltar que o resultado representa uma média do trecho analisado, que corresponde a distância entre a fonte e o primeiro receptor (12 pés = 3,6576 m), além de facilitar a visualização. Contudo, é preciso cuidado na interpretação da Figura 3, pois apesar de apresentada em duas dimensões, a profundidade e o offset estão na mesma dimensão.

As formas de onda do perfil foram analisadas a cada pé de profundidade. Deste modo, apesar de próximos verticalmente, os dados são distintos, sendo necessário estimar os valores do fator Q nestes intervalos, visando à elaboração de um mapa que mostre a variação contínua do fator Q no trecho analisado. Como as formas de onda não são aleatórias, pois existe um fator regional que as condicionam, neste trabalho foi utilizada a técnica da krigagem para estimar os valores de fator Q nos intervalos entre receptores, já que esta é uma técnica refinada de interpolação de dados.

A Figura 4 apresenta o mapa krigado de fator Q no intervalo entre a fonte e o primeiro receptor, para todo o intervalo de profundidades analisado.

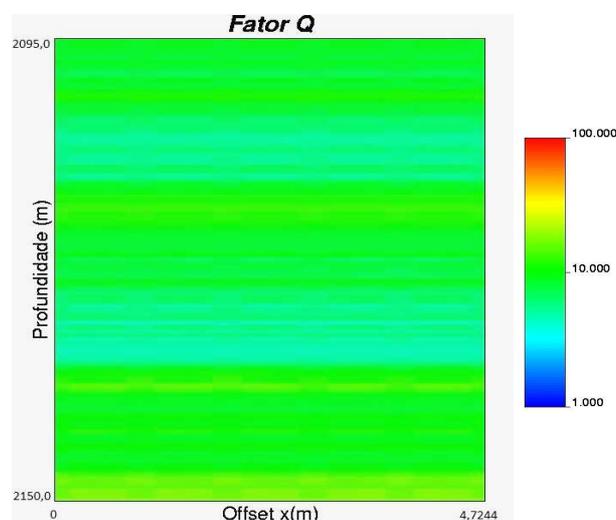


**Figura 4** – Distribuição contínua do fator Q no intervalo entre a fonte e o primeiro receptor.

A investigação que resultou na Figura 4 foi realizada para as ondas propagadas no intervalo entre a fonte e o primeiro receptor, entretanto pode-se aplicar o mesmo raciocínio para os demais receptores (fonte-receptor 2, fonte-receptor 3 e etc.), gerando um único gráfico krigado. Dessa forma, além de mostrar continuamente a variação do fator Q entre as diferentes profundidades, o gráfico gerado mostrará também a variação do fator Q em função do offset.

Para fins de ilustração da variação do fator Q com o offset, a Figura 5 apresenta o mapa krigado de fator Q no

intervalo entre a fonte e o oitavo e último receptor, para todo o intervalo de profundidades do poço analisado.



**Figura 5** – Distribuição contínua do fator Q entre as profundidades no intervalo Fonte-Receptor 8.

Observa-se na Figura 4 uma indicação muito clara das profundidades com valores baixos do fator de qualidade Q, indicadas pela predominância da cor azul. A Figura 5 apresenta semelhanças com a Figura 4, nos trechos com baixos valores do fator Q, entretanto, com menor definição. Isto ocorre porque a onda registrada no oitavo receptor apresenta uma atenuação mais significativa do que aquela registrada no primeiro receptor, já que se encontra mais afastado da fonte. Além disso, o fator Q obtido é uma média dos valores entre a fonte e o receptor, para cada intervalo de profundidades. Assim, quanto maior a distância da fonte, menos detalhada é a informação obtida.

A Figura 6 apresenta uma comparação entre os painéis de fator Q para o primeiro e o oitavo receptores e os demais perfis geofísicos registrados no poço em investigação. Aqueles perfis geofísicos indicam a presença de duas zonas com potencialidades para reservatório: uma que vai da profundidade 2101 m a 2111 m, e outra que vai de 2124 m a 2141 m. Em primeiro plano se observa que os valores mais reduzidos para o fator de qualidade (abaixo de 10 unidades) se encontram diante daquelas possíveis zonas potencialmente produtoras de hidrocarbonetos.

A zona menos profunda coincide com baixos valores de fator Q em praticamente toda a sua espessura, para ambos os receptores analisados. Este fato reforça a interpretação dos demais perfis que indicam a ocorrência de hidrocarbonetos nesta zona.

A zona mais profunda apresenta uma provável lente interna de rocha não-reservatório em torno da profundidade 2130 m. Os valores de fator Q sugerem que acima daquela lente ocorre a presença de hidrocarbonetos e que há um contato óleo-água aproximadamente coincidente com a lente. Observa-se também que o padrão de variação do fator Q diferencia

sensivelmente do perfil de tempo de trânsito, constituindo-se numa fonte independente de informação.

### Conclusões

Os valores calculados neste trabalho para o fator Q são coerentes, em ordem de grandeza, com os relatados na literatura especializada (Toksöz & Johnston, 1981; Bourbié et al., 1987; Marques et al., 2009) para rochas sedimentares saturadas sob condições *in situ* de tensão e temperatura. No entanto, os valores de fator de qualidade aqui apresentados foram extraídos diretamente do perfil sônico de onda completa registrado em um poço, diferentemente dos valores relatados na literatura, os quais foram medidos em laboratório.

Os atributos de atenuação calculados mostraram boa correlação com outras propriedades do meio analisado, conforme se pode visualizar na Figura 6. O fator Q pode ser relacionado a fenômenos petrofísicos importantes como saturação fluida, anisotropia elástica e deformação visco-elástica, este último de grande importância no estudo do comportamento mecânico de rochas evaporíticas, fenômeno conhecido como *creep* salino (Toksöz et al., 1979b).

No caso analisado se identifica (Figura 4) claramente os intervalos de profundidades com valores baixos do fator de qualidade Q, que, somados à análise dos demais perfis (Figura 6), indicam a presença de petróleo e de um contato óleo-água. Os perfis de fator Q construídos para as ondas registradas pelo primeiro e oitavo receptores indicam uma redução na variabilidade deste atributo com o aumento da distância fonte-receptor. Provavelmente este fenômeno está condicionado pela escala de investigação. Recomenda-se realizar a mesma análise para as ondas registradas pelos demais receptores.

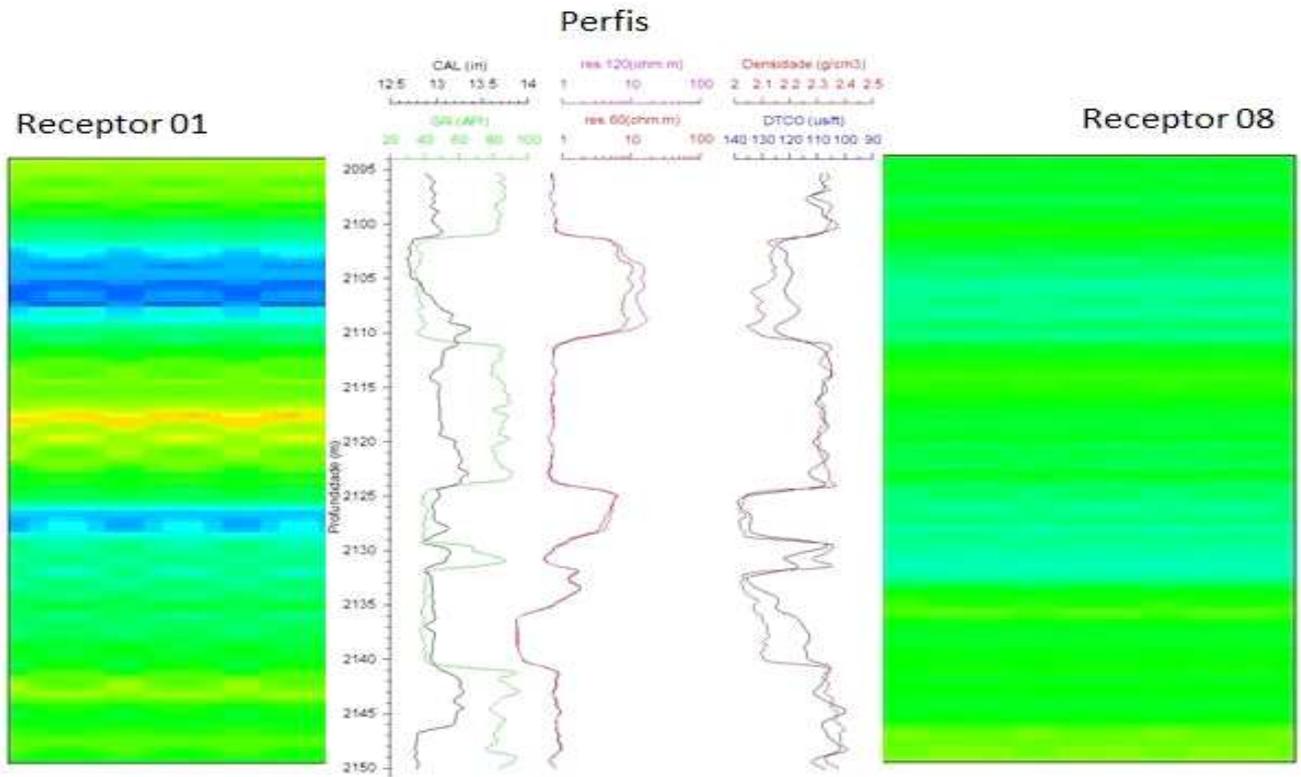
O perfil sônico de onda completa também registra outros tipos de onda, além da compressional. Recomenda-se proceder à futura análise dos atributos de atenuação da onda cisalhante e buscar definir possíveis correlações da razão entre os fatores de qualidade das ondas P e S e a saturação fluida, conforme relatado na literatura.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a PETROBRAS pela cessão dos dados utilizados neste trabalho. Em especial, à graciosa colaboração do Geólogo Carlos Francisco Beneduzzi, que muito se empenhou na seleção deles e na discussão dos seus múltiplos aspectos.

### Referências

- BOURBIÉ, T.; COUSSY, O.; ZINSZNER, B.; 1987. Acoustics of Porous Media. Éditions Technip, 334 p.
- GOLDBERG, D.S.; KAN, T.K.; CASTAGNA, J.P.; 1984a. Attenuation measurements from sonic log waveforms. 25th SPWLA Logging Symposium.
- GOLDBERG, D.S.; GANT, W.T.; SIEGFIED, R.W.; CASTAGNA, J.P.; 1984b. Processing and interpretation of sonic log waveforms: a case study. Paper BHG 2.4, 54th SEG Meeting.
- MATHIEU, F.; TOKSÖZ, M.N.; 1984. Application of full waveform acoustic logging data to the estimation of reservoir permeability. Paper BHG 1.5, 54th SEG Meeting.
- MARQUES, Z.M., SOARES, J.A., LANDAU, L., 2009. Extração de atributos de atenuação de ondas elásticas em rochas sedimentares. Anais do 11º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica.
- TOKSÖZ, M.N.; JOHNSTON, D.H.; TIMUR, A.; 1979a. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements. Geophysics, v. 44, p. 681-690.
- TOKSÖZ, M.N.; JOHNSTON, D.H.; TIMUR, A.; 1979b. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: II. Mechanisms. Geophysics, v. 44, pp. 691-711.
- TOKSÖZ, M.N.; JOHNSTON, D.H.; 1981. Seismic wave attenuation. Society of Exploration Geophysicists, Geophysical Reprint Series N° 2, 459 p.



**Figura 6** – Comparação entre os perfis de raios gama, resistividade, densidade e sônico com o fator de qualidade Q calculado para o primeiro e oitavo receptores.