



Comparação entre métodos de determinação e inversão do fator de qualidade Q

Bonnie Ives de Castro Nunes^{1,2}
 Aderson Farias do Nascimento^{1,2}
 José Antônio de Moraes Moreira²
 Walter Eugênio de Medeiros^{1,2}

¹ Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica / UFRN
² Departamento de Geofísica / UFRN

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.

Resumo

Os estudos da atenuação das ondas sísmicas é uma ferramenta importante na discriminação de reservatórios. Os processos associados são sintetizados numa descrição quantitativa chamada fator de qualidade Q. Neste trabalho fazemos uma comparação entre diferentes métodos para determinar Q, sendo dividido em duas partes. Na primeira fizemos um teste de performance de três métodos (deslocamento de pico, de centróide e razão espectral) em um modelo de três camadas. Na segunda parte invertemos os valores de Q utilizando os métodos de deslocamento de centróide e de pico. O deslocamento de centróides mostrou-se o mais robusto dos métodos em ambas as partes.

Introdução

Os modelos mais simples de propagação de uma onda elástica consideram o meio como ideal, mas na realidade, fatores intrínsecos do próprio meio contribuem para a perda de energia da onda. Dessa forma o pulso além de perder amplitude, sofre perda de componentes de frequências mais altas. Este efeito denominamos de atenuação.

A atenuação de uma onda ao se propagar em um meio dispersivo tem se tornado uma ferramenta de grande importância no processamento de dados sísmicos e de GPR (Moreira, 2006). Segundo Tonn (1991), esta importância se dá por dois motivos: 1) Os efeitos da atenuação inelástica podem ser eliminados através de filtros inversos e 2) a atenuação pode ser reconhecida como um atributo sísmico significativo melhorando a interpretação de sismogramas no que diz respeito à petrofísica, litologia, porosidade, permeabilidade, viscosidade e saturação das rochas (Wang, 2003; Parra, 2006, Li *et al.*, 2006; Moreira, 2006; Zhang, 2008).

Existem diversos processos responsáveis pela atenuação de uma onda, por isso, com o objetivo de criarmos um modelo que considere a perda permanente da energia de uma onda, utiliza-se o fator de qualidade Q. Este fator reúne todos estes processos em um único parâmetro quantitativo. Por isso, muitos autores têm dedicado esforços em relacionar a atenuação com a caracterização

de reservatórios devido ao fato de que em rochas porosas saturadas observa-se forte atenuação (Parra & Hackett, 2002; Catagna *et al.*, 2003; Tanner & Treitel, 2003; Hübert *et al.*, 2005; Chapman *et al.*, 2005; Dvorkin & Mavko, 2006).

Assim, o ponto-chave para diversas informações petrofísicas e litológicas pode estar na determinação do fator de qualidade Q. Podemos encontrar na literatura diversas abordagens para estimar Q, Tonn (1991), comparou dez abordagens e as dividiu em dois grupos: a) abordagens no domínio do tempo e b) abordagens no domínio da frequência.

Nos últimos anos outras abordagens, como as sugeridas por Quan & Harris (1997), Zhang & Ulrych (2002), Rickett (2006) e Moreira (2006) têm surgido e demonstraram-se muito eficazes e robustas. Visto que há uma grande distância temporal entre o trabalho de Tonn (1991) e os dias atuais, este trabalho tem como objetivo realizar um teste de sensibilidade entre três abordagens. São elas: razão espectral (Spencer *et al.*, 1982), deslocamento de centróide (Quan & Harris, 1996) e Deslocamento de pico (Zhang & Ulrych, 2002).

Logo após realizado o teste de sensibilidade, escolhemos duas abordagens para a realização da inversão em modelos mais elaborados.

Metodologia/ Problema Investigado

O conhecimento de Q tem grande importância no uso dos filtros inversos. Monitorar a atenuação numa seção sísmica pode garantir bons resultados nas estimativas de Q. Dessa forma, Zhang & Ulrich (2002) desenvolveram um método para determinar o fator de qualidade monitorando o deslocamento do pico do espectro de frequência num modelo de uma camada plana (figura 1):

$$Q = \frac{\pi\sigma^2}{f_d - f_p} \quad (1)$$

sendo; f_d e f_p os picos de frequência do sinal de entrada e do refletido na base da camada respectivamente; t o tempo duplo de trânsito da chegada da reflexão e σ o desvio padrão do espectro do sinal refletido. Quan & Harris (1996) monitoram o deslocamento do espectro através da comparação entre centróides de frequência (figura 2):

$$Q = -C\pi \left(\frac{f_{c2} - f_{c1}}{t_2 - t_1} \right)^{-1} \quad (2)$$

sendo f_{c1} e f_{c2} os centróides de frequência do primeiro e do segundo sinal registrados nos tempos t_1 e t_2 respectivamente, e C a variância do espectro do segundo sinal. Spencer *et al.* (1982) desenvolveram uma técnica que compara o logaritmo da razão entre dois espectros (figura 3):

$$\log \left[\frac{A_1(\omega)}{A_0(\omega)} \right] = \beta - \frac{\omega \Delta \tau}{2Q} \quad (3)$$

sendo $A_1(\omega)$ e $A_0(\omega)$ os espectros de amplitudes dos sinais refletidos na base da camada e o de entrada respectivamente. Moreira (2006) inverte o fator de qualidade em múltiplas camadas comparando o deslocamento entre centróides. Nunes (2010) modifica o algoritmo comparando o deslocamento entre os picos. Os espectros são obtidos do modelo de dispersão de Futterman (1962) e como otimizador da função objeto utilizamos o método de busca iterativa COMPLEX (Richardson & Kuester, 1973).

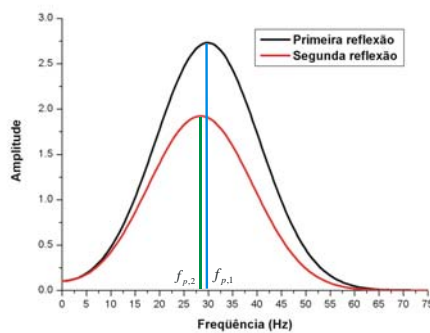


Figura 1 - Espectros de duas reflexões de chegadas em instantes diferentes. Em preto, temos a primeira reflexão. Em vermelho, temos a segunda reflexão, onde $f_{p,1}$ e $f_{p,2}$ são os picos de frequência da primeira e da segunda reflexão respectivamente.

A comparação entre os métodos foi realizada utilizando um modelo de quatro camadas, sendo a última um semi-espaço, em três situações distintas:

- Situação 1: Variamos a espessura da camada 2 e mantemos Q dessa camada constante;
- Situação 2: Variamos Q da camada 2 e mantemos sua espessura constante;
- Situação 3: variamos o mergulho da base da segunda camada.

Em todas as situações, a espessura e o valor de Q das camadas 1 e 3 são mantidas constantes. Em todos os casos contaminamos o dado com um ruído equivalente à 0,5% da amplitude da primeira reflexão.

Logo após o teste de sensibilidade escolhemos os métodos de pico e de centróide para realizarmos a

inversão em um modelo de sete camadas plano-paralelas.

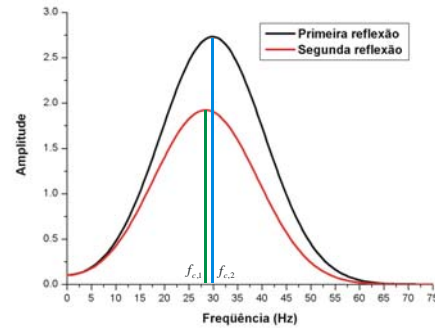


Figura 2 - Espectros de duas reflexões de chegadas em instantes diferentes. Em preto, temos a primeira reflexão. Em vermelho, temos a segunda reflexão, onde $f_{c,1}$ e $f_{c,2}$ são os centróides de frequência da primeira e da segunda reflexão respectivamente.

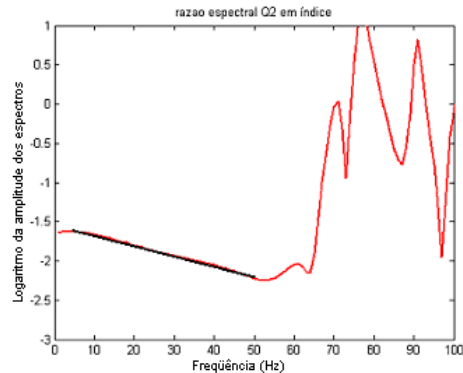


Figura 3 - Gráfico da razão espectral. No eixo horizontal, temos os valores das frequências. No eixo vertical, temos os valores dos logaritmos das razões entre as amplitudes. O fator de qualidade Q das duas camadas em questão eram iguais a 50. A linha escura representa a região linear do gráfico.

Resultados

Na situação 1, para a determinação de Q da camada 2 todos os métodos apresentaram bons resultados quando se utilizaram pulsos de frequências centrais de 30 e 40Hz. Os erros observados se encontravam na faixa dos $\pm 5,0\%$ para todos os métodos. Porém, na frequência de 60 Hz, observamos que os métodos tornavam-se cada vez mais imprecisos à medida que aumentávamos a espessura da camada 2. O método da razão espectral demonstrou-se mais preciso nas situações 1. No entanto, o método de deslocamento de centróides apresentou bons resultados em espessuras maiores (figuras 4, 5 e 6).

Ainda na situação 1, para a determinação de Q da camada 3 observamos também que os métodos tornavam-se mais imprecisos com o aumento da frequência central do pulso de entrada. Em todas as

freqüências utilizadas, o método de picos demonstrou-se bastante impreciso com erros atingindo mais de 25%. O método de centróides foi o que mais se destacou, demonstrando bastante robustez nas freqüências centrais de 30 Hz e 40 Hz. Porém, demonstrou bastante instabilidade na freqüência de 60 Hz. O método da razão espectral também se demonstrou bastante robusto nas freqüências de 30 Hz e 40 Hz, porém, perdia a instabilidade em espessuras menores da camada 2 em relação ao método de centróides (figuras 7, 8 e 9).

Na situação 2, mantivemos as espessuras das camadas constantes e variamos o fator de qualidade da segunda camada. Na determinação de Q da camada 2, o método de deslocamento de picos demonstrou bastante robustez quando utilizado o pulso de freqüência central 30 Hz e 40 Hz. Porém, na freqüência de 60 Hz, observamos uma grande instabilidade da parte do método. Os métodos de deslocamento de centróides e da razão espectral demonstraram bastante robustez para todas as freqüências centrais utilizadas sendo os que mais se destacaram nessa situação (figuras 10, 11 e 12).

Para a determinação de Q na camada 3, o método de deslocamento de picos demonstrava precisão à medida que diminuíamos a atenuação da camada 2, nas freqüências de 30 Hz e 40 Hz. Na freqüência central de 60 Hz, o método demonstrou bastante instabilidade no intervalo de Q entre 10 e 100. Os métodos de deslocamento de centróides e o da razão espectral destacaram-se nesta situação, porém, o do deslocamento de centróides foi o mais preciso (figuras 13, 14 e 15).

Na situação 3 mantivemos os valores de Q constante em todas as camadas, porém, variamos a inclinação da interface entre as camadas 2 e 3. O objetivo deste teste era o de observar a robustez em determinar o fator de qualidade da camada 3. Nesta situação, pudemos observar que todos os métodos foram bastante instáveis nas freqüências centrais de 30 Hz e 40 Hz. Porém, quando utilizamos o pulso de freqüência central 60 Hz, destacamos os métodos de deslocamento de centróides e o da razão espectral. O método de deslocamento de centróides foi bastante preciso até a inclinação de 16° , enquanto que a razão espectral manteve sua precisão até a inclinação de 12° (figuras 16, 17 e 18).

Com o uso do algoritmo de inversão, o método que apresentou os melhores resultados foi o que compara os centróides. As tabelas 1 e 2 apresentam os resultados da inversão para o método de centróides e de picos respectivamente.

A grande vantagem do uso da estimativa por picos surge de sua rapidez computacional, visto que em alguns casos, este método convergia com até 9 vezes menos iterações através do método COMPLEX que o método de centróides.

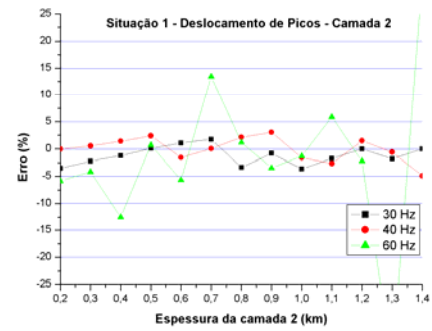


Figura 4 - Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 2 através do método de deslocamento de picos na situação 1.

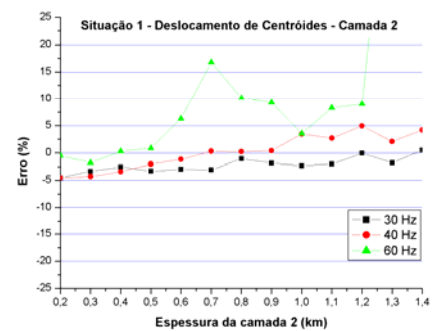


Figura 5 - Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 2 através do método de deslocamento de centróides na situação 1.

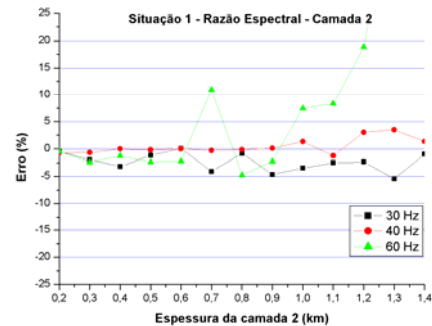


Figura 6 - Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 2 através do método razão espectral na situação 1.

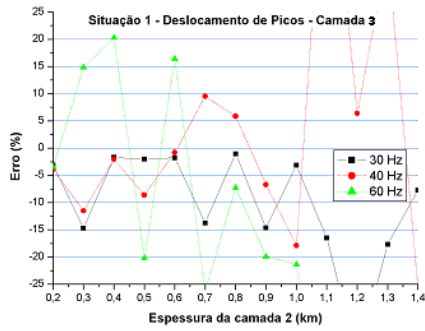


Figura 7 - Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 3 através do método de deslocamento de picos na situação 1.

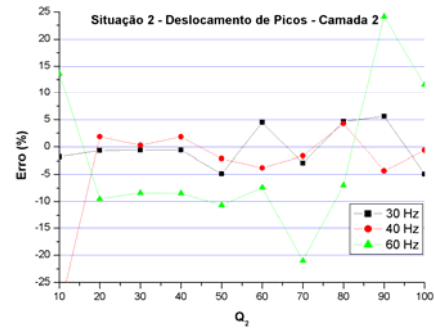


Figura 10 - Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 2 através do método de deslocamento de picos na situação 2.

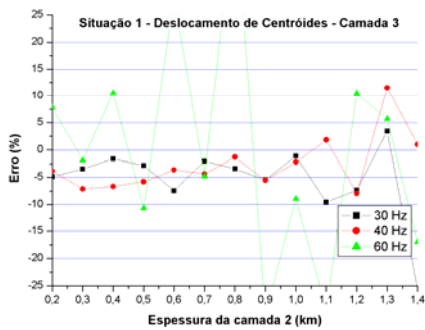


Figura 8 - Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 3 através do método de deslocamento de centróides na situação 1.

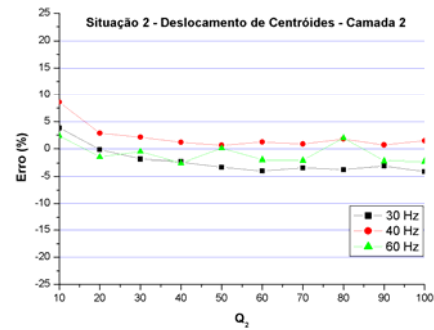


Figura 11 - Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 2 através do método de deslocamento de centróides na situação 2.

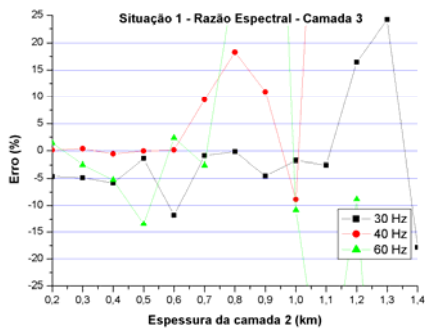


Figura 9 - Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 3 através do método razão espectral na situação 1.

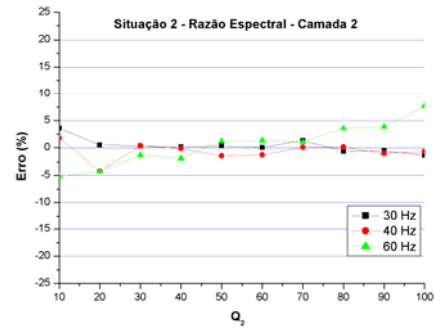


Figura 12 - Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 2 através do método de razão espectral na situação 2.

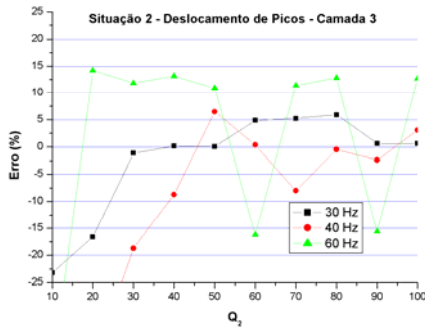


Figura 13 - Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 3 através do método de deslocamento de picos na situação 2.

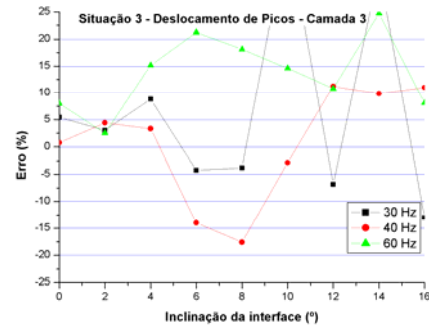


Figura 16 - Erros percentuais na estimativa de Q da camada 3 para o método de deslocamento de picos na situação 3.

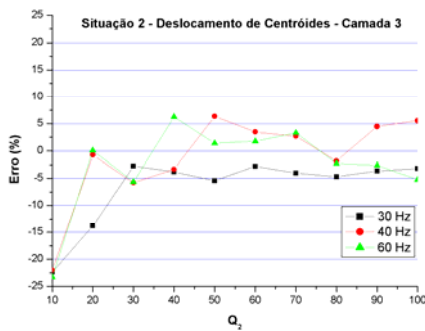


Figura 14 - Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 3 através do método de deslocamento de centróides na situação 2.

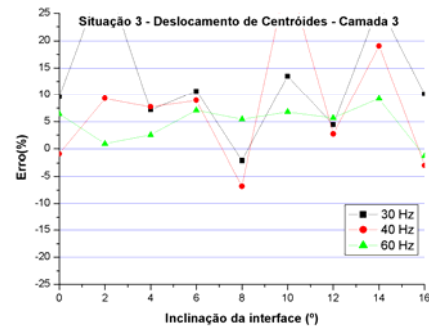


Figura 17 - Erros percentuais na estimativa de Q da camada 3 para o método de deslocamento de centróides na situação 3.

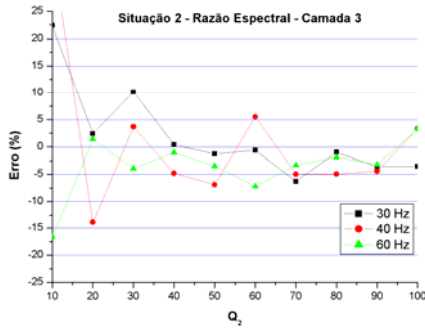


Figura 15 - Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 3 através do método razão espectral na situação 2.

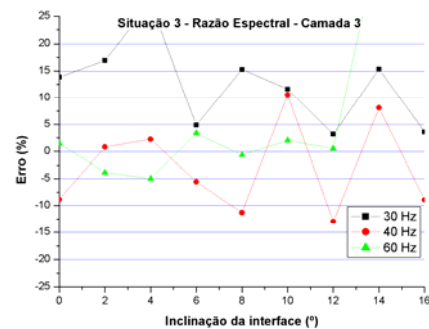


Figura 18 - Erros percentuais na estimativa de Q da camada 3 para o método razão espectral na situação 3.

Tabela 1 - Resultados da inversão através do método de comparação entre centróides.

Estimativas através da inversão do modelo 1 – Centróide							
Situação 1			Situação 2				
Q real	Estimativa	Erro	Q real	Estimativa	Erro		
Q ₂	20	18.40	-8.00%	Q ₂	120	107.24	-10.63%
Q ₃	30	34.19	13.98%	Q ₃	30	30.62	2.07%
Q ₄	40	40.27	0.66%	Q ₄	40	37.79	-5.53%
Q ₅	50	78.88	57.76%	Q ₅	50	54.53	9.06%
Q ₆	40	34.82	-12.94%	Q ₆	40	37.78	-5.55%
Q ₇	120	142.11	18.42%	Q ₇	120	119.66	-0.28%
Iterações			6186	Iterações			2597

Tabela 2 - Resultados da inversão através do método de comparação entre picos.

Estimativas através da inversão do modelo 1 - Pico							
Situação 1			Situação 2				
Q real	Estimativa	Erro	Q real	Estimativa	Erro		
Q ₂	20	17.84	-10.80%	Q ₂	120	130.47	8.72%
Q ₃	30	27.5	-8.33%	Q ₃	30	32.91	9.69%
Q ₄	40	43.9	9.75%	Q ₄	40	39.11	-2.23%
Q ₅	50	81.56	63.12%	Q ₅	50	41.39	-17.22%
Q ₆	40	31.47	-21.33%	Q ₆	40	32.27	-19.34%
Q ₇	120	143.36	19.47%	Q ₇	120	119.35	-0.54%
Iterações			684	Iterações			589

Discussão e Conclusões

As metodologias demonstraram uma grande robustez por parte da comparação entre os centróides e da razão espectral nas frequências centrais iguais a 30 Hz e 40 Hz. O método de picos demonstrou bastante dependência com a digitalização do dado. Notamos também que, para estimarmos precisamente o fator de qualidade pelos métodos de centróide e de pico, devemos provocar uma separação considerável entre os espectros observados de duas reflexões consecutivas, desde que o sinal observado tenha uma relativa qualidade.

Quando tratamos das camadas subjacentes, o método de centróides demonstrou ser o mais eficaz mesmo quando a espessura da camada acima é relativamente grande. O método da razão espectral também demonstrou uma relativa precisão, porém tornava-se menos estável antes que o método de centróides.

Nos testes onde variamos o mergulho da interface entre a segunda e a terceira camada todos os métodos demonstraram pouca precisão nas frequências centrais de 30 Hz e 40 Hz. Porém, ao aumentarmos essa frequência para 60 Hz as estimativas tornavam-se mais precisas, com destaque para o deslocamento de centróides, que apresentou relativa precisão até a inclinação de 16°.

Na inversão, o algoritmo aplicado à comparação entre os centróides de frequência tem maior robustez que o aplicado para comparar os picos. Em todos os casos, o uso do pico demonstra grande dependência com a digitalização do sinal e, mesmo sendo relativamente menos preciso que o método de centróides, é mais rápido computacionalmente utilizando o algoritmo COMPLEX (Richardson & Kuester, 1973). Ambos os métodos apresentaram resultados mais precisos com a melhora da qualidade do sinal.

Agradecimentos

Agradecemos ao projeto "Inversão de fator de qualidade de dados sísmicos e aplicação em reservatórios delgados" (CNPq Proc. No. 482841/2007-9), coordenado pelo prof. Dr. Walter Eugênio de Medeiros, pelo apoio financeiro à este trabalho.

Referências

- Castagna, J. P., Sun, S., and Siegfried, R. W., (2003). Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons: The Leading Edge, 22, 120–127.
- Chapman, M., Liu, E., and Li, X., (2005). The influence of abnormally high reservoir attenuation on the AVO signature: The Leading Edge, 11, 1120–1125.
- Futterman, W. I. (1962). Dispersive body waves. *Journal of Geophysical Research*, 69, 5279-5291.
- Li, H., Zhao, W., Cao, H., Yao, F. & Shao, L. (2006). Measures of scale based on the wavelet scalogram with applications to seismic attenuation. *Geophysics*, 71: V111-V118.
- Moreira, J. A. M. (2006). Determinação do fator de qualidade Q baseada no deslocamento do centróide de frequência independente do campo de velocidade. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica/UFRN, Natal/RN. Tese de Doutorado. 167 pp.
- Nunes, B. I. C. (2010). Estudo comparativo de abordagens de inversão do fator de qualidade Q. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica/UFRN, Natal/RN. Dissertação de Mestrado, 96 pp.
- Parra, J. & Hackert, C. L. (2006). Modeling and interpretation of Q logs in carbonate rock using a double porosity model and well logs. *Journal of Applied Geophysics*, 58: 253-262.
- Quan, Y. & Harris, J. M. (1997). Seismic attenuation tomography using the frequency shift method. *Geophysics*, 62: 895-905.
- Richardson, J.A. & Kuester, J.L. (1973). Algorithm 454: The Complex Method for Constrained Optimization [E4]. *Communications of the ACM*, 16(8): 487-489.
- Spencer, T. W., J. R. Sonnad, and T. M. Butler. (1982). Seismic Q stratigraphy or dissipation: *Geophysics*, 47, 16–24.
- Taner, M. T. and S. Treitel. (2003). A robust method for Q estimation: 73rd SEG, Expanded Abstracts, 710–713, Soc. of Expl. Geophys.
- Tonn, R. (1991). The determination of the seismic quality factor Q from VSP Data: A comparison of different computational methods. *Geophysical Prospecting*, 39, 1-27.
- Zhang, C. & Ulrych, T. J. (2002). Estimation of quality factors from CMP records. *Geophysics*, 67: 1542-1547.
- Zhang, C. (2008). Seismic absorption estimation and compensation. The University of British Columbia, Vancouver, Canada. Ph.D Thesis. 97 pp.