



**Universidade Federal do Rio Grande do Norte**

**Centro de Ciências Exatas e da Terra**

**Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ESTUDO COMPARATIVO DE ABORDAGENS DE  
INVERSÃO DO FATOR DE QUALIDADE Q**

**Autor:**

**BONNIE IVES DE CASTRO NUNES**

**Orientador:**

**Dr. ADERSON FARIAS DO NASCIMENTO**

**Co-orientador:**

**Dr. JOSÉ ANTÔNIO DE MORAIS MOREIRA**

**Dissertação n.º 84/PPGG.**

**Natal-RN, Janeiro de 2010**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ESTUDO COMPARATIVO DE ABORDAGENS DE  
INVERSÃO DO FATOR DE QUALIDADE Q**

Autor:

**Bonnie Ives de Castro Nunes**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal do Rio  
Grande do Norte como requisito  
à obtenção do grau de MESTRE  
em Geofísica.

Comissão Examinadora:

**Dr. Aderson Farias do Nascimento (orientador)**

**Dr. José Antônio de Moraes Moreira (examinador interno)**

**Dr. Walter Eugênio de Medeiros (examinador interno)**

**Dr. Milton José Porsani (examinador externo)**

Natal-RN, Janeiro de 2010.

Aos meus pais, Neusa e Gilvan pela oportunidade da vida.  
Aos meus irmãos, Brenno e Brunno por serem mais do  
que amigos e à minha amada Eleni por acreditar em mim  
e estar constantemente ao meu lado.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu Deus por ter me fornecido esta oportunidade única de realizar este difícil trabalho e por me dar forças durante os dois anos de lutas.

Ao meu orientador prof. Dr. Aderson Farias do Nascimento pela chance de trabalhar nesta área, sua competência e seus conselhos.

Ao meu co-orientador prof. Dr. José Antônio de Moraes Moreira pelo seu constante acompanhamento.

Ao prof. Dr. Walter Eugênio de Medeiros por suas valiosas sugestões em relação a este trabalho.

Aos professores geólogos Vanildo Pereira, Antônio Carlos Galindo, Alex Antunes, Francisco Pinheiro e Fernando César pela disponibilidade em tirar as minhas dúvidas sobre geologia.

Ao professor Jean Michel Legrand pela sua grande ajuda no meu aprendizado da língua francesa.

Ao professor Zorano pelo seu bom trabalho como coordenador do PPGG.

À Nilda, secretária da pós-graduação por seu constante acompanhamento em nossa vida burocrática e pelo seu enorme carinho e Luís Felipe por auxiliar no trabalho da secretaria.

Aos funcionários do Departamento de Física Teórica e Experimental e do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN.

Ao aluno de graduação em geofísica Ygor Bastos Mesquita, por sua valiosa colaboração neste trabalho.

Aos grandes amigos de sala, Irenaldo Pessoa, Francisco Eduardo, Heleno Carlos, Aline Gomes, Flávio Lemos, Paulo Duarte, Rosana Maria e Paulo Henrique pelas demonstrações constantes de amizade e companheirismo.

Ao professor Roberto Hugo, pela grande ajuda na matemática.

Ao professor Milton José Porsani por sua disponibilidade em avaliar este trabalho.

Aos meus colegas de graduação do primeiro e do segundo ano por acreditarem em mim e pelo apoio durante todo o processo.

Ao Prof. Jessé Costa (UFPA) e Ellen Gomes (UFPA) pela ajuda na implantação no Depto. de Geofísica/UFRN do software SEIS88.

À CAPES pela bolsa concedida.

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 Eugenio de Medeiros, pelo apoio financeiro à este trabalho.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia/Geofísica de Petróleo (INCT-GP/CNPq).

E, não menos importante, aos meus amigos de fora da faculdade, em especial aos companheiros da Aliança Francesa, os quais não posso citar todos os nomes aqui, por me apoiarem e acreditarem que este trabalho seria realizado.

## RESUMO

Os estudos da dispersão e da atenuação das ondas sísmicas têm se tornado uma ferramenta importante na discriminação das litologias e conteúdo de fluidos em reservatórios de hidrocarbonetos. Os processos associados à atenuação são complexos e sintetizados em uma única descrição quantitativa chamada fator de qualidade ( $Q$ ). A presente dissertação tem o objetivo de comparar diferentes aproximações para a determinação de  $Q$  e é dividido em duas partes. Primeiramente, fizemos um teste de performance e robustez de três métodos diferentes para a determinação de  $Q$  no domínio da frequência. São elas: deslocamento de pico, deslocamento de centróide e razão espectral. Todos os testes foram feitos em um modelo de três camadas. O conjunto de testes aqui realizados consistia em variar a espessura da camada,  $Q$  e a inclinação das camadas para a propagação dos pulsos com frequências centrais de 30, 40 e 60 Hz. Pudemos determinar que o método do deslocamento de centróide produz os resultados mais robustos para todo o conjunto de testes. Em segundo lugar, invertemos os valores de  $Q$  utilizando os métodos de deslocamento de pico e de centróide utilizando um algoritmo de busca sequencial. Neste caso, o método de centróide também produziu os resultados mais robustos que o método de deslocamento de picos, apesar de ter uma convergência mais lenta.

**Palavras-chave:** Atenuação, Dispersão, Fator de qualidade  $Q$ .

## ABSTRACT

Seismic wave dispersion and attenuation studies have become an important tool for lithology and fluid discrimination in hydrocarbon reservoirs. The processes associated to attenuation are complex and are encapsulated in a single quantitative description called quality factor (Q). The present dissertation has the objective of comparing different approaches of Q determination and is divided in two parts. Firstly, we made performance and robustness tests of three different approaches for Q determination in the frequency domain. They are: peak shift, centroid shift and spectral ratio. All these tests were performed in a three-layered model. In the suite of tests performed here, we varied the thickness, Q and inclination of the layers for propagation pulses with central frequency of 30, 40 and 60 Hz. We found that the centroid shift method produces robust results for the entire suite of tests. Secondly, we inverted for Q values using the peak and centroid shift methods using an sequential grid search algorithm. In this case, centroid shift method also produced more robust results than the peak shift method, despite being of slower convergence.

**Keywords:** Attenuation, Dispersion, Q-factor.



## ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>ii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 APRESENTAÇÃO .....	1
<b>2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA DA ATENUAÇÃO.....</b>	<b>4</b>
2.1 APRESENTAÇÃO .....	4
2.2 O FENÔMENO DA ATENUAÇÃO SÍSMICA .....	4
2.3 MECANISMOS DE ATENUAÇÃO.....	8
2.3.1 Atenuação intrínseca.....	8
2.4 IMPORTÂNCIA NA DETERMINAÇÃO DE Q EM RESERVATÓRIOS.....	10
2.5 DEFINIÇÕES DE Q .....	11
2.6 MODELOS DE DISPERSÃO .....	15
2.7 RESUMO DO CAPÍTULO.....	17
<b>3 ABORDAGENS DE DETERMINAÇÃO E INVERSÃO DO FATOR DE</b>	
<b>QUALIDADE Q.....</b>	<b>19</b>
3.1 APRESENTAÇÃO .....	19
3.2 ABORDAGENS DE INVERSÃO .....	19
3.3 MÉTODO DE DESLOCAMENTO DO CENTRÓIDE DE FREQUÊNCIAS.....	20
3.4 MÉTODO DO DESLOCAMENTO DO PICO DE FREQUÊNCIA.....	23
3.5 RAZÃO ESPECTRAL.....	28
3.6 RESUMO DO CAPÍTULO.....	28
<b>4 ESTIMATIVAS DO FATOR DE QUALIDADE Q.....</b>	<b>30</b>
4.1 APRESENTAÇÃO .....	30
4.2 A CRIAÇÃO DO DADO SINTÉTICO .....	30
4.3 PREPARAÇÃO DO DADO PARA A ESTIMATIVA DE Q .....	31
4.4 DETERMINAÇÃO DE Q DA SEGUNDA E TERCEIRA CAMADAS.....	32

4.4.1	Determinação dos valores do fator de qualidade $Q$ .....	33
4.4.2	Resultados obtidos para a 1ª Situação (variando a espessura da camada 2 e mantendo $Q$ constante).....	37
4.4.3	Resultados para a 2ª situação (variando $Q$ e mantendo as espessuras constantes).....	46
4.4.4	Resultados obtidos na situação 3 (variando a inclinação da interface entre as camadas 2 e 3 e mantendo $Q$ constante) .....	54
4.5	RESUMO DO CAPÍTULO.....	58
5	INVERSÃO DO FATOR DE QUALIDADE $Q$ .....	61
5.1	APRESENTAÇÃO .....	61
5.2	INTRODUÇÃO.....	62
5.3	FUNÇÃO OBJETO .....	65
5.4	CONSIDERAÇÕES INICIAIS PARA O MÉTODO DE INVERSÃO.....	66
5.4.1	Modelo 1 – Sete camadas horizontais .....	67
5.4.2	Precisão dos métodos.....	70
5.5	RESUMO DO CAPÍTULO .....	72
6	Conclusões e considerações finais .....	73
6.1	CONCLUSÕES.....	73
6.2	RECOMENDAÇÕES FINAIS .....	75
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UMA AQUISIÇÃO DE SÍSMICA DE REFLEXÃO, O PULSO SE PROPAGA ATRAVÉS DO MEIO 1, REFLUTE NA INTERFACE COM O MEIO 2 E É RECEBIDO PELO GEOFONE. ....	6
FIGURA 2.2: SISMOGRAMA SINTÉTICO REPRESENTANDO A AQUISIÇÃO ILUSTRADA NA FIGURA 2.1. NA VERTICAL REPRESENTAMOS O TEMPO DE REGISTRO DO SINAL. NA HORIZONTAL TEMOS A POSIÇÃO DOS RECEPTORES EM SUPERFÍCIE. ....	6
FIGURA 2.3: ESQUEMA TEÓRICO DO ESPALHAMENTO GEOMÉTRICO. A FONTE DE ENERGIA SITUADA NO CENTRO DO MODELO PRODUZ UMA ONDA QUE SE PROPAGA ESFERICAMENTE. À MEDIDA EM QUE ELA SE PROPAGA SUA ENERGIA SE PERMANECE CONSTANTE, PORÉM A ÁREA AUMENTA EM FUNÇÃO DO TEMPO “DILUINDO” A QUANTIDADE DE ENERGIA POR UNIDADE DE ÁREA. ....	7
FIGURA 2.4: COMPORTAMENTO DA ONDA SÍSMICA EM UM MEIO ABSORSIVO DEVIDO À VELOCIDADE, DENSIDADE E FATOR DE QUALIDADE Q. (A) SEM ABSORÇÃO E (B) COM ABSORÇÃO (MODIFICADO DE ZHANG, 2008).....	9
FIGURA 2.5: A ATENUAÇÃO É DETERMINADA PELAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS ROCHAS, TAIS COMO LITOLOGIA, POROSIDADE, SATURAÇÃO, CONTEÚDO DE FLUIDOS, ETC. (MODIFICADO DE ZHANG, 2008).....	10
FIGURA 2.6: A ARMADILHA FORMADA PELA ROCHA SELANTE. O GÁS, MENOS DENSO QUE O PETRÓLEO, PRESSIONA A ROCHA SELANTE PARA CIMA FORMANDO UM ANTICLINAL.....	11
FIGURA 2.7: AMPLITUDE VERSUS Q PARA UM PULSO DE FREQUÊNCIA 30 HZ OS TEMPOS DE TRÂNSITO 0,1 s (VERMELHO), 0,3 s (VERDE), 0,4 s (AMARELO), 0,5 s (AZUL ESCURO), 1 s (VIOLETA) E 2 s (AZUL CLARO). ....	14
FIGURA 2.8: ESTE GRÁFICO REPRESENTA O GRAU DE DISPERSÃO SEGUNDO O MODELO DE FUTTERMAN DE UM SINAL EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA Q IGUAL A 5 (VERMELHO), 10 (VERDE), 20 (AMARELO), 40 (AZUL) E 80 (LILÁS). OBSERVE QUE PARA FREQUÊNCIAS MUITO ALTAS E MUITO BAIXAS, O MODELO DEIXA DE SER LINEAR. VEJA TAMBÉM QUE A PARTIR DOS VALORES DE Q MENORES QUE 5, O MODELO PERDE A SUA LINEARIDADE. ....	16
FIGURA 2.9: COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE MÜLLER, FUTTERMAN E Q CONSTANTE. AS CURVAS SIMULAM O COMPORTAMENTO DA AMPLITUDE EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA. A CURVA PONTILHADA VERMELHA REPRESENTA O MODELO DE MÜLLER, A PRETA CONTÍNUA REPRESENTA O MODELO DE FUTTERMAN ENQUANTO QUE A PONTILHADA AMARELA REPRESENTA O MODELO DE Q CONSTANTE. O VALOR DE Q UTILIZADO É IGUAL A 30.....	17
FIGURA 3.1: REPRESENTAÇÃO DE UM ESPECTRO GAUSSIANO DE VARIÂNCIA LAMBDA. O TERMO $F_p$ REPRESENTA O PICO DE FREQUÊNCIA DESTE ESPECTRO, O TERMO $F_c$ REPRESENTA O CENTRÓIDE DE FREQUÊNCIAS DO ESPECTRO E $F_{CORTE}$ É A FREQUÊNCIA DE CORTE.....	22
FIGURA 3.2: MODELO DE N CAMADAS PARALELAS DE ESPESSURA $Z_N$ SENDO CADA CAMADA DESCRITA EM FUNÇÃO DE SUA DENSIDADE, VELOCIDADE E SEU FATOR DE QUALIDADE Q. ....	23
FIGURA 3.3: (A) UM EVENTO EM UMA AQUISIÇÃO CMP ( <i>COMMON MEDIUM POINT</i> ) É GERADO POR UM REFLETOR EM UM MEIO ABSORVENTE. OS TRAÇOS FORAM NORMALIZADOS BASEADOS EM SUAS AMPLITUDES MÁXIMAS. (B) ESPECTRO DE AMPLITUDE DA ASSINATURA DA FONTE ORIGINAL (EM PRETO), TRAÇO 1 (EM VERMELHO), TRAÇO 11 (EM VERDE) E TRAÇO 21 (EM CINZA). OBSERVE A DIFERENÇA DA POSIÇÃO ENTRE OS ESPECTROS DO TRAÇO 1 E 21. O PULSO DO TRAÇO 21 TRANSITOU POR MAIS TEMPO NESTE MEIO, SENDO ASSIM MAIS ESTREITO E MAIS	

DESLOCADO ÀS BAIXAS FREQUÊNCIAS QUE O ESPECTRO DO TRAÇO 1 (MODIFICADO DE ZHANG & ULRYCH, 2008).....	25
FIGURA 3.4: PULSO DE GABOR COM PARÂMETROS: $T_1=1,0$ ; $F_M=30$ ; $\gamma=4$ ; E $\nu=0$ .....	27
FIGURA 3.5: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS ESPECTROS GAUSSIANOS. OS PULSOS AQUI REPRESENTADOS TÊM FREQUÊNCIAS E $\Sigma$ RESPECTIVAMENTE NOS VALORES DE 30 HZ E 8 (VERMELHO); 25 HZ E 7 (VERDE); 20 HZ E 6 (AMARELO); E 15 HZ E 4,5 (AZUL). ....	27
FIGURA 4.1: REPRESENTAÇÃO DO TRAÇO GERADO SINTETICAMENTE. AS JANELAS SÃO DELIMITADAS PELOS TEMPOS $T_1$ E $T_1'$ , PARA A PRIMEIRA REFLEXÃO; $T_2$ E $T_2'$ PARA A SEGUNDA REFLEXÃO; E $T_2$ E $T_3'$ PARA A TERCEIRA REFLEXÃO. ....	32
FIGURA 4.2: MODELO DE TRÊS CAMADAS PARALELAS.....	35
FIGURA 4.3: 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. ....	35
FIGURA 4.4: 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. ....	36
FIGURA 4.5: 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. ....	36
FIGURA 4.6: TRAÇO SINTÉTICO CRIADO NO SEIS88. A FIGURA FOI CRIADA NO MATLAB E MOSTRA SETE REFLEXÕES EM UM MODELO DE SETE CAMADAS CUJAS VELOCIDADES DA PRIMEIRA Á ÚLTIMA SÃO RESPECTIVAMENTE: 1,5 KM/S, 2,0 KM/S, 2,5 KM/S, 3,0 KM/S, 3,5 KM/S 4,0 KM/S, 4,5 KM/S E 5,0 KM/S. O FATOR DE QUALIDADE Q DE CADA CAMADA É IGUAL A 50. FOI UTILIZADO O PULSO DE GABOR DE FREQUÊNCIA IGUAL A 30HZ E $\phi$ IGUAL A 4. ....	38
FIGURA 4.7: ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS DOS PULSOS ILUSTRADOS NA FIGURA 4.2. (A) OS ESPECTROS ORIGINAIS. (B) OS ESPECTROS COM SUA AMPLITUDE NORMALIZADA. ....	39
FIGURA 4.8: O ESPECTRO EM (A) FOI OBTIDO DE UMA REFLEXÃO NA CAMADA 2 COM ESPESURA $Z_2$ IGUAL A 1500 M. FOI UTILIZADO O PULSO DE GABOR COM FREQUÊNCIA IGUAL A 30 HZ E O VALOR DE Q NESTA CAMADA ERA IGUAL A 60. EM (B) TEMOS UM “ZOOM” DO PICO DO ESPECTRO. A TAXA DE AMOSTRAGEM DF DO ESPECTRO É IGUAL A 0,4882 HZ.....	40
FIGURA 4.9: ERROS PERCENTUAIS NAS ESTIMATIVAS DE Q DA CAMADA 2 ATRAVÉS DO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE PICOS NA SITUAÇÃO 1. ....	41
FIGURA 4.10: ERROS PERCENTUAIS NAS ESTIMATIVAS DE Q DA CAMADA 2 ATRAVÉS DO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE CENTRÓIDES NA SITUAÇÃO 1. ....	42
FIGURA 4.11: ERROS PERCENTUAIS NAS ESTIMATIVAS DE Q DA CAMADA 2 ATRAVÉS DO MÉTODO DA RAZÃO ESPECTRAL NA SITUAÇÃO 1. ....	43
FIGURA 4.12: ERROS PERCENTUAIS NAS ESTIMATIVAS DE Q DA CAMADA 3 ATRAVÉS DO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE PICOS NA SITUAÇÃO 1. ....	44

FIGURA 4.13: ERROS PERCENTUAIS NAS ESTIMATIVAS DE Q DA CAMADA 3 ATRAVÉS DO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE CENTRÓIDES NA SITUAÇÃO 1.....	45
FIGURA 4.14: ERROS PERCENTUAIS NAS ESTIMATIVAS DE Q DA CAMADA 3 ATRAVÉS DO MÉTODO DA RAZÃO ESPECTRAL NA SITUAÇÃO 1.....	46
FIGURA 4.15: PULSOS DE 60 HZ OBSERVADOS EM UMA CAMADA DE ESPESSURA IGUAL A 50 M. BAIXOS VALORES DE Q REPRESENTAM UMA GRANDE ATENUAÇÃO DO SINAL, FAZENDO COM QUE ELE SE DEFORME.....	47
FIGURA 4.16: ESPECTROS DE FREQUÊNCIA NORMALIZADOS RELATIVOS AOS PULSOS MOSTRADOS NA FIGURA 4.15. OBSERVAMOS QUE A ATENUAÇÃO ALTERA A POSIÇÃO DO ESPECTRO SIGNIFICATIVAMENTE. OS ESPECTROS FORAM NORMALIZADOS E OS VALORES DE Q.....	48
FIGURA 4.17: ERROS PERCENTUAIS NAS ESTIMATIVAS DE Q DA CAMADA 2 ATRAVÉS DO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE PICOS NA SITUAÇÃO 2.....	49
FIGURA 4.18: ERROS PERCENTUAIS NAS ESTIMATIVAS DE Q DA CAMADA 2 ATRAVÉS DO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE CENTRÓIDES NA SITUAÇÃO 2.....	50
FIGURA 4.19: ERROS PERCENTUAIS NAS ESTIMATIVAS DE Q DA CAMADA 2 ATRAVÉS DO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE CENTRÓIDES NA SITUAÇÃO 2.....	51
FIGURA 4.20: ERROS PERCENTUAIS NAS ESTIMATIVAS DE Q DA CAMADA 3 ATRAVÉS DO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE PICOS NA SITUAÇÃO 2.....	52
FIGURA 4.21: ERROS PERCENTUAIS NAS ESTIMATIVAS DE Q DA CAMADA 3 ATRAVÉS DO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE CENTRÓIDES NA SITUAÇÃO 2.....	53
FIGURA 4.22: ERROS PERCENTUAIS NAS ESTIMATIVAS DE Q DA CAMADA 3 ATRAVÉS DO MÉTODO DA RAZÃO ESPECTRAL NA SITUAÇÃO 2.....	54
FIGURA 4.23: QUANDO A INTERFACE ENTRE DOIS MEIOS DISTINTOS É INCLINADA, O RAIOS REFLETIDOS NA BASE DA PRIMEIRA CAMADA (VERMELHO) E O REFLETIDO NA BASE DA SEGUNDA CAMADA (VERDE) PERCORREM CAMINHOS DIFERENTES. PERCEBA A DISTÂNCIA PERCORRIDA PELO RAIOS EM VERMELHO É MENOR QUE A PERCORRIDA PELO RAIOS EM VERDE. ....	55
FIGURA 4.24: ERROS PERCENTUAIS NA ESTIMATIVA DE Q DA CAMADA 3 PARA O MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE PICOS NA SITUAÇÃO 3.....	56
FIGURA 4.25: ERROS PERCENTUAIS NA ESTIMATIVA DE Q DA CAMADA 3 PARA O MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE CENTRÓIDES NA SITUAÇÃO 3.....	57
FIGURA 4.26: ERROS PERCENTUAIS NA ESTIMATIVA DE Q DA CAMADA 3 PARA O MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE CENTRÓIDES NA SITUAÇÃO 3.....	58
FIGURA 5.1: O RETÂNGULO AZUL REPRESENTA A “CAIXA” QUE CONSTITUI OS LIMITES DE BUSCA INFERIORES E SUPERIORES, OS PONTOS AZUIS REPRESENTAM O MODELO INICIAL ENQUANTO QUE AS CURVAS DE NÍVEL REPRESENTAM O DESAJUSTE NAS OBSERVAÇÕES. (MODIFICADO DE SANTANA, 2005). ....	63
FIGURA 5.2: O PONTO VERMELHO REPRESENTA O BARICENTRO DOS PONTOS COM MELHOR AJUSTE (NESTE CASO, REPRESENTANDO QUATRO MODELOS). OS PONTOS VERDES INDICAM O CÁLCULO DO NOVO PONTO. OS PONTOS AZUIS SÃO OS VALORES AINDA NÃO AJUSTADOS. A SETA AZUL REPRESENTA A DISTÂNCIA $\alpha$ . (A) PRIMEIRAMENTE É IDENTIFICADO O PONTO DE PIOR VALOR DO FUNCIONAL, LOGO APÓS (B) ESTE PONTO É	

DESLOCADO A UMA DISTÂNCIA $\alpha$ DO CENTRÓIDE DOS PONTOS PARA ENTÃO (C) COMEÇAR UMA NOVA ITERAÇÃO. (MODIFICADO DE SANTANA, 2005). .....	64
FIGURA 5.3: ESTÁGIO FINAL DO COMPLEX. NOTE QUE OS PONTOS AJUSTADOS SE ENCONTRAM NO ENTORNO DA MELHOR ESTIMATIVA. (MODIFICADO DE SANTANA, 2005). .....	65
FIGURA 5.4: PARÂMETROS FÍSICOS E GEOMÉTRICOS DO MODELO UTILIZADO NA INVERSÃO DE Q. ....	69

## LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1: PARÂMETROS FÍSICOS E GEOMÉTRICOS DO MODELO DE CAMADAS HORIZONTAIS E PARALELAS PARA AS FREQUÊNCIAS 30 HZ E 40 HZ. A ESPESSURA DA CAMADA 2 VARIA ENTRE 0,2 KM E 2,0 KM.....	34
TABELA 4.2: PARÂMETROS FÍSICOS E GEOMÉTRICOS DO MODELO DE CAMADAS HORIZONTAIS E PARALELAS PARA A FREQUÊNCIA DE 60 HZ. A ESPESSURA DA CAMADA 2 VARIA ENTRE 0,2 KM E 1,4 KM. ....	34
TABELA 4.3: PARÂMETROS FÍSICOS E GEOMÉTRICOS DO MODELO DE CAMADAS PARALELAS PARA AS FREQUÊNCIAS 30 HZ E 40 HZ. O FATOR DE QUALIDADE DA CAMADA 2 VARIA ENTRE 10 E 400. ....	47
TABELA 4.4: PARÂMETROS FÍSICOS E GEOMÉTRICOS DO MODELO DE CAMADAS PARALELAS PARA A FREQUÊNCIA DE 60 HZ. O FATOR DE QUALIDADE DA CAMADA 2 VARIA ENTRE 10 E 400.....	47
TABELA 4.5: PARÂMETROS FÍSICOS E GEOMÉTRICOS DO MODELO UTILIZADO NA SITUAÇÃO 3.....	56
TABELA 5.1: MODELO 1 – RESULTADOS ENCONTRADOS PARA O PRIMEIRO TRAÇO DA INVERSÃO DO FATOR DE QUALIDADE Q UTILIZANDO A COMPARAÇÃO ENTRE OS PICOS DE FREQUÊNCIAS NAS DUAS SITUAÇÕES PROPOSTAS. A PRIMEIRA CAMADA É A DE REFERÊNCIA E TEM O FATOR DE QUALIDADE IGUAL A 500.....	71
TABELA 5.2: MODELO 1 – RESULTADOS ENCONTRADOS PARA O PRIMEIRO TRAÇO DA INVERSÃO DO FATOR DE QUALIDADE Q UTILIZANDO A COMPARAÇÃO ENTRE OS CENTRÓIDES DE FREQUÊNCIAS NAS DUAS SITUAÇÕES AQUI PROPOSTAS. A PRIMEIRA CAMADA É DE REFERÊNCIA E TEM O FATOR DE QUALIDADE IGUAL A 500. ....	72

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

A atenuação de uma onda ao se propagar em um meio dispersivo tem se tornado uma ferramenta de grande importância no processamento dos dados sísmicos e de GPR (do inglês: *Ground Penetrating Radar*) (Moreira, 2006). Segundo Tonn (1990), esta importância se dá por dois motivos: 1) Os efeitos da atenuação inelástica, que estão associados à perda de energia por calor; estes efeitos podem ser eliminados através dos 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, informação litológica, porosidade, permeabilidade, viscosidade e grau de 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 isto, com o objetivo de criarmos um modelo que considere a perda da energia de uma onda, utiliza-se o fator de qualidade  $Q$ . Este fator reúne todos estes processos em um único parâmetro capaz de portar informações sobre a rocha. Por isto muitos autores têm dedicado seus esforços em relacionar atenuação sísmica com caracterização de reservatório devido ao fato de que em rochas porosas saturadas com fluidos observa-se uma forte atenuação (Parra & Hacket, 2002; Castagna *et al.*, 2003; Taner & 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 que permitem uma estimativa de  $Q$ , Tonn (1990), por exemplo, comparou dez destas abordagens e as dividiu em dois grupos: i) abordagens no domínio do tempo e ii) abordagens no domínio da frequência.



Porém, 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.

Tendo em vista a grande distância temporal entre o trabalho de Tonn (1990) e os dias atuais, esta dissertação tem o objetivo de realizar um teste de sensibilidade com três abordagens através de modelos gerados sinteticamente. As abordagens aqui testadas são:

- A razão espectral (Spencer *et al.*, 1982), que determina  $Q$  através da inclinação gerada pelo logaritmo da razão entre dois espectros de amplitudes de chegadas consecutivas;
- Deslocamento entre centróides (Quan & Harris, 1996), que determina  $Q$  comparando o deslocamento entre os centróides dos espectros de amplitudes de chegadas consecutivas;
- Deslocamento entre picos (Zhang & Ulrych, 2002), que, analogamente ao método de deslocamento entre os centróides, compara o deslocamento entre os picos de frequência.

Para isto, utilizamos um modelo de quatro camadas, onde a primeira é uma camada de referência de fator  $Q$  muito alto (igual a 500), e a última é um semi-espaco de profundidade infinita. Este modelo criado tem em vista:

- i) Observar os limites físicos de cada uma dessas abordagens quanto à variação da espessura de uma camada com fator  $Q$  constante;
- ii) Observar os limites quanto à variação do fator  $Q$  de uma camada de espessura constante;
- iii) Testar os efeitos das variações anteriores nas frequências centrais de 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz;
- iv) Observar o efeito do mergulho na interface entre duas camadas;
- v) Observar quais os efeitos de todas as variações anteriores nas camadas subjacentes.

Logo após testada a sensibilidade dos métodos, escolhemos duas abordagens para a realização da inversão em modelos mais elaborados. Para a realização dos testes, contamos com as rotinas do programa de traçado de raio SEIS88 produzido por Cervený & Psencik.

Para inversão, realizamos os mesmos testes anteriores em modelos com o número de camadas superior a quatro. Para isto, utilizamos o método proposto por Moreira (2006) que compara o deslocamento de centróides de frequência (Quan & Harris, 1997), sendo ela modificada para comparar também os picos de frequência. Utilizamos também um algoritmo de otimização chamado COMPLEX (Richardson & Kuester, 1973) para minimização da função objeto.

No capítulo 2 desta dissertação fazemos uma descrição dos mecanismos físicos de perda de energia de um sinal, discutindo o papel das propriedades físicas das rochas na atenuação. Apresentamos também neste capítulo as diferentes definições de  $Q$  e mais à frente, discutimos os dois filtros de dissipação utilizados neste trabalho e suas diferenças principais.

No capítulo 3 apresentamos as abordagens de determinação do fator de qualidade  $Q$  que serão aqui testadas.

No capítulo 4 apresentamos os resultados encontrados na determinação do fator de qualidade  $Q$  para as três abordagens utilizadas nas diferentes situações por nós propostas. Neste capítulo definimos os limites físicos de cada uma das técnicas.

No capítulo 5, após definirmos os limites das técnicas testadas, apresentamos os resultados obtidos pelo algoritmo utilizado para a inversão do fator de qualidade  $Q$  em modelos de várias camadas. Por último, fazemos a apresentação dos resultados obtidos pelo algoritmo utilizado e comparamos os resultados obtidos com o uso do pico e do centróide para a inversão.

## **2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA DA ATENUAÇÃO.**

### **2.1 Apresentação**

Neste capítulo descrevemos o fenômeno da atenuação sísmica e os mecanismos físicos que causam a atenuação de um sinal ao se propagar em um meio material. Logo após, apresentamos as definições do fator de qualidade  $Q$  encontradas na literatura. Por fim, discutimos as principais diferenças entre os modelos de dispersão de Futterman (1962), utilizado na geração dos nossos dados sintéticos, e Müller (1983), utilizado na inversão.

### **2.2 O Fenômeno da Atenuação Sísmica**

O fenômeno de propagação das ondas elásticas é a base dos métodos sísmicos. Ao longo do processo de propagação, o material responde às perturbações provocadas pela passagem das ondas, deformando-se em função de suas propriedades elásticas. Muitos fatores contribuem para que haja perda de amplitude do sinal, como por exemplo, o espalhamento geométrico e a partição da energia do raio na interface entre dois meios. Nestes exemplos, a energia total do sistema é conservada. Porém, na atenuação ocorre perda efetiva da energia do raio além do pulso sofrer com a defasagem.

Convencionalmente, na exploração sísmica, a terra é modelada como um meio elástico ideal, e a propagação da onda sísmica é explicada em termos da equação da onda acústica ou elástica. Alguns fatores que provocam a perda da energia de uma onda são facilmente percebidos por obedecerem a princípios físicos básicos, como é o caso do espalhamento geométrico e a partição da energia em uma interface. Porém, nestes casos, a energia total do sistema se conserva.

Na prática, a propagação da onda sísmica é bastante diferente de sua propagação em um meio sólido ideal. Por exemplo, o material que constitui a terra é anisotrópico e heterogêneo. A equação da onda elástica tradicional não é precisa o suficiente para descrever o

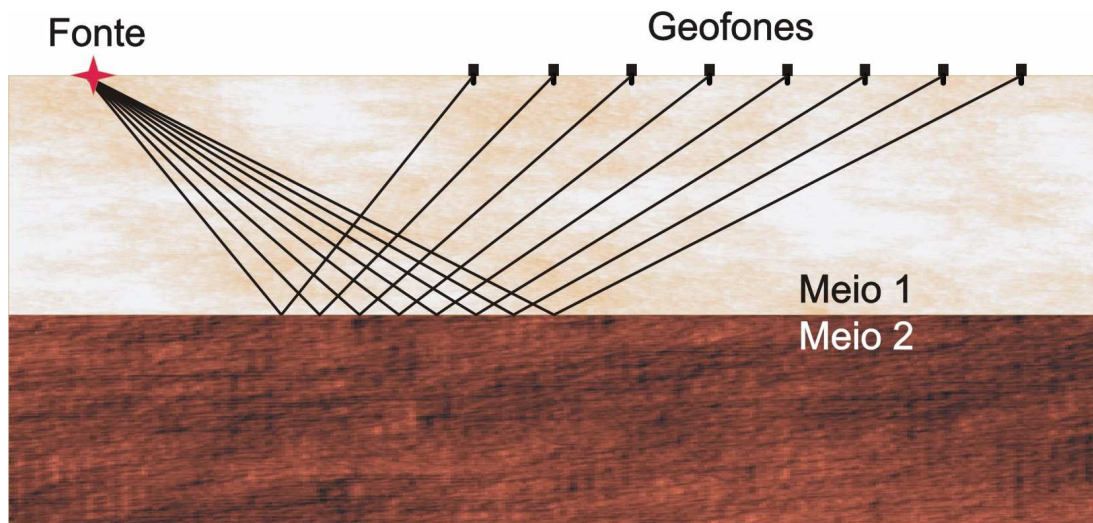
comportamento de uma onda que transita neste meio complicado. Além disso, estes materiais podem apresentar ao mesmo tempo características viscosas e inelásticas (Zhang, 2008), fazendo com que a onda atenua, ou seja, perca energia sísmica.

A atenuação inelástica afeta tanto a amplitude quanto a fase dos dados de sísmica de reflexão. Como definição, o efeito na amplitude será chamado de atenuação enquanto que o efeito na fase será definido como dispersão. Para estudos quantitativos, os dois aspectos precisam ser considerados durante o processamento e o imageamento, ou modelados como uma parte do processo de análise de amplitude (Rickett, 2006).

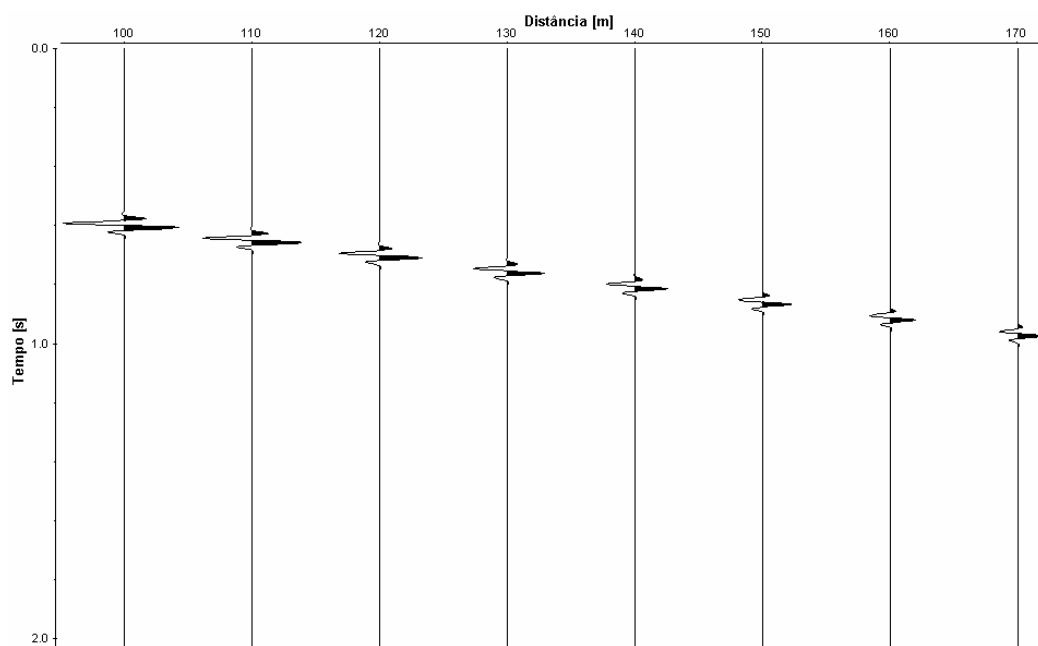
O levantamento de sísmica de reflexão pode ser aplicado tanto na terra quanto no mar. Durante o levantamento são realizadas medidas na amplitude de vibração em pontos específicos do terreno, através dos receptores durante um determinado período de tempo, conhecido como tempo de registro. A figura 2.1 mostra um possível arranjo fonte-receptor em um levantamento sísmico em terra. No mar, um único navio faz o levantamento carregando consigo tanto a fonte quanto o receptor. O tempo de registro (TR), ou tempo duplo de trânsito, deve corresponder ao tempo que o pulso gasta no percurso entre a fonte, o refletor e o receptor. A figura 2.2 representa um sismograma sintético obtido em um levantamento sísmico.

Os receptores de sísmica são chamados de *geofones*, para levantamentos em terra, e *hidrofones*, para levantamentos no mar. Eles transferem a vibração provocada pelas fontes para um sismograma, que conterá informações sobre o afastamento entre a fonte e o receptor, conhecido como *offset*, e as amplitudes dos sinais provocadas pelas descontinuidades, ou seja, os refletores em sub-superfície. Isso ocorre devido ao contraste entre as impedâncias acústicas dos dois meios. A impedância acústica está diretamente relacionada à velocidade da onda no meio em que se propaga e à sua densidade segundo a equação da refletividade:

$$R = \frac{A_1}{A_2} = \frac{(\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1)}{(\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1)} \quad (2.1)$$



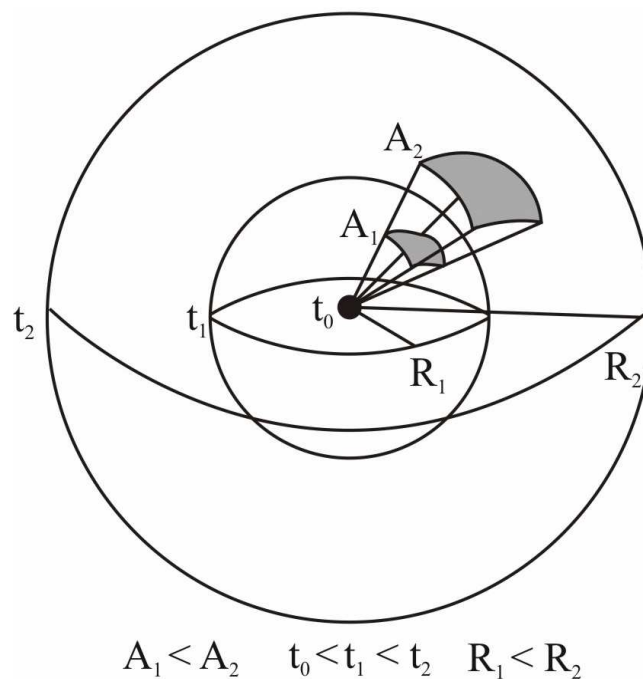
**Figura 2.1:** Representação gráfica de uma aquisição de sismica de reflexão, o pulso se propaga através do meio 1, reflete na interface com o meio 2 e é recebido pelo geofone.



**Figura 2.2:** Sismograma sintético representando a aquisição ilustrada na figura 2.1. Na vertical representamos o tempo de registro do sinal. Na horizontal temos a posição dos receptores em superfície.

À medida que o tempo de propagação aumenta, a onda sofre perda de amplitude pelo fenômeno do espalhamento geométrico. O espalhamento geométrico consiste na atenuação da amplitude do sinal sísmico estando relacionado com a expansão da frente de onda e é um

fator puramente geométrico. Para um meio isotrópico e homogêneo, a perda de amplitude é proporcional ao tempo de percurso da onda. Considerando que a propagação da onda se dá por frentes de onda, cada frente emitida da fonte tem uma determinada quantidade de energia que é redistribuída à medida que esta frente se propaga. Observe a figura 2.3, a área total da esfera gerada da propagação do sinal é maior no instante  $t_2$  do que no instante  $t_1$ . Sabendo que a energia gerada durante a emissão do pulso é conservada durante toda a propagação, podemos concluir que a densidade de energia na frente de onda é maior no instante  $t_1$ . Este processo faz com que a amplitude do sinal no instante  $t_2$  seja menor que no instante anterior  $t_1$ .



**Figura 2.3:** Esquema teórico do espalhamento geométrico. A fonte de energia situada no centro do modelo produz uma onda que se propaga esfericamente. À medida em que ela se propaga sua energia se permanece constante, porém a área aumenta em função do tempo “diluindo” a quantidade de energia por unidade de área.

## 2.3 Mecanismos de Atenuação

Outros fatores menos triviais podem ter contribuições bastante significativas não somente para a atenuação e para a dispersão de um pulso, por exemplo, as diversas escalas de heterogeneidades encontradas nas rochas porosas (Ciz *et al.*, 2006). Esta seção tem como objetivo descrever alguns destes fatores.

### 2.3.1 Atenuação intrínseca

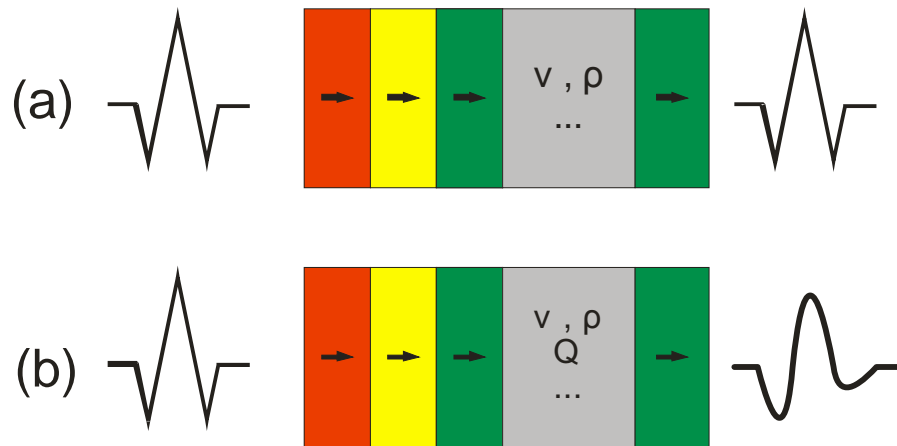
Na atenuação intrínseca, dois fatores são geralmente considerados os mais importantes. Um é a fricção interna resultante do deslizamento relativo ao longo dos contatos entre os grãos na rocha matriz durante a propagação da onda (Zhang, 2008). O outro é o fluxo de fluidos dentro dos espaços porosos. Parte da energia na propagação sísmica é transformada em movimento relativo e dissipativo dentro e entre os grãos devido à fricção e fluxo de fluido.

As rochas têm rachaduras microscópicas (ou fissuras) e poros nos quais podem estar contidos fluidos. Estas rachaduras podem ter uma profunda influência na propagação das ondas S e das ondas P. Observações feitas em campo demonstram que o mecanismo de perda mais efetivo é resultante da variação da porosidade e da saturação parcial nas rochas (Carcione & Picotti, 2006).

Para sintetizar todos os processos de atenuação em um meio visco-elástico e descrever quantitativamente estas perdas, utiliza-se o fator de qualidade  $Q$ . Usualmente, descrevemos a propagação de um pulso utilizando somente a densidade e a velocidade, porém, com o objetivo de obtermos informações mais detalhadas é de grande importância considerarmos também os efeitos de atenuação no meio visco-elástico (Zhang, 2008).

A figura 2.4 mostra o comportamento de uma onda em um meio visco-elástico e absorativo. Em (a) observamos a propagação em um meio elástico que é representado pela densidade  $\rho$  e pela velocidade  $v$ . Sem absorção, o pulso tende a manter o seu formato durante a sua propagação. Em (b) temos um meio visco-elástico que deve ser representado

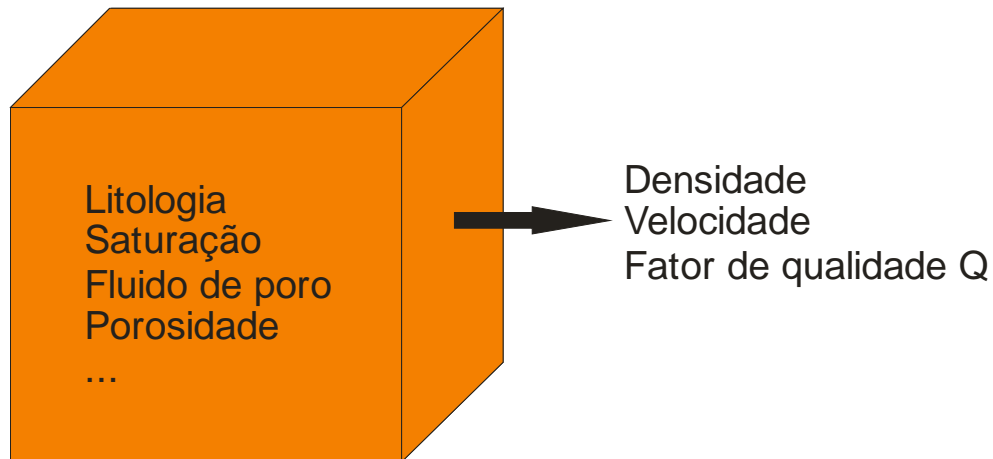
por  $\rho$ ,  $v$  e pelo fator de qualidade  $Q$ . Com a absorção, o pulso se distorce devido à atenuação das altas frequências.



**Figura 2.4:** Comportamento da onda sísmica em um meio absoritivo devido à velocidade, densidade e fator de qualidade  $Q$ . (a) Sem absorção e (b) com absorção (Modificado de Zhang, 2008).

É difícil formular um modelo que descreva todo o processo de atenuação. Uma maior complicação é a grande diversidade de propriedades intrínsecas dos materiais na Terra. De fato, não se pode esperar que nenhum modelo descreva as perdas em todas as rochas sob todas as condições encontradas em campo. Apesar de diversos modelos existentes, não há consenso que diga qual seria o melhor. A figura 2.5 ilustra uma idéia geral de que a atenuação sísmica é o efeito composto dos parâmetros físicos das rochas, e que a propriedade de atenuação pode ser descrita pelo fator de qualidade  $Q$ .



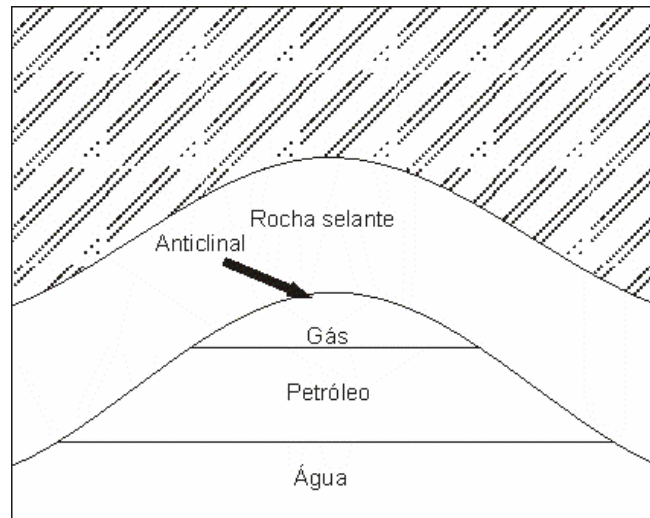


**Figura 2.5:** A atenuação é determinada pelas propriedades físicas das rochas, tais como litologia, porosidade, saturação, conteúdo de fluidos, etc. (Modificado de Zhang, 2008).

## 2.4 Importância na determinação de Q em reservatórios

As condições geológicas que favorecem o acúmulo em grandes proporções de petróleo e gás natural são combinações da estrutura com os tipos de rochas, as quais criam barreiras impermeáveis à migração destes fluidos no topo das chamadas armadilhas de petróleo. Para citar um exemplo, um dos tipos de armadilhas é formado por um anticlinal, no qual a rocha selante está sobrejacente a uma camada permeável de arenito (figura 2.6). O petróleo e o gás acumulam-se na crista deste anticlinal, sendo o gás na posição mais alta enquanto o petróleo permanece logo abaixo, ambos flutuam na água subterrânea que satura o arenito.

Discutimos anteriormente que o comportamento da atenuação é diferente para cada rocha no que diz respeito à sua litologia, petrofísica e seu grau de saturação. O fator de qualidade sintetiza todas estas informações. É possível, através da atenuação observada na seção sísmica, descobrir se a rocha em questão está, ou não, saturada com fluido.



**Figura 2.6:** A armadilha formada pela rocha selante. O gás, menos denso que o petróleo, pressiona a rocha selante para cima formando um anticlinal

## 2.5 Definições de Q

Podemos encontrar diversas definições do fator de qualidade Q na literatura (Tonn, 1990). Todas elas remetem à expressão de Knopoff & McDonald's (1958) deduzida para ondas senoidais:

$$Q = 2\pi \frac{E_0}{\Delta E} \quad (2.2)$$

Esta equação é de grande importância na explicação do fenômeno da atenuação. Considerando que para se propagar num sólido o mesmo se comporta de forma elástica, com ciclos de compressão e distensão. Em cada ciclo há uma energia máxima  $E_0$ . Conhecendo as propriedades inelásticas do meio, haverá uma perda de energia igual a  $\Delta E$  em cada ciclo. Desta forma, o fator de qualidade é diretamente proporcional à razão entre a energia total e a energia perdida em cada ciclo. Observe também que o fator de qualidade define a eficiência de um meio transmitir uma onda sem deformá-la. Assim, consideramos a energia perdida por ciclo como:

$$\Delta E = E_0 - E_0 \exp(-2\alpha\lambda) \quad (2.3)$$

Observe que a perda de energia decresce exponencialmente a uma taxa igual a  $\alpha$ . Este termo  $\alpha$  é também conhecido como constante de atenuação.

A definição de Knopoff & McDonald's (1958) raramente é de uso direto, pois somente em experimentos bem controlados podemos submeter os materiais a perturbações sem mudanças de amplitudes e período (Aki & Richards, 1980). De forma mais comum, pode-se observar ou o decaimento temporal da amplitude de uma onda estacionária de número de onda fixo ou o decaimento espacial da amplitude em uma onda se propagando a uma frequência fixa.

Para as ondas sísmicas, Futterman (1962) concluiu que:

$$Q_s = 2\pi \frac{e_0}{\Delta e} \quad (2.4).$$

Apesar da analogia entre esta definição e a de Knopoff & McDonald's, esta definição utiliza a razão entre a amplitude da densidade de energia  $e_0$  e a dissipação da densidade de energia cinética  $\Delta e$  da onda. Esta equação não é equivalente à equação (2.2) por trabalhar com a energia cinética da onda em vez de sua energia total. A relação entre  $Q_s$  e  $Q$  é a seguinte (O'Connell & Budiansky, 1978):

$$Q_s = 2\pi \{1 - \exp[-4\pi(\sqrt{Q^2 + 1} - Q)]\}^{-1} \quad (2.5)$$

Futterman (1962) também deduziu uma relação entre o coeficiente de absorção  $\alpha$  e o fator de qualidade  $Q$  que pode ser expressa por:

$$Q = \frac{2\pi}{1 - \exp(-2\alpha\lambda)} \quad (2.6)$$

onde  $\lambda = c/f$ ,  $f$  é a frequência,  $c$  é a velocidade e  $\lambda$  é o comprimento de onda. Para grandes valores de  $Q$ , a primeira aproximação para uma série de Taylor é válida (Futterman, 1962):

$$Q = \frac{\pi}{\alpha\lambda} = \frac{\pi f}{c\alpha} \quad (2.7)$$

No caso onde há um decaimento temporal da amplitude a uma taxa de tempo igual a  $2n\pi/\omega$  em uma onda estacionária de amplitude inicial  $A_0$  de número de onda fixo, podemos deduzir que (Aki & Richards, 1980):

$$A(t) = A_0 (1 - \pi/Q)^n \quad (2.8)$$

Aplicando a definição:

$$\exp(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} (1 + x/n)^n \quad (2.9)$$

Teremos que a amplitude do sinal  $A(t)$ , para grandes valores de  $t$  será representada por (Aki & Richards, 1980):

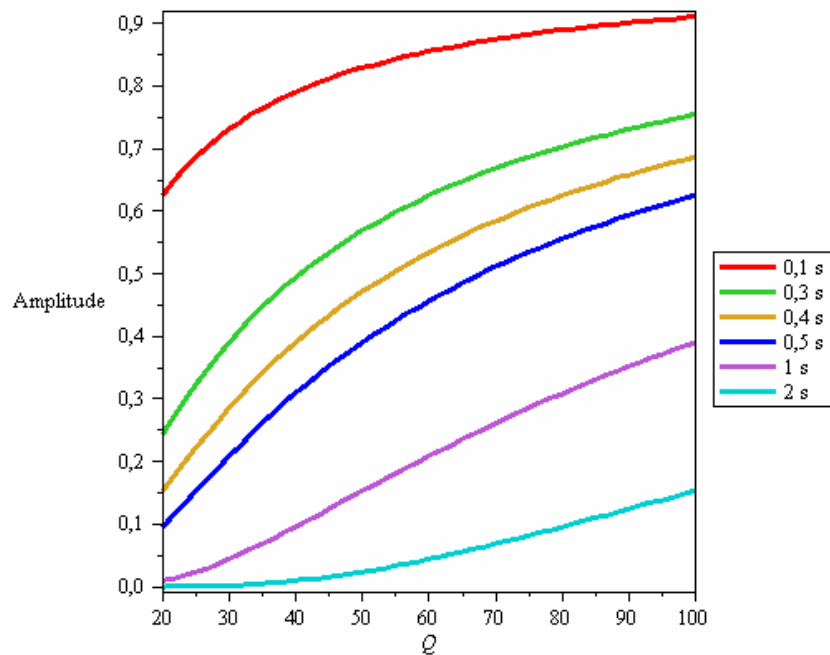
$$A(t) = A_0 \left[ 1 - \frac{\omega t}{2Qn} \right]^n = A_0 \exp \left[ -\frac{\omega t}{2Q} \right] \quad (2.10)$$

A partir das observações do decaimento exponencial dos valores de  $A(t)$ , nós usamos a equação (2.10) para definirmos o valor da amplitude em função de  $Q$  (figura 2.7).

Para definirmos o valor de  $Q$  em função da distância percorrida, faremos a substituição de  $t = z/v$ , onde  $z$  é a distância percorrida pela onda e  $v$  é a velocidade de propagação. Logo temos que:

$$A(t) = A_0 \exp \left[ -\frac{\omega z}{2vQ} \right] \quad (2.11)$$

Esta equação tem uma implicação bastante importante. Veja que a perda de amplitude do sinal original ocorre de forma exponencial e o expoente é linear em função da frequência. Observando ainda a figura 2.7, notamos que ao longo da propagação, a perda de amplitude torna-se cada vez maior com o aumento do tempo de propagação. Podemos perceber também que mesmo para valores relativamente baixos de  $Q$ , a perda é menos significativa em relação a valores de  $Q$  mais altos em tempos de propagação maiores. Assim, podemos deduzir claramente que a perda de amplitude do sinal ocorre de forma exponencial à medida que aumentamos o tempo de propagação dentro do meio ou, igualmente, aumentarmos o caminho percorrido pela onda.



**Figura 2.7:** Amplitude versus  $Q$  para um pulso de frequência 30 Hz os tempos de trânsito 0,1 s (vermelho), 0,3 s (verde), 0,4 s (amarelo), 0,5 s (azul escuro), 1 s (violeta) e 2 s (azul claro).

## 2.6 Modelos de dispersão

A relação de dispersão de Futterman (1962) é a relação mais popular no meio científico por ser linear para valores de  $Q$  acima de 5. O fator de absorção total da trajetória do raio de velocidade  $V_r$  entre a posição  $S$  a fonte e  $R$  do receptor é definida como (Cerveny, 2005):

$$\Delta(R, S) = \int_S^R \frac{ds}{V_r Q} = \int_S^R \frac{dt}{Q} \quad (2.13)$$

O filtro de dissipação é dado por:

$$D(R, S) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \omega \Delta(R, S) - i \frac{\omega t}{\pi Q} \ln \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right) \right] \quad (2.14)$$

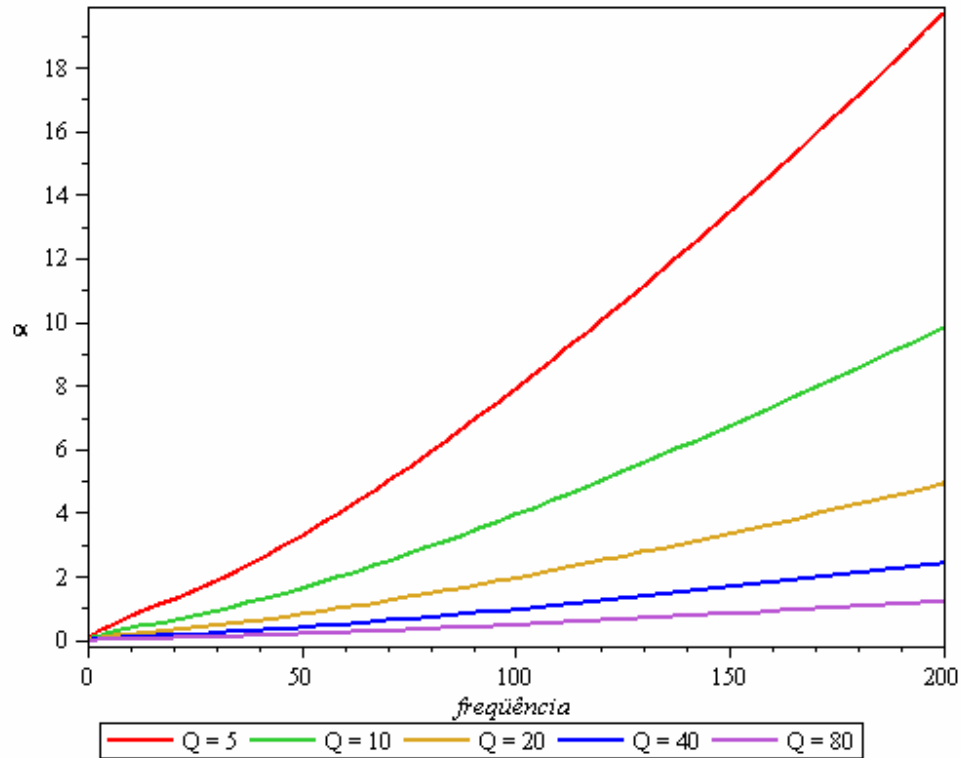
onde  $\omega_r$  é a frequência de referência. O primeiro termo da equação contém o fator de absorção total da trajetória e cresce linearmente com a frequência. O segundo é um termo de defasagem do sinal. O filtro de dissipação atua sobre o espectro da fonte, causando os efeitos de desvio do espectro em direção às baixas frequências.

Uma grande desvantagem desta relação é que, em frequências muito baixas ou muito altas, ela não satisfaz exatamente os requerimentos de causalidade. Observe a figura (figura 2.8), nestas frequências o modelo perde sua linearidade.

Para  $Q$  obedecendo uma lei de potências de frequências, o modelo de dispersão de Müller (1983) apresenta o seu filtro de dissipação como:

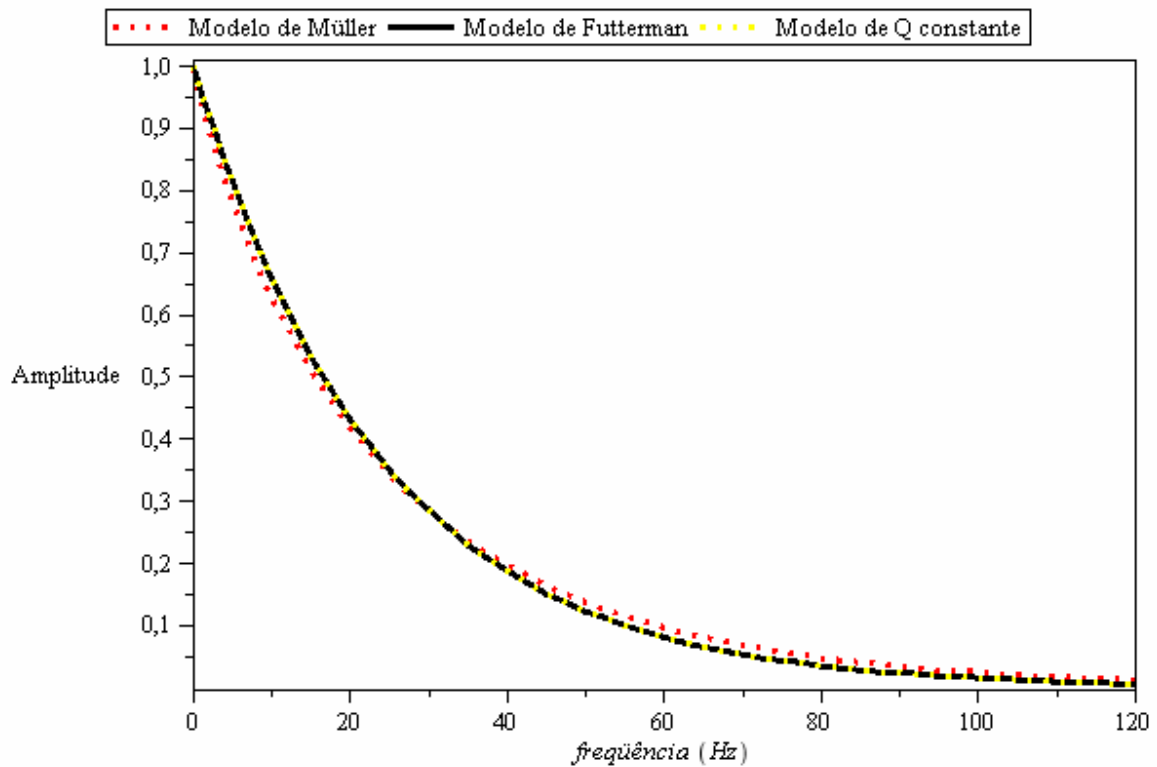
$$M(R, S) = \exp \left\{ -\frac{\omega t}{2Q} \left[ \left( \frac{\omega_r}{\omega} \right)^\gamma + i \cot \left( \gamma \frac{\pi}{2} \right) \left( 1 - \left( \frac{\omega_r}{\omega} \right)^\gamma \right) \right] \right\} \quad (2.15)$$

O parâmetro  $\gamma$  é responsável pelo peso do termo de dispersão.



**Figura 2.8:** Este gráfico representa o grau de dispersão segundo o modelo de Futterman de um sinal em função da frequência para Q igual a 5 (vermelho), 10 (verde), 20 (amarelo), 40 (azul) e 80 (lilás). Observe que para frequências muito altas e muito baixas, o modelo deixa de ser linear. Veja também que a partir dos valores de Q menores que 5, o modelo perde a sua linearidade.

A figura 2.9 ilustra a comparação dos modelos de Q constante, Futterman e Müller. Note que os modelos de Futterman e Q constante são praticamente coincidentes, enquanto há uma leve divergência do modelo de Müller em alguns intervalos. Perceba também que o modelo de Müller, para situações semelhantes, atenua mais as frequências além da frequência de referência do que o modelo de Futterman. Em contrapartida, o contrário acontece para as frequências abaixo da frequência de referência. Note que enquanto o modelo de Futterman utiliza a razão entre as frequências  $\omega/\omega_r$ , o modelo de Müller utiliza o fator inverso  $\omega_r/\omega$ , resultando em uma deformação diferente de um espectro quando utilizamos os diferentes modelos. Assim, a dispersão causada pelo filtro de dispersão de Futterman torna-se maior a partir da frequência de referência enquanto que o contrário acontece com o filtro de Müller.



**Figura 2.9:** Comparação entre os modelos de Müller, Futterman e Q constante. As curvas simulam o comportamento da amplitude em função da frequência. A curva pontilhada vermelha representa o modelo de Müller, a preta contínua representa o modelo de Futterman enquanto que a pontilhada amarela representa o modelo de Q constante. O valor de Q utilizado é igual a 30.

## 2.7 Resumo do capítulo.

Este capítulo teve como objetivo apresentar os mecanismos que provocam a atenuação de uma onda ao se propagar em um meio material. Vimos que são diversas as causas da atenuação, muitas delas de fácil percepção. Porém, vimos que a atenuação intrínseca reúne os diversos mecanismos responsáveis pela perda de energia da onda e pode ser descrito em função do fator de qualidade Q.

Observamos que na literatura existem diversas definições de Q. A definição de Knopoff & McDonald's (1958) determina que Q é proporcional à razão entre a energia total



de uma onda e sua perda por ciclo. Já a definição de Aki & Richard (1980) determina que a perda de amplitude do sinal ocorre de forma exponencial durante a propagação.

O modelo de Futterman (1962) é o mais popular no meio científico por ser linear para  $Q$  maior que 5, porém, com a desvantagem de perder a linearidade para frequências muito baixas e muito altas. O modelo de Müller (1983) é obtido através de uma lei de potências e é bastante próximo do modelo de Futterman, tendo como diferença que dispersão descrita por Müller é mais acentuada para as frequências menores que a frequência de referência.

### **3 ABORDAGENS DE DETERMINAÇÃO E INVERSÃO DO FATOR DE QUALIDADE Q**

#### **3.1 Apresentação**

Neste capítulo apresentamos as diferentes abordagens para a determinação do fator de qualidade  $Q$  encontradas na literatura. Discutimos aqui com mais detalhes as três abordagens escolhidas para a comparação.

#### **3.2 Abordagens de inversão**

Várias abordagens do fator de qualidade  $Q$  podem ser encontradas na literatura, muitas delas oferecem grande grau de robustez, que é a capacidade de determinar o valor de uma grandeza mesmo com a presença de ruído. Estas abordagens são divididas em dois grupos distintos: (i) as que trabalham no domínio do tempo e (ii) as que trabalham no domínio da frequência.

Tonn (1991) comparou dez dessas técnicas tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Ele destacou os seguintes métodos: método de sinal analítico (método de máximo), razão espectral, modelagem espectral, modelagem de pulso e modelagem de frequência. Os demais métodos eram fortemente dependentes da qualidade do sinal.

Desde então, várias técnicas de determinação e inversão de  $Q$  têm surgido na literatura, por este motivo, realizamos aqui um novo teste com três técnicas atuais que determinam o fator de qualidade. A primeira que descrevemos determina o fator de qualidade  $Q$  a partir do deslocamento do centróide de frequências. A segunda técnica utiliza o deslocamento entre os picos de frequências. A terceira é uma generalização da técnica da razão espectral. Estes três métodos trabalham no domínio da frequência.

### 3.3 Método de deslocamento do centróide de frequências

Esta primeira técnica que iremos descrever parte do princípio de que o deslocamento do espectro ocorre de forma linear em direção às baixas frequências e utiliza o centróide de frequência do espectro para determinar o fator de qualidade  $Q$ , sendo que o centróide de frequência do sinal é igual à média ponderada da distribuição total das frequências em um espectro.

A figura 3.1 representa um espectro aproximadamente gaussiano de desvio padrão  $\sigma$ . O pico de frequência deste espectro é definido como  $f_p$  e o centróide de frequência definido como  $f_s$ . A variância deste espectro pode ser obtida a partir da equação:

$$\sigma_s^2 = \frac{\int_0^\infty (f - f_s)^2 S(f) df}{\int_0^\infty S(f) df} \quad (3.1)$$

Como na prática, todo espectro real contém ruído, por este motivo, devemos impor um limite de integração que iremos denominar de frequência de corte  $f_{corte}$ .

Consideremos então um modelo de camadas paralelas onde cada camada pode ser descrita segundo a sua densidade, velocidade e seu fator de qualidade  $Q$  (figura 3.2).

O centróide de frequência do sinal de entrada emitido da fonte de espectro  $S(f)$  pode ser escrito como (Quan & Harris, 1997):

$$f_s = \frac{\int_0^\infty f S(f) df}{\int_0^\infty S(f) df} \quad (3.2)$$

Similarmente, o centróide de frequência do sinal que chega ao receptor tem espectro  $R(f)$ , pode ser escrito como:

$$f_R = \frac{\int_0^\infty fR(f)df}{\int_0^\infty R(f)df} \quad (3.3)$$

Para o caso de pequena a moderada atenuação ( $Q > 5$ ), o coeficiente de atenuação  $\alpha$  tem uma dependência aproximadamente linear com a frequência (Bano, 2004), e pode ser escrito como:

$$\alpha = \frac{\pi \eta t}{Q} \quad (3.4)$$

Ao considerar que o espectro da fonte é Gaussiano, Liu *et al.* (1998) propuseram uma equação de tomografia para a atenuação dada por:

$$\int_{\text{raio}} \alpha_0 dl = (f_s - f_R) / \sigma_s^2, \quad (3.5)$$

onde  $f_s$  e  $f_R$  são, respectivamente, o centróide de frequência do sinal da fonte e do receptor e  $\sigma_s^2$  é a variância do espectro do sinal da fonte.

Podemos substituir a equação (3.4) em (3.5):

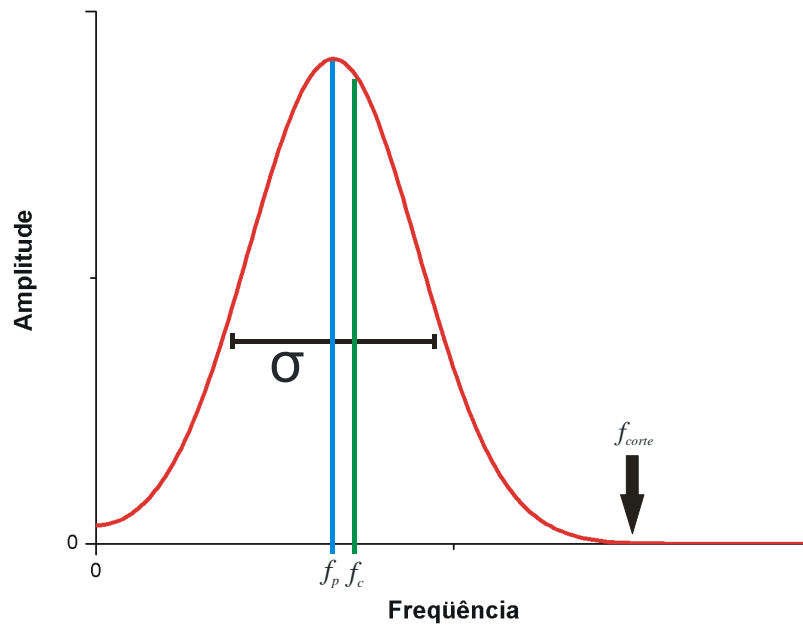
$$\int_{\text{raio}} \frac{\pi}{VQ} dl = (f_s - f_R) / \sigma_s^2, \quad (3.6)$$

No caso de duas interfaces horizontais, no topo e na base de uma camada com fator de qualidade  $Q$ , podemos estimar  $Q$  a partir dos sinais refletidos nessas duas interfaces. Calcular a integral em (3.6) resulta no produto de  $\pi/Q$  pela diferença de tempo duplo de propagação  $(t_2 - t_1)$  do sinal que é refletido nas interfaces. Assim, se conhecermos o

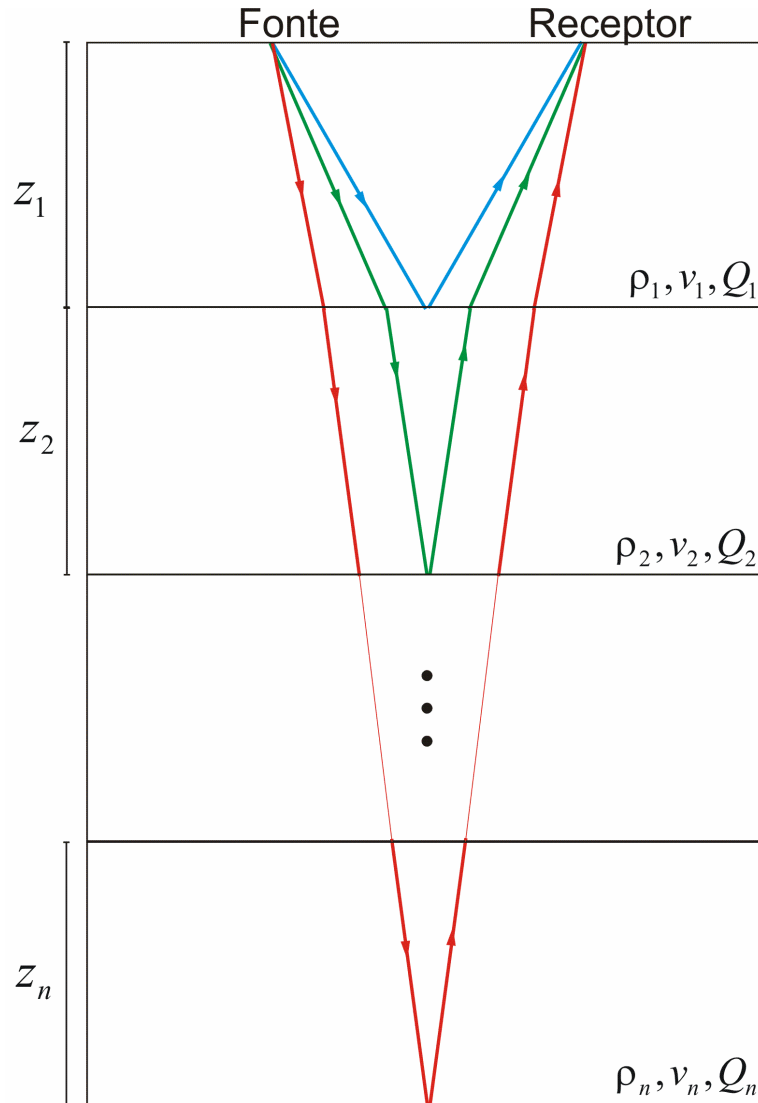
deslocamento do centróide de frequência dos dois pulsos refletidos em duas interfaces diferentes, o fator de qualidade é dado por (Irving & Knight, 2003):

$$Q = -C\pi \left( \frac{f_{c2} - f_{c1}}{t_2 - t_1} \right)^{-1}, \quad (3.7)$$

e segundo Quan & Harris (1997), a constante C é a variância do espectro do sinal ao encontrar a interface e entrar na camada em consideração,  $f_{c2}$  é o centróide de frequência do espectro da reflexão na segunda interface e  $f_{c1}$  é o centróide de frequência do espectro da reflexão na primeira interface. Observe que o deslocamento entre os centróides ocorre de forma linear e é inversamente proporcional ao fator de qualidade.



**Figura 3.1:** Representação de um espectro gaussiano de variância lambda. O termo  $f_p$  representa o pico de frequência deste espectro, o termo  $f_c$  representa o centróide de frequências do espectro e  $f_{corte}$  é a frequência de corte.



**Figura 3.2:** Modelo de  $n$  camadas paralelas de espessura  $z_n$  sendo cada camada descrita em função de sua densidade, velocidade e seu fator de qualidade  $Q$ .

### 3.4 Método do deslocamento do pico de frequência

Analogamente à técnica do deslocamento do centróide de frequências, Zhang & Ulrych (2002) também partiram do princípio que o deslocamento do espectro durante a propagação de um sinal ocorre linearmente na direção das baixas frequências.

Consideremos então um modelo de camadas em um meio absorvido. A figura 3.3 representa uma família de traços sísmicos organizados na forma CMP (*Common Medium*

*Point*). Em (a) temos o sismograma obtido do levantamento e (b) os espectros de amplitude da fonte (em preto) e dos três pulsos nos traços 1, 11 e 21. Comparemos o espectro do pulso do traço 1 em vermelho e o espectro do traço 21 em cinza que transitou no meio por mais tempo. Este último pulso tem seu espectro deslocado para as frequências mais baixas e é mais largo devido ao seu maior tempo de propagação no meio.

Considerando então que o espectro de amplitude do pulso da fonte pode ser bem representado pelo espectro Gaussiano de frequências, sendo ele expresso pela equação:

$$G(f) = \exp\left[-\frac{(f - f_d)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3.8)$$

onde  $f_d$  é a frequência dominante do pulso,  $f$  é a frequência do pulso e  $\sigma$  é o desvio padrão do espectro. Observe na figura 3.4 que o espectro deste sinal fica mais estreito quanto menor for a sua frequência central.

Por conveniência, vamos nos referir à frequência do máximo de amplitude como o pico de frequência, denominado  $f_p$ . Para um pulso em seu estado inicial, o pico de frequências é a frequência dominante. Este sinal é representado na figura 3.4 e sua equação é:

$$x(t) = \exp\left[-\left(2\pi f_d (t - t_i) / \gamma\right)^2\right] \cos[2\pi f_d (t - t_i) + \nu] \quad (3.9)$$

Seus quatro parâmetros livres são: a frequência dominante  $f_d$ , parâmetro que representa a envoltória gaussiana do sinal  $\gamma$ , parâmetro de fase  $\nu$  e parâmetro de tempo  $t_i$ . Segundo Cervený (2005), este sinal é também conhecido como envelope Gaussiano e também como sinal de Puzyrev. O pulso de Gabor é considerado como não-causal. Em um pulso causal, o seu tempo de chegada é medido a partir do início do registro do pulso. No pulso não-causal, esta medida é feita no instante da chegada do pico.

A evolução do espectro de amplitude através do tempo é modelada como um espectro Gaussiano transitando num meio viscoelástico (o espalhamento geométrico e outros fatores não são considerados). Depois de transitar por um tempo  $t$ , o espectro de amplitude é (Zhang, 2008):

$$G(f, t) = \exp\left[-\frac{(f - f_d)^2}{2\sigma^2}\right] H(f, t) \quad (3.10)$$

O valor  $H(f, t)$  é o filtro de absorção (Varela *et al.*, 1993) cuja resposta da frequência é igual a:

$$H(f) = \exp\left[-\int_{\text{raio}} \alpha(f, l) dl\right] \quad (3.11)$$

onde a integral é calculada ao longo do percurso do raio  $l$  e  $\alpha(f, l)$  é a constante de atenuação ao longo do raio.

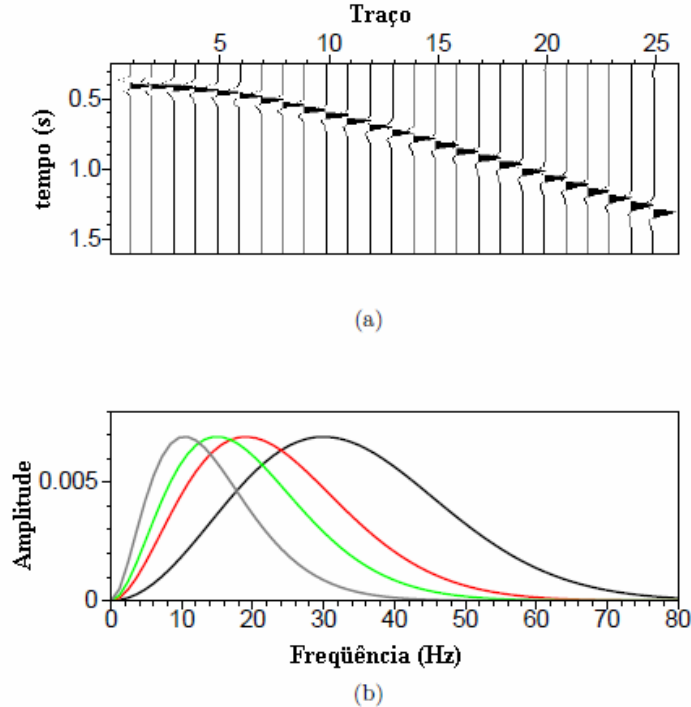


Figura 3.3: (a) Um evento em uma aquisição CMP (*Common Medium Point*) é gerado por um refletor em um meio absorvente. Os traços foram normalizados baseados em suas amplitudes máximas. (b) Espectro de amplitude da assinatura da fonte original (em preto), traço 1 (em vermelho), traço 11 (em verde) e traço 21 (em cinza). Observe a diferença da posição entre os espectros do traço 1 e 21. O pulso do traço 21 transitou por mais



tempo neste meio, sendo assim mais estreito e mais deslocado às baixas frequências que o espectro do traço 1 (Modificado de Zhang & Ulrych, 2008).

Para o caso onde temos uma única camada refletora, cuja propagação de uma onda em um meio com um fator de qualidade  $Q$  durante no instante  $t$ . Então, determinamos o espectro de amplitude do sinal recebido como:

$$G(f, t) = G(f) \exp \left[ -\frac{\pi f t}{Q} \right] \quad (3.12)$$

Como o tempo aumenta, a atenuação também aumenta com a frequência e resulta na translação do seu pico em direção às baixas frequências como demonstrado.

Consideremos então um modelo de atenuação onde incluiremos todas as funções não relacionadas no fator de qualidade  $Q$  em um termo de amplitude expresso como:

$$G(f, t) = A(t) G(f) \exp \left[ -\frac{\pi f t}{Q} \right] \quad (3.13)$$

onde  $A(f)$  é um fator de amplitude independente da frequência e da atenuação. O pico de frequências pode ser determinado igualando-se a derivada do espectro em função da frequência a zero. Desta forma, o fator de qualidade  $Q$  será (Zhang & Ulrych, 2002):

$$Q = \frac{\pi \sigma^2}{f_d - f_p} \quad (3.14)$$

Onde  $t$  é o instante do registro da chegada do pulso que gerou o espectro,  $\sigma$  é o desvio padrão do espectro do sinal de entrada,  $f_d$  e  $f_p$  são, respectivamente, o pico de frequência do sinal de entrada e o pico de frequência do sinal refletido na base da camada. Podemos observar que a atenuação é inversamente proporcional ao deslocamento entre os picos de frequência de dois sinais em instantes diferentes e que este deslocamento ocorre de forma linear.

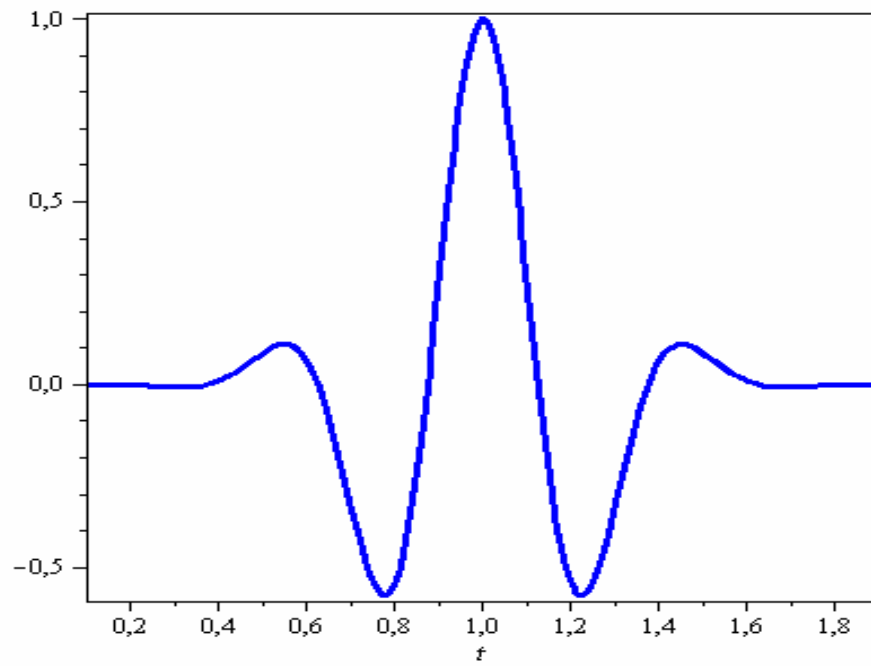


Figura 3.4: Pulso de Gabor com parâmetros:  $t_i=1,0$ ;  $f_m=30$ ;  $\gamma=4$ ; e  $\nu=0$ .

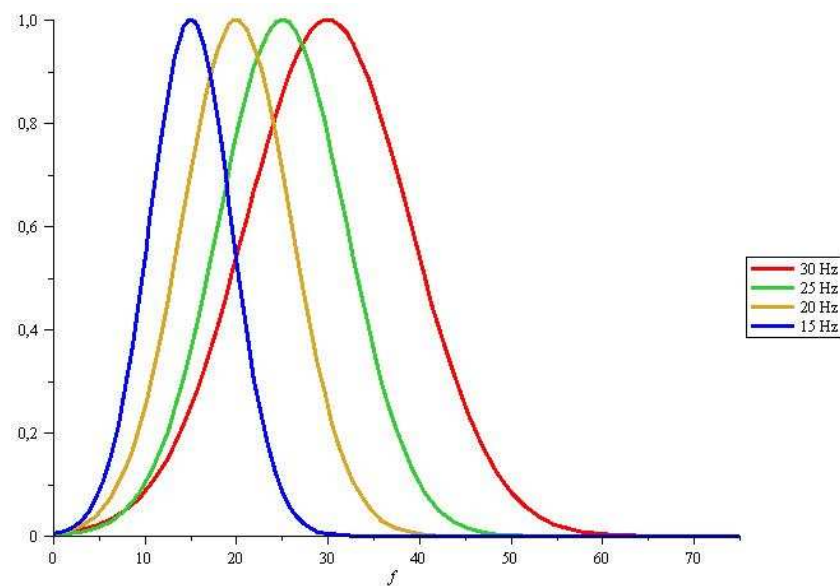


Figura 3.5: Representação gráfica dos espectros gaussianos. Os pulsos aqui representados têm frequências e  $\sigma$  respectivamente nos valores de 30 Hz e 8 (vermelho); 25 Hz e 7 (verde); 20 Hz e 6 (amarelo); e 15 Hz e 4,5 (Azul).

### 3.5 Razão Espectral.

O terceiro método que apresentaremos aqui foi inicialmente proposto por Spencer (1982). Rickett (2006), porém, fez uma generalização tomográfica deste método. Ou seja, considerando um modelo de camadas, a estimativa de  $Q$  de uma camada é dependente da estimativa do espectro da camada imediatamente acima.

Para encontrarmos a aproximação tradicional da razão espectral para a estimativa de  $Q$ , podemos considerar o caso quando temos apenas duas estimativas espectrais em um modelo de duas camadas. Desta forma, sendo o espectro da fonte  $A_0(\omega)$  e o espectro do sinal refletido na base da primeira camada  $A_1(\omega)$ . Os tempos de trânsito da fonte e do sinal refletido serão  $\tau_0$  e  $\tau_1$  respectivamente. Se considerando  $Q$  constante na camada, podemos concluir que (Rickett, 2006):

$$\log \left[ \frac{A_1(\omega)}{A_0(\omega)} \right] = \beta - \frac{\omega \Delta \tau}{2Q}, \quad (3.15)$$

onde  $\Delta \tau = \tau_1 - \tau_0$ . Note a regressão linear do logaritmo da razão dos espectros de amplitude versus a frequência  $\omega$  é proporcional à  $\Delta \tau / Q$ . Desta forma, a equação (3.15) nos fornece um gráfico linear produzido pela razão entre os espectros.

### 3.6 Resumo do capítulo

Neste capítulo citamos diferentes técnicas na determinação e inversão do fator de qualidade  $Q$ . Tonn (1991) separou estas técnicas pelo domínio no qual elas trabalhavam, são eles (i) o domínio do tempo e (ii) o domínio da frequência. Porém, desde então têm surgido diversas técnicas de inversão e determinação do fator de qualidade  $Q$ , aqui destacamos a

técnica do deslocamento de centróide (Quan & Harris, 1997), que considera o desvio do centróide da distribuição de frequências em direção às baixas frequências linear; a técnica do deslocamento de pico (Zhang & Ulrych, 2002) similar à técnica do deslocamento de centróides, porém considerando o desvio de picos; e a generalização tomográfica da técnica da razão espectral (Spencer *et al.*, 1982) proposta por Rickett (2006), onde  $Q$  é proporcional à inclinação da reta gerada pelo logaritmo da razão entre dois espectros em instantes diferentes.

## 4 ESTIMATIVAS DO FATOR DE QUALIDADE Q

### 4.1 Apresentação

Discutiremos aqui os resultados obtidos nas diferentes situações as quais submetemos os nossos métodos. Os modelos aqui criados têm como objetivo reproduzir as condições nas quais podemos encontrar reservatórios na natureza.

Desta forma descreveremos o comportamento dos métodos: razão espectral, deslocamento do centróide de frequências e deslocamento do pico de frequências, utilizando um modelo de três camadas, em três situações distintas:

- Situação 1: tem em vista observar a estabilidade das propostas mantendo-se o valor do fator de qualidade constante nas três camadas de interfaces paralelas e variando a espessura da segunda camada;
- Situação 2: observamos o efeito da variação de Q da segunda camada mantendo a espessura das três camadas constante e com suas interfaces paralelas;
- Situação 3: consistiu em avaliar a estabilidade dos métodos ao variar a inclinação da interface entre a segunda e a terceira camada.

Discutiremos aqui também o efeito sofrido na camada imediatamente inferior ao modificar estes parâmetros discutidos anteriormente e o efeito da variação da frequência central do pulso.

### 4.2 A criação do dado sintético

Para a criação do dado sintético, foram utilizadas as rotinas do SEIS88 (Cerveny & Psencick, 2006). Este programa realiza o traçado do raio considerando os efeitos da variação

das velocidades entre as camadas e de espalhamento geométrico. Para a dispersão, o modelo utilizado foi o de Futterman (1962). O SEIS88 normaliza as amplitudes de todos os pulsos tomando o pulso de maior amplitude como referência, por isto, os sinais de tempos posteriores perdem bastante resolução na amplitude.

### 4.3 Preparação do dado para a estimativa de Q

Para a determinação do fator de qualidade Q segundo os métodos aqui citados, alguns passos necessitam ser realizados:

- Primeiramente, após a criação do dado sintético, realizamos a leitura do primeiro traço registrado pelo arquivo de saída dos traços do SEIS88. Como premissa para os três métodos, este primeiro traço deve estar em zero *offset*. Os instantes de chegada  $t_{ref}$  da reflexão de referência,  $t_2$  da segunda reflexão e  $t_3$  da terceira reflexão são obtidos à partir de suas amplitudes máximas.
- Em segundo lugar realizamos a inclusão do ruído aleatório no sinal. A função aqui utilizada gera um vetor com números normalmente distribuídos com média igual a zero, com variância e desvio padrão iguais a 1,0. Logo após, este vetor é multiplicado de 0,5% do valor da amplitude máxima registrada no traço e adicionado ao sinal.
- Por fim, realizamos a definição das “janelas” que definem o limite inferior e o superior de cada reflexão (figura 4.1). Observe que o início da janela na  $i$ -ésima reflexão é definido como  $t_i$  e o fim desta janela é definido em  $t'_i$ . Uma escolha cuidadosa destes limites é necessária de modo a minimizar a presença do ruído na produção do espectro de frequências. Neste passo, são realizados separadamente em cada pulso a obtenção do espectro de frequências com o uso da transformada de Fourier.

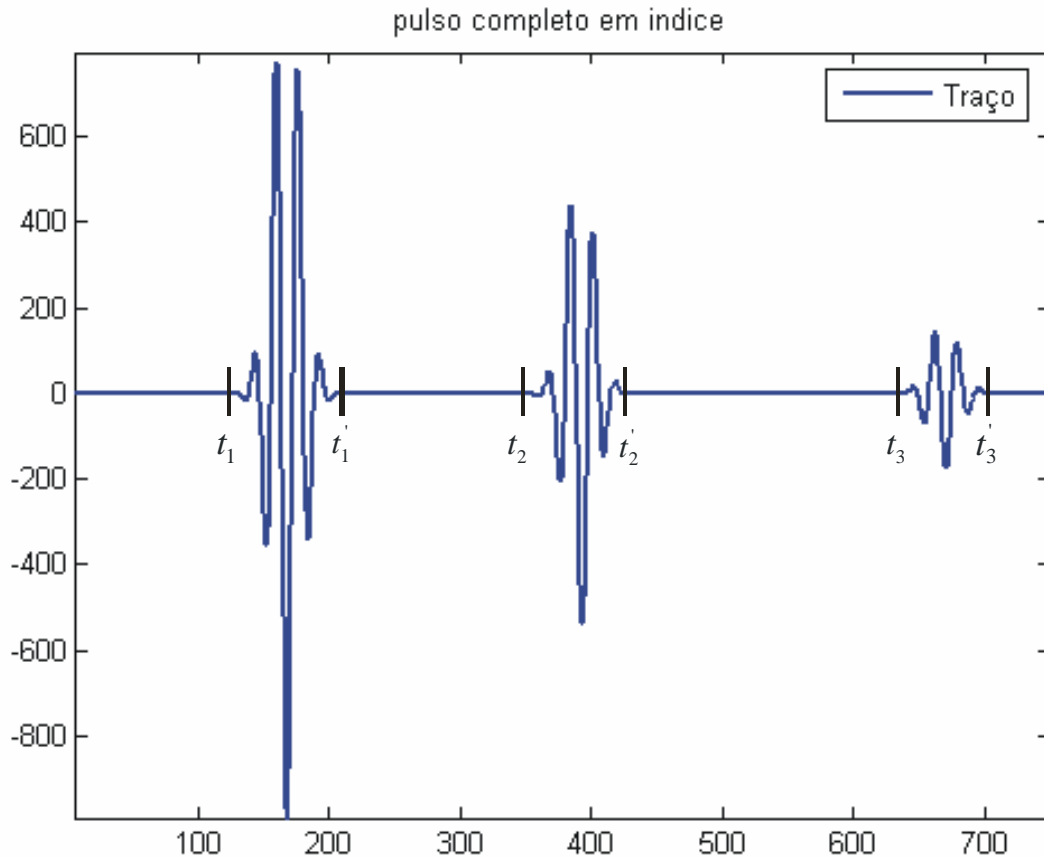


Figura 4.1: Representação do traço gerado sinteticamente. As janelas são delimitadas pelos tempos  $t_1$  e  $t_1'$ , para a primeira reflexão;  $t_2$  e  $t_2'$  para a segunda reflexão; e  $t_3$  e  $t_3'$  para a terceira reflexão.

#### 4.4 Determinação de Q da segunda e terceira camadas.

Nesta seção, iremos testar a eficiência dos três métodos em determinar o fator de qualidade Q da segunda camada. Dada a grande demanda atual da indústria de petróleo, é de suma importância que os métodos sejam capazes de boas estimativas de Q em modelos que reproduzam a situação de reservatórios. Por isso, testamos aqui a robustez dos métodos quando variamos a espessura da camada 2 mantendo o seu fator de qualidade Q constante e a robustez ao mantermos constante a espessura da camada 2 variando o seu fator de

qualidade. Visto que a primeira camada é a camada de referência, admitimos que esta camada tenha o fator de qualidade já conhecido por ser a camada aflorante.

#### 4.4.1 Determinação dos valores do fator de qualidade Q

Para o cálculo de Q, utilizamos nesta etapa um modelo de três camadas paralelas representado pela figura 4.2. A primeira camada, denominada camada de referência, tem o valor do fator de qualidade  $Q_{ref}$  mantido em 500 de modo a minimizar a perda do sinal e evitar grandes deformações no espectro. A sua espessura  $z_{ref}$  era variada segundo a frequência utilizada. Para as altas frequências ela deveria ser menor; para as baixas frequências, maior. Este cuidado servia para minimizar o tempo de propagação naquela camada, evitando grandes perdas. Nas baixas frequências, aumentávamos a espessura evitando interferência entre as duas primeiras reflexões registradas. Os parâmetros físicos e geométricos dos modelos utilizados estão nas tabelas. Foi utilizado o pulso de Gabor com  $\gamma = 4,0$ . Os tempos de trânsito do pulso em cada camada eram definidos como:  $\Delta t_{ref} = t_{ref} - t_0$  para a camada de referência,  $\Delta t_2 = t_2 - t_{ref}$  para a camada 2 e  $\Delta t_3 = t_3 - t_2$  para a camada 3. Para que haja reflexão na base dessa camada, consideramos que há uma quarta camada, não representada na figura, de espessura infinita. Utilizamos em cada teste, pulsos de frequências centrais iguais a respectivamente 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz.

O cálculo de Q consistia, para cada método, em:

1. Método do deslocamento de picos: Após o registro dos picos  $f_{pref}$ ,  $f_{p2}$  e  $f_{p3}$  nos espectros dos pulsos (figura 4.3) e seus tempos de chegada  $t_{ref}$ ,  $t_2$  e  $t_3$ , utilizamos a equação (3.14) para determinar os valores de  $Q_2$  e/ou  $Q_3$ ;
2. Método do deslocamento de centróides: Utilizamos a equação (3.1) primeiramente para determinar as variâncias  $\sigma_{ref}^2$ ,  $\sigma_2^2$  e  $\sigma_3^2$  dos espectros. A equação (3.2) foi utilizada para a determinação dos centróides de frequência  $f_{cref}$ ,  $f_{c2}$  e  $f_{c3}$  (figura



4.4), identificando-se os limites de integração. O nosso limite superior  $f_{corte}$  consistia em 2,5 vezes o valor do pico. Enfim, aplicamos a equação (3.7) para determinar os valores de  $Q_2$  e/ou  $Q_3$ ;

3. Método da razão espectral: O logaritmo dos espectros é calculado. Então, observando o gráfico produzido pela razão destes logaritmos, escolhemos o intervalo aproximadamente linear (figura 4.5) e nele aplicamos um ajuste linear de modo que obtemos o coeficiente angular  $m_2$  da reta formada pelo logaritmo da razão entre os espectros da segunda reflexão e o da primeira. Com a razão entre a terceira e a segunda reflexão, obtemos o coeficiente angular  $m_3$ . Enfim, aplicamos a equação (3.15) para a determinação de  $Q_2$  e/ou  $Q_3$ .

Camada	Q	Velocidade	Espessura
1	500	1,8 km/s	0,4 km
2	60	2,0 km/s	0,2 - 2,0 km
3	50	2,7 km/s	0,4 km
<b>Frequências centrais: 30 Hz e 40 Hz</b>			

Tabela 4.1: Parâmetros físicos e geométricos do modelo de camadas horizontais e paralelas para as frequências 30 Hz e 40 Hz. A espessura da camada 2 varia entre 0,2 km e 2,0 km.

Camada	Q	Velocidade	Espessura
1	500	1,8 km/s	0,2 km
2	60	2,0 km/s	0,2 - 1,4 km
3	50	2,7 km/s	0,2 km
<b>Frequência central: 60 Hz</b>			

Tabela 4.2: Parâmetros físicos e geométricos do modelo de camadas horizontais e paralelas para a frequência de 60 Hz. A espessura da camada 2 varia entre 0,2 km e 1,4 km.

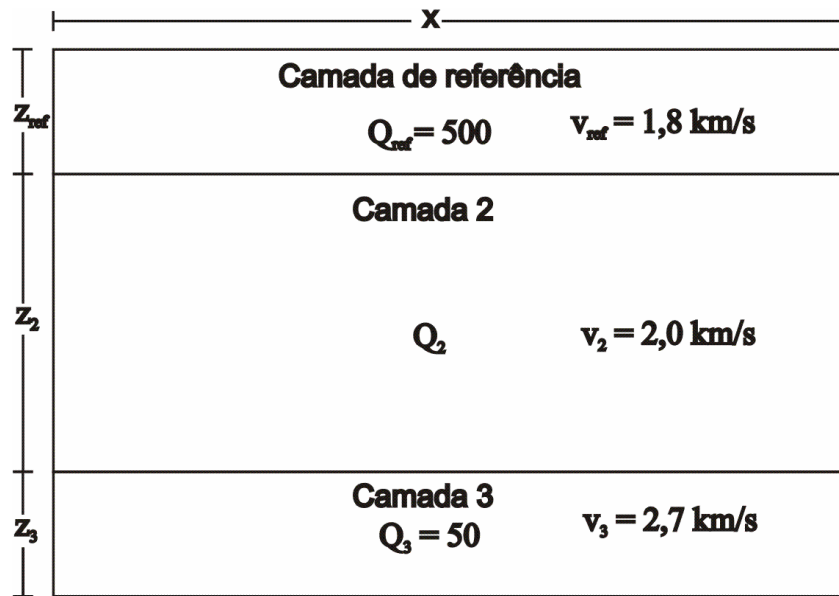


Figura 4.2: Modelo de três camadas paralelas.

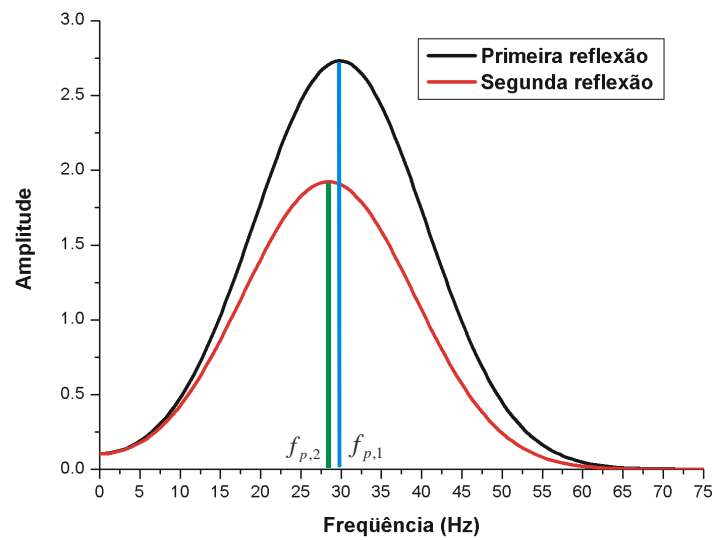


Figura 4.3: Espectros de duas reflexões de chegadas em instantes diferentes. Em preto, temos a primeira reflexão. Em vermelho, temos a segunda reflexão, onde  $f_{p,1}$  e  $f_{p,2}$  são os picos de frequência da primeira e da segunda reflexão respectivamente.

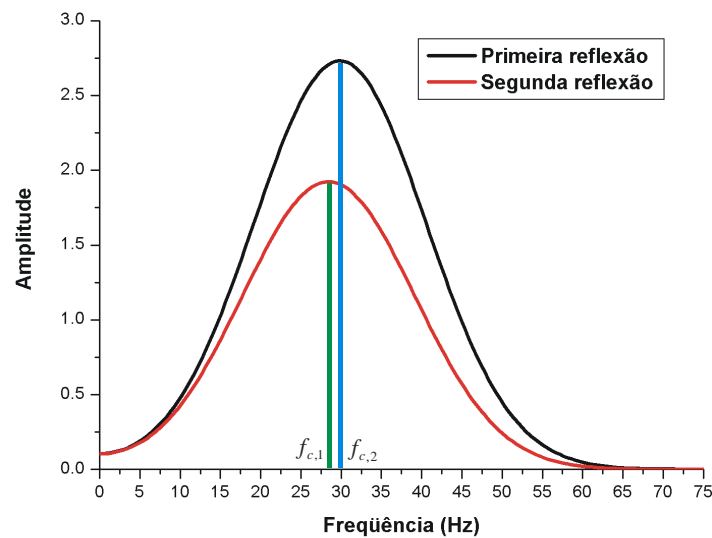


Figura 4.4: Espectros de duas reflexões de chegadas em instantes diferentes. Em preto, temos a primeira reflexão. Em vermelho, temos a segunda reflexão, onde  $f_{c,1}$  e  $f_{c,2}$  são os centróides de frequência da primeira e da segunda reflexão respectivamente.

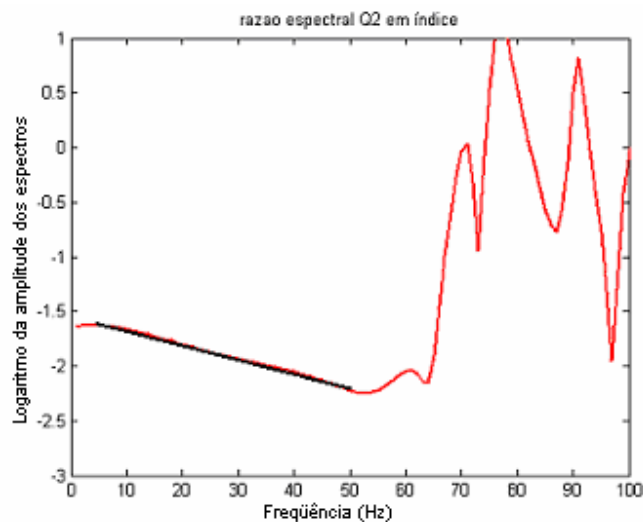


Figura 4.5: Gráfico da razão espectral. No eixo horizontal, temos os valores das frequências. No eixo vertical, temos os valores dos logaritmos das razões entre as amplitudes. O fator de qualidade Q das duas camadas em questão eram iguais a 50. A linha escura representa a região linear do gráfico.

#### 4.4.2 Resultados obtidos para a 1ª Situação (variando a espessura da camada 2 e mantendo Q constante)

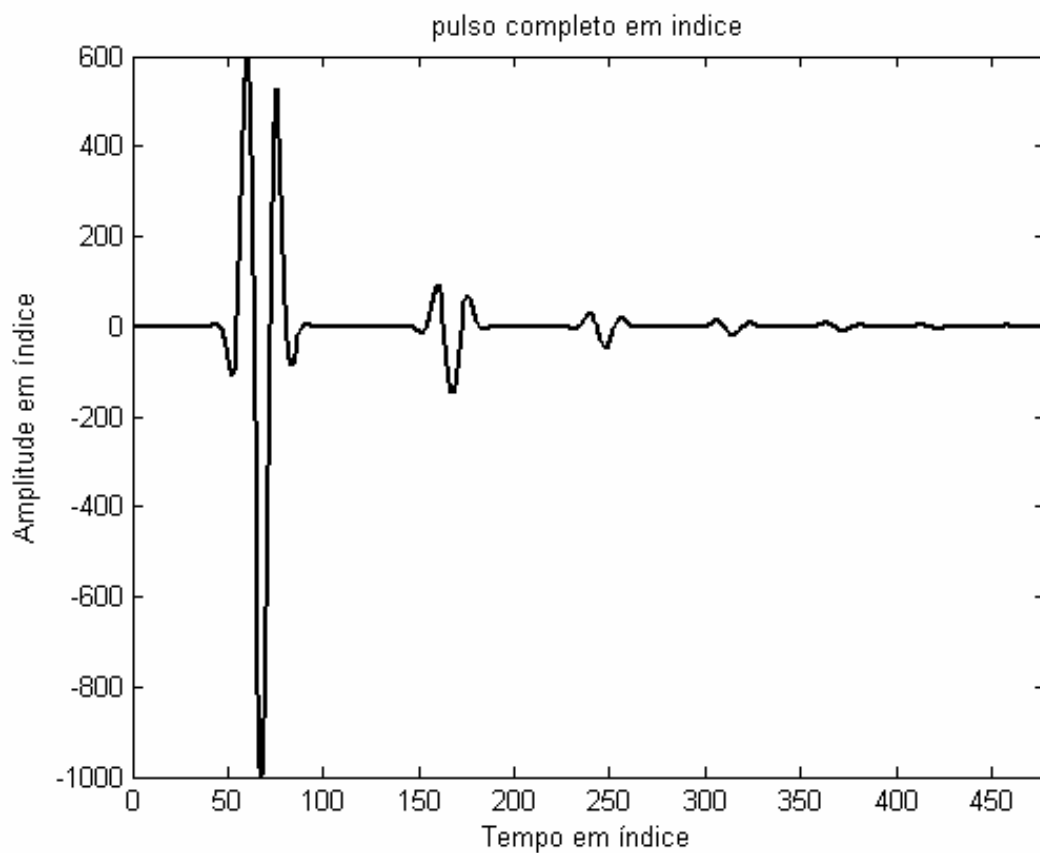
Nesta seção, discutimos os resultados obtidos pelos três métodos segundo a variação da espessura  $z_2$  da camada 2 para as frequências centrais iguais a 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz mantendo os valores dos fatores de qualidade constantes em cada camada e os efeitos da variação destes parâmetros na camada 3.

Durante os testes, observamos uma forte dependência dos três métodos no que diz respeito à resolução dos traços produzidos pelo SEIS88, causando instabilidade em tempos de registros relativamente grandes. Ao aumentarmos o tempo de propagação na camada, as reflexões posteriores se tornam cada vez mais difíceis de serem observadas (figura 4.6). A figura 4.7a apresenta os espectros dos sete pulsos da figura 4.6. Podemos observar que os espectros das reflexões posteriores têm amplitudes muito pequenas em relação às reflexões anteriores. Porém a maior implicação da baixa resolução está na qualidade dos espectros nos pulsos que propagam por mais tempo. A figura 4.7b apresenta os espectros normalizados da figura 4.7a. Veja que os espectros, a partir da quinta reflexão apresentam um ruído característico da baixa qualidade do sinal.

Vale ressaltar também que todos os métodos são dependentes da digitalização do espectro. A figura 4.8a ilustra um espectro obtido da reflexão de um pulso na segunda camada, que tinha espessura igual à 1500m. Observe que o espectro é representado por pontos cujo espaçamento entre eles é a taxa de amostragem  $\Delta f$  do espectro. Para este espectro especificamente, a taxa de amostragem é igual a 0,4882 Hz. A figura 4.8b apresenta um *zoom* da região do pico. O pico deste espectro deverá ser representado pelo ponto de maior amplitude. Desta forma, o pico verdadeiro dificilmente coincide com o observado no espectro. Esta imprecisão afeta tanto a estimativa por deslocamento de picos quanto a estimativa por deslocamento de centróides.

Outro problema encontrado é a definição da “janela” que delimita o pulso para a obtenção do espectro. Escolher uma “janela” mais larga que o próprio pulso, adiciona

informações de ruído ao espectro, em contrapartida, reduzir esta janela faz com que sejam perdidas informações relevantes em relação ao pulso.



**Figura 4.6:** Traço sintético criado no SEIS88. A figura foi criada no MATLAB e mostra sete reflexões em um modelo de sete camadas cujas velocidades da primeira à última são respectivamente: 1,5 km/s, 2,0 km/s, 2,5 km/s, 3,0 km/s, 3,5 km/s, 4,0 km/s, 4,5 km/s e 5,0 km/s. O fator de qualidade  $Q$  de cada camada é igual a 50. Foi utilizado o pulso de Gabor de frequência igual a 30Hz e  $\varphi$  igual a 4.

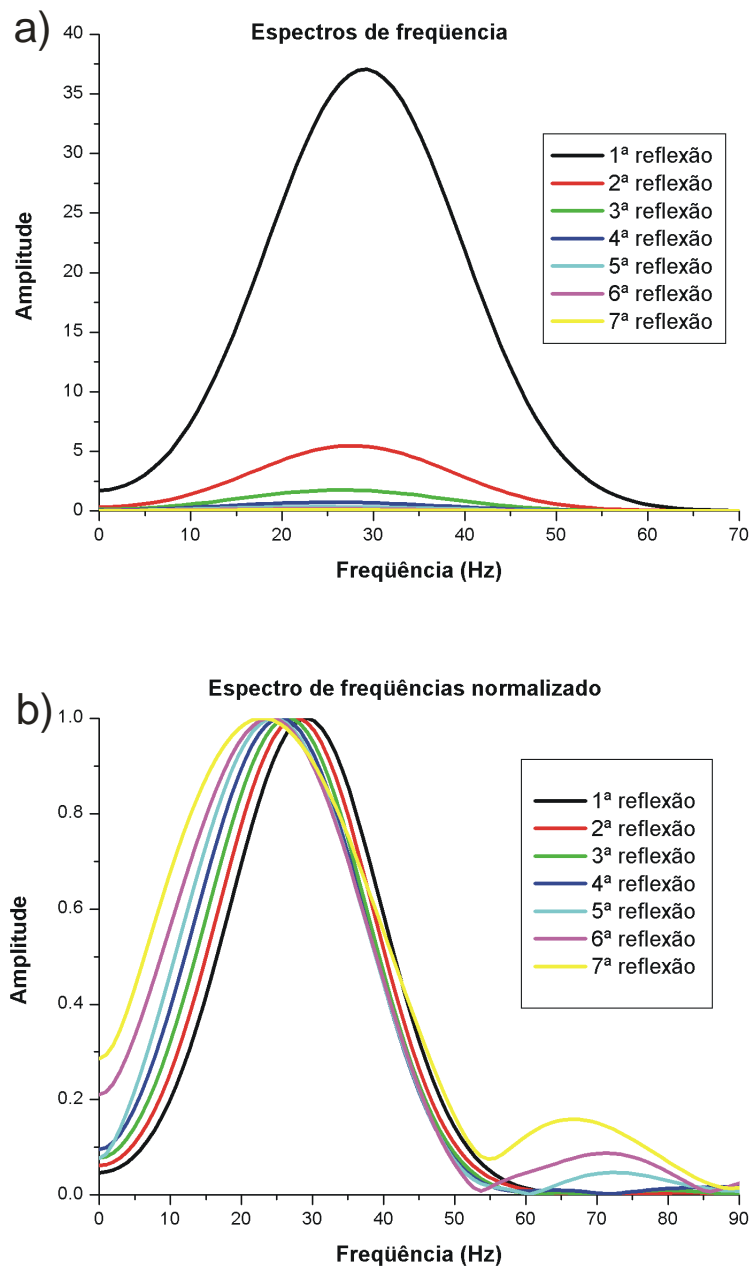
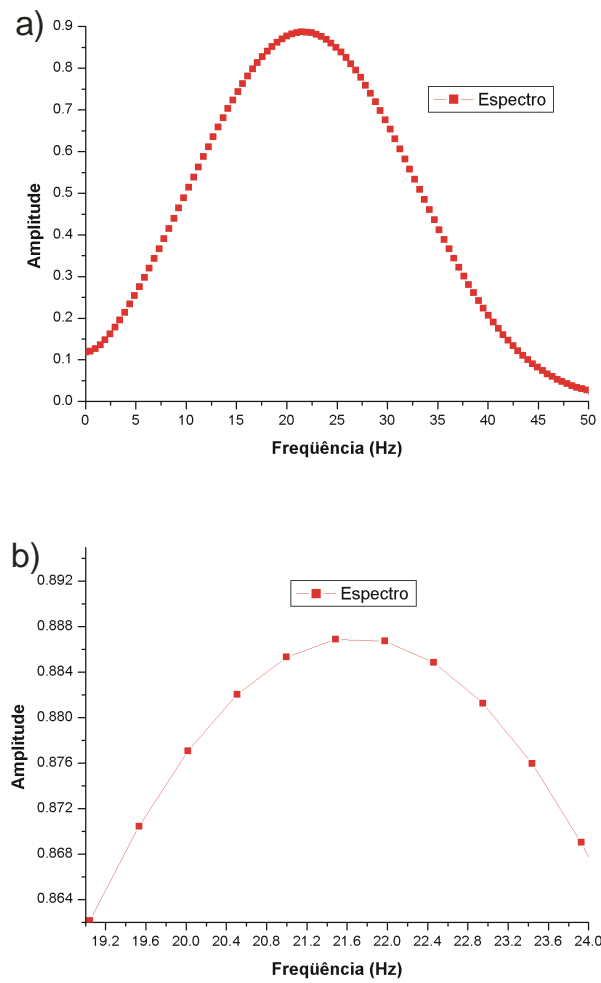


Figura 4.7: Espectros de frequências dos pulsos ilustrados na figura 4.2. (a) Os espectros originais. (b) Os espectros com sua amplitude normalizada.



**Figura 4.8:** O espectro em (a) foi obtido de uma reflexão na camada 2 com espessura  $z_2$  igual a 1500 m. Foi utilizado o pulso de Gabor com frequência igual a 30 Hz e o valor de  $Q$  nesta camada era igual a 60. Em (b) temos um “zoom” do pico do espectro. A taxa de amostragem  $df$  do espectro é igual a 0,4882 Hz.

### Camada 2

Discutimos a partir deste ponto os resultados das estimativas de cada um dos métodos em determinar o fator de qualidade da camada 2. Como variamos a espessura desta camada, iremos medir qual a precisão dos métodos em monitorar o deslocamento do espectro. Vale salientar que o uso da espessura máxima aqui utilizada ser de 1,4 km tem como objetivo reproduzir condições de tempo de registros relativamente altos.

- Deslocamento de picos de frequência: A figura 4.9 apresenta os erros percentuais deste método para as frequências centrais de 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Observe que nas frequências centrais de 30 Hz e 40 Hz, o método é bastante estável durante todo o intervalo proposto. Os erros observados nestas frequências estão no entorno dos  $\pm 5,0\%$ . Na frequência 60 Hz, o método torna-se menos estável. Os erros observados estão no entorno dos  $\pm 15,0\%$ . Observe que uma maior instabilidade é observada a partir da espessura igual a 1,3 km, onde os erros observados estão além dos 25,0%.

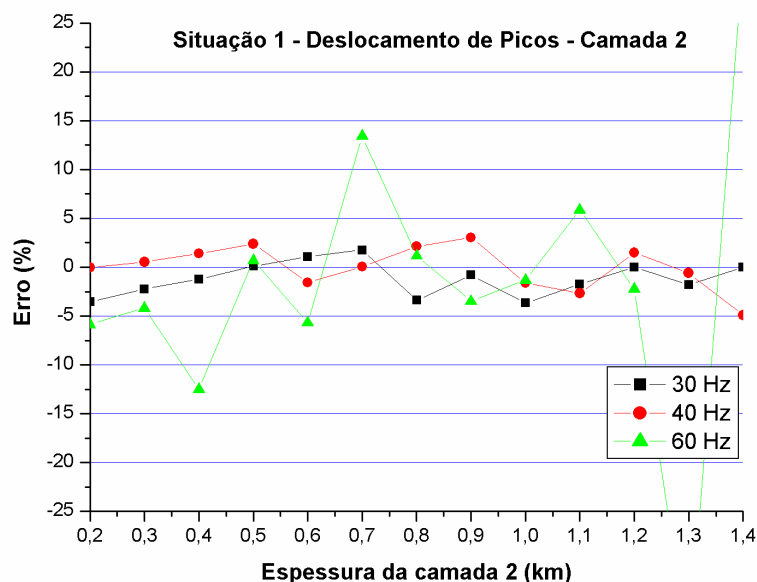
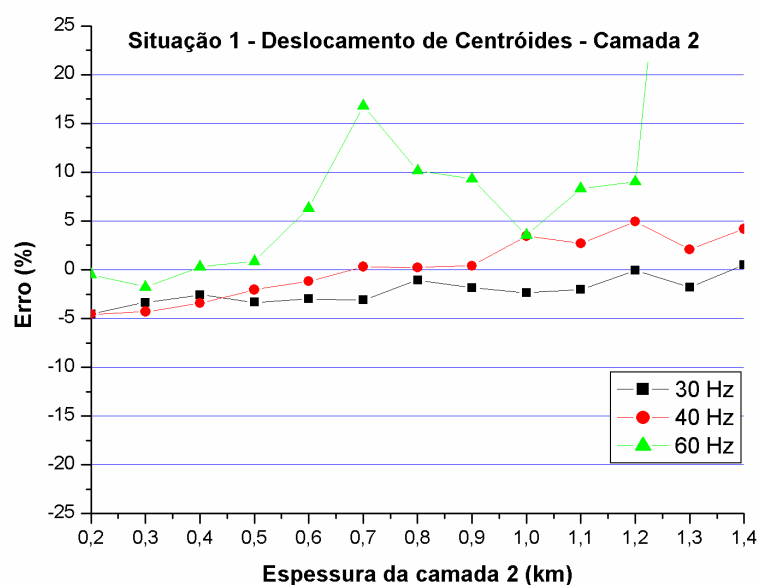


Figura 4.9: Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 2 através do método de deslocamento de picos na situação 1.



- Deslocamento de centróides de frequência: A figura 4.10 apresenta os erros percentuais deste método para as frequências centrais 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Podemos perceber que, semelhantemente ao método de picos, o método de centróides também apresenta bastante robustez nas frequências centrais 30 Hz e 40 Hz. Os erros observados estão dentro do intervalo de  $\pm 5,0\%$ . Na frequência central 60 Hz, os erros observados estão na maioria no intervalo de  $-2,5\%$  e  $10\%$ . Podemos observar que a maior instabilidade vem a ser apresentada a partir da espessura igual a 1,3 km.



**Figura 4.10:** Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 2 através do método de deslocamento de centróides na situação 1.

- Razão espectral: A figura 4.11 apresenta os erros nas estimativas da razão espectral para as frequências centrais iguais a 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Observe que igualmente aos outros métodos, a razão espectral é bastante precisa em determinar Q nas frequências 30 Hz e 40 Hz. Em geral, o erro observado está no entorno dos  $\pm 5\%$  em todo o intervalo de espessuras proposto. Destacamos a frequência central 40 Hz no intervalo de 0,2 km a 1,1 km, onde o erro observado está no entorno dos  $\pm 2,5\%$ . Na frequência central 60 Hz, este método também apresenta bastante estabilidade. Semelhante aos métodos de picos e centróides, os maiores erros são observados a partir da espessura igual a 1,3 km. Em

geral, este é o mais estável entre os métodos em determinar  $Q$  da camada 2 nesta situação.

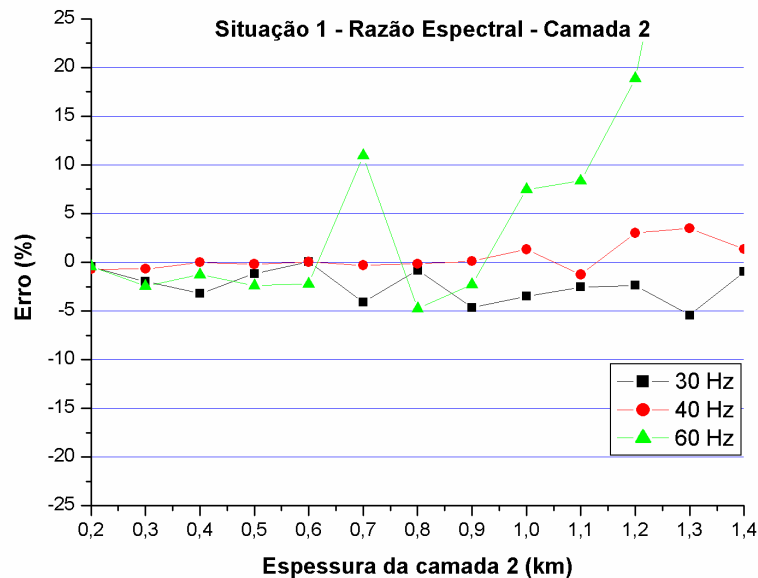


Figura 4.11: Erros percentuais nas estimativas de  $Q$  da camada 2 através do método da razão espectral na situação 1.

### *Camada 3*

Neste ponto iremos discutir a robustez dos métodos em determinar o fator de qualidade da camada 3. Como a espessura desta camada é mantida constante, a distância entre os espectros deverá ser igual, independentemente da espessura da camada 2. O sinal refletido na base desta camada deverá ser de menor qualidade, assim, espera-se que os métodos não sejam tão precisos em determinar o fator de qualidade da terceira camada. Outro fator importante é o tempo de trânsito nesta camada, que também independe do tempo de trânsito da onda na camada 2.

- Deslocamento de picos de frequência: A figura 4.12 ilustra os erros percentuais do método deste método em determinar o fator de qualidade da camada 3. Observe que apesar das boas estimativas para a camada 2, este método demonstrou-se bastante

instável. Na frequência central de 30 Hz, os erros observados estão no intervalo que vai de 0% a -15% até a espessura de 1,0 km. Para a frequência central igual a 40 Hz, o intervalo do erro observado é maior. Até a espessura de 1,0, o erro observado se encontra no intervalo de 10% a -20%, remetendo uma grande imprecisão do método nesta situação. Para a frequência central de 60 Hz, este método é instável em todo o intervalo de espessuras da camada 2.

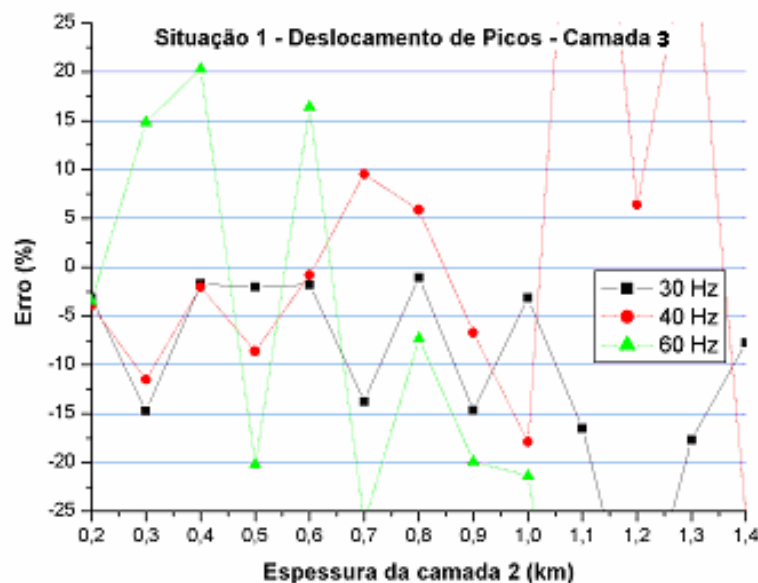


Figura 4.12: Erros percentuais nas estimativas de Q da camada 3 através do método de deslocamento de picos na situação 1.

- Deslocamento de centróides de frequência: A figura 4.13 apresenta os erros percentuais do método de deslocamento de centróides para as frequências 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Na frequência central de 30 Hz, este método demonstrou bastante estabilidade até a espessura de 1,3 km. Os erros observados, neste intervalo, estão sempre na faixa de -10% a 5 %. Na frequência central de 40 Hz, o comportamento deste método é bastante semelhante da frequência de 30 Hz. Podemos observar que, em todas as espessuras propostas, o intervalo de erro observado se encontra também entre -10% e 5% e somente na espessura de 1,3 km observamos um erro acima dos 5%. Nesta situação, na determinação de Q da camada 3, este método é o mais preciso dos três.

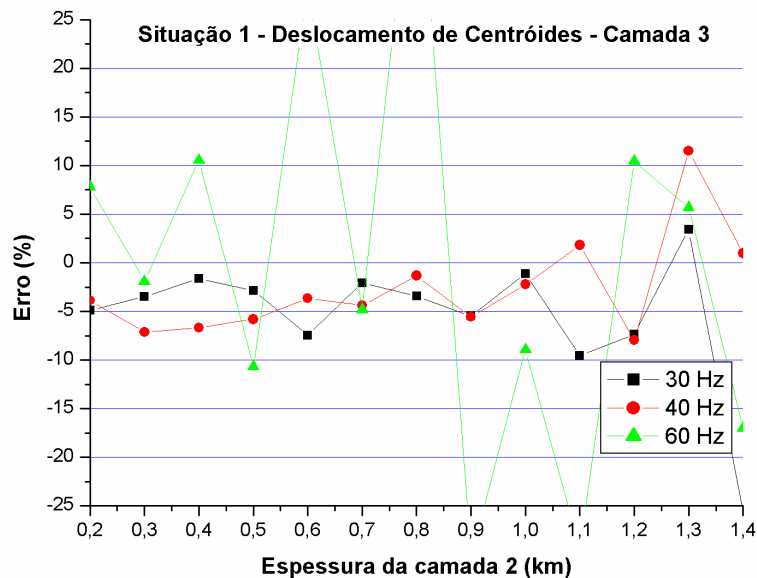


Figura 4.13: Erros percentuais nas estimativas de  $Q$  da camada 3 através do método de deslocamento de centróides na situação 1.

- Razão espectral: A figura 4.14 apresenta os erros observados na estimativa de  $Q$  da camada 3 através do método da razão espectral nas frequências centrais de 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Este método demonstra bastante estabilidade na frequência central de 30 Hz. Até a espessura de 1,1 km, o intervalo de erro permanece entre os 0% e os -12,5% sendo na espessura de 0,6 km onde observamos o maior erro. Porém, a partir da espessura de 1,2 km, o método torna-se bastante impreciso. Na frequência central de 40 Hz, o método é muito eficaz até a espessura de 0,6 km, onde o erro observado oscila no entorno dos 0%. Porém, a partir da espessura de 0,7 km, este método torna-se bastante impreciso demonstrando grande instabilidade. Na frequência central igual a 60 Hz, este método perde a instabilidade em espessuras cada vez menores. Note que o intervalo de menor erro (2,5% a -15%) se encontra até a espessura de 0,5 km. Acima desta espessura, observamos bastante imprecisão em determinar o fator de qualidade da terceira camada.

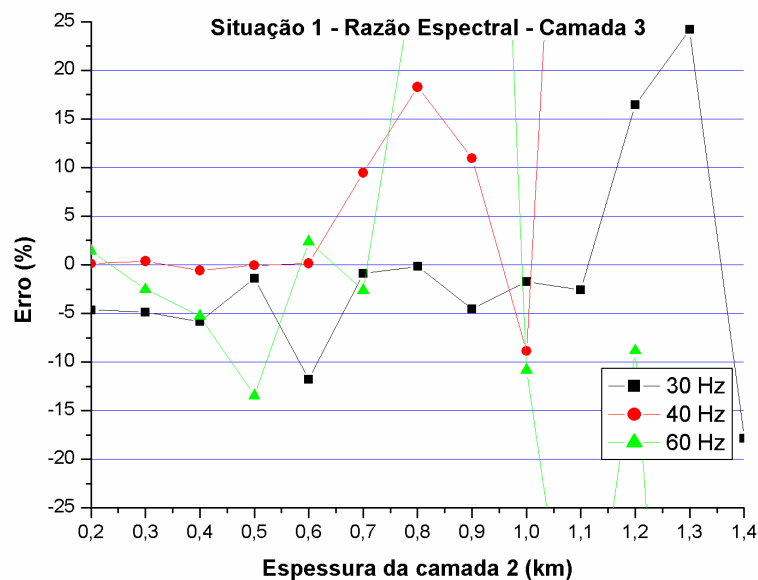


Figura 4.14: Erros percentuais nas estimativas de  $Q$  da camada 3 através do método da razão espectral na situação 1.

#### 4.4.3 Resultados para a 2ª situação (variando $Q$ e mantendo as espessuras constantes)

Após compararmos o comportamento dos métodos em relação à variação da espessura da camada 2, iremos descrever nesta seção o comportamento das estimativas ao mantermos a espessura desta camada constante e variarmos o seu fator de qualidade. Este conjunto de testes tem como objetivo avaliar a validade destes métodos na equivalência entre variar  $Q$  e a espessura.

Submeter um pulso às baixas atenuações é equivalente a diminuir seu tempo de trânsito em uma camada. De forma semelhante, reflexões observadas em grandes profundidades sofrem atenuação semelhante aos pulsos refletidos de camadas menos espessas, mas de forte absorção. Nesta etapa, utilizamos o modelo de três camadas com seus parâmetros físicos e geométricos descritos nas tabelas 4.3 e 4.4.

A figura 4.15 apresenta seis pulsos refletidos na base de uma camada de espessura igual a 50 m. Cada pulso foi submetido a uma atenuação diferente de 10, 25, 50, 100, 250 e

500. Observe que quanto maior for a atenuação, mais deformado será o pulso em questão. Porém, a maior consequência desta deformação pode ser observada nos espectros destes pulsos. Veja que aqueles pulsos submetidos a baixas atenuações têm deslocamentos mínimos entre si. Somente iremos observar um grande deslocamento entre os espectros para baixos valores de  $Q$ .

Camada	Q	Velocidade	Espessura
1	500	1,8 km/s	0,4 km
2	10-400	2,0 km/s	0,4 km
3	50	2,7 km/s	0,4 km
<b>Frequências centrais: 30 Hz e 40 Hz</b>			

Tabela 4.3: Parâmetros físicos e geométricos do modelo de camadas paralelas para as frequências 30 Hz e 40 Hz. O fator de qualidade da camada 2 varia entre 10 e 400.

Camada	Q	Velocidade	Espessura
1	500	1,8 km/s	0,2 km
2	10-400	2,0 km/s	0,2 km
3	50	2,7 km/s	0,2 km
<b>Frequência central: 60 Hz</b>			

Tabela 4.4: Parâmetros físicos e geométricos do modelo de camadas paralelas para a frequência de 60 Hz. O fator de qualidade da camada 2 varia entre 10 e 400.

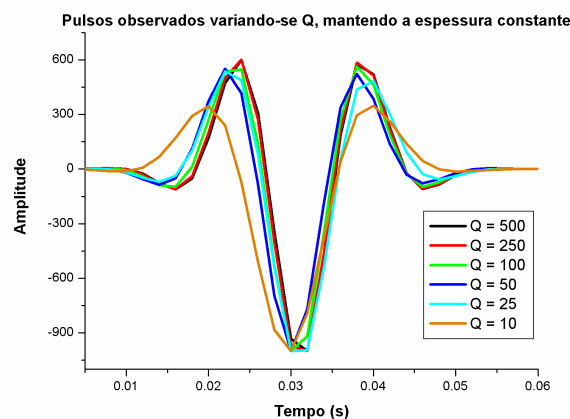
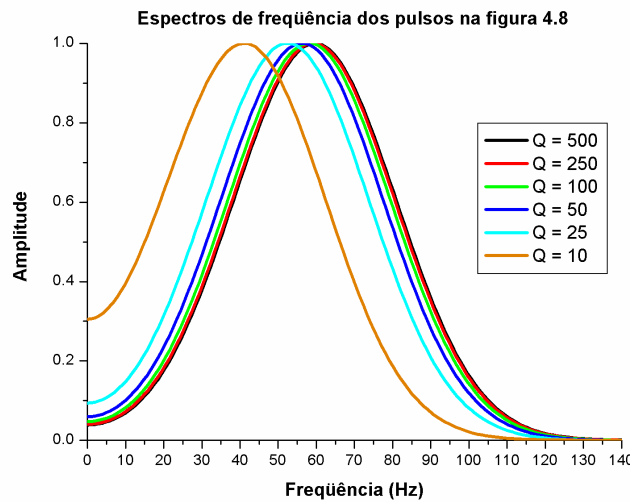


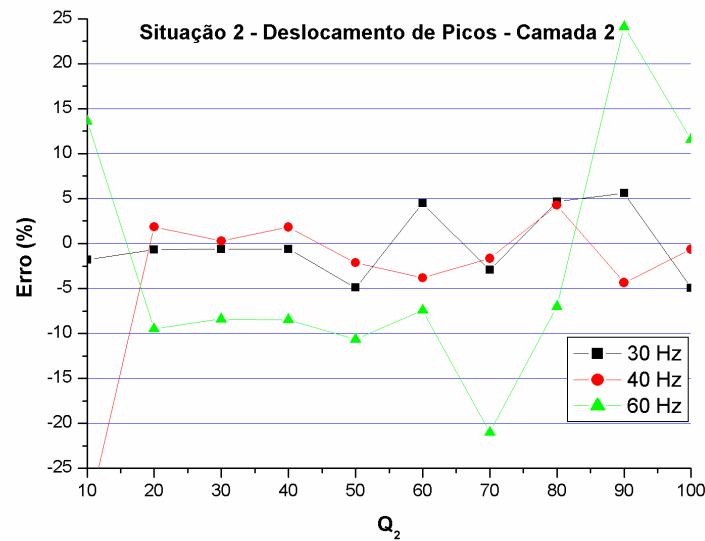
Figura 4.15: Pulsos de 60 Hz observados em uma camada de espessura igual a 50 m. Baixos valores de  $Q$  representam uma grande atenuação do sinal, fazendo com que ele se deforme.



**Figura 4.16:** Espectros de frequência normalizados relativos aos pulsos mostrados na figura 4.15. Observamos que a atenuação altera a posição do espectro significativamente. Os espectros foram normalizados e os valores de  $Q$ .

### *Camada 2*

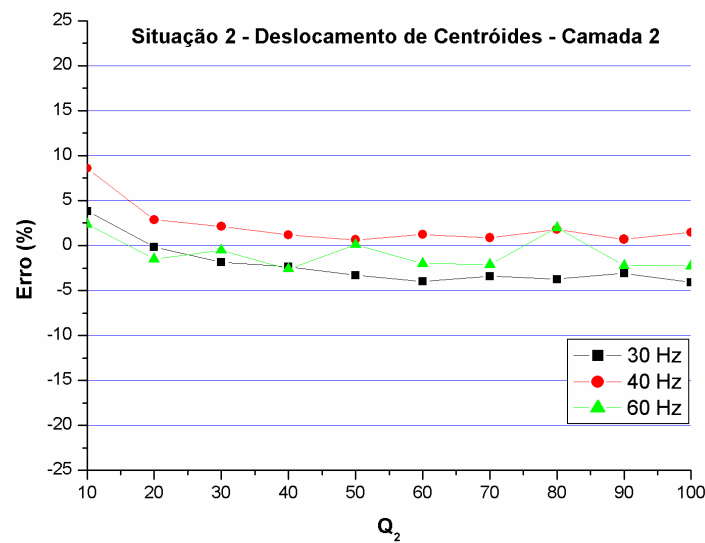
- Deslocamento de picos de frequência: A figura 4.17 apresenta os erros deste método na estimativa de  $Q$  da camada 2 nas frequências centrais iguais a 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Na frequência de 30 Hz este método demonstrou bastante robustez. Observe que o erro pouco ultrapassa o intervalo de -5% a 5%. Já na frequência de 40 Hz, este método foi bastante impreciso em determinar  $Q = 10$ . Este erro observado se deveu a baixa qualidade do sinal recebido, e conseqüentemente do espectro. Acima deste valor de  $Q$ , este método demonstrou bastante precisão, com o intervalo de erro entre -5% e 5%. Na frequência central de 60 Hz, este método torna-se bastante impreciso. Em contraste com as frequências mais baixas, cujos erros oscilavam pouco, observamos bastante instabilidade durante todo o intervalo de  $Q$  para a camada 2 proposto.



**Figura 4.17:** Erros percentuais nas estimativas de  $Q$  da camada 2 através do método de deslocamento de picos na situação 2.

- Deslocamento de centróides de frequência: A figura 4.18 apresenta os erros nas estimativas de  $Q$  da segunda camada para este método nas frequências centrais iguais a 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Este método demonstra bastante robustez durante todo o intervalo de  $Q$  proposto para todas as frequências. Observe que nas frequências centrais de 30 Hz e 60 Hz os erros observados se encontram no intervalo de -5% a 5%. Para a frequência central de 40 Hz, o maior erro observado está na determinação de  $Q = 10$ , que é de pouco mais de 7,5%, seguindo a tendência das outras frequências. Este maior erro observado especificamente para este valor de  $Q$  se deve à baixa qualidade do sinal observado.





**Figura 4.18:** Erros percentuais nas estimativas de  $Q$  da camada 2 através do método de deslocamento de centróides na situação 2.

- Razão espectral:** A figura 4.19 apresenta os erros nas estimativas através do método da razão espectral para a camada 2 utilizando pulsos de frequências centrais iguais a 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Este método demonstra-se como o mais robusto entre os três aqui estudados para as frequências centrais de 30 Hz e 40 Hz. Observe que, nestes casos, o erro observado oscila entre -2,5% e 2,5%. Na frequência central de 30 Hz, o maior erro observado é de pouco mais de 2,5% para  $Q = 10$ . Já para a frequência de 40 Hz, o maior erro observado é de quase -5% para  $Q = 20$ . Na frequência central de 60 Hz, este método é menos estável, mas ainda assim bastante robusto, apresentando erros no intervalo de -5% a 10%.

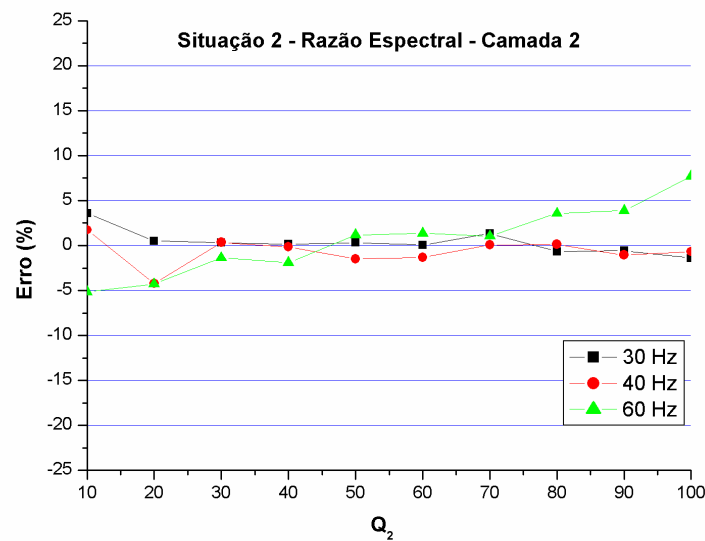
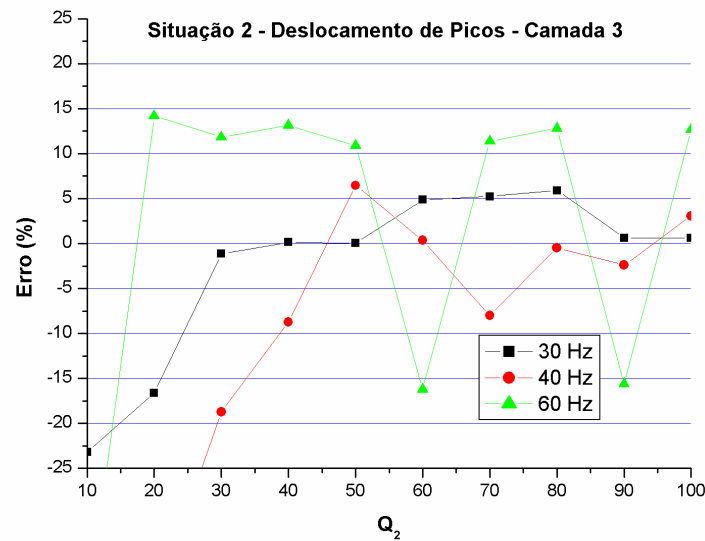


Figura 4.19: Erros percentuais nas estimativas de  $Q$  da camada 2 através do método de deslocamento de centróides na situação 2.

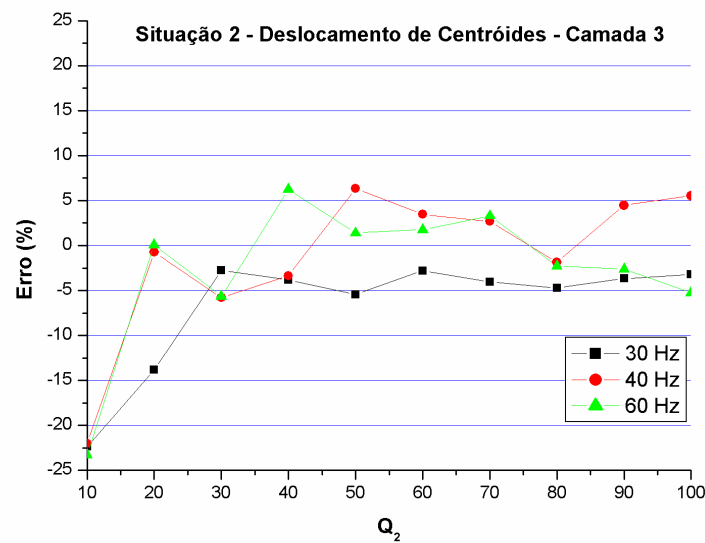
### Camada 3

- Deslocamento de picos de frequência: A figura 4.20 apresenta os erros nas estimativas deste método na determinação de  $Q$  da camada 3 utilizando pulsos de frequências centrais 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Observemos que este método é bastante dependente da qualidade do sinal de entrada. Nesta situação, o sinal de entrada é o sinal transmitido da segunda camada. Desta forma, quando o sinal é bastante atenuado observamos um grande erro na estimativa de  $Q_3$ . Na frequência central de 30 Hz, este método apresenta eficácia a partir de  $Q_2 = 30$ . Veja que os erros se encontram entre -2,5% e 7,5%. Aumentando a frequência do sinal, torna-se cada vez mais difícil manter a sua qualidade em atenuações relativamente altas. Na frequência central de 40 Hz, uma relativa estabilidade é observada a partir de  $Q_2 = 40$ . O intervalo de erros a partir deste intervalo se encontra entre -10,0% e 7,5%. Já para a frequência de 60 Hz, observamos grandes imprecisões nas estimativas de  $Q_3$ , onde os menores erros observados são de pouco mais de 10%.



**Figura 4.20:** Erros percentuais nas estimativas de  $Q$  da camada 3 através do método de deslocamento de picos na situação 2.

- Deslocamento de centróides de frequência: A figura 4.21 apresenta os erros nas estimativas através deste método na determinação de  $Q$  da camada 3 utilizando pulsos de frequências centrais iguais a 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Semelhante ao método de picos, o método de centróides também é bastante afetado pela qualidade do sinal de entrada. Na frequência central de 30Hz, observe que a estabilidade somente ocorre a partir de  $Q_2 = 30$ . Para os valores maiores que 30, onde a qualidade do sinal de entrada é maior, o erro observado oscila no entorno dos -5,0%. Nas frequências de 40 Hz e 60 Hz, observamos que o método torna-se relativamente estável a partir de  $Q_2 = 20$ . O intervalo de erros observados para estas frequências partir de  $Q_2 = 30$  está entre  $\pm 7,5\%$ .



**Figura 4.21:** Erros percentuais nas estimativas de  $Q$  da camada 3 através do método de deslocamento de centróides na situação 2.

- Razão espectral:** A figura 4.22 apresenta os erros percentuais nas estimativas do fator de qualidade da terceira camada através do método da razão espectral nas frequências de 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Como observado nos métodos anteriores, a razão espectral também sofre com a baixa qualidade do sinal. Veja que em todas as frequências centrais, o método apresenta grande imprecisão para valores de  $Q_2$  iguais a 10. Na frequência de 30 Hz, à medida que diminuimos a atenuação da camada 2, a precisão em determinar  $Q_3$  aumenta. A partir de  $Q_2 = 20$ , o erro se encontra na faixa entre -7,5% e 10,0%. Para a frequência central de 40 Hz, o método estabiliza-se a partir de  $Q_2 = 30$ , com erros entre  $\pm 7,5\%$ . Podemos notar que para a maior frequência (60 Hz), o método estabiliza-se mais rapidamente e torna-se mais preciso à medida que aumentamos o valor de  $Q_2$ . Nos valores de  $Q_2$  a partir de 20, os erros observados se encontram na faixa de -7,5% e 5,0%. Este comportamento sugere que, para esta situação, é mais indicado o uso de frequências mais altas.

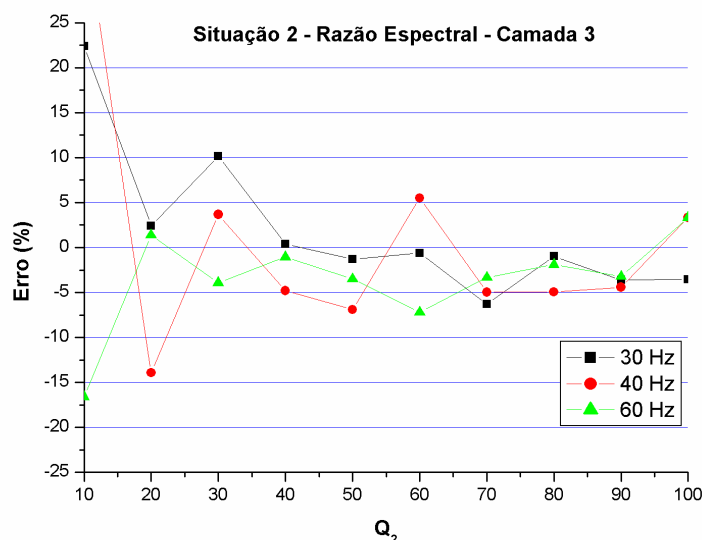


Figura 4.22: Erros percentuais nas estimativas de  $Q$  da camada 3 através do método da razão espectral na situação 2.

#### 4.4.4 Resultados obtidos na situação 3 (variando a inclinação da interface entre as camadas 2 e 3 e mantendo $Q$ constante)

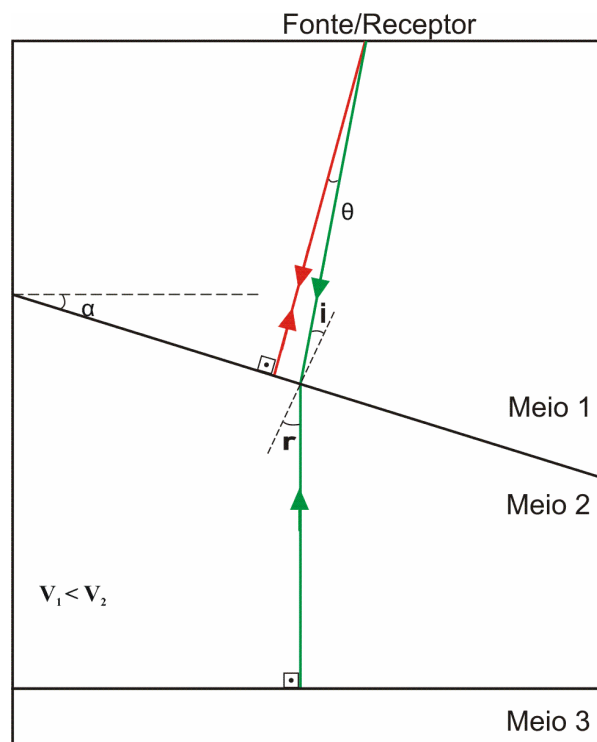
Para finalizar os testes com as metodologias de determinação do fator de qualidade  $Q$ , nesta seção, apresentaremos os resultados obtidos para os três métodos no que diz respeito à variação do mergulho da interface entre a segunda e a terceira camada. Este teste reproduz as condições de reservatórios localizados sob um anticlinal, como no caso explicado no capítulo 2 desta dissertação.

Até o presente momento, todos os testes realizados utilizaram modelos cujas camadas tinham seus topos e suas bases paralelas. Nestes modelos, o raio refletido na base da camada 3 percorre o mesmo caminho do raio refletido na base das camadas 1 e 2. Desta forma, o raio refletido na base da camada 2 percorre, também, o mesmo caminho do raio da camada 1.

Considere então o modelo ilustrado na figura 4.23. A interface entre os meios 1 e 2 encontra-se inclinada de um ângulo  $\alpha$  e o arranjo fonte-receptor se encontra em zero *offset*. O raio 1, em vermelho, é refletido na base do meio 1 e incide normalmente à interface entre

os meios 1 e 2. Porém, o raio 2, em verde, é refletido na base do meio 2 e não incide normalmente na interface entre os meios 1 e 2. Com isto, percebe-se que o raio refletido na base do meio 2 não segue o mesmo caminho que o raio refletido na base do meio 1. Isto produz uma inconformidade no tempo de registro. Podemos notar que o caminho do raio 2 no meio 1 é maior que o caminho do raio 1 no meio 1.

Para os testes nesta situação, utilizamos um modelo de três camadas cuja interface entre as camadas 2 e 3 tem sua inclinação variada. O arranjo fonte-receptor está em zero *offset* e se encontra no centro do modelo. O ângulo de inclinação da interface entre as camadas 2 e 3 foi variado de  $0^\circ$  a  $16^\circ$ . O objetivo deste modelo é testar a robustez das técnicas em determinar o fator de qualidade da camada 3. Os parâmetros físicos e geométricos do modelo se encontram na tabela



**Figura 4.23:** Quando a interface entre dois meios distintos é inclinada, o raio refletido na base da primeira camada (vermelho) e o refletido na base da segunda camada (verde) percorrem caminhos diferentes. Perceba a distância percorrida pelo raio em vermelho é menor que a percorrida pelo raio em verde.

Camada	Q	Velocidade	Espessura
1	500	1,8 km/s	70 m
2	60	2,0 km/s	400 m
3	50	2,5 km/s	600 m

Tabela 4.5: Parâmetros físicos e geométricos do modelo utilizado na situação 3.

- Deslocamento de picos de frequência: A figura 4.24 apresenta os erros percentuais deste método na situação 3 para as frequências centrais de 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Observe na frequência central 30 Hz. Este método apresenta bons resultados até a inclinação de  $8^\circ$  com erros variando de -5% a 10%. Porém, a partir da inclinação de  $10^\circ$ , este método torna-se bastante instável. Com o aumento da frequência, também ocorre o aumento na imprecisão. Os erros observados na frequência de 40 Hz se encontram entre -17,5% e 12,5%. Já na frequência de 60 Hz, este método torna-se bastante impreciso com erros variando de 2,5% e 22,5%.

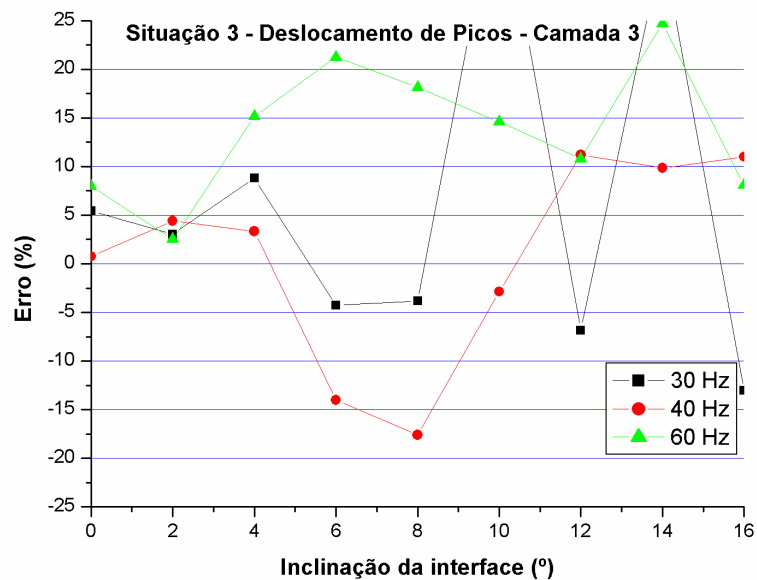
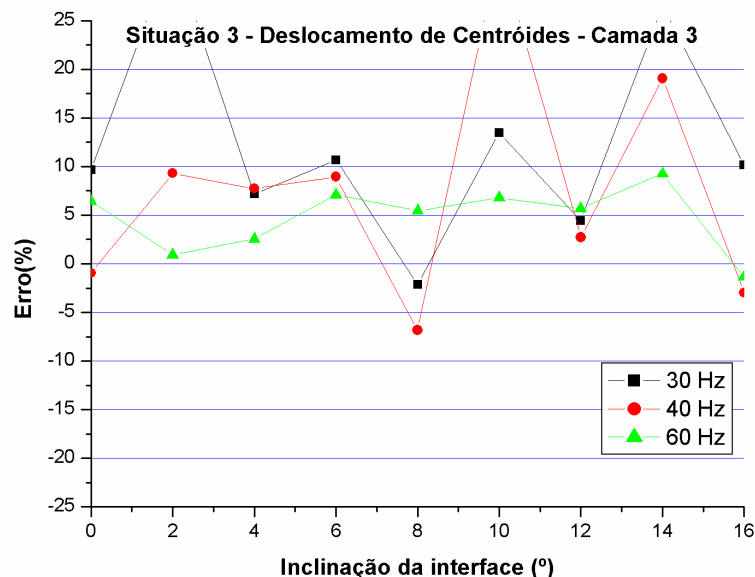


Figura 4.24: Erros percentuais na estimativa de Q da camada 3 para o método de deslocamento de picos na situação 3.

- Deslocamento de centróides de frequência: A figura 4.25 apresenta os erros nas estimativas para este método em determinar Q da camada 3 utilizando pulsos de frequências centrais iguais a 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Observe que nas menores frequências este método demonstra bastante instabilidade. Na frequência de 40 Hz, o método apresenta relativa precisão até a inclinação de 6°. Mas ao aumentarmos esta inclinação observamos bastante imprecisão por parte deste método. Porém, na frequência central de 60 Hz, este método é o mais robusto em todo o intervalo, apresentando erros na faixa de  $\pm 7,5\%$ .

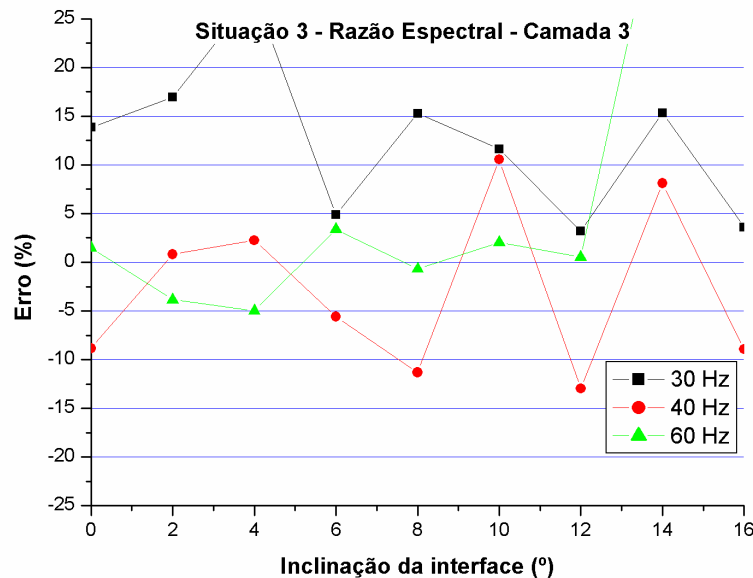


**Figura 4.25:** Erros percentuais na estimativa de Q da camada 3 para o método de deslocamento de centróides na situação 3.

- Razão Espectral: A figura 4.26 apresenta os erros deste método em determinar o fator de qualidade da camada 3 utilizando pulsos de frequências centrais iguais a 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. Observemos os resultados da frequência central de 30 Hz. Nesta frequência, a determinação de Q se torna relativamente precisa a partir da inclinação de 6°. Com o aumento da frequência, observamos que o erro torna-se menor. Observe na frequência de 60 Hz. Semelhantemente ao método de deslocamento de centróides, a razão espectral



apresenta uma relativa estabilidade. Porém, este método perde estabilidade em uma inclinação menor ( $12^\circ$ ).



**Figura 4.26:** Erros percentuais na estimativa de  $Q$  da camada 3 para o método de deslocamento de centróides na situação 3.

## 4.5 Resumo do capítulo.

Este capítulo teve como objetivo verificar as limitações das três técnicas; deslocamento de picos de frequência, deslocamento de centróides de frequência e razão espectral, em três situações diferentes. Em cada situação utilizamos um modelo com três camadas, sendo a primeira uma camada de referência de baixa atenuação.

Na situação 1, mantivemos os valores de  $Q$  constante em todas as camadas e variamos a espessura da camada 2. Na determinação de  $Q$  da camada 2, todos os métodos apresentaram bons resultados quando se utilizaram pulsos de frequências centrais 30 Hz e 40 Hz. 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, porém, o método de deslocamento de centróides apresentou bons resultados em espessuras maiores.

Na 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 frequências utilizadas, o método de picos demonstrou-se bastante impreciso. O método de centróides foi o que mais se destacou, demonstrando bastante robustez nas frequências centrais de 30 Hz e 40 Hz. Porém, demonstrou bastante instabilidade na frequência de 60 Hz. O método da razão espectral também se demonstrou bastante robusto nas frequências de 30 Hz e 40 Hz, porém, perdia a instabilidade em espessuras menores da camada 2 em relação ao método de centróides.

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 frequência central 30 Hz e 40 Hz. Porém, na frequência 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 frequências centrais utilizadas sendo os que mais se destacaram nesta situação.

Para a determinação de  $Q$  da camada 3, o método de deslocamento de picos demonstrava precisão à medida que diminuíamos a atenuação da camada 2, nas frequências de 30 Hz e 40 Hz. Na frequência central de 60 Hz, o método demonstrou bastante instabilidade em todo o intervalo proposto. 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.

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 frequências centrais de 30 Hz e 40 Hz. Porém, quando utilizamos o pulso de frequência 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  $16^\circ$ , enquanto que a razão espectral manteve sua precisão até a inclinação de  $12^\circ$ .

## 5 INVERSÃO DO FATOR DE QUALIDADE Q

### 5.1 Apresentação

Neste capítulo, iremos discutir os resultados obtidos utilizando o algoritmo de Moreira (2006) para a inversão do fator de qualidade Q. No capítulo anterior pudemos perceber que o uso das equações analíticas na determinação de Q produzia um efeito em cascata, isto é, a estimativa de uma camada dependia diretamente da estimativa da camada imediatamente acima. Desta forma, para modelos com mais de três camadas devemos utilizar uma proposta de inversão do fator de qualidade Q.

Assim, este capítulo realizará a comparação entre as propostas de inversão que utilizam a comparação entre os centróides e a que utiliza a comparação entre os picos. O algoritmo escolhido foi proposto por Moreira (2006) e é válido para meios de baixa à moderada perda ( $Q > 5$ ). Para determinar os valores de Q, a proposta de Moreira faz comparação entre os centróides de frequência observados e modelados. Este algoritmo foi modificado para fazer comparação entre os picos de frequência. Para a minimização da função objeto utilizamos o algoritmo COMPLEX de Richardson & Kuester (1973).

O modelo de dispersão aqui utilizado na criação do dado sintético é o de Futterman (1962), já na modelagem dos espectros de amplitudes, utilizamos o modelo de Müller (1983).

A proposta de inversão original de Moreira (2006) utilizava a transformada S (Stockwell *et al.*, 1996), que é uma extensão da transformada de Fourier em tempo curto e utiliza janelas gaussianas para a aquisição dos espectros de amplitude. Em vez da transformada S, utilizaremos a transformada de Fourier. A criação do dado sintético ocorre da mesma forma daquela descrita no capítulo 4.

## 5.2 Introdução

A inversão numérica do fator de qualidade  $Q$  é um processo que pode envolver bastante gasto de tempo computacional, devido à dificuldade de se encontrar o mínimo da função objeto. No nosso contexto, foi necessário um método de busca direta capaz de obter a solução sem a necessidade do cálculo de derivadas da função objeto. Por este motivo, foi escolhido o método COMPLEX (Richardson & Kuester, 1973), que apesar de ser um método bastante lento, demonstra-se eficaz em encontrar o mínimo da função objeto. A utilização deste método tem sido proposta não somente para a inversão do fator de qualidade  $Q$ , como se pode encontrar na literatura sendo utilizando também para ajuste histórico de reservatórios (Santana *et al*, 2008). O método COMPLEX é baseado numa técnica de busca seqüencial, sendo bastante eficiente para funções objeto não-lineares e sujeitas aos vínculos também não lineares.

O processo de busca inicia-se com um conjunto de pontos distribuídos aleatoriamente no espaço de parâmetros, dentro de uma região definida como “caixa” (figura 5.1), que traduz os vínculos de desigualdade associados a limites inferiores e superiores fisicamente admissíveis para os parâmetros. O COMPLEX calcula pelo menos  $N + 1$  parâmetros que são distribuídos aleatoriamente dentro da caixa previamente definida e cada ponto do COMPLEX corresponde ao valor da função objeto calculada para uma quantidade  $N$  parâmetros. Distribuídos os pontos, a função objeto é calculada para cada um deles e os seguintes passos são realizados:

- Identifica-se o ponto de pior valor da função objeto (figura 5.2a);
- Este ponto é substituído por outro que se encontra na mesma direção do baricentro  $C$  de todos os pontos. Este novo ponto está a uma distância de  $\alpha$  vezes entre o ponto descartado e o baricentro (figura 5.2b), se este ponto ultrapassar a barreira da “caixa”, ele será rebatido de volta a uma distância igual a  $\delta$ ;
- O processo é reiniciado buscando-se um novo pior ponto (figura 5.2c);
- Se todos os pontos estiverem dentro de um círculo de raio igual a  $\beta$  e este critério se repetir durante  $\gamma$  vezes, então o processo termina.

Observe a figura 5.3. Nota-se que o COMPLEX nos dá mais do que uma única solução. Isto demonstra a grande facilidade de se incorporar vínculos ao problema, modificar o seu critério de ajuste, como também fornecer um conjunto de estimativas otimizadas no entorno da melhor estimativa.

Ainda que não haja uma garantia de que o COMPLEX convirja para o mínimo global, é provável que isto ocorra desde que sua amostragem inicial seja uma boa amostragem da “caixa” (Moreira, 2006).

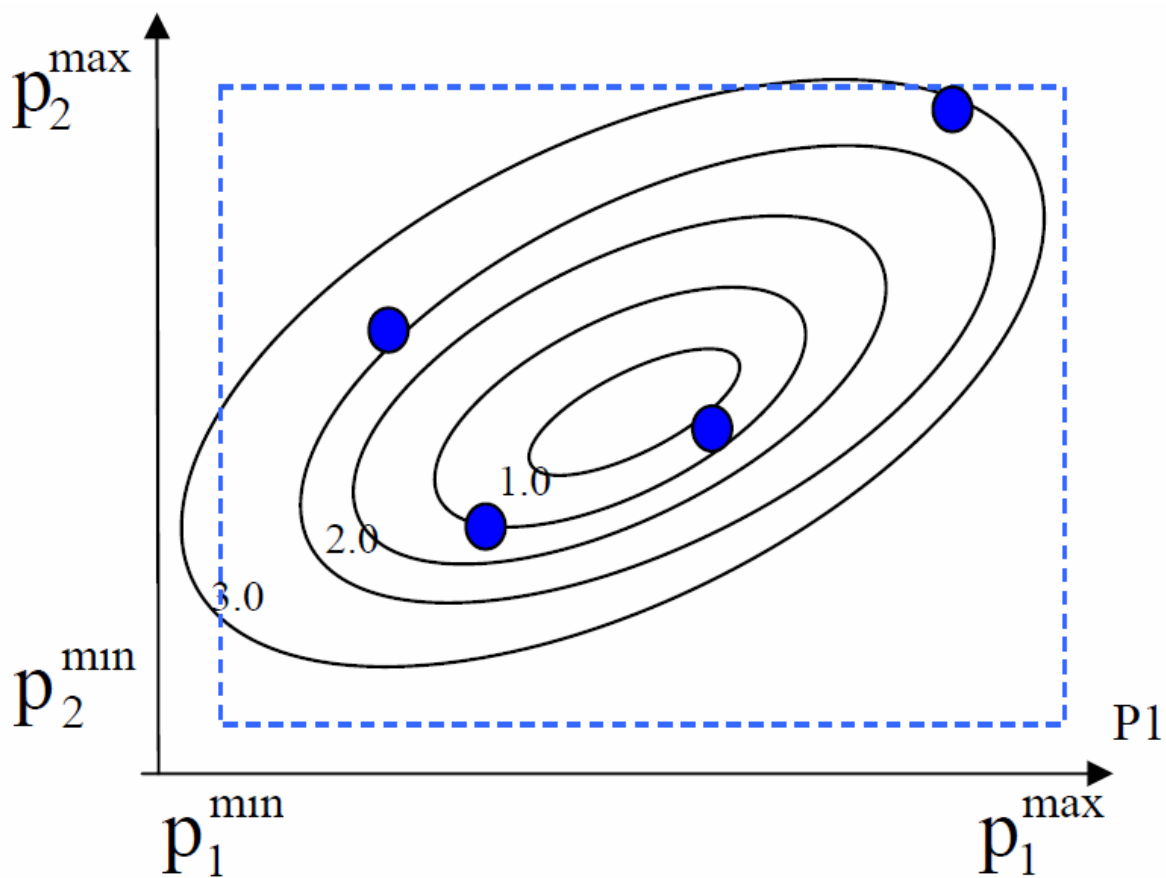


Figura 5.1: O retângulo azul representa a “caixa” que constitui os limites de busca inferiores e superiores, os pontos azuis representam o modelo inicial enquanto que as curvas de nível representam o desajuste nas observações. (Modificado de Santana, 2005).

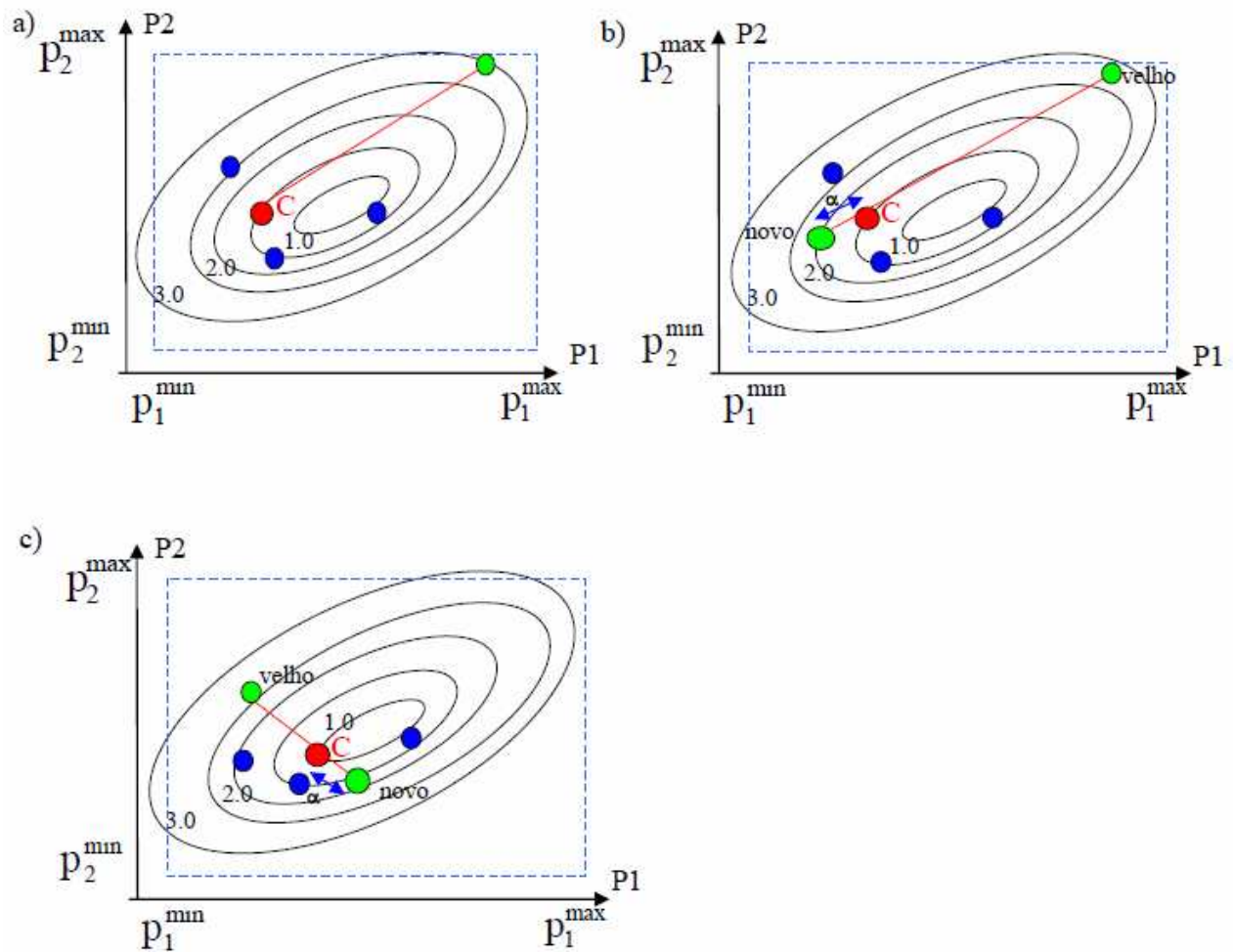


Figura 5.2: O ponto vermelho representa o baricentro dos pontos com melhor ajuste (neste caso, representando quatro modelos). Os pontos verdes indicam o cálculo do novo ponto. Os pontos azuis são os valores ainda não ajustados. A seta azul representa a distância  $\alpha$ . (a) Primeiramente é identificado o ponto de pior valor do funcional, logo após (b) este ponto é deslocado a uma distância  $\alpha$  do centróide dos pontos para então (c) começar uma nova iteração. (Modificado de Santana, 2005).

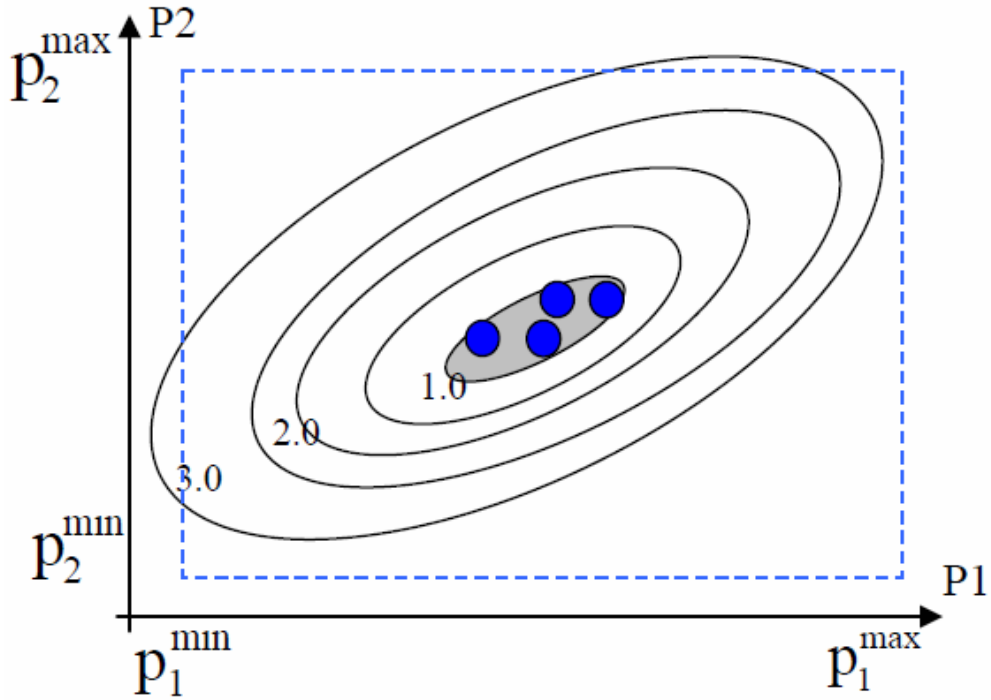


Figura 5.3: Estágio final do COMPLEX. Note que os pontos ajustados se encontram no entorno da melhor estimativa. (Modificado de Santana, 2005).

### 5.3 Função objeto

No problema direto, a partir do conhecimento da forma do espectro de amplitudes, de tempo de propagação e do deslocamento do espectro obtemos o valor numérico do fator de qualidade em uma dada camada. Porém no problema inverso, Moreira (2006) obtém os valores dos centróides e simula com o COMPLEX qual valor de  $Q$  é necessário para provocar aquele deslocamento. No intuito de fazer um estudo comparativo, modificamos o algoritmo para comparar o deslocamento entre os picos de frequências dos espectros de amplitudes. Dessa forma, as condições propostas são as seguintes:

$$\text{Min}\{F(Q_{ij})\} = \text{Min} \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_R} \left| \max[f_c(80 \ln Q_{ij})] - \max[f_{c,ij}^{obs}] \right| \quad (5.1)$$

$$\text{Min}\{F(Q_{ij})\} = \text{Min} \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_R} \left| \max[f_p(80 \ln Q_{ij})] - \max[f_{p,ij}^{obs}] \right| \quad (5.2)$$



Observe que a equação (5.1) utiliza a comparação entre os centróides de frequência  $f_c$  enquanto a equação (5.2) faz a comparação entre os picos de frequência  $f_p$ . Em ambas as equações,  $Q_{ij}$  é o fator de qualidade da  $j$ -ésima camada no  $i$ -ésimo traço. As grandezas  $\max[f_c(80 \ln Q_{ij})]$  e  $\max[f_p(80 \ln Q_{ij})]$  são o valor máximo do centróide e do pico de frequência do pulso modelado associado ao traço  $i$ , através da cascata de aplicação do operador de propagação do sinal de referência, desde a entrada na camada 2 até a chegada no receptor, atravessando as camadas 2 e  $j$  com reflexão na base da camada  $j$ . A grandeza  $\max[f_{c,ij}^{obs}]$  é equivalente à  $\max[f_c(80 \ln Q_{ij})]$  com a diferença de ser associada ao pulso real. Não foi utilizado nenhum vínculo.

## 5.4 Considerações iniciais para o método de inversão

Para executarmos a inversão, iremos fazer aqui as considerações propostas por Moreira (2006). Nós iremos considerar que a Terra pode ser modelada através de um modelo de camadas não necessariamente horizontais de propriedades homogêneas e isotrópicas. Admitimos que todos os traços invertidos tenham o mesmo número de reflexões. Iremos admitir aqui também, que a seção sísmica foi submetida a um processamento anterior. Este processamento deve eliminar as múltiplas e transformar a nossa seção em uma seção *zero-offset*. Consideremos também que a forma do sinal não foi alterada durante o processamento. A seguir listaremos os passos necessários para a inversão:

- O primeiro passo para a inversão consiste na preparação da seção sísmica. Neste passo, fornecemos os traços que serão utilizados para o procedimento da inversão. Iremos chamar o número de traços de  $N_T$ . No nosso trabalho, utilizamos o  $N_T$  máximo de cinco traços. Ainda neste passo, definimos também a quantidade de reflexões  $N_R$  registradas na sessão sísmica. Consideramos aqui que a camada aflorante, a camada  $N_1$  tenha o valor  $Q_{i1}$  previamente conhecido, fazendo com que o número de incógnitas do nosso

problema seja igual a  $(N_R - 1) \cdot (N_T)$ . Definimos esta camada aflorante como camada de referência.

- No segundo passo, identificamos a janela que conterá o limite inferior  $Q_k^{\min}$  e o superior  $Q_k^{\max}$  da k-ésima reflexão. Lembramos que estes limites irão definir a área de busca do COMPLEX dentro do espaço de parâmetros. Também neste passo, fornecemos os limites inferiores  $\tau_{ij}^{\inf}$  e superiores  $\tau_{ij}^{\sup}$  da janela que irá abranger a j-ésima reflexão no i-ésimo traço. A finalidade da janela do tempo é limitar o sinal que será transformado do domínio do tempo para o domínio da frequência.
- O terceiro passo consiste na identificação da localização do pico de cada pulso no tempo. Assim, identificamos o tempo de chegada  $t_{ij}$  da j-ésima reflexão no i-ésimo traço.
- No quarto passo, calculamos o espectro de frequências observado  $G_{ij}^{obs}(f)$  da j-ésima reflexão no i-ésimo traço. Este cálculo, diferentemente do utilizado por Moreira (2006), que utilizou a transformada de Stockwell (1996), se dá através da transformada de Fourier. Aqui, o espectro é suavizado para evitar o aparecimento de picos espúrios. Ainda neste passo, identificamos também, o pico de frequências observado  $f_{p,ij}^{obs}$  e o centróide de frequências observado  $f_{c,ij}^{obs}$  do espectro calculado. A frequência de corte utilizada para definir o limite superior no cálculo do centróide obedece a relação  $f_{ij}^{corte} = 2,5 f_{p,ij}^{obs}$ .
- No quinto passo inicia-se o processo de otimização através do algoritmo COMPLEX. A quantidade de pontos que utilizamos é definida por  $N_{complex} = 10N_T(N_R - 1)$ . Assim, identificamos o espaço de parâmetros que satisfaz as condições da função objeto.

#### 5.4.1 Modelo 1 – Sete camadas horizontais

O nosso primeiro modelo tem como objetivo avaliar a eficácia e a robustez dos métodos aqui comparados no que diz respeito às múltiplas camadas. No capítulo 4, testamos as diferentes estimativas para o máximo de três camadas, onde uma delas, a primeira, seria a

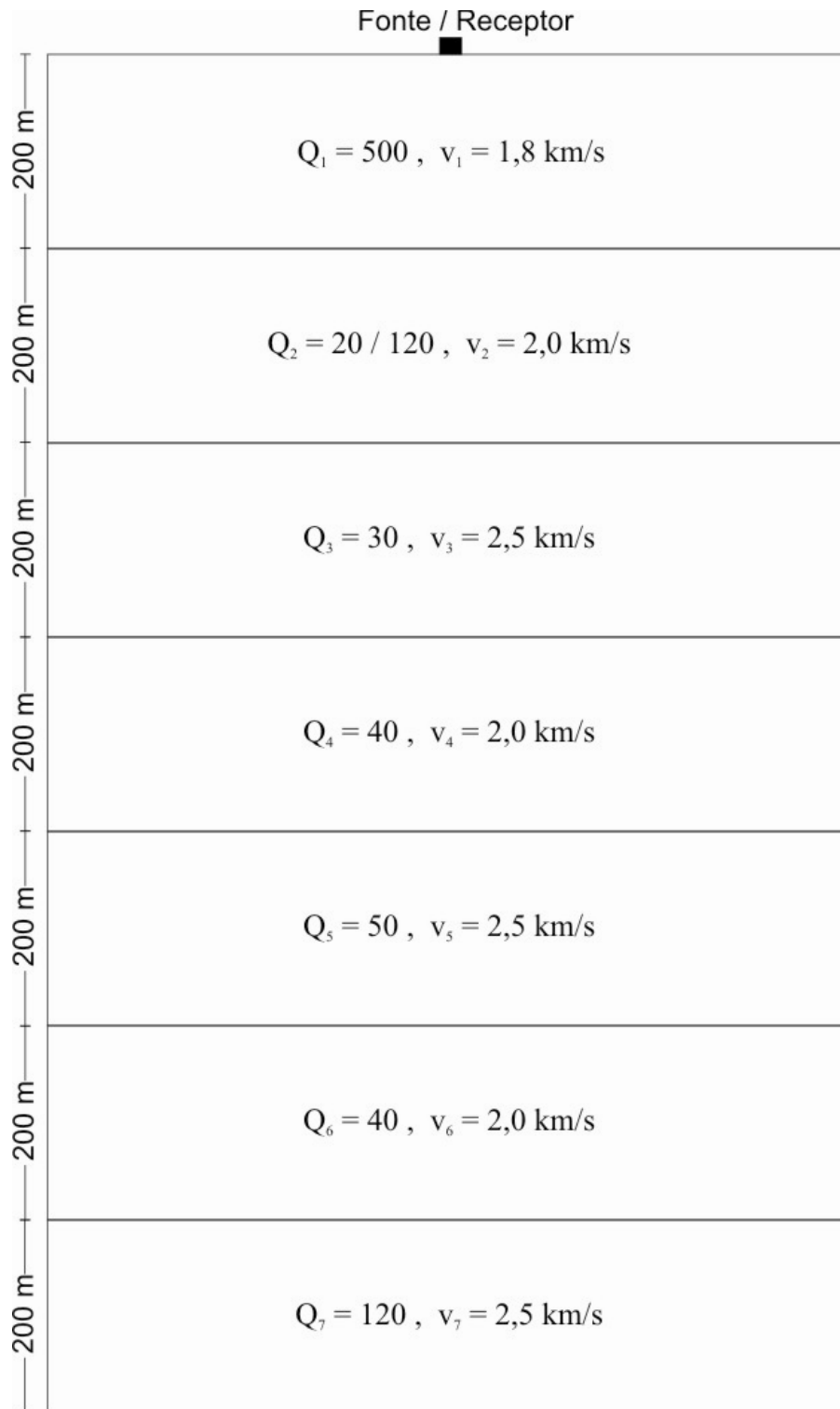
camada de referência. Pudemos observar com bastante clareza que as estimativas do fator de qualidade para as camadas mais inferiores sofriam com a propagação do erro nas estimativas das camadas imediatamente acima. Além deste problema, os nossos modelos consideram as perdas por transmissão e reflexão como também perdas por espalhamento geométrico.

Para testar estas hipóteses, criamos um modelo de camadas paralelas cujos parâmetros físicos e geométricos estão representados na figura 5.4. Neste primeiro modelo, invertemos simultaneamente dois traços em *zero-offset* em duas situações.

- i)  $Q_2 = 20$  em todos os casos, com o objetivo de observar o efeito da atenuação nas camadas inferiores;
- ii)  $Q_2 = 120$  em todos os casos, com o objetivo de preservar o sinal e observar o efeito nas camadas inferiores.

O objetivo principal é testar a sensibilidade dos dois métodos quanto aos valores extremos da absorção global definida por  $z/Q$ . Os parâmetros do COMPLEX utilizados foram  $\alpha = 1,3$ ,  $\beta = 0,001$ ,  $\gamma = 5$  e  $\delta = 0,001$ .

Lembramos que para a criação dos dados sintéticos utilizamos o modelo de dispersão de Futterman (1962) enquanto que na modelagem do pulso utilizamos o modelo de Müller (1983). Apesar da grande similaridade entre estes dois modelos, podemos notar uma diferença básica no que diz respeito à sua dependência com a frequência. No filtro de absorção definido por Futterman, observamos a razão  $\omega/\omega_r$ . Isto faz com que a absorção seja maior para as frequências acima da frequência de referência. O contrário ocorre no filtro de absorção de Müller, onde a razão é inversa ( $\omega_r/\omega$ ).



**Figura 5.4:** Parâmetros físicos e geométricos do modelo utilizado na inversão de Q.

### 5.4.2 Precisão dos métodos

A seguir, descrevemos os resultados dos dois modelos nas situações propostas. Os dados utilizados foram contaminados com um ruído que representa 0,5 % da amplitude do sinal de referência.

#### *Situação 1 ( $Q_2 = 20$ )*

- Método de pico: A tabela 5.1 apresenta os erros observados para este método efetuando-se a inversão. Este método demonstra relativa robustez nas camadas 2 a 4. Os erros observados se encontram no entorno dos  $\pm 10,0$  %. Já para as camadas mais inferiores, note que a baixa qualidade do sinal faz com que este método apresente grandes imprecisões, chegando até 63,12 % na camada 5. Observe também que este método é mais veloz que o método de centróides em convergir para o mínimo da função objeto com apenas 684 iterações.
- Método de centróide: A tabela 5.2 apresenta os erros observados para este método efetuando-se a inversão. Observemos que este método, semelhante ao método de picos, é bastante robusto em determinar Q das camadas 2 a 4. O maior erro observado é o da estimativa na camada 3, igual a 13,98%. Porém, este método também sofre com a baixa qualidade do sinal. Observe que a partir da camada 5, uma grande imprecisão é observada. O maior erro observado se encontra na estimativa da camada 5 e é igual a 57,76 %. Este método é o mais lento em questão de convergência. Observe que foram necessárias 6186 iterações para se encontrar o mínimo da função objeto, cerca de 9 vezes mais iterações que o método de picos.

#### *Situação 2 ( $Q_2 = 120$ )*

- Método de pico: A tabela 5.1 apresenta os resultados para a inversão de Q utilizando o método de picos. Observe que os resultados encontrados para as camadas 2 e 3 são bastante semelhante daqueles observados na primeira situação. A mudança significativa

se encontra a partir dos resultados da camada 4. Veja que a melhora na qualidade do sinal faz com que aumente a precisão deste método em determinar o fator de qualidade das camadas mais inferiores. Em especial, observemos o resultado da estimativa para a camada 7. Mesmo com os efeitos cumulativos do enfraquecimento do sinal devido ao espalhamento geométrico e da atenuação nas camadas superiores observamos uma grande precisão. Para a inversão nesta situação foram necessárias 589 iterações através do método COMPLEX.

- Método de centróide: A tabela 5.2 apresenta os resultados para a inversão de  $Q$  utilizando o método de centróide. Este método também demonstra bastante robustez na determinação de  $Q$  nesta situação. Porém, na maioria das camadas, este é o método mais indicado para realizar a inversão do fator de qualidade. Note que apenas na estimativa de  $Q_2$  e  $Q_4$  este método é menos preciso que o método de picos. Porém, a quantidade de iterações necessárias para minimizar a função objeto é maior para este método. Veja que foram necessárias 2597 iterações através do método COMPLEX, cerca de 4,4 vezes iterações a mais.

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	

Tabela 5.1: Modelo 1 – Resultados encontrados para o primeiro traço da inversão do fator de qualidade  $Q$  utilizando a comparação entre os picos de frequências nas duas situações propostas. A primeira camada é a de referência e tem o fator de qualidade igual a 500.

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

Tabela 5.2: Modelo 1 – Resultados encontrados para o primeiro traço da inversão do fator de qualidade Q utilizando a comparação entre os centróides de frequências nas duas situações aqui propostas. A primeira camada é de referência e tem o fator de qualidade igual a 500.

## 5.5 Resumo do capítulo

Neste capítulo, discutimos o resultado da comparação do algoritmo de inversão proposto por Moreira na comparação entre centróides e picos. Os dois métodos demonstraram bastante eficácia e robustez para o modelo de sete camadas de interfaces paralelas. Porém, no modelo de cinco camadas onde a interface entre a segunda e a terceira se encontravam inclinadas, o método de centróides apresentou a maior eficácia dos dois.

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.

## 6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 Conclusões

Primeiramente testamos três metodologias para a determinação do fator de qualidade  $Q$  baseadas no domínio da frequência utilizando um modelo de três camadas onde uma delas é utilizada como referência. As metodologias aqui testadas foram:

- i) Deslocamento entre os picos de frequência, que determina a atenuação de uma camada através da diferença entre os picos de frequências;
- ii) Deslocamento de centróides de frequência, que utiliza o deslocamento entre os centróides de frequência de dois espectros em intervalos de tempo diferentes;
- iii) Razão espectral, onde calculamos o logaritmo da razão entre dois espectros de frequências de intervalos de tempo distintos.

Estes primeiros testes tiveram como objetivo realizar um teste de sensibilidade com cada método, para isto, utilizamos três situações diferentes:

- i) Variação da espessura da segunda camada, mantendo as espessuras da primeira e da terceira camadas constante;
- ii) Variação do fator de qualidade  $Q$  da segunda camada, mantendo os valores de  $Q$  da primeira e da terceira camadas constante;
- iii) Variação da inclinação da interface entre segunda e a terceira camada.



Após os testes, verificamos os seguintes resultados:

- As metodologias demonstraram uma grande robustez por parte da comparação entre os centróides de frequência e a razão espectral no que diz respeito às frequências centrais iguais a 30 Hz e 40 Hz, pois estes métodos consideram o espectro como um todo. O método que utiliza os picos de frequência para a determinação de Q 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 e o mais robusto dentre os três métodos mesmo quando aumentamos a espessura da camada imediatamente acima. O método da razão espectral também demonstrou relativa precisão, porém perdia a estabilidade antes que o método de centróides. O método de picos demonstra grande instabilidade na determinação de Q da terceira camada, provando sua dependência em relação à qualidade do sinal. Percebemos também que aumentar o fator de qualidade da camada acima, melhora a qualidade do sinal estabilizando as estimativas aqui testadas.
- Nos testes onde variamos o ângulo de inclinação da interface entre a segunda e a terceira camada percebemos que todos os métodos demonstraram bastante imprecisão nas frequências mais baixas. Porém, ao aumentarmos a frequência central do sinal, observávamos que as estimativas tendiam a melhorar. Neste teste, para o pulso de frequência central igual a 60 Hz, destacamos o método de deslocamento de centróides como o mais robusto, demonstrando precisão mesmo quando o topo da camada está inclinado de 16°. A razão espectral também demonstrou bastante estabilidade na frequência central de 60 Hz, porém, esta estabilidade desaparecia em inclinações maiores que 12°. O método de picos demonstrou bastante imprecisão em todas as frequências utilizadas.

No nosso segundo momento analisamos as técnicas que utilizam o pico de frequências e o centróide para a inversão do fator de qualidade  $Q$ . Para isto, utilizamos a técnica proposta por Moreira (2006) com a diferença de utilizarmos agora em vez da transformada  $S$  (Stockwell *et al.*, 1996) para a monitoração do pulso no tempo, utilizamos a transformada de Fourier. A técnica consiste em comparar os centróides de frequência dos espectros dos pulsos em um traço, ou seção sísmica.

Neste segundo momento, utilizamos um modelo de 7 camadas horizontais e paralelas em duas situações distintas. Na situação 1, o valor de  $Q_2$  era igual a 20, enquanto que na situação 2 o valor de  $Q_2$  era igual a 120. Os resultados por nós encontrados demonstraram o seguinte:

- O algoritmo aplicado à comparação entre os centróides de frequência tem maior robustez que o aplicado para fazer a comparação entre os picos de frequências. Em todos os casos, o uso do pico demonstra uma grande dependência com a digitalização do sinal.
- Pudemos notar que, mesmo relativamente menos preciso que o método de centróides, o método de picos é computacionalmente mais rápido que o método de centróides, podendo chegar ao mínimo com até 9 vezes menos iterações que o método de centróides.
- Ambos os métodos melhoraram as suas estimativas na situação 2, onde o valor de  $Q$  da segunda camada era de 120. Este alto valor de  $Q$  melhorava a qualidade do sinal que era refletido na base das camadas mais inferiores, permitindo uma boa estimativa de  $Q$  destas camadas.

## 6.2 Recomendações finais

Nós pudemos perceber que os métodos aqui comparados não são eficazes em toda a gama de situações. Vimos que na estimativa de múltiplas camadas, estimar o valor de  $Q$  da camada 2 com o método da razão espectral é mais indicado na maioria dos casos, enquanto que para as camadas inferiores ele se torna o menos eficaz. No caso da inversão, estimar o

valor de  $Q$  nas camadas mais rasas pelo método de centróides é um pouco menos eficiente do que pelo método de picos, porém, nas camadas mais profundas, o método de centróides é o mais indicado. Sabemos também que utilizamos dois modelos diferentes de dispersão para a inversão e a criação dos dados sintéticos. Por estes motivos, faremos as seguintes recomendações:

- É de suma importância verificar a estabilidade dos métodos aqui testados com dados reais de sísmica de reflexão e se possível aplicar estes métodos com dados de GPR;
- Analisar os modelos diferentes de dispersão e verificar os diferentes efeitos possíveis sobre as estimativas do fator de qualidade  $Q$ ;
- Verificar de forma sistemática os efeitos nas estimativas de  $Q$  para o caso de camadas inclinadas.

## **7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Aki, K. & Richards, P. G. (1980). Quantitative Seismology. W.H. Freeman and Company, New York.

Bano, M. (2004). Modelling of GPR waves for lossy media obeying a complex power law of frequency for dielectric permittivity. *Geophysical Prospecting*, 52: 11-26.

Carcione, J. M. & Picotti, S. (2006). P-wave seismic attenuation by slow-wave diffusion: Effects of inhomogeneous rock properties: *Geophysics*, 71, O1-O8.

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.

Cerveny, V. (2001). *Seismic ray theory*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Chand, S. (2008). Gas hydrate anomalies in seismic velocities, amplitudes and attenuation: what do they imply?

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.

Ciz, R., Gurevich, B. & M. Markov, (2006). Seismic attenuation due to wave-induced fluid flow in a porous rock with spherical heterogeneities: *Geophysical Journal International*, 165, 957.

Dvorkin, J. & G. Mavko, (2006). Modeling attenuation in reservoir and non-reservoir rock: *The Leading Edge*, 25, 194–197.

Futterman, W. I. (1962). Dispersive body waves. *Journal of Geophysical Research*, 69, 5279-5291.

Giustiniani, M., Accaino, F., Picotti, S. & Tinivella, U. (2008). Characterization of the shallow aquifers by high-resolution seismic data. *Geophysical Prospecting*: 56, 655-666.

Giustiniani, M., Accaino, F., Picotti, S. & Tinivella, U. (2009). 3D seismic data for shallow aquifers characterisation. *Journal of Applied Geophysics*.

Hübert, L., Strecker, U., Dvorkin, J., & Festervoll, K. A., (2005). Seismic attenuation and hybrid attributes to reduce exploration risk-North Sea case study: 75th SEG, Expanded Abstracts, 436–439.

Irving, J. D. & Knight, R. J. (2003). Removal of wavelet dispersion from ground penetrating radar data. *Geophysics*, 68: 960-970.

Knopoff, L. & McDonald, G. J. F. (1958). Attenuation of small amplitude stress waves in solids. *Reviews of Modern Physics*, 30, 1178-1192.

Lay, T., Wallace, T. C. (1995). *Modern Global Seismology*.

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.

Liu, L., Lane, J. W. & Quan Y. (1998). Radar attenuation tomography using the centroid frequency downshift method. *J. Appl. Geophys.* 40: 105-116.

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.

Müller, G. (1983). Rheological properties and velocity dispersion of a medium with power-law dependence of  $Q$  on frequency. *Geophysics*: 54, 20-29.

O'Connell, R.J., and Budiansky, B. (1978). Measures of dissipation in viscoelastic media: *Geophysical Research Letters*, v. 5/1, p. 5-8.

Parra, J. O. and C. Hacket. (2002). Wave attenuation attributes as flow unit indicators: The Leading Edge, 21, 564–572.

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.

Rickett, J. (2006). Integrate estimation of interval-attenuation profiles. *Geophysics*, 71: A19-A23.

Santana, F. L. (2005). Incorporação do vínculo de suavidade no ajuste de histórico de reservatórios de petróleo. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica/UFRN, NATAL/RN. Dissertação de Mestrado. 86 pp.

Santana, F. L., do Nascimento, A. F. & Medeiros, W. E. (2008). History match of a real-scale petroleum reservoir model using smoothness constraint. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 16: 483-498.

Spencer, T. W., J. R. Sonnad, and T. M. Butler. (1982). Seismic Q stratigraphy or dissipation: *Geophysics*, 47, 16–24.

Stockwell, R. G., Mansinha, L., & Lowe, R. P. (1996). Localization of the Complex Spectrum: The S Transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 44, no. 4.998-1001

Taner, M. T. and S. Treitel. (2003). A robust method for Q estimation: 73<sup>rd</sup> 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.

Ward, R.W. & Toksöz, M.N. (1971). Causes of regional variation of magnitude. *Bull. Seis. Soc. Am.* 61: 649-670.

White, J. E. (1965). *Seismic waves: radiation, transmission, and attenuation*. McGraw Hill Book Co.

Zhang, C. & Ulrych, T. J. (2002). Estimation of quality factors from CMP records. *Geophysics*, 67: 1542-1547.

Zhang, C. (2008). *Seismic absorbtion estimation and compensation*. The University of British Columbia, Vancouver, Canada. Ph.D Thesys. 97 pp.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)