



Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
Centro de Ciências Exatas e da Terra – CCET
Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica – PPGG

TESE DE DOUTORADO

DETERMINAÇÃO DO FATOR DE QUALIDADE BASEADA NO DESLOCAMENTO DO CENTRÓIDE DE FREQUÊNCIA, INDEPENDENTE DO CAMPO DE VELOCIDADE

Autor:

José Antonio de Moraes Moreira

Orientador:

Prof. Dr. Walter Eugênio de Medeiros

Tese nº 16 / PPGG

Natal/RN, Dezembro de 2006.

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.



Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
Centro de Ciências Exatas e da Terra – CCET
Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica – PPGG

TESE DE DOUTORADO

DETERMINAÇÃO DO FATOR DE QUALIDADE BASEADA NO DESLOCAMENTO DO CENTRÓIDE DE FREQUÊNCIA, INDEPENDENTE DO CAMPO DE VELOCIDADE

Autor:

José Antonio de Moraes Moreira

Tese de Doutorado apresentada em 18 de Dezembro de 2006 para obtenção do Título de Doutor em Geofísica pela Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Walter Eugênio de Medeiros (Orientador – UFRN)
Prof. Dr. Aderson Farias do Nascimento (UFRN)
Prof. Dr. Mario Koechi Takeya (UFRN)
Prof. Dr. Jessé Carvalho Costa (UFPA)
Dr. Wander Nogueira de Amorim (PETROBRAS)

Tese nº 16 / PPGG

Natal/RN, Dezembro de 2006.

“O movimento circular próprio da filosofia não encontra seu elemento essencial no fato de andar ao longo de uma periferia e de retornar à posição original. Ao contrário, ele o encontra no olhar para o centro, que só é possível no curso circular”

Martin Heidegger em "Conceitos Fundamentais da Metafísica"

Agradecimentos

Este trabalho não teria sido possível sem a ajuda inestimável de vários amigos aos quais seria muito difícil retribuir de forma minimamente justa, restando-me apenas reconhecer o débito impagável e exprimir a minha mais profunda gratidão.

De forma muito especial o meu profundo agradecimento ao meu orientador Walter Eugênio de Medeiros, pela orientação segura, apoio e incentivo nas horas mais difíceis, e o reconhecimento de que este trabalho não teria sido concluído sem a sua contínua pressão para que o foco fosse mantido. Mas agradeço ao Walter, sobretudo, pelas inúmeras demonstrações de amizade.

Ao Aderson pelas incontáveis contribuições para este trabalho e acima de tudo pela amizade.

Ao Prof. Jessé Carvalho Costa e ao Dr. Mark Chapman, as discussões e sugestões durante suas visitas à Natal.

Aos demais amigos do Grupo de Geofísica do DFTE, Mario Takeya e Joaquim, pelo apoio, incentivo e amizade.

Aos amigos do DG, Fernando Lins, Galindo, e Emanuel pelo incentivo, apoio e amizade.

Ao PPGG pelo apoio quanto à infra-estrutura disponibilizada e à Nilda de Araújo Lima pela extrema eficiência e amizade.

A todos os meus professores que marcaram a minha formação.

E finalmente à Lúcia, Regina, Alice e Luisa que são a razão de todo meu empenho e a quem dedico este trabalho.

Resumo

O presente trabalho apresenta uma abordagem inédita de inversão de fator de qualidade Q , válida para dados sísmicos e de GPR. Ela é baseada no deslocamento do centróide de frequência e faz uso da transformada S para monitorar a evolução temporal desse centróide. Desse modo, ela combina vantagens das abordagens correntes de inversão de Q , dicotomicamente divididas entre abordagens no domínio do tempo e no domínio da frequência.

A estimativa de Q depende apenas da variação da forma do pulso de onda. Desse modo, a abordagem prescinde da modelagem de amplitude e, na pior das hipóteses, quando o valor verdadeiro de Q é muito alto, ela fornece um limite inferior para este valor verdadeiro. Pelo fato de não requerer o conhecimento da amplitude do pulso, o conhecimento do campo de velocidade é irrelevante, desde que seja válida a seguinte condição: o caminho seguido pelo raio, que é refletido na base de uma dada camada, durante sua passagem pelas camadas superiores, seja o mesmo caminho seguido, nestas mesmas camadas superiores, pelo raio refletido no topo da camada em questão. Esta hipótese de efeito cumulativo, embora só seja rigorosamente válida se as camadas forem horizontais e o arranjo for *zero-offset*, constitui uma boa aproximação, mesmo quando as camadas não são paralelas e apresentam mergulhos de até 20 graus.

A nossa abordagem é robusta à presença de ruídos na faixa de frequência do sinal. Isso representa uma nítida vantagem em relação a outros métodos de estimativa de Q , que se baseiam na posição em frequência do pico de amplitude. Tais métodos são bem mais sensíveis à presença de ruído.

Para operacionalizar a abordagem de inversão, o pulso de referência ou de entrada deve ser conhecido. Este pulso de referência não é necessariamente a assinatura da fonte – ele pode ser um pulso refletido numa interface de referência e identificado no próprio traço.

Abstract

The present work presents a new approach for Q quality factor inversion which is valid both for seismic and GPR data. This new approach is based on the frequency centroid temporal shift and uses the S transform in order to monitor this evolution. Thus, it combines the advantages of the current two-folded approaches done in time or in frequency domains.

The Q estimation relies solely on the pulse deformation. As consequence, it does not requires amplitude modeling and at the worst case scenario, when Q is very high, the inversion will proved a lower bound to Q value. Because the inversion approach does not demand the knowledge of pulse amplitude, it does not either requires the knowledge of the field velocity as far as the following condition is met: for a given layer, both pulses reflected at the base and top of this layer have the same ray path along the upper layers. This cumulative hypothesis for all pulses in a single trace although rigorously valid only if the layers are horizontal and the zero-offset condition are met, is still approximately valid even for gently non-parallel dipping layers exhibiting dips of up to 20 degrees.

Our approach is noise robust – even for noise within the frequency range of the pulse. That constitutes a clear advantage when comparing to other methods which are based on the frequency amplitude peak shift because peak position is too sensitive to noise content.

To implement this inversion approach, we required the knowledge of a reference pulse. This pulse is not necessarily the source signature – it may be also a pulse reflected at a known reference interface and can be extracted from the trace itself.

Sumário

	Pág.
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Capítulo I – Introdução	1
1.1 – Apresentação	1
1.2 – Importância de estimar o fator de qualidade Q	1
1.3 – Visão geral da proposta de inversão do fator de qualidade realizada nesta tese	3
1.4 – Guia de leitura desta tese	5
Capítulo II – Propagação em meios dispersivos	6
2.1 – Apresentação	6
2.2 – Constantes de propagação	6
2.3 – Propriedades dielétricas	9
2.4 – Modelos teóricos de dispersão	11
2.5 – Conclusão	13
Capítulo III – Fundamentos da abordagem de inversão: deslocamento do centróide de frequência e Transformada S	14
3.1 – Apresentação	14
3.2 – Estimativas de Q do ponto de vista do sinal sísmico	14
3.3 – Estimativas de Q do ponto de vista de GPR	16
3.4 – Escolha do parâmetro para identificar atenuação: amplitude, alargamento do sinal ou deslocamento do centróide de frequência	19

3.5 – Transformada S	23
3.5.1 – Definição da transformada S	23
3.5.2 – Aplicações da transformada S em dados sintéticos	26
3.5.3 – Aplicações da transformada S em dados reais	29
3.6 - Conclusão	30
Capítulo IV – Inversão de Fator de Qualidade baseada no deslocamento do centróide de frequência	37
4.1 – Apresentação	37
4.2 – Fundamento da abordagem de inversão	37
4.3 – Formulação para inversão de Q em um meio de camadas	38
4.4 – Condições requeridas para validade da proposta de inversão de Q	43
4.5 – Exemplos de inversão de Q	44
4.5.1 – GPR: Modelo de camadas horizontais	46
4.5.2 – GPR: Modelo de camadas não horizontais	58
4.5.3 – GPR: Dados sintéticos com adição de ruído	60
4.5.4 – Sísmica: Dados sintéticos gerados com um modelo de atenuação diferente do utilizado no modelo interpretativo	65
4.6 – Uso de Q equivalente como diagnóstico da presença de gás em reservatórios	69
4.6.1 – Motivação	69
4.6.2 – Formulação para a dependência com frequência do coeficiente de reflexão	70
4.6.3 – Exemplos de inversão de fator de qualidade equivalente	71

4.7 – Conclusão	75
Capítulo V – Conclusões e recomendações	126
Referências bibliográficas	129
Anexo A – <i>Ray-Tracing</i> com incorporação dos efeitos de atenuação e dispersão	134
A.1 – Apresentação	134
A.2 – Exemplo	136

1.1 – Apresentação

A dispersão e atenuação de um pulso de onda ao se propagar em um meio dispersivo estão ligadas à resposta do material à perturbação causada pela onda e depende, portanto, dos mecanismos de relaxação do meio. A abrangência desta questão é grande porque os processos de relaxação em geral (e dielétrica e elástica, em particular) apresentam uma forte sensibilidade à natureza estocástica dos mecanismos envolvidos, o que faz com que a resposta do material possa ser caracterizada por poucos parâmetros com características de universalidade (Jonscher, 1999). Tanto para a sísmica como para GPR, o fator de qualidade Q do meio (Aki & Richards, 1980) sintetiza as informações relevantes para caracterizar o processo de atenuação e dispersão do sinal ao se propagar neste meio. Com isso, a determinação do fator de qualidade, a partir das informações contidas no sinal, constitui uma questão extremamente importante tanto do ponto de vista operacional, pois permite corrigir os efeitos da atenuação no sinal, como do ponto de vista de interpretação, pois fornece informações relevantes sobre as características petrofísicas do meio.

A proposta desta tese é apresentar uma técnica para inversão do fator de qualidade Q baseada no deslocamento do centróide de frequência (Quan & Harris, 1997) com o uso da transformada S (Stockwell *et al.*, 1996).

1.2 - Importância de estimar o fator de qualidade Q

No tratamento de dados de GPR, de uma forma geral, não são exploradas adequadamente as especificidades da onda eletromagnética. Os dados de GPR possuem uma complexidade intrínseca devido a vários fatores, tais como as características do próprio sistema de radar (instabilidade do acoplamento antena-terreno e ruído eletrônico) e as propriedades peculiares do meio que está sendo analisado, que pode ser heterogêneo e/ou dispersivo. Essa complexidade inerente aos dados de GPR nem sempre pode ser superada, mesmo com a aplicação das

técnicas de processamento de imagens e de sinais “embutidas” nos GPR comerciais. Muitas vezes, nem mesmo o processamento convencional consegue resolver o problema porque este processamento, em geral, irá destacar os fortes espalhadores e os refletores rasos, enquanto os alvos mais profundos ou com baixo contraste de impedância não são ou são pobremente identificados devido à atenuação do sinal. Assim, uma das preocupações básicas no processamento dos dados de GPR deve ser justamente corrigir os efeitos da dispersão como uma forma de restaurar a qualidade da imagem, corrigindo a falta de resolução crescente com o tempo/profundidade causada pela dispersão (Xavier Neto, 2006). Além disso, antes da aplicação de técnicas de processamento baseadas na hipótese de uma *wavelet* estacionária (migração e deconvolução de *spiking*), é necessário que a dispersão da onda tenha sido removida (LaFléche *et al.*, 1991; Rees & Glover, 1992; Powers, 1995) para que tal hipótese possa ser considerada pelo menos aproximadamente válida em dados de GPR. Rigorosamente ela não é válida porque o sinal de GPR possui fase mista (Xavier Neto, 2006).

Apesar do reconhecimento da importância da correção dos efeitos da dispersão no processamento dos dados de GPR, a literatura é escassa neste tema. Turner (1994) foi o primeiro a considerar este problema, apresentando um algoritmo para corrigir a dispersão da *wavelet* no dado de GPR, com base no conhecimento a priori das curvas de dispersão do meio e do sinal de entrada. Tal exigência, contudo, limitou bastante a aplicabilidade do seu método, que só pode ser utilizado de forma prática em levantamentos de tomografia de transmissão em que o meio é aproximadamente homogêneo. Em um trabalho subsequente, Turner & Siggins (1994) mostraram que, na faixa de frequência de GPR, a atenuação de várias rochas pode ser adequadamente caracterizada com o parâmetro Q^* , que é similar ao fator de qualidade Q . Por sua vez, Bano (1996a, b) justificou teoricamente, sob certas condições, o uso do parâmetro Q e apresentou uma filtragem inversa como uma maneira de remover a dispersão do sinal. Uma abordagem prática, mas expedita, da correção dos efeitos da dispersão em GPR foi proposta por Xavier Neto & Medeiros (2006). Ela é baseada numa combinação criteriosa de ganho temporal, associado com balanceamento espectral. Segundo Xavier Neto & Medeiros (2006), esta combinação de procedimentos pode corrigir a atenuação/dispersão em meios dielétricos de baixa perda porque, nestes meios, a propagação não introduz no pulso mudanças significativas no seu espectro de fase e modifica apenas o seu espectro

de amplitude. A técnica produz bons resultados, mesmo em meios heterogêneos, mas é fortemente dependente da subjetividade do operador, devendo, na verdade, ser considerada como parte integrante do processo interpretativo.

Embora na Sísmica a atenuação não apresente a conspicuidade que há no caso de GPR, vale também a afirmação de que o conhecimento de Q é importante, pelas seguintes razões:

- 1) Para melhorar a resolução dos dados de sísmica através da aplicação de filtros Q inversos mais apropriados. Tal filtragem permite uma melhor análise de amplitude (vale também para GPR);
- 2) O próprio valor de Q é um parâmetro petrofísico importante, que raramente é medido. Além da litologia, afetam o valor de Q, a porosidade e as características do fluido nos poros. Medidas em laboratório da atenuação da onda P mostram que o fator de qualidade é alto para rochas secas e baixo para rochas completamente saturadas com líquidos, sendo ainda mais baixo em rochas parcialmente saturadas (Winkler & Nur, 1982). Além disso, várias rochas têm fator de qualidade característico: Q é maior para calcário e arenito, mais baixo para argila e, mais baixo ainda, para arenito saturado com gás (Sheriff & Geldart, 1995). Desta forma, o fator de qualidade tem potencial para diagnosticar litologias e conteúdo de fluidos. (Klimentos, 1995; Parra & Hackert, 2002; Brown, 2004);
- 3) Segundo Klimentos (1995), que analisou dados de atenuação em ondas sônicas (5 KHz), a razão entre os fatores de qualidade associados às ondas P e S é diagnóstica da saturação: $Q_P/Q_S < 1$ indica presença de gás, enquanto $Q_P/Q_S = 1$ indica saturação completa com água ou saturação de óleo e água.

1.3 - Visão geral da proposta de inversão do fator de qualidade realizada nesta tese

Apresentaremos, a seguir, uma visão geral da proposta de inversão do fator de qualidade Q aqui realizada.

As técnicas para estimação de Q podem ser separadas em dois grandes grupos (Tonn, 1991): aquelas que utilizam a informação do pulso no domínio do tempo e aquelas que utilizam a informação do pulso no domínio da frequência. Tonn

(1991) realizou uma análise comparativa entre as técnicas. De acordo com seus resultados, para o primeiro grupo, a técnica de Engelhard (1990), que faz uso do sinal analítico, é a mais eficiente. Contudo, ela tem a forte deficiência de exigir o conhecimento da amplitude verdadeira do pulso. Por outro lado, para o segundo grupo, a técnica mais eficiente é a do modelamento espectral, embora a mais largamente utilizada, pela sua simplicidade, seja a do método da razão espectral. Contudo, esta última técnica não é eficiente na presença de ruído (Tonn, 1991).

A proposta de inversão que apresentamos procura unir as vantagens das técnicas do domínio do tempo com as vantagens das técnicas do domínio de frequência. Tal união foi possível graças ao uso combinado da transformada S (Stockwell *et al.*, 1996) e dos resultados de Quan & Harris (1997) sobre o efeito da dispersão no centróide de frequência. O uso da transformada S permite efetuar um monitoramento da evolução temporal do espectro do pulso ao longo do tempo. Por sua vez, os resultados de Quan & Harris (1997) demonstram que a propagação do pulso no meio dispersivo provoca um deslocamento do centróide de frequência, que é proporcional ao caminho percorrido pelo raio no meio. Mostraremos que, combinando estas duas abordagens, é possível estimar de forma bastante robusta o fator de qualidade *sem precisar conhecer o campo de velocidade*.

Para operacionalizar a proposta de inversão, é necessário dispor de um algoritmo de modelagem direta da propagação de pulsos em meios dispersivos, além de dispor de um esquema de otimização. Tanto para dados de GPR como para dados sísmicos, o algoritmo de modelagem direta que construímos consiste basicamente de um *ray-tracing* com incorporação a posteriori dos efeitos de dispersão. O modelo de dispersão utilizado nesta modelagem direta é o de Bano (2004). Para o caso sísmico, os dados sintéticos utilizados nos testes de inversão foram gerados com o algoritmo SEIS88 de Cerveny & Psencik. Por sua vez, o método de otimização utilizado foi o Complex (Richardson & Kuester, 1973).

1.4 – Guia de leitura desta tese

Esta tese está organizada da seguinte maneira. No Capítulo II fazemos uma breve exposição da propagação de ondas eletromagnéticas em meios dispersivos, com o objetivo duplo de apresentar as constantes de propagação, que serão utilizadas na inversão, e o modelo de dispersão (Bano, 2004), que será utilizado para modelagem e inversão de Q.

No Capítulo III, apresentamos uma revisão bibliográfica das técnicas de inversão de Q mais utilizadas, bem como os dois fundamentos em que a nossa proposta de inversão se baseia: o fato do deslocamento do centróide de frequência ser proporcional ao tempo de percurso do pulso no meio dispersivo (Quan & Harris, 1997) e a transformada S (Stockwell *et al.*, 1996), que permite monitorar a evolução temporal do espectro do pulso.

No Capítulo IV, apresentamos os detalhes da proposta de inversão, além de uma série de testes que demonstram a sua eficiência e robustez mesmo em situações adversas. Também mostramos, neste capítulo, que é possível diagnosticar a existência de uma camada, com topo apresentando coeficiente de reflexão dependente de frequência (Odebeatu *et al.*, 2006), usando a estimativa de um Q equivalente, que incorpora os efeitos conjuntos de propagação e reflexão no topo desta camada.

No Capítulo V, apresentamos as nossas conclusões e sugestões.

Por fim, no Anexo A, apresentamos o algoritmo de *ray-tracing* por nós construído para gerar o dado de entrada no processo de inversão.

Capítulo II – Propagação em meios dispersivos

2.1 – Apresentação

O objetivo deste capítulo não é fazer uma revisão completa de propagação de ondas em meios dispersivos, mas tão somente definir sucintamente as grandezas necessárias para o desenvolvimento da abordagem de inversão proposta nesta tese. Devido à maior fluência do autor no tema apresentaremos a revisão apenas para o caso eletromagnético. O leitor interessado numa revisão detalhada dos temas deve se dirigir ao Stratton (1941), para o caso de ondas eletromagnéticas ou ao Aki & Richards (1980), para o caso de ondas elásticas.

2.2 – Constantes de propagação

Vamos considerar o caso da propagação da onda eletromagnética num meio sem densidade de carga, homogêneo e isotrópico, caracterizado apenas pelas constantes ε (permissividade elétrica), μ (permeabilidade magnética) e σ (condutividade elétrica). Doravante, vamos admitir que a terra é indistinguível do vácuo em relação às propriedades magnéticas. Além disso, vamos admitir a validade da seguintes relações constitutivas lineares: $\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ e $\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$, em que \mathbf{D} , \mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{H} e \mathbf{J} são os vetores: campo deslocamento elétrico, campo elétrico, campo indução magnética, campo magnético e densidade de corrente, respectivamente. As equações de Maxwell podem ser escritas como:

$$\begin{aligned} \text{(I)} \quad \nabla \times \mathbf{E} &= -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} & \text{(III)} \quad \nabla \cdot \mathbf{H} &= 0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

$$\text{(II)} \quad \nabla \times \mathbf{H} = -\varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} = \mathbf{J}_d + \mathbf{J}_c \quad \text{(IV)} \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

onde $\mathbf{J}_d = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ é a corrente de deslocamento e $\mathbf{J}_c = \sigma \mathbf{E}$ é a corrente de condução.

Para simplificar a análise do efeito de ε e σ na propagação da onda, vamos considerar o problema de ondas planas se propagando na direção x (caso 1-D, de fonte e meio). Neste caso, as equações acima exigem que os campos elétrico e magnético satisfaçam à equação de onda:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0. \quad (2.2)$$

Considerando ondas monocromáticas com a dependência temporal dada pelo fator $e^{-i\omega t}$, em que $\omega = 2\pi f$, f sendo a frequência e $i = \sqrt{-1}$, a equação (2.2) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \omega^2 \mu\varepsilon \left(1 + i \frac{\sigma}{\varepsilon\omega}\right) \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + k^2 \psi = 0, \quad (2.3)$$

onde k^2 é o quadrado do número de onda dado por:

$$k^2 = \omega^2 \mu\varepsilon \left(1 + i \frac{\sigma}{\varepsilon\omega}\right). \quad (2.4)$$

Para o caso de GPR, é necessário que o termo de onda seja dominante em relação ao termo de difusão. A solução da equação (2.3) é da forma:

$$\psi(x, t) = \psi_0 \exp i(kx - \omega t). \quad (2.5)$$

Vamos escolher k de modo que a parte imaginária da raiz seja positiva. Com essa escolha, a solução da equação (2.3) será dada por $\psi(x, t) = \psi_0 e^{i(kx - \omega t)}$, garantindo que a mesma seja fisicamente aceitável. Isto é, ela apresenta amplitude decaindo exponencialmente. Assim, k é dado por:

$$k = \beta + i\alpha, \quad (2.6)$$

onde α e β são reais. α está associado com o decaimento em amplitude do campo e, no caso de α depender de frequência, também está associado com dispersão. De acordo com Stratton (1941), β e α podem ser escritos como:

$$\beta = w \left[\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{w^2\epsilon^2}} + 1 \right) \right]^{1/2}, \quad (2.7)$$

$$\alpha = w \left[\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{w^2\epsilon^2}} - 1 \right) \right]^{1/2}. \quad (2.8)$$

O argumento de k^2 na equação (2.4) é dependente da condutividade e define a tangente de perda:

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{w\epsilon}. \quad (2.9)$$

Note que se $\sigma \ll w\epsilon$, o termo de difusão é desprezível em relação ao termo de propagação na equação (2.3), o que corresponde à condição de validade prática do GPR. Da nossa experiência, $\frac{\sigma}{w\epsilon} < \frac{1}{50}$ para que o pulso de GPR efetivamente propague como onda e a velocidade de fase seja aproximadamente constante. Mesmo nessa situação, contudo, a atenuação no sinal de GPR é muito significativa, o que faz com que GPR seja um “laboratório” de sismica de alta dispersão, do ponto de vista cinemático. Em outras palavras, embora a onda de GPR seja uma onda transversal, ela apresenta grande similaridade cinemática com a onda elástica P, dentro dos limites de validade da teoria do raio.

A onda $\psi(x,t)$ tem portanto a forma:

$$\psi(x,t) = \psi_0 \exp(-\alpha x) \exp i w \left(\frac{\beta}{w} x - t \right), \quad (2.10)$$

e, assim, os planos com mesma fase se propagam com velocidade de fase V dada por

$$\begin{aligned}
 V = \frac{w}{\beta} &= \left[\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{w^2\varepsilon^2}} + 1 \right) \right]^{-1/2} = \\
 &= c \left[\frac{\kappa_e}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{w^2\varepsilon^2}} + 1 \right) \right]^{-1/2} = \frac{c}{n}
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

em que κ_e é a constante dielétrica e n é o índice de refração. V aumenta com a frequência desde que os parâmetros μ , ε e σ não variem com a frequência. A atenuação da amplitude numa superfície de fase constante é determinada pelo fator de atenuação α , que também cresce com a frequência.

Da equação (2.11) o índice de refração n está ligado ao fator β conhecido como *constante de fase*, pela equação:

$$n = \beta \frac{c}{w}. \tag{2.12}$$

Para altas frequências e baixa condutividade $n = \sqrt{\kappa_e}$.

2.3 – Propriedades dielétricas

A condutividade σ é uma medida da resposta das cargas livres a um campo atuante. Para baixas frequências, o tempo de resposta das cargas é tão pequeno que a corrente varia em fase com o campo elétrico. Entretanto, para frequências altas, o tempo de resposta pode se tornar significativo e resultar em uma componente fora de fase. Desta forma uma expressão geral para a condutividade é:

$$\sigma = \sigma' + i\sigma'', \tag{2.13}$$

onde σ' e σ'' são as componentes em fase e fora de fase, respectivamente.

A permissividade ε é a medida da resposta das cargas ligadas à presença do campo, ou da polarizabilidade do material. Como no caso da condutividade, com o crescimento da frequência, a resposta da polarização pode atrasar em relação à

mudança do campo. Desta forma, em geral, a permissividade também é uma quantidade complexa e dada por:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' , \quad (2.14)$$

onde ε'' e ε' são as componentes em fase e fora de fase com a variação temporal do campo, respectivamente.

Assim, as equações para β e α podem ser reescritos como funções de ε'' e ε' :

$$\beta = w \left[\frac{\mu\varepsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} + 1 \right) \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

$$\alpha = w \left[\frac{\mu\varepsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{1/2} , \quad (2.16)$$

em que ε_e é a permissividade efetiva dada por:

$$\varepsilon'_e = \varepsilon' - \sigma'' / w , \quad (2.17)$$

$$\varepsilon''_e = \sigma' / w + \varepsilon'' .$$

Assim, a tangente de perda, $\tan \delta$, será dada por :

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''_e}{\varepsilon'_e} . \quad (2.18)$$

Pode-se definir o fator de qualidade Q como sendo a razão entre 2π vezes o pico de energia e a energia dissipada em um ciclo, ou seja:

$$Q = \frac{w}{2V\alpha} = \frac{\beta}{2\alpha} \cong \frac{1}{\tan \delta} . \quad (2.19)$$

O efeito do fator Q é introduzir uma deformação do sinal à medida que ele se propaga no meio.

2.4 – Modelos teóricos de dispersão

Na descrição teórica da permissividade de materiais geológicos têm sido utilizados comumente modelos que são generalizações do modelo clássico de Debye (Debye, 1929), a exemplo do modelo Cole-Cole (Cole & Cole, 1941), que é muito popular pela sua simplicidade. É também utilizado o modelo da resposta dielétrica universal de Jonscher (1977), que descreve a dependência da permissividade complexa com a frequência através de uma lei de potência. Com a utilização destes modelos teóricos, observa-se que os materiais dispersivos usualmente apresentam curvas de dispersão de permissividade em que a parte real apresenta patamares de convergência em baixa e alta frequência, decaindo monotonicamente do patamar de baixa frequência para o de alta frequência. Por sua vez, a parte imaginária apresenta patamares de alta e baixa frequência, aproximadamente de mesmo nível, com um máximo entre os dois patamares. A localização do máximo depende de vários fatores, como a porosidade, salinidade e/ou tipo de fluido contido nos poros, tamanho do grão nas rochas, etc.

Tanto os modelos teóricos como as medidas de laboratório (Turner & Siggins, 1994) sugerem que o comportamento da atenuação das ondas EM em materiais geológicos, com uma baixa tangente de perda, é semelhante ao caso da sísmica, onde o efeito líquido dos vários mecanismos de atenuação resulta em uma dependência linear com a frequência. Este resultado permite que se utilize um modelo de Q constante para as ondas EM (Turner & Siggins, 1994; Bano, 1996a).

No processo de modelagem e inversão proposto nesta tese, o modelo com Q constante de Bano (2004) foi utilizado. Neste modelo, tanto a parte real como a parte imaginária da permissividade apresentam dependência na forma de lei de potencia com igual expoente. Isto resulta em um modelo de dispersão que está em bom acordo com o modelo de Jonscher (1977).

No modelo de Bano (2004), a permissividade pode ser expressa como:

$$\varepsilon(w) = \varepsilon^0 \left(-i \frac{w}{w_r} \right)^{n-1}, \quad (2.20)$$

onde ε^0 e w_r são constantes. w_r é uma frequência de referência e ε^0 tem dimensão de permissividade e é igual a ε quando $n=1$. O índice n ($0 < n < 1$) está ligado com o fator de qualidade Q pela equação:

$$n = \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(Q), \quad (2.21)$$

onde

$$\frac{1}{Q} = \frac{\text{Im}(\varepsilon)}{\text{Re}(\varepsilon)} = \tan\left[\frac{\pi}{2}(1-n)\right]. \quad (2.22)$$

O número de onda k pode ser expresso como:

$$k = \frac{w}{V(w)} + i\alpha(w) \quad (2.23)$$

onde $V(w)$ é a velocidade de fase e $\alpha(w)$ é o coeficiente de atenuação. Estes, por sua vez, podem ser expressos como:

$$V(w) = V_r \left(\frac{w}{w_r} \right)^{\frac{(1-n)}{2}} \quad (2.24)$$

e

$$\alpha(w) = \frac{w}{V(w)} \tan\left[\frac{\pi}{4}(1-n)\right] = \frac{\tan\left[\frac{\pi}{4}(1-n)\right]}{V_r w_r^{\frac{(n-1)}{2}}} w^{\frac{(1+n)}{2}}, \quad (2.25)$$

onde V_r é a velocidade de fase na frequência de referência w_r .

2.5 – Conclusão

O fato importante a ser destacado é que vamos fazer uso posteriormente do modelo de dispersão de Bano (2004) no processo de inversão do fator de qualidade Q. O modelo de Bano (2004) será utilizado para gerar o modelo direto da inversão, tanto para o caso de dados de GPR, como para o caso de dados sísmicos. Neste último caso entenda-se que o modelo de Bano dá o comportamento *em forma* do pulso de onda propagado.

Capítulo III – Fundamentos da abordagem de inversão: deslocamento do centróide de frequência e Transformada S

3.1 – Apresentação

Apesar da atenuação e dispersão do sinal constituir um problema muito mais presente na propagação das ondas eletromagnéticas que na propagação das ondas elásticas, as técnicas de estimação de Q utilizadas em GPR são, na sua grande maioria, baseadas em técnicas que têm sido desenvolvidas para a prospecção sísmica. Isto reflete o fato de que o GPR constitui uma ferramenta relativamente nova na exploração geofísica, mas também mostra o paralelismo existente no tratamento e análise dos dados de GPR e de sísmica. Assim, é importante ressaltar que, embora o problema de estimação de Q tenha perspectivas distintas em sísmica e GPR, não devemos perder de vista que uma técnica de inversão para estimação de Q desenvolvida em uma destas áreas, pode, em geral, ser implementada na outra, de uma forma quase direta, exigindo apenas pequenas adaptações.

Vamos apresentar aqui as diversas abordagens existentes para o problema de estimação do fator de qualidade Q, tanto do ponto de vista da sísmica como também do ponto de vista de GPR.

3.2 – Estimativas de Q do ponto de vista do sinal sísmico

Como sabemos, as ondas sísmicas sofrem atenuação e dispersão ao se propagarem na terra devido à anelasticidade e heterogeneidades do meio. A absorção da onda elástica pode ser caracterizada pelo fator de qualidade Q (Aki & Richards, 1980). A importância de se desenvolver técnicas para a estimação de Q na prospecção sísmica advém de vários fatores. O conhecimento do fator Q é importante para melhorar a resolução das imagens sísmicas, pois esta informação é utilizada, no processamento, para compensar os efeitos da absorção (Pramanik *et al.*, 2000). Além disso, nos estudos quantitativos de amplitude, como, por exemplo,

na análise AVO (*Amplitude Versus Offset*) há a necessidade de se superpor à assinatura usual AVO os efeitos da atenuação, que podem ser estimados com o conhecimento de Q (Zhang e Ulrych 2002; Odebeatu *et al.*, 2006). Adicionalmente, no planejamento de um levantamento sísmico, o conhecimento da atenuação permite uma otimização dos parâmetros de aquisição, garantindo a adequação da quantidade de energia para atingir o alvo (Rickett, 2006). Por fim, outro aspecto importante que pode ser explorado com técnicas que permitam a determinação do fator de qualidade Q é a possibilidade de se extrair informações sobre a petrofísica em reservatório contendo gás (Winkler & Nur, 1982; Murphy, 1982; Klimentos 1995; Sams *et al.*, 1997)

Segundo Dasgupta & Clark (1998), os métodos para estimar o fator Q com dados sísmicos de superfície não estão bem desenvolvidos. Entretanto, têm surgido vários métodos para estimação de Q, utilizando principalmente dados de perfis sísmicos verticais (VSP) e dados de *crosswell* (Tonn, 1991). Das técnicas para estimação de Q, a mais popular é aquela baseada no método da razão espectral. Nessa abordagem, a determinação de Q entre dois níveis é baseada na inclinação da curva do log da razão entre os dois espectros de amplitude em função da frequência (Tonn, 1991). A grande vantagem desta técnica é que ela não depende de uma escala absoluta para as duas formas de onda, já que a mesma é eliminada como um termo constante. A extensão desta técnica para o caso de muitos níveis traz uma complicação adicional, pois é preciso encontrar os muitos Q's que sejam a solução simultânea da razão espectral dos muitos pares de traços (Leaney, 1999; Rickett, 2006).

Outras técnicas para estimação de Q baseadas na amplitude do sinal recebido, têm o inconveniente desta informação ser em geral imprecisa, devido ao ruído, espalhamento, inclusive geométrico, e outros fatores. Brzostowski & McMechan (1992) usaram o método de inversão tomográfica linear SIRT (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*) para obter a imagem de velocidade e atenuação a partir de dados de tempo de percurso e amplitude. Esta abordagem tomográfica tem a grande vantagem de permitir a estimação de Q para uma grande variedade de geometrias. Entretanto, ela depende de uma informação precisa sobre a amplitude absoluta do sinal e requer a inversão simultânea do campo de velocidade.

Quan & Harris (1997) apresentaram um método para estimar a absorção sísmica baseado no deslocamento do centróide de frequência observado em dados VSP. Como o centróide do espectro do sinal sofre um deslocamento para frequências mais baixas, durante a propagação, eles desenvolveram uma relação entre o fator Q e o centróide de um espectro de amplitude, que é representado por uma Gaussiana, uma caixa, ou uma forma triangular. Nessa mesma linha, mas agora analisando não o deslocamento do centróide de frequência, e sim a variação do pico de frequência do espectro, Zhang & Ulrych (2002) obtiveram uma relação entre o fator Q e a variação do pico de frequência, com base na hipótese de que a assinatura da fonte sísmica pode ser modelada por um pulso de Ricker. Utilizando esta relação, eles apresentaram um método de estimação de Q a partir de secções (*gathers*) de CMP, com uma abordagem de despimento de camadas.

Vamos agora apresentar algumas técnicas para estimação de Q que têm sido propostas para serem utilizadas com dados de GPR.

3.3 – Estimativas de Q do ponto de vista de GPR

Como foi destacado anteriormente, os efeitos causados pela dispersão constituem o maior problema no processamento do sinal de GPR, impedindo que os alvos mais profundos sejam percebidos adequadamente. Foi proposto por Xavier Neto & Medeiros (2006) um método prático de processamento para eliminar os efeitos dispersivos, sem antes determinar os parâmetros de dispersão do meio. A principal etapa do processamento consiste na aplicação do balanceamento espectral tentativamente executado de maneira a repor o pico de frequência do sinal original. Este método, contudo, carece de um embasamento teórico e é extremamente dependente da subjetividade do operador, tendo, inclusive, sido proposto pelos autores como parte integrante do processo de interpretação. Desta forma, é importante investir numa técnica de inversão que consiga extrair do traço de GPR os valores dos parâmetros responsáveis pela dispersão do sinal no meio geológico.

O parâmetro Q do meio, para materiais com baixa a média perda, consegue sintetizar toda informação necessária para que sejam eliminados os efeitos dispersivos do sinal. Assim, a possibilidade de se conseguir extrair um mapa de Q, a partir de uma secção de GPR, constitui um acréscimo considerável sobre o conhecimento da subsuperfície, uma vez que, no processamento usual, temos

basicamente informações sobre a geometria dos refletores. Diferentemente do caso elástico, para as ondas eletromagnéticas, em geral, as informações sobre os parâmetros de dispersão e a geometria dos refletores são complementares. Isto ocorre porque as propriedades eletromagnéticas do meio, em geral, dependem fortemente do conteúdo de fluido nos poros. Assim, pequenas mudanças nesse conteúdo não produzem contraste de impedância suficiente para provocar reflexões significativas, mas podem afetar sensivelmente a propagação do sinal devido aos efeitos dissipativos. Além disso, as anomalias provocadas pela variação de conteúdo de fluido nos poros podem ser irregulares, distribuídas aleatoriamente e com fronteiras não muito bem definidas, dificultando assim sua visualização quando nos limitamos apenas às informações dos refletores (Liu *et al.*, 1998).

Uma das primeiras propostas de inversão de dados de GPR, para estimar a atenuação da onda eletromagnética, foi feita por Liu *et al.* (1998), baseada na análise do CFDS (*Centroid Frequency DownShift*) e aplicada em dados de radar em poços. Esta mesma técnica de tomografia de atenuação já havia sido aplicada anteriormente com dados de sísmica (Quan & Harris, 1997).

A técnica utilizada por Liu *et al.* (1998) considera que a propagação da onda pode ser descrita por um sistema linear, sendo o espectro da fonte $S(f)$ e a resposta do meio e do instrumento dada por $G(f) \cdot H(f)$. Assim, o espectro de amplitude do sinal no receptor será expresso como:

$$R(f) = G(f) \cdot H(f) \cdot S(f), \quad (3.1)$$

onde o fator $G(f)$ inclui o espalhamento geométrico, a resposta do instrumento, o acoplamento da fonte e receptor com o meio, o padrão da radiação, os coeficientes de reflexão e transmissão e a acumulação de fase devido à propagação. Por sua vez, $H(f)$ descreve os efeitos da atenuação na amplitude do sinal. Admitindo que a atenuação é proporcional à frequência (Ward & Toksöz, 1971), pode-se escrever o filtro de atenuação como:

$$H(f) = \exp\left(-f \int_{\text{raio}} \alpha_0 dl\right), \quad (3.2)$$

onde α_0 é o coeficiente intrínseco de atenuação ($\alpha(f) = \alpha_0 f$; no modelo de Q constante). Para determinar α_0 a partir de $R(f)$ e $S(f)$, usando as equações (3.1) e (3.2), Liu *et al.* (1998) obtiveram a expressão:

$$\int_{\text{raio}} f \alpha_0 dl = \ln \left[\frac{G(f)S(f)}{R(f)} \right]. \quad (3.3)$$

Para eliminar a dependência de $G(f)$, que inclui vários processos complicados e é muito difícil de ser determinado, Liu *et al.* (1998) usaram um processo estatístico para determinar α_0 a partir do deslocamento do centróide de freqüência do sinal. Admitindo que o espectro da fonte é Gaussiano, Liu *et al.* (1998) propuseram uma equação de tomografia para a atenuação dada por:

$$\int_{\text{raio}} \alpha_0 dl = (f_S - f_R) / \sigma_S^2, \quad (3.4)$$

onde f_S e f_R são, respectivamente, o centróide de freqüência do sinal da fonte e do receptor e σ_S^2 é a variância do espectro do sinal da fonte. A equação acima pode ser escrita na forma discreta:

$$\sum_j \alpha_{0j} l_j^i = \frac{(f_S - f_R^i)}{\sigma_S^2}, \quad (3.5)$$

onde i se refere ao i -ésimo raio; j é o j -ésimo ponto da grade que discretiza o meio e l_j^i é o comprimento do raio i dentro da grade j .

Como o espectro da fonte não é conhecido, f_S pode ser colocado junto com a matriz das incógnitas da atenuação. Assim, na inversão são estimados os coeficientes intrínsecos de atenuação e o centróide de freqüência da fonte.

Seja $f_S = \bar{f}_S + \Delta f$, em que \bar{f}_S é o valor estimado do centróide de freqüência da fonte. Como estimativa inicial de \bar{f}_S pode ser tomado o máximo $\{f_R\}$. Assim, a equação acima fica (Liu *et al.*, 1998):

$$\sum_j \alpha_{0j} l_j^i - \frac{\Delta f}{\sigma_S^2} = \frac{(\bar{f}_S - f_R^i)}{\sigma_S^2}, \quad (3.6)$$

onde α_{0j} e Δf são as incógnitas.

Por sua vez, Vasco *et al.* (1996) desenvolveram um método de perturbação para inversão simultânea de dados de tempo de percurso e amplitude para determinação simultânea de velocidade e atenuação. Nesta mesma linha, Zhou *et al.* (2001), assumindo como Liu *et al.* (1998) a hipótese de que a propagação pode ser descrita como um sistema linear (equação (3.1)) e supondo que o termo G seja independente da freqüência, obtiveram, derivando os dois lados da equação (3.3) em relação à freqüência:

$$\int_{\text{raio}} \alpha_0 dl = \frac{S'(f)}{S(f)} - \frac{R'(f)}{R(f)}. \quad (3.7)$$

A equação acima é formalmente equivalente à equação para a tomografia de tempo de percurso:

$$\int_{\text{raio}} \frac{1}{v} dl = t. \quad (3.8)$$

Diferentemente da abordagem de Vasco *et al.* (1996), as equações acima para velocidade e atenuação são resolvidas separadamente, pois, segundo Zhou *et al.* (2001), computacionalmente é mais fácil resolver duas equações com matrizes menores do que uma única com uma matriz maior. Além disso, a regularização utilizada no algoritmo de inversão tende a suavizar as soluções e seria difícil justificar um mesmo grau de suavização para a velocidade e a atenuação, uma vez que elas nem sempre apresentam a mesma escala de heterogeneidade. Assim, em cada iteração, as trajetórias dos raios são atualizadas; em seguida, a equação linearizada para a velocidade é resolvida e, finalmente, é resolvida a equação linearizada para a atenuação (Zhou *et al.*, 2001).

3.4 – Escolha do parâmetro para identificar atenuação: amplitude, alargamento do sinal ou deslocamento do centróide de freqüência

Na revisão bibliográfica acima apresentada para determinação da atenuação, sempre o sinal é analisado no espaço de freqüência. Contudo, a atenuação pode ser determinada a partir da análise do sinal em tempo, pois, na propagação de um pulso eletromagnético em um meio dispersivo, observa-se um alargamento do pulso bem como uma diminuição na amplitude do mesmo. Desta forma, na estimativa da dispersão, poder-se-ia utilizar tanto o alargamento do pulso como a diminuição da amplitude. Entretanto, como a diminuição de amplitude pode ser resultante de vários outros fatores (por exemplo, espalhamento, acoplamento da fonte e do receptor, padrão de radiação, efeitos de transmissão e reflexão, etc.) o alargamento do pulso é o parâmetro operacionalmente mais adequado para estimar Q. Por outro lado, com a inevitável deformação do pulso, devido à dispersão, pode ser difícil obter uma estimativa realista do alargamento do pulso no domínio do tempo. Assim, o melhor parâmetro para estimar a dispersão parece ser o deslocamento do centróide de freqüência do espectro do pulso calculado no domínio de freqüência (Liu *et al.*,

1998). Evidentemente, quando se dispõe de valores confiáveis de amplitude, esta deve ser incorporada como uma informação adicional na estimativa da atenuação. Este é o procedimento utilizado por Rickett (2006) no seu esquema de inversão, que é uma generalização do método da razão espectral.

Uma vez conhecido o caminho percorrido pela onda eletromagnética em um meio de baixa perda, os efeitos da atenuação podem ser descritos por um único parâmetro, que é o fator de qualidade Q , ou sua generalização Q^* , introduzida por Turner & Siggins (1994), e definido como:

$$Q^* = \frac{1}{2V} \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\omega} \right)^{-1}, \quad (3.9)$$

onde V é a velocidade e $\left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\omega} \right)$ é a taxa de variação da atenuação com a frequência.

Q^* é uma generalização do fator de qualidade Q , utilizado na sismologia (Aki & Richards, 1980):

$$Q = \frac{\omega}{2V\alpha} = \frac{\pi}{V\alpha_0}. \quad (3.10)$$

Assim, a questão que se coloca é como estimar eficientemente o valor de Q a partir dos dados de GPR. A proposta de Bano (1996b) para estimar Q é basicamente comparar o sinal de GPR observado com grupos de sinais sintéticos atenuados com vários valores de Q . O valor de Q estimado será aquele do sinal sintético que melhor se ajustar com o sinal observado, no sentido de mínimos quadrados. A inconveniência deste método é a necessidade da identificação e isolamento das reflexões individuais em um dado traço, o que exige que os eventos de reflexão sejam bastante separados no tempo e o nível de ruído dos dados seja bastante baixo.

Outra alternativa possível, a que é seguida nesta tese, é utilizar o resultado obtido por Quan & Harris (1997). Eles mostraram que o fator de qualidade pode ser obtido a partir da medida da variação do centróide de frequência do espectro do sinal. Usando a equação (3.10), podemos reescrever a equação básica da tomografia de atenuação (3.4) como:

$$\int_{\text{raio}} \alpha_0 dl = \int_{\text{raio}} \frac{\pi}{vQ} dl = (f_S - f_R) / \sigma_S^2. \quad (3.11)$$

Considerando o caso de duas interfaces horizontais em subsuperfície, separadas por uma camada constituída de um material com fator de qualidade Q

constante, obtemos a relação entre o deslocamento do centróide de freqüência e o fator de qualidade Q:

$$\frac{\pi}{Q}(t_2 - t_1) = (f_{R_2} - f_{R_1}) / \sigma_s^2. \quad (3.12)$$

É importante lembrar aqui que, para um espectro Gaussiano, a equação (3.11) é exata. Assim o centróide de freqüência coincide com o pico do espectro de freqüência. Entretanto para um espectro tipo caixa ou triangular, a equação (3.11) é apenas aproximadamente verdadeira.

No caso de um espectro triangular, com centróide de freqüência igual a f_s , por exemplo, considerando o tempo de percurso τ_D em uma camada com fator de qualidade Q, obtemos

$$f_s - f_R = \frac{\pi\tau_D}{Q} \frac{f_s^2}{2} + \frac{1}{10} \left(\frac{\pi\tau_D}{Q} \right)^2 f_s^3 + O \left(\left(\frac{\pi\tau_D}{Q} \right)^3 f_s^4 \right), \quad (3.13)$$

onde a variância do espectro é $\sigma_s^2 = \frac{f_s^2}{2}$.

Supondo o sinal da fonte como um pulso de Ricker, de freqüência dominante f_s , o espectro da fonte pode ser escrito como

$$S(f) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{f^2}{f_s^2} e^{-\frac{f^2}{f_s^2}}. \quad (3.14)$$

O espectro do sinal no receptor, depois de percorrer durante um tempo τ_D um meio com fator de qualidade Q, será dado por:

$$R(f) = S(f) e^{-\frac{\pi f \tau_D}{Q}}. \quad (3.15)$$

O pico de freqüência do espectro que, inicialmente, era igual à freqüência f_s passa a ser (Zhang & Ulrych, 2002):

$$f_p = f_s^2 \left[\sqrt{\left(\frac{\pi\tau_D}{4Q} \right)^2 + \left(\frac{1}{f_s} \right)^2} - \frac{\pi\tau_D}{4Q} \right]. \quad (3.16)$$

O pico de freqüência também satisfaz uma equação análoga à equação (3.13), dada por

$$f_s - f_p = \frac{\pi\tau_D}{Q} \frac{f_s^2}{4} - \frac{1}{32} \left(\frac{\pi\tau_D}{Q} \right)^2 f_s^3 + O \left(\left(\frac{\pi\tau_D}{Q} \right)^4 f_s^5 \right). \quad (3.17)$$

O espectro de um pulso de Ricker com freqüência dominante f_s , dado pela equação (3.14) não é simétrico. Portanto, o seu centróide de freqüência f_{cS} é ligeiramente maior que f_s , ou, mais exatamente,

$$f_{cS} = \frac{2f_s}{\sqrt{\pi}}, \quad (3.18)$$

sendo a variância dada por

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{2} \frac{f_s^2 (3\pi - 8)}{\pi}. \quad (3.19)$$

O centróide de freqüência f_{cR} do sinal no receptor, cujo espectro é dado pela equação (3.15), obedece a uma equação semelhante à equação (3.13)

$$f_{cS} - f_{cR} = \frac{\pi\tau_D}{Q} \sigma_s^2 - \frac{1}{2} \frac{(16 - 5\pi)}{\pi^{(\frac{3}{2})}} \left(\frac{\pi\tau_D}{Q} \right)^2 f_s^3 + O\left(\left(\frac{\pi\tau_D}{Q} \right)^3 f_s^4 \right). \quad (3.20)$$

Em vista dos resultados acima descritos, parece ser mais adequado utilizar o deslocamento do centróide de freqüência para identificar o fator de qualidade Q, já que este fenômeno sempre ocorre na propagação do sinal em um meio dispersivo.

Uma vez definido o método a ser utilizado para identificar o fator de qualidade, devemos nos preocupar agora com a escolha da metodologia a ser adotada para medir o deslocamento do centróide de freqüência. Como a atenuação intrínseca é cumulativa e se dá ao longo do tempo, a evolução do centróide de freqüência deve ser monitorada ao longo do tempo. Com o desenvolvimento de modernas técnicas de decomposição espectral é possível, por exemplo, a partir de um dado traço, saber como evolui o espectro de amplitude do sinal ao longo deste traço. Para tanto é bastante utilizar as vantagens da transformada Stockwell ou transformada S (Stockwell *et al.*, 1996), que será adotada nesta tese..

Numa comparação entre dez diferentes técnicas para determinar o fator de qualidade, usando dados de VSP, Tonn (1991) concluiu que não existe um único método que tenha se mostrado adequado e mais eficiente em todas as situações. Dependendo do ruído e tipo de informação disponível no dado, alguns métodos específicos podem se mostrar superiores a outros. Os métodos se dividem em dois grandes grupos (Tonn, 1991): métodos que operam no domínio do tempo e métodos que operam no domínio da freqüência. Dos métodos no domínio do tempo, o mais adequado é o método do sinal analítico (Engelhard *et al.*, 1986; Engelhard, 1990).

Este método é particularmente eficiente quando se dispõe da amplitude verdadeira do sinal. Quando não se dispõe da amplitude verdadeira, os métodos que operam no domínio da frequência, em geral, são mais eficientes e, dentre eles, o que se mostrou mais eficiente foi a modelagem espectral. Na ausência de ruído, o método da razão espectral também se mostrou bastante confiável. Como veremos, a nossa proposta de inversão, com o uso da Transformada S, opera simultaneamente no domínio do tempo e da frequência, procurando extrair o melhor das técnicas nos dois domínios.

Em síntese, portanto, esta tese une as abordagens de Liu *et al.* (1998) e a transformada S (Stockwell *et al.*, 1996) para estima Q. A seguir faremos uma breve apresentação da transformada S.

3.5 – Transformada S

Como os efeitos de atenuação e dispersão do sinal são cumulativos, aumentando conforme o pulso vai percorrendo o meio dissipativo, para se analisar a evolução do espectro de frequência do sinal é necessário que se faça uma análise do sinal em tempo-frequência, o que pode ser conseguido com o uso da transformada S (Stockwell *et al.*, 1996).

3.5.1 – Definição da transformada S

A análise em tempo-frequência é de ampla utilização tanto em sísmica, como também em processamento de imagens, imageamento médico, engenharia elétrica e acústica. Em geral, quando se pretende fazer a análise de um sinal em tempo-frequência, utiliza-se a transformada de Fourier em tempo curto ou em janelas. A janela vai se deslocando no tempo, obtendo-se então um espectro localizado no tempo e, assim, é possível fazer uma representação dos dados em tempo-frequência. Em princípio, uma dada janela pode ser utilizada com qualquer função. Contudo, a forma da janela e o seu tamanho determinam a resolução em tempo-frequência dos dados e vazamento de conteúdo espectral do sinal. Frequentemente tem sido utilizada a janela Gaussiana que, escolhida de forma adequada, pode fornecer uma resolução ótima em tempo e frequência.

A transformada S [$TS(t, f)$] (Stockwell *et al.*, 1996) pode ser entendida como uma extensão da transformada de Fourier em tempo curto, que utiliza janelas Gaussianas com largura $\sigma^2 = 1/f^2$ dependente da frequência que está sendo analisada. A transformada $TS(\tau, f)$ é definida por:

$$TS[h](\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)w(\tau-t, f)e^{-i2\pi ft} dt, \quad (3.21)$$

sendo a janela Gaussiana $w(\tau-t, f)$ dada por:

$$w(\tau-t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}}, \quad (3.22,)$$

onde $h(t)$ é o sinal que está sendo analisado e τ é o centro no tempo da janela Gaussiana. Uma alta precisão em tempo e frequência não pode ser, simultaneamente obtida devido ao Princípio da Incerteza de Heisenberg. Para facilitar a implementação computacional, Stockwell *et al.* (1996) escreveram a equação (3.21) como o produto no espaço de frequência:

$$TS[h](\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha + f) e^{\frac{2\pi\alpha^2}{f^2}} e^{i2\alpha\tau} d\alpha, \quad (3.23)$$

em que $H(\alpha)$ é a transformada de Fourier de $h(t)$ e é calculada apenas uma vez. $H(\alpha)$ é deslocada de f antes de ser multiplicada pela função janela. A transformada $TS(\tau, f)$ é assim obtida aplicando a transformada de Fourier inversa.

Stockwell *et al.* (1966) apresentaram a transformada S como uma “correção de fase” da transformada de *wavelet* contínua (CWT). A CWT, $W[h](\tau, d)$, de uma função $h(t)$ é definida por:

$$W[h](\tau, d) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)w(t-\tau, d)dt, \quad (3.24)$$

onde $w(t, d)$ é uma réplica com a escala da *wavelet* mãe fundamental. A dilatação d determina a largura da *wavelet* $w(t, d)$, controlando assim sua resolução. Além da equação (3.24), a definição da CWT ainda impõe uma condição de admissibilidade para a *wavelet* mãe, exigindo que a função $w(t, d)$ tenha média zero.

A transformada S de uma função $h(t)$ poderia ser definida como uma CWT multiplicada por um fator de fase utilizando uma específica *wavelet* mãe, ou seja:

$$TS[h](\tau, f) = e^{-i2\pi f\tau} W[h](\tau, f), \quad (3.25)$$

com a *wavelet* mãe definida como:

$$w(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi ft}. \quad (3.26)$$

Note que o fator de dilatação d é o inverso da frequência f .

Contudo, como a *wavelet* associada com a transformada S [equação (3.26)] não tem média zero e, portanto não satisfaz a condição de admissibilidade, a transformada S não pode ser considerada, estritamente falando, como uma transformada de *wavelet*, embora tenha grande semelhança com a *wavelet* de Gabor (Kim & Kim, 2001).

Por outro lado, a transformada S possui algumas propriedades interessantes que não são compartilhadas pela transformada de *wavelet*. Por exemplo, como ela se propõe a ser uma representação do espectro local, o espectro de Fourier da função $h(t)$ pode ser obtido com uma simples média no tempo desse espectro local. De fato:

$$\int_{-\infty}^{\infty} TS[h](\tau, f) d\tau = H(f), \quad (3.27)$$

onde $H(f)$ é a transformada de Fourier de $h(t)$. Desta forma $h(t)$ pode ser recuperada exatamente a partir de $TS[h](t, f)$. Assim:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} TS[h](\tau, f) d\tau \right\} e^{i2\pi ft} df. \quad (3.28)$$

A grande vantagem da transformada S é sua interpretação direta como um espectro local, o que não ocorre no caso da transformada de *wavelet* que é expressa em termos do fator de escala d .

No caso da transformada *wavelet*, a energia do sinal $h(t)$ pode ser analisada em um escalograma dado por $|W[h](\tau, d)|^2$. Esta função representa a densidade de energia no domínio tempo/frequência, ou seja, ela nos dá a energia contida em caixas de Heisenberg centradas em $(\tau, \eta/d)$ (η é o centro de frequência da *wavelet* mãe), e com larguras $d\sigma_t$ e σ_w/d em tempo e frequência, respectivamente (onde σ_t^2 e σ_w^2 são as variâncias da *wavelet* mãe no tempo e em frequência, respectivamente) (Mallat, 2001). Desta forma, para um pulso que, no instante inicial tivesse sua energia concentrada na frequência η , depois de atravessar um meio dispersivo durante um tempo τ , o pulso se tornará mais largo e, conseqüentemente, terá sua densidade de energia concentrada agora em torno de um ponto $(\tau, \eta/d)$, onde o valor de d dependerá do fator de qualidade do meio. Ou seja, quanto menor o fator de

qualidade maior será o valor de d associado com o máximo da densidade de energia. Pode-se mostrar que existe uma relação linear ligando o valor de $1/Q$ e o valor de d correspondente ao maior conteúdo de energia ($Max|W[h](\tau, d)|^2$) (Li *et al.*, 2006). Desta forma é possível, calibrando adequadamente o escalograma, estimar o fator de qualidade Q em um sinal sísmico.

A abordagem de Li *et al.* (2006), utilizando a transformada de *wavelet* para estimar a atenuação do sinal sísmico, tem muitas semelhanças com a nossa proposta de inversão do fator de qualidade que utiliza a transformada S . Inclusive, na proposta da utilização do centróide de d como um atributo sísmico para diagnóstico de gás em reservatório.

3.5.2 Aplicações da transformada S em dados sintéticos

Vamos apresentar nesta seção algumas aplicações da transformada S para evidenciar a sua eficiência na decomposição espectral do sinal.

Em primeiro lugar, devemos lembrar que, em toda técnica de decomposição espectral, onde buscamos a melhor definição em frequência, há uma limitação intrínseca, devido ao Princípio de Incerteza de Heisenberg. Ou seja, aumentando a definição em frequência perderemos, inevitavelmente, precisão em tempo. A similaridade entre a transformada S e a CWT com *wavelet* de Gabor parece ser um indicativo de uma boa performance pois, segundo Kim & Kim (2001), na análise da evolução em frequência de um sinal utilizando CWT, deve-se usar *wavelet* de Gabor, que fornece a menor caixa de Heisenberg e, diferentemente da *wavelet* harmônica, pode ter o seu suporte em tempo ajustado para um valor menor.

Como primeiro exemplo, vamos considerar um meio de onze camadas horizontais, tendo a última camada espessura infinita. A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros físicos e geométricos do modelo. Utilizando como fonte um pulso de Ricker de frequência dominante de 200 MHz, o sinal de GPR *zero-offset*, resultante da propagação neste meio, está apresentado na Figura 3.1 (a). Nós estamos interessados em mostrar que o fator relevante a ser levado em conta é o deslocamento do centróide de frequência do sinal e que este parâmetro depende apenas da deformação do pulso e não da sua amplitude. Para tanto, cada pulso mostrado no traço da Figura 3.1 (a) foi multiplicado por uma constante arbitrária, de modo que as amplitudes dos pulsos fossem aproximadamente iguais. Reforce-se

ainda que a técnica resultante dispensará o conhecimento do coeficiente de reflexão e, portanto do campo de velocidade. A Figura 3.1 (b) apresenta a transformada S do traço apresentado na Figura 3.1 (a).

Modelo de camadas horizontais			
Camada	Espessura (m)	ϵ	Q
1	0.001	1	6000
2	1.4	9	6000
3	3	18	6
4	5.8	36	6000
5	7.8	25	6000
6	9.8	14	6000
7	12.5	9	6000
8	13.5	18	10
9	14.5	36	6000
10	15.5	25	6000
11	∞	14	

Tabela 3.1 – Modelo de camadas horizontais utilizado para gerar o traço de GPR apresentado na Figura 3.1 (a).

A primeira deformação importante no pulso de GPR ocorre devido à propagação na terceira camada ($Q_3=6$), associado à reflexão que ocorre em torno do tempo duplo de trânsito $50 \eta_s$ (Figura 3.1 (a)). De fato, o espectro da transformada S no entorno de $50 \eta_s$ apresenta um rebaixamento do centróide de frequência em relação aos dois pulsos anteriores. Fato semelhante ocorre com o pulso refletido na base da camada 8, que ocorre em torno do tempo duplo de trânsito $180 \eta_s$. De modo a melhor evidenciar estes fatos, apresentamos na Figura 3.2 (a) ampliações dos pulsos refletidos nas bases das camadas 2, 3 e 8 e, na Figura 3.2 (b), os espectros associados. Em (b), apresentamos tanto o espectro da transformada S, como o espectro de Fourier. Observe que, em relação ao pulso refletido na base da camada 2, cujo pico de frequência está em torno de 200 MHz, os picos de frequência dos pulsos refletidos nas bases das camadas 3 e 8 são aproximadamente iguais a 100 50 MHz, revelando uma forte dispersão na propagação do pulso.

Cabe ressaltar que o espectro da transformada S é muito semelhante ao espectro da transformada de Fourier, como pode ser visto nos espectros da Figura 3.2. Isto revela que, pelo menos do ponto de vista de obtenção de estimativa do centróide de freqüência, as transformadas S e de Fourier são equivalentes. Contudo, a primeira tem sobre a segunda uma enorme vantagem operacional, pois o efeito do ajanelamento na transformada S é muito pequeno, ao passo que, na transformada de Fourier, este efeito implica numa perda enorme de precisão e, conseqüentemente, de acurácia na determinação do centróide ou pico de freqüência.

Voltemos à Figura 3.1 para comentar um fato deveras interessante: há no entorno do tempo duplo de trânsito 240 ns um “levantamento” do centróide de freqüência que, nitidamente, se destaca no *trend* geral de decaimento dado pela reta vermelha. Esta reta corresponde ao ajuste de mínimos quadrados do decaimento do centróide. Isto mostra claramente que, mesmo num meio dispersivo, existe a possibilidade de “reintrodução” de conteúdo de alta freqüência. Tal fato ocorreu devido ao fenômeno de interferência dos pulsos refletidos nas bases das camadas 9 e 10.

Um dos fundamentos da nossa proposta de inversão, a ser detalhada no próximo capítulo, é a validade da equação (3.12) proposta por Liu *et al.* (1998). Segundo esta equação, Q depende linearmente da razão $\Delta t/\Delta f$, o que é rigorosamente válido para um pulso de espectro Gaussiano. Contudo, como demonstramos na equação (3.20), a equação (3.12) corresponde apenas ao comportamento do termo dominante, para o caso de um pulso de Ricker. Mostraremos a seguir que a equação (3.12) é uma excelente aproximação mesmo para um pulso de Ricker. Adicionalmente, mostraremos também que a transformada S é uma boa ferramenta para estimar o deslocamento do centróide de freqüência.

A Figura 3.3 apresenta os resultados de várias modelagens de dispersão de pulsos que se propagam no meio com a mesma geometria especificada na Tabela 3.1. Agora, contudo, para cada valor de Q_3 , várias simulações foram feitas alterando-se o valor de Q_6 . Por exemplo, os quadrados em azul correspondem a seis modelagens de dispersão com Q_6 assumindo valores 2, 4, 10, 20, 30 e 60, para um único valor $Q_3 = 6000$. Observe que os grupos de pontos associados a um só valor de Q_3 se dispõem aproximadamente ao longo de uma reta. De fato, as retas

mostradas nesta Figura 3.3, que são ajustes de mínimos quadrados, representam muito bem o comportamento dos pontos.

A julgar pela similaridade das equações (3.13) e (3.20), que demonstram que pulsos de espectro triangular e pulsos de Ricker têm ambos termo dominante para a evolução temporal do centróide de frequência dado pela equação (3.20), concluímos que esta equação é válida para pulsos de espectros não Gaussiano. Em outras palavras, espectros não Gaussianos podem ser representados por uma expansão em que o termo dominante é uma Gaussiana. Embora não tenhamos investigado esta questão a fundo, acreditamos que exista conexão deste resultado com o teorema do limite central da estatística.

3.5.3 Aplicações da transformada S em dados reais

Nesta secção evidenciaremos que a transformada S é suficientemente robusta para ser aplicada em dados reais. Com o mesmo exemplo, daremos uma explicação alternativa para o fato da abordagem de Xavier Neto & Medeiros (2006) funcionar como uma correção expedita dos efeitos de dispersão.

A Figura 3.4 apresenta onze traços retirados de uma secção de GPR levantada sobre uma duna próxima à cidade de São Bento do Norte, no estado do Rio Grande do Norte (Oliveira Jr. *et al.*, 2003). A secção de GPR foi submetida a um processamento que envolveu apenas subtração do valor médio e remoção de *background* (filtragem de conteúdo de baixíssima frequência). Para estes dados de GPR, a Figura 3.5 apresenta duas versões diferentes do espectro da transformada S. Na versão da Figura 3.5 (a), a transformada S foi aplicada em cada traço e, posteriormente, foi calculado o módulo da média das transformadas S dos traços. Por outro lado, na versão da Figura 3.5 (b), a transformada S foi aplicada em cada traço, para cada um deles, foi calculado o módulo da transformada S, sendo posteriormente calculada a média dos módulos. Doravante, por simplicidade, designaremos as abordagens acima descritas de aplicação da transformada S por abordagens A e B, respectivamente associadas às figuras 3.5 (a) e (b). As abordagens A e B são equivalentes evidenciando a robustez da transformada S.

Na Figura 3.5, as retas em cores amarela e vermelha são ajustes de mínimos quadrados dos picos de frequência da transformada S conforme calculados pelas abordagens A e B, respectivamente. Também mostradas na Figura 3.5, as linhas

“quebradas” em cores verde e magenta unem picos de frequência da transformada S , conforme calculados pelas abordagens A e B. Note que a evolução do pico de frequência não é uma boa abordagem para medir a dispersão, devido a sua alta sensibilidade. Desse modo a abordagem de Zhang & Ulrych (2002) provavelmente deve apresentar pequena robustez à presença de ruído. Mostraremos, no próximo capítulo, que o centróide de frequência, ao invés do pico de frequência, é um localizador robusto à presença de ruído.

A Figura 3.6 apresenta novas versões da Figura 3.5, agora aplicadas no radargrama resultante do processamento realizado por Xavier Neto & Medeiros (2006), sobre o radargrama da Figura 3.4. Neste processamento, foi aplicada uma etapa de balanceamento espectral como uma correção expedita dos efeitos de dispersão. A explicação dada por Xavier Neto & Medeiros (2006) para a validade desta abordagem de correção dos efeitos de dispersão, é o fato de que o espectro de fase é praticamente invariante em meios de baixa dispersão. Aqui, apresentamos uma explicação alternativa para a validade da abordagem de Xavier Neto & Medeiros (2006), conforme descrito a seguir.

Note na Figura 3.6 que as retas em cores amarela e vermelha (ajustes de mínimos quadrados dos picos de frequência da transformada S conforme calculados pelas abordagens A e B, respectivamente) são agora horizontais. Isso evidencia que o efeito da dispersão foi satisfatoriamente corrigido. O balanceamento espectral corrige os efeitos de dispersão usando um coeficiente de atenuação constante por faixas de frequência. Como o tratamento é efetuado em todo o radargrama, avaliamos que a abordagem de Xavier Neto & Medeiros (2006) é válida em meios em que a variação espacial de Q é pequena.

3.6 – Conclusão

A abordagem de inversão apresentada nesta tese, a ser detalhada no próximo capítulo, se baseia em dois pilares: i) calcular o efeito da dispersão com base no deslocamento do centróide de frequência, seguindo a proposta de Quan & Harris (1997) e ii) usar as facilidades numéricas da transformada S para operacionalizar este cálculo.

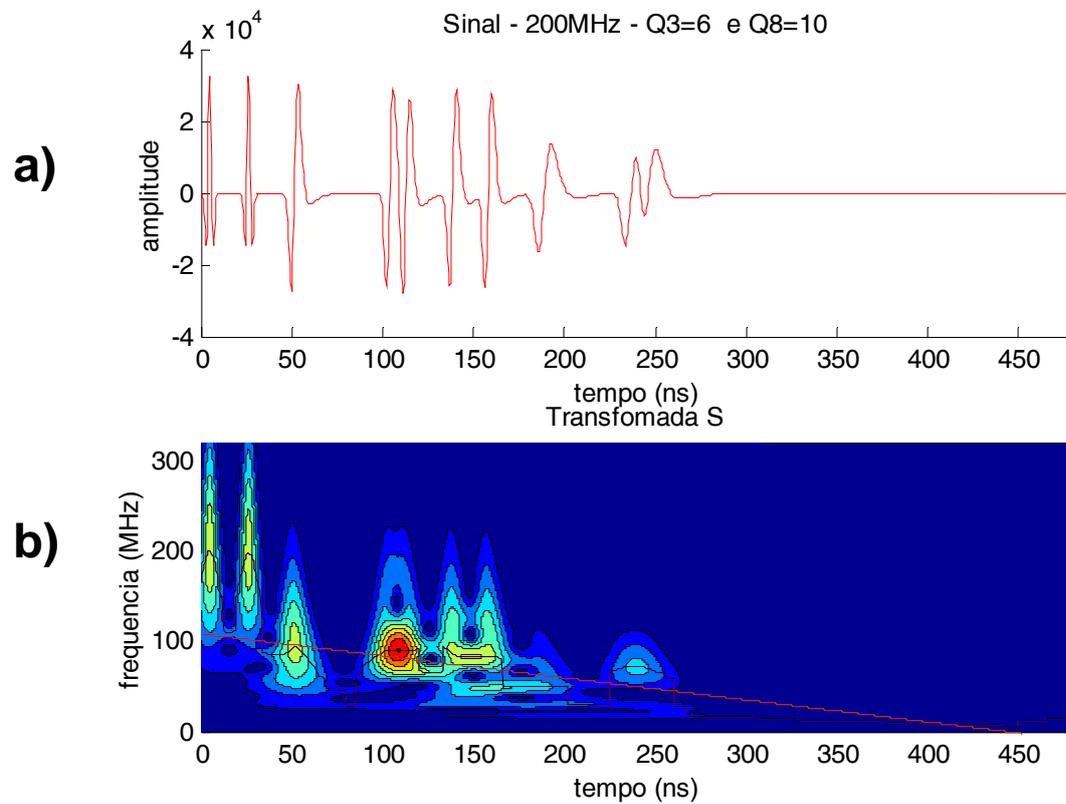


Figura 3.1 – Traço de GPR gerado pela propagação de um pulso de Ricker (200 MHz) no meio apresentado na Tabela 3.1. a) Traço zero-offset. b) Módulo da transformada S. As cores quentes representam valores altos de amplitude. A legenda de cores não foi apresentada porque as amplitudes dos pulsos foram multiplicadas por constantes arbitrárias (vide texto) de modo a demonstrar a irrelevância da amplitude no processo de definição do centróide de frequência. A reta em vermelho é o ajuste de mínimos quadrados do decaimento do centróide de frequência.

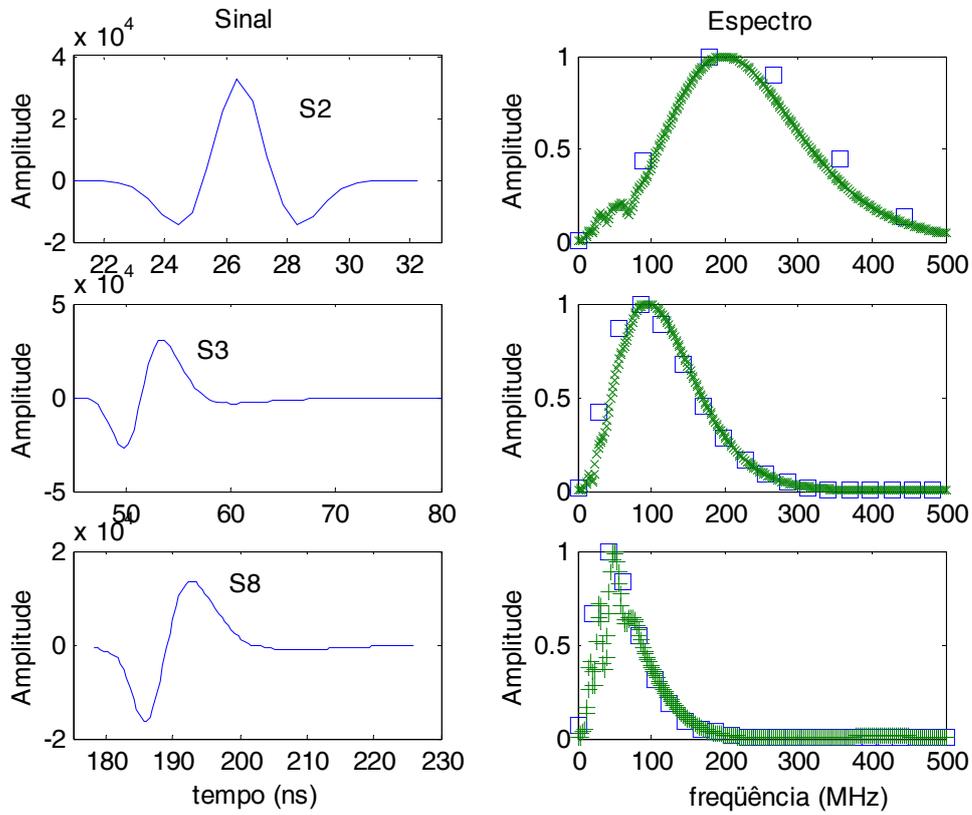


Figura 3.2 – Painel da esquerda: Ampliações por janelas do traço mostrado na Figura 3.1 (a), para os pulsos refletidos nas bases das camadas 2, 3 e 8. Painel da direita: espectros de amplitude dos pulsos mostrados à esquerda; em verde, transformada S, em azul, transformada de Fourier.

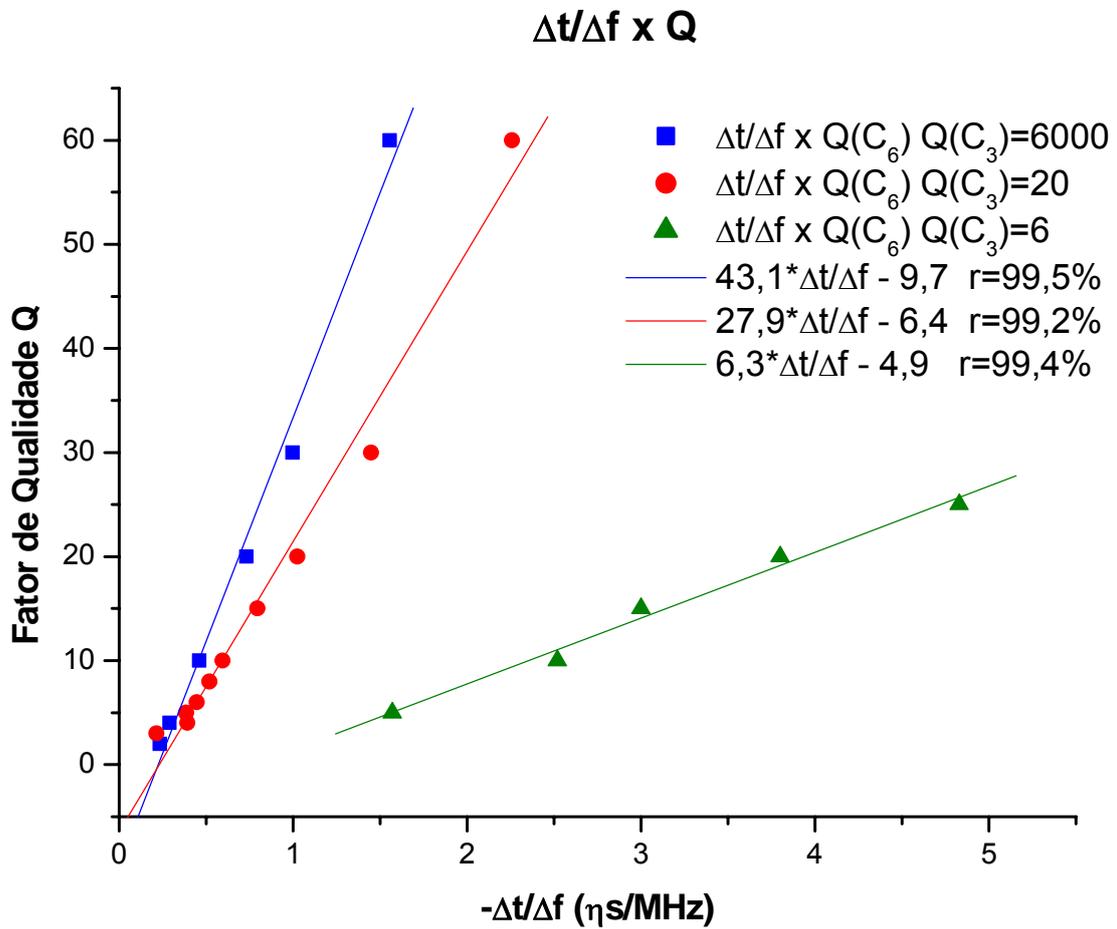


Figura 3.3 – Resultados de modelagens de dispersão de pulsos que se propagam em um meio com a geometria especificada na Tabela 3.1. Para cada valor de Q_3 , várias simulações foram feitas, alterando-se o valor de Q_6 . As retas são ajustes de mínimos quadrados.

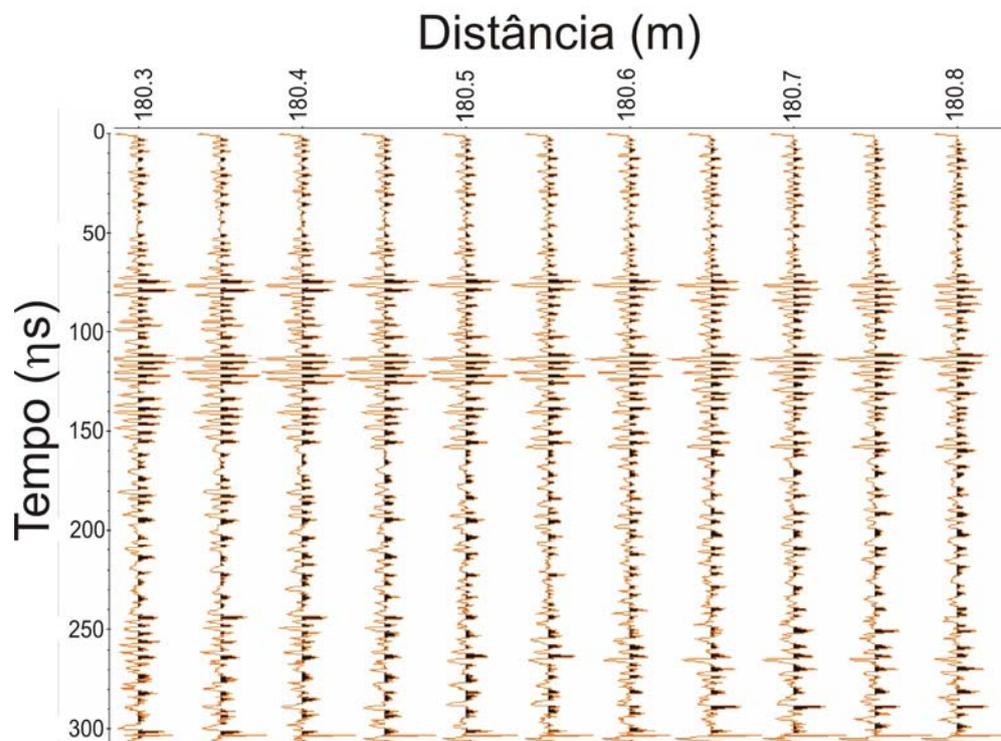


Figura 3.4 – Excerto de radargrama (200 MHz) apresentado em Oliveira Jr. *et al.* (2003). O radargrama foi levantado sobre uma duna eólica localizada nas proximidades da cidade de São Bento do Norte, litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte. O processamento aplicado consistiu apenas de subtração do nível de base e remoção do conteúdo espectral de baixíssima frequência. Ver detalhes do processamento em Oliveira Jr. *et al.* (2003) ou Oliveira Jr. (2001).

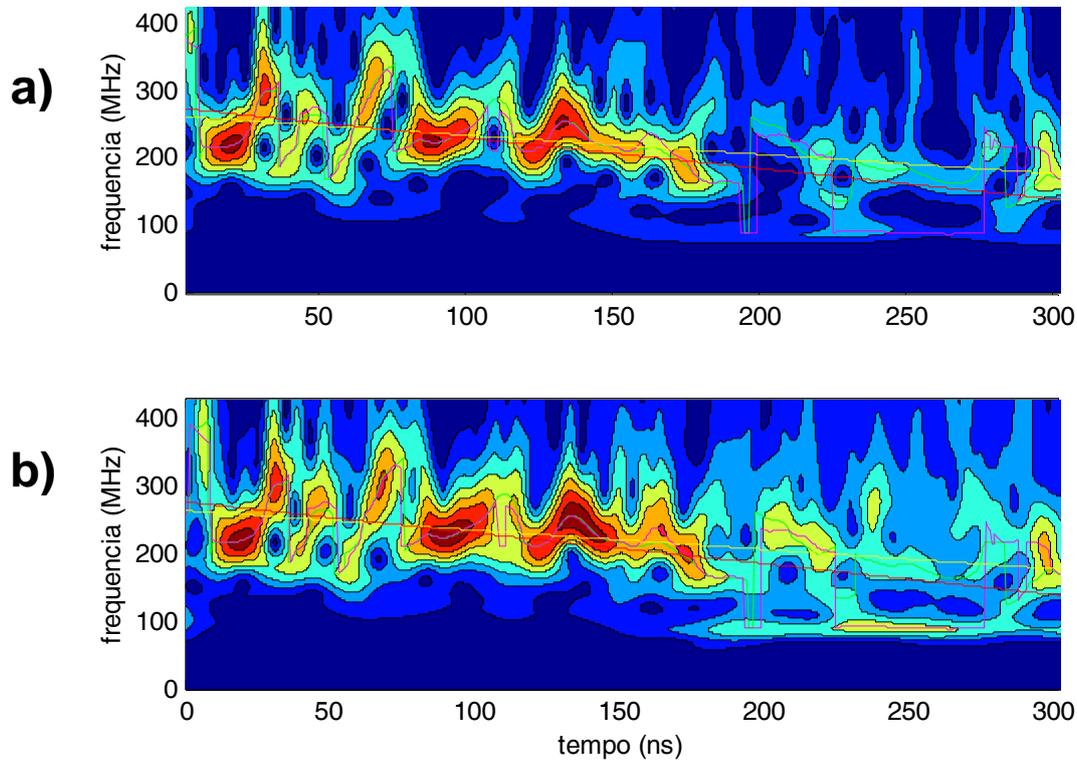


Figura 3.5 – Duas versões diferentes de cálculo do espectro da transformada S aplicadas nos dados de GPR apresentados na Figura 3.4. Em a), a transformada S foi aplicada em cada traço e posteriormente foi calculado o módulo da média das transformadas S dos traços. Em b), a transformada S foi aplicada em cada traço, para cada um deles foi calculado o módulo da transformada S, e posteriormente calculada a média dos módulos. As retas em cores amarela e vermelha são ajustes de mínimos quadrados dos picos de frequência da transformada S, conforme calculados pelas abordagens descritas em a) e b), respectivamente. As linhas “quebradas” em cores verde e magenta unem picos de frequência da transformada S, conforme calculados pelas abordagens descritas em a) e b), respectivamente.

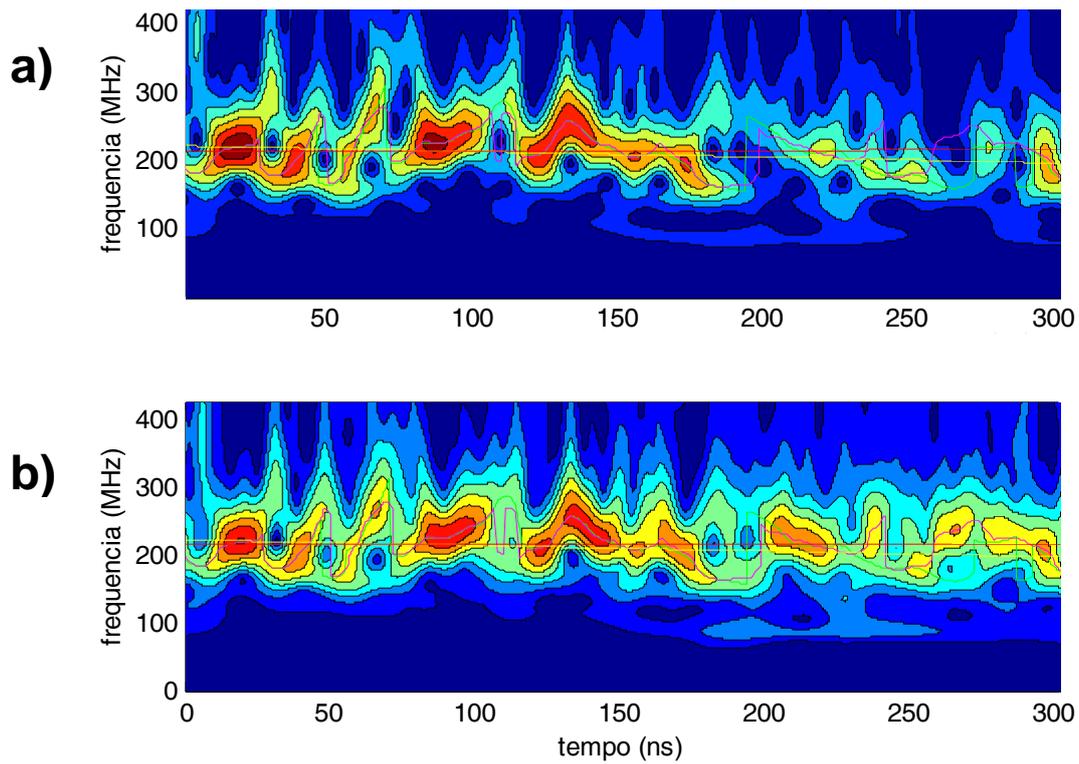


Figura 3.6 – Idem da Figura 3.5, aplicados na secção de GPR que resulta do processamento de Xavier Neto & Medeiros (2006) sobre a secção mostrada na Figura 3.4.

Capítulo IV – Inversão de Fator de Qualidade baseada no deslocamento do centróide de frequência

4.1 – Apresentação

Neste capítulo apresentamos a nossa proposta de inversão de Fator de Qualidade Q , que é válida para meios de baixa a moderada perda, ou seja, em meios em que a atenuação possa ser caracterizada por um único parâmetro. A nossa abordagem utiliza o método do deslocamento do centróide de frequência proposto por Quan & Harris (1997), que foi adaptada para dados de GPR por Liu *et al.* (1998) e faz uso das vantagens da Transformada S (Stockwell *et al.*, 1996).

4.2 – Fundamento da abordagem de inversão

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

$$\alpha(w) = \frac{w}{2VQ}, \quad (4.1)$$

em que $w = 2\pi f$, f é a frequência e V a velocidade do meio.

Substituindo a equação (4.1) na equação (3.4), resulta:

$$\int_{\text{raio}} \frac{\pi}{VQ} dl = (f_S - f_R) / \sigma_S^2, \quad (4.2)$$

em que f_S e f_R são as frequências centrais dos pulsos de entrada e propagado, respectivamente, e σ_S^2 é a variância do pulso de entrada.

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. A integral em (4.2) resulta no produto de π/Q pela diferença de tempo duplo de propagação ($t_2 - t_1$) do sinal refletido nas interfaces (base e topo da

camada em consideração). Dessa forma, conhecendo o deslocamento do centróide de frequência ($f_{R2} - f_{R1}$) das duas *wavelets* refletidas nessas interfaces, o fator de qualidade Q é dado por (Irving & Knight, 2003):

$$Q = -C\pi \left(\frac{f_{R2} - f_{R1}}{t_2 - t_1} \right)^{-1}, \quad (4.3)$$

em que a constante C, para o caso de um espectro aproximadamente Gaussiano, é igual à variância do espectro do sinal ao entrar na camada em consideração (Quan & Harris, 1997). A seguir, vamos generalizar esta idéia afim de obter estimativas de Q para um meio de camadas.

4.3 –Formulação para inversão de Q em um meio de camadas

Em todos os modelos considerados, a Terra é formada por dois subespaços, sendo o subespaço superior o ar (aproximado por vácuo), que é separado da subsuperfície da Terra por uma interface plana. A subsuperfície da Terra é aproximada por um modelo de camadas, não necessariamente horizontais. Admitese a validade da ótica geométrica, no que diz respeito ao traçado de raios.

Considere que um pulso de onda incide em uma dada camada j , sendo t_{j-1} e t_j os tempos de chegada no receptor dos pulsos refletidos no topo e na base dessa camada j , respectivamente. Seja C_{j-1} a variância (em frequência ao quadrado) do pulso incidente no topo da camada j , e f_{Rj-1} e f_{Rj} os centróides de frequência dos pulsos refletidos no topo e na base da camada j , respectivamente. Desse modo a equação (4.3) pode ser escrita como:

$$Q_j = -C_{j-1}\pi \frac{t_j - t_{j-1}}{f_{Rj} - f_{Rj-1}}. \quad (4.4)$$

A equação (4.4) permite a obtenção de uma “imagem” do fator Q, *em tempo*, a partir da imagem de GPR ou Sísmica. Em outras palavras, a citada equação permite estimar Q de forma independente da informação do campo de velocidade. O ponto central da questão é que a estimativa de Q está acoplada com uma estimativa da variância do espectro do sinal de entrada (ou assinatura da fonte). A nossa proposta de inversão consiste basicamente em estimar o fator de qualidade Q a partir do deslocamento do centróide de frequência ocasionado pela propagação do

senal. A estratégia que desenvolvemos, para fazer esta estimativa, foi desacoplar a dependência de Q com a variância do sinal de referência utilizando uma abordagem que, implicitamente, corresponde a um processo de obter estimativas em “cascata” dos valores de Q . Isto é, ao trabalhar na camada j , admite-se implicitamente conhecer a deformação no pulso devido à propagação nas camadas superiores. O termo *implicitamente* é aqui utilizado no sentido de que os valores de Q das camadas são na verdade conjuntamente estimados, de modo que um único sinal de entrada, com a sua associada variância, é requerido para estimar todos os valores de Q .

É necessário aprofundar o significado da hipótese de efeito cumulativo da dispersão no traço. Para tanto, vamos utilizar o caso de duas camadas, facilmente generalizável para n camadas. O raio que é refletido na base da camada 2 realiza a seguinte trajetória: passagem de ida na camada 1, passagem de ida na camada 2, passagem de volta na camada 2 e, por fim, passagem de volta na camada 1 e registro no receptor, compondo o pulso B. Por sua vez, o raio que é refletido na base da camada 1 tem como trajetória a passagem de ida na camada 1, seguida pela passagem de volta na camada 1 e registro no receptor, compondo o pulso A. Usar o pulso A como o sinal de referência para calcular o efeito dispersivo no pulso B, é uma operação válida porque, sendo o efeito da dispersão cumulativo, o pulso B só difere do pulso A, no que diz respeito ao efeito dispersivo, apenas pelo seu trajeto na camada 2, desde que sejam válidas as hipóteses de meio composto por camadas horizontais e arranjo *zero-offset*. Registre-se, contudo, que a referida operação envolve um operador não causal porque a ordem dos efeitos é alterada no que diz respeito ao tratamento do pulso B. Em outras palavras, os efeitos no pulso B das trajetórias na camada 1 são unidos como se a última passagem de volta na camada 1 ocorresse antes da passagem do raio na camada 2. Apesar de não causal, esta operação é válida no tratamento do traço porque o operador associado ao efeito da dispersão é temporalmente comutativo, como mostra a equação (2.10).

Por facilidade operacional, vamos admitir que a secção de GPR ou de Sísmica, a ser utilizada no processo de inversão, foi submetida a um processamento prévio de modo a transformá-la numa secção *zero-offset* e sem múltiplas. Além disso, esse processamento prévio não deve utilizar nenhum procedimento que altere a forma do sinal, a exemplo de deconvolução. Por facilidade de implementação numérica do operador de propagação, associado ao modelo de Bano (2004),

trabalhamos na verdade com o coeficiente de atenuação $\alpha(f)$. Como $\alpha(f)$ é um fator multiplicativo do espaço percorrido pelo pulso, é necessário converter tempo de trânsito em espaço. Desse modo, é requerida a especificação a priori do valor médio ou de *background* V_r da velocidade na secção. Mais tarde, mostraremos que o resultado da inversão é bastante robusto em relação a variações de V_r , não comprometendo a afirmação de que a estimativa de Q é independente do campo de velocidade.

A presente proposta de inversão é válida basicamente em situações em que a terra possa ser aproximada, pelo menos por partes, por um modelo de camadas, não necessariamente horizontais, mas com boa continuidade lateral. Seja N_c o número de camadas em que o valor de Q é incógnito. O valor de Q na camada 1 (ou camada aflorante) não é uma incógnita (e não é necessário conhecê-lo), porque vamos usar como sinal de referência ou de entrada o pulso refletido na base dessa camada. Além disso, como a última camada tem espessura infinita, não é possível estimar o valor de Q para a mesma, porque o pulso que nela se propaga não retorna ao receptor. Assim, $N_c + 2$ é o número total de camadas no modelo. As incógnitas no processo de inversão consistem de $N_t \times N_c$ valores de Q, em que N_t é o número de traços. Desse modo, é permitida a variação lateral tanto de Q como da espessura da camada. Admite-se, contudo, que o mesmo número de camadas está amostrado em todos os N_t traços. É tarefa do intérprete, decidir até onde manter a continuidade lateral das camadas, durante o processo de “picagem” da secção.

A identificação do pulso de referência poderia ser implementada de várias outras maneiras, como exemplos: a) através do pulso de chegada medido na primeira camada num experimento de tomografia, b) identificando o pulso de propagação direta na primeira camada com um experimento de CMP, c) uma hipótese teórica, como um pulso de Ricker.

O procedimento de inversão por nós implementado consiste dos seguintes passos:

Passo P0: O sinal de referência é identificado visualmente, na própria secção, como o pulso refletido na base da camada 1. Escolhendo adequadamente uma janela de amostragem, o pulso de referência pode ser isolado da secção. Resulta assim desse passo a definição do pulso de referência.

Passo P1: É atribuída uma velocidade média ou de *background* V_r , admitida válida para toda a secção. Usando V_r , é calculada a espessura equivalente de cada camada, de modo a aplicar o operador de propagação no domínio do espaço usando a função $\alpha(f)$. No cálculo do operador de propagação é utilizado o modelo de dispersão proposto por Bano (2004).

Passo P2: A secção é visualmente analisada de modo a identificar os tempos duplos de transito associados com os pulsos refletidos nas bases das camadas 2 a $N_c + 1$ (a secção é “picada”). Por identificação de tempo duplo de trânsito entenda-se a medição no próprio traço do instante da primeira quebra do pulso. Resulta deste passo a identificação definitiva de N_c , N_r , dos pulsos reais ou observados refletidos nas bases das camadas 2 a $N_c + 1$, além da identificação *tentativa* dos tempos duplos de trânsito t_{ji} dos pulsos reais refletidos nas bases das camadas 2 a $N_c + 1$, de cada traço i , obtidas da “picagem” da secção.

Passo P3: Utilizando um processo automático de otimização, é identificado o ponto do subespaço de parâmetros (ou espaço dos Q's) em que são satisfeitas simultaneamente as seguintes restrições:

$$\text{Max}_{ij} \left| \tau_{ij}^{MCF,mod} (80 \ln Q_{ij}) - \tau_{ij}^{MCF,obs} \right| < \xi \quad , \quad (4.5)$$

$$\text{Min} \{ F(Q_{ij}) \} = \text{Min} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_c} \left| \max [f(80 \ln Q_{ij})] - \max [f_{ij}^{Obs}] \right|. \quad (4.6)$$

Nas equações acima, Q_{ij} é o valor do fator de qualidade incógnito da camada j do traço i ; $\tau_{ij}^{MCF,mod}$ é o tempo duplo de trânsito, associado ao traço i , em que ocorre o máximo do centróide de freqüência do pulso modelado 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 a j com reflexão na base da camada j ; $\tau_{ij}^{MCF,obs}$ é a grandeza equivalente do pulso observado; ξ é uma discrepância máxima aceitável, a priori especificada, entre $\tau_{ij}^{MCF,mod}$ e $\tau_{ij}^{MCF,obs}$; $\text{Max}[f(80 \ln Q_{ij})]$ é o valor máximo do centróide de freqüência do pulso modelado, associado com o 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 a j com reflexão na base da camada j ;

$Max(f_{ij}^{Obs})$ é a grandeza equivalente calculada com o pulso real propagado. Resultam desse passo, conjuntos de valores ótimos t_{ij}^* e Q_{ij}^* , que satisfazem simultaneamente as equações (4.5) e (4.6).

No processo de satisfazer a equação (4.5), os tempos de trânsito t_{ij} são assim modificados. Por sua vez, os máximos dos centróides de frequência são calculados através da Transformada S (ver Capítulo III). Os detalhes sobre os procedimentos de minimização da função objetivo são abaixo especificados, bem como a razão de utilizar $80 \ln Q_{ij}$ ao invés de Q_{ij} como parâmetro de inversão.

O passo P1 poderia ser automatizado com o uso de um procedimento de identificação automática de pulsos refletidos. Nesta tese, foi adotado um procedimento interpretativo e visual por mera simplicidade, visto que um passo de reconhecimento automático requer bastante sofisticação, mas não tem maior importância para o foco desta tese, que é obter estimativas de Q. Observe também que o procedimento de inversão pode ser facilmente focado em uma camada de interesse, ao invés de ser realizada em toda a seção. Para tanto, basta definir o pulso de referência como sendo o pulso refletido na base da camada imediatamente acima da camada de interesse, admitindo-se a validade da hipótese de o coeficiente de reflexão nessa camada não depende de frequência. Este assunto será tratado com mais profundidade posteriormente.

O processo de otimização simultânea das equações (4.5) e (4.6), no passo P3, foi computacionalmente implementado através do algoritmo de busca “Complex” (Richardson & Kuester, 1973). Este algoritmo não exige o conhecimento da derivada da função, permitindo assim a utilização da norma L1 no processo de ajuste acima definido. O método Complex é baseado em uma técnica de busca seqüencial, sendo bastante eficiente para funções objetivos não lineares e sujeitas a vínculos também não lineares (que serão depois implementados). O processo de busca inicia com um conjunto de pontos distribuídos aleatoriamente no espaço de parâmetros, dentro de uma região tipo “caixa”, que traduz vínculos de desigualdade associados a limites inferiores e superiores fisicamente admissíveis para os parâmetros. A função objetivo é calculada para todos os pontos; o ponto que apresenta o maior valor da função objetivo é substituído por outro, que está a uma distância igual a λ vezes a distancia entre o ponto que está sendo descartado e o centróide dos pontos restantes, na direção que liga estes dois pontos. Se o novo ponto viola um dos

vínculos “caixa”, ele é deslocado, de uma distância proporcional a δ , para dentro da região que satisfaz o vínculo. Desta forma o conjunto de pontos vai convergindo para o(s) mínimo(s) da função objetivo e, ao mesmo tempo, satisfazendo todos os vínculos impostos. Embora não haja garantia de que o Complex convirja para o mínimo global, é provável que isso ocorra desde que a distribuição inicial dos pontos seja uma boa amostragem da “caixa”. A convergência é assumida quando os valores da função objetivo de todos os pontos do Complex estão dentro de β unidades durante γ iterações consecutivas. Os parâmetros λ , β , γ e δ devem ser previamente sintonizados de modo a se adequarem à morfologia típica da função objetivo. Em geral, contudo, uma vez sintonizados, esses parâmetros são bastante robustos.

O método Complex tem como vantagens: a extrema facilidade de se incorporar vínculos ao problema, de mudar o critério de ajuste, bem como de fornecer, além da melhor estimativa, um conjunto de estimativas quase-ótimas, no entorno da melhor estimativa, com as quais é possível avaliar a estabilidade da solução do problema inverso. O uso de $80 \ln Q$, ao invés de Q , para mapear o espaço dos parâmetros fornece, como veremos, uma “métrica” mais adequada para esse espaço, o que permite um melhor mapeamento da função objetivo com o mesmo número de pontos no Complex.

Antes de iniciar a apresentação dos exemplos numéricos, cabe re-visitare estabelecer de forma mais clara as condições que o meio deve satisfazer para que o procedimento acima proposto de inversão de Q seja válido.

4.4 – Condições requeridas para validade da proposta de inversão de Q

Devem ser satisfeitas as seguintes condições:

a) O meio pode ser aproximado por partes por um conjunto de camadas com boa continuidade lateral. Admite-se que os valores de Q e de espessura das camadas possam variar lateralmente, conforme registrado em diferentes traços.

b) O sinal de referência ou de entrada deve ser conhecido. Por simplicidade, vamos usar como sinal de referência o sinal refletido na base da camada aflorante.

c) A secção utilizada precisa ser previamente tratada para que as condições de *zero-offset* e ausência de múltiplas sejam válidas.

d) Alterações do conteúdo espectral do sinal, produzidas artificialmente ou por processamento inadequado não serão incorporadas. Estas alterações podem ocorrer, por exemplo, devido à introdução de múltiplas, efeitos de tunelamento e outros (Ebrom, 2004; Odebeatu *et al.*, 2006).

e) Não é admitido explicitamente que o coeficiente de reflexão dependa de frequência. O efeito dispersivo modelado resulta apenas da propagação, sendo cumulativo. Apesar de não ser introduzida na modelagem a dependência da reflexão com a frequência, mostraremos que a abordagem pode diagnosticar a presença desse efeito, quando se lida com uma única camada alvo, situação que simula o estudo de uma camada-reservatório de petróleo.

f) Admite-se que o caminho seguido pelo raio refletido na base da camada $j+1$, durante sua passagem pelas camadas superiores, seja o mesmo caminho seguido, nessas mesmas camadas superiores, pelo raio refletido na base da camada j . Esta hipótese de efeito cumulativo, igual para todos os pulsos registrados em um mesmo traço, só é rigorosamente válida se as camadas forem horizontais e arranjo *zero-offset*. Mostraremos em um dos exemplos numéricos que meios acamadados com mergulhos geologicamente realísticos se enquadram bem dentro dessa aproximação.

É importante destacar que a abordagem acima proposta prescinde da modelagem de amplitude do sinal porque ela se baseia apenas na *deformação* do sinal. Desse modo, não é necessário modelar a diminuição de amplitude pela reflexão ou transmissão através de uma superfície; este é o ponto chave para prescindir do campo de velocidade. Quando nos referirmos ao termo pulso modelado, entenda-se que na verdade queremos designar apenas a modelagem do deslocamento do centróide de frequência do pulso.

4.5 – Exemplos de inversão de Q

Apresentamos a seguir alguns testes efetuados com modelos sintéticos. Serão apresentados os seguintes casos:

- i) GPR - Modelo de camadas planas horizontais, analisando a sensibilidade da estimativa em relação ao valor verdadeiro de Q , profundidade da camada, espessura da camada, variações da velocidade de *background* do meio, erro na atribuição inicial dos tempos de propagação dos pulsos refletidos e contaminação do pulso com ruído, entre outros efeitos.
- ii) GPR - Modelo de camadas não horizontais, de modo a avaliar a robustez da estimativa de Q em relação à validade da hipótese de caminho único dos raios nas camadas superiores.
- iii) Sísmica - Modelo com camada apresentando coeficiente de reflexão dependente de frequência, de modo a avaliar a eficiência da estimativa de Q (neste caso entendido como um Q efetivo ou equivalente) em diagnosticar a presença de tal camada. Os dados sintéticos serão gerados com um modelo de atenuação diferente do modelo de Bano (2004), que é usado no operador de propagação da modelagem do pulso. Desse modo, pode-se avaliar também a robustez do método a diferentes modelos de atenuação.

O uso do programa Complex demanda a especificação prévia dos parâmetros λ (que controla o novo posicionamento do pior ponto em relação ao centróide), β (que controla a variância dos pontos do Complex e compõe um dos critérios de parada), γ (que especifica o número máximo de tentativas, visando diminuir a função objetivo, e compõe também um critério de parada) e δ (que controla a reflexão de um ponto que viola o vínculo “caixa”). Os parâmetros β e γ são determinantes na definição do critério de parada, afetando a variância dos pontos do Complex obtida no final do processo iterativo. Após uma série de testes, com modelos sintéticos com diferentes graus de dificuldade, sintonizamos estes parâmetros nos seguintes valores: $\lambda = 1.30$, $\beta = 0.10$, $\gamma = 10$ e $\delta = 0.64$. Excepcionalmente, em algumas situações em que foi necessária uma melhor definição do desvio padrão das soluções, β foi diminuído para 0.09. Nestes testes, foi também sintonizado o valor 0.1 para o parâmetro ξ da equação (4.5), que define o critério de proximidade entre os tempos duplos de trânsito, associados aos

máximos dos centróides de freqüência dos pulsos observado e propagado (ou modelado).

Não seguimos a recomendação de Richardson & Kuester (1973) em relação a escolha do numero de pontos no Complex, que é de usar $N+1$, em que N é o número de incógnitas. Preferimos usar um número maior de pontos porque, em geral, queríamos garantir uma boa amostragem do espaço de parâmetros, de modo a proporcionar um bom mapeamento da função objetivo (em estágios intermediários da convergência), além de obter uma estatística significativa da variabilidade ou estabilidade da solução (uma vez satisfeitos os critérios de parada). Por completeza o número de pontos do Complex será fornecido em cada exemplo.

4.5.1 – GPR: Modelo de camadas horizontais

A estrutura básica do primeiro modelo (Modelo 1) está mostrada na Figura 4.1. O Modelo 1 contém quatro camadas horizontais, cujos parâmetros físicos e geométricos são apresentados na Tabela 4.1.

Modelo 1			
Camada	Espessura (m)	ϵ_r	Q
1	0.01	6	400
2	0.49	25	Variável
3	1.0	9	Variável
4	∞	25	-

Tabela 4.1 – Parâmetros físicos e geométricos do Modelo 1, mostrado na Figura 4.1.

Observe que são mantidos fixos os parâmetros geométricos, os valores de permissividade elétrica relativa e o valor do fator de qualidade da camada 1 (associado ao pulso de referência). Vários exemplos serão apresentados em que os valores de Q das camadas 2 e 3 foram variados. Numa visão geral, o objetivo dos exemplos é investigar a acuidade e sensibilidade da inversão de Q obtida para uma camada rasa e dispersiva (o valor verdadeiro de Q a ser utilizado na camada 2 será relativamente baixo).

Com o Modelo 1 apresentaremos os resultados da inversão, variando Q_2 e Q_3 , nos seguintes casos: a) usando um único traço, b) usando seis traços, sem vínculo de continuidade lateral e c) usando seis traços, com vínculo de continuidade lateral.

4.5.1.1 – Modelo 1: Inversão de um único traço

No primeiro exemplo, os valores verdadeiros de Q_2 e Q_3 são iguais a 5 e 15 respectivamente. Iremos usar como incógnita na inversão apenas Q_2 . Na construção da secção de GPR sintética utilizamos como pulso da fonte um pulso de Ricker de frequência dominante de 200 MHz (Figura 4.2). Não foram consideradas as múltiplas e, no cálculo da amplitude dos pulsos refletidos, não foram levados em conta os efeitos dos coeficientes de reflexão das camadas, nem tampouco a diminuição da amplitude devido ao espalhamento geométrico. Dessa forma, a amplitude do sinal incorpora apenas a absorção sofrida pelo sinal ao atravessar os meios dissipativos. Lembremos que tal abordagem não é restritiva, porque o método de inversão é baseado no deslocamento do centróide de frequência, que é sensível apenas às alterações de forma do pulso. Esta abordagem de construção da secção de GPR foi utilizada em todos os demais exemplos a serem apresentados. Por facilidade, designaremos por sinal/pulso observado o sinal/pulso utilizado na inversão. Lembremos ainda que para efetuar a inversão do sinal utilizamos o pulso refletido na base da camada 1 como sendo o pulso de referência.

No Complex, foram utilizados 12 pontos e os critérios de parada foram satisfeitos após 121 iterações; o valor mínimo da Função Objetivo é igual a 0.14. O valor estimado para Q_2 é igual a 4.98 e a média e o desvio padrão do conjunto de soluções são iguais 4.99 e 0.02, respectivamente. Nas figuras 4.3 [(a) e (b)] apresentamos o sinal observado e o sinal modelado com a estimativa $Q_2^* = 4.98$. Pode-se observar que a coincidência entre o sinal observado e o sinal modelado é perfeita.

O valor estimado de Q_2 ($Q_2^* = 4.98$) é uma excelente aproximação do valor verdadeiro. Apesar da simplicidade do exemplo, verificamos que tal fato sempre ocorre quando o valor de Q é muito baixo. Em outras palavras, a dispersão é muito acentuada para um valor baixo de Q , o que proporciona maior acuidade na inversão. Por outro lado, veremos que quando o valor verdadeiro de Q é alto, a estimativa é relativamente pior.

Vamos agora fixar o valor de Q_2 e usar apenas Q_3 como incógnita. Os resultados obtidos da inversão são: melhor estimativa de Q_3 igual a 15.08, média e desvio padrão das soluções iguais a 15.01 e 0.06, respectivamente. Nas figuras 4.3 [(c) e (d)] apresentamos o sinal observado e o sinal modelado com $Q_3^* = 15.08$.

Novamente a coincidência entre o sinal observado e o sinal modelado é perfeita, além da estimativa ser uma boa aproximação do valor verdadeiro.

Analisemos agora a inversão simultânea de Q_2 e Q_3 , usando os pulsos refletidos nas bases das camadas 2 e 3. Com o número de pontos no Complex igual a 24, obtivemos como resultado da inversão, depois de 357 iterações, os seguintes valores: melhor estimativa de Q_2 e Q_3 iguais a 5.02 e 14.95, respectivamente; média e desvio padrão para Q_2 iguais a 5.00 e 0.01, respectivamente; e média e desvio padrão para Q_3 iguais a 15.04 e 0.14, respectivamente. Na Figura 4.4 apresentamos o sinal observado e o sinal modelado com a melhor solução de Q_2 e Q_3 .

O fato de que a média das soluções forneça valores muito próximos da melhor solução evidencia que o problema inverso é fracamente não linear. Em outras palavras, a curvatura do “vale” da função objetivo no espaço de parâmetros é relativamente pequena. A Figura 4.5 apresenta um mapa de isovalores da função objetivo, obtida em um estágio intermediário do Complex, na iteração de número 50. Foram utilizados 180 pontos no Complex afim de proporcionar uma melhor amostragem. Esta figura foi obtida da interpolação dos valores da função objetivo, usando o logaritmo do fator de qualidade (a variável $X = 80 \ln Q_{ij}$) para mapear o espaço de parâmetros. Esta visão corrobora a interpretação acima realizada de que o problema é fracamente não linear. Não obstante, a esparsa amostragem produz a falsa impressão de não unicidade da solução (observe o fechamento de quatro mínimos, além do mínimo esperado em torno dos valores verdadeiros), mesmo tendo sido usada uma “métrica” adequada para o espaço. Caso o logaritmo de Q não fosse usado, a falsa impressão de não unicidade da solução seria ainda pior, conforme mostra a Figura 4.6. Neste sentido é importante enfatizar o papel de usar o logaritmo de Q no lugar de Q como variável de busca; o logaritmo de Q dá uma “métrica” adequada do espaço, proporcionando uma melhor representação da função objetivo, com o mesmo numero de pontos no Complex. Como consequência, há um ganho de robustez e eficiência computacional na evolução do Complex. Estas são as razões que justificam a opção de trabalhar com o logaritmo de Q ao invés de Q ; o número 80 é apenas um fator de escala.

Podemos ainda observar na Figura 4.5 que existe um “vale” da função objetivo passando pelo ponto ($Q_2=5$, $Q_3=15$) e que tem direção tendendo a “NNW”, especialmente no quadrante “SSE”. Este comportamento é facilmente explicado uma

vez que, para valores de $Q_2 < 5$, o atendimento do mínimo da função objetivo exige que $Q_3 > 15$ e vice versa. Em outras palavras, se a atenuação é subestimada na camada 2, ela precisa ser superestimada na camada 3 e vice-versa, pois o efeito da dispersão é cumulativo.

Ainda com o Modelo 1, fizemos vários outros testes variando os valores verdadeiros de Q_2 e Q_3 e invertendo-os simultaneamente. A Tabela 4.2 sumariza os resultados obtidos. Para os Exemplos 2 e 3, respectivamente, as figuras 4.7 e 4.8 apresentam as seções de GPR utilizadas, as figuras 4.9 e 4.10, o ajuste entre os pulsos observado e modelado, e as figuras 4.11 e 4.12, os mapas da função objetivo. Neste mapeamento, utilizamos a “métrica” do logaritmo no espaço de parâmetros. Para o Exemplo 3, é mostrado na Figura 4.13 o mapa da função objetivo com a “métrica” linear. Observe novamente a inadequação desta “métrica” e a presença de falsos mínimos.

Podemos observar (Tabela 4.2) que o resultado da inversão é bastante bom. O erro percentual na estimativa de Q_3 apresenta certa correlação com o crescimento de Q , o que não é perceptível no caso de Q_2 . Embora os valores de Q utilizados nos três testes apresentem uma variação mais ampla na camada 3 ($Q_3 = 15, 20$ e 50) do que na camada 2 ($Q_2 = 5, 10$ e 15), é de se esperar que, para maiores valores de Q , a sua estimativa seja inevitavelmente mais pobre. De qualquer maneira, os resultados obtidos nesses testes foram bastante promissores, indicando que a abordagem de inversão proposta funciona muito bem (pelo menos para esta situação simples). Devemos lembrar que, em cada um desses testes, foi invertido apenas um traço de cada modelo. Assim o número de pontos do Complex ($N=12$) utilizado é muito grande em vista do número de parâmetros a serem estimados (apenas 2).

Inversão de um traço para determinação de Q_2 e Q_3											
Modelo 1			Exemplo 1			Exemplo 2			Exemplo 3		
Cam	Esp. (m)	ϵ_r	Q	Q_{est}	Erro(%)	Q	Q_{est}	Erro(%)	Q	Q_{est}	Erro(%)
1	0.01	6	400	-	-	400	-	-	400	-	-
2	0.49	25	5	5.02	0.40	10	10.01	0.10	15	14.94	0.40
3	1.0	9	15	14.9	0.33	20	19.79	1.05	50	50.77	1.54
4	∞	25									

Tabela 4.2 – Resumo dos resultados da inversão usando apenas um traço. As estimativas mostradas correspondem ao ponto mínimo do Complex, após satisfeitos os critérios de parada.

Voltemos à Figura 4.12, que apresenta o mapa da função objetivo na iteração 50 utilizando 180 pontos no Complex. Observe a presença de um extenso vale de direção “NS” que é resultante da grande diferença de estabilidade na estimativa dos dois parâmetros. Isto é, Q_2 , por ter valor relativamente baixo, é muito bem determinado em comparação com Q_3 , que é relativamente alto. A rigor, o número de pontos no Complex ainda é pequeno, ocasionando a aparência de mínimos locais em setores de baixo gradiente. Nesse sentido, observe que a função apresenta pelo menos dois “aparentes” mínimos locais: um no ponto ($Q_2 = 13.8$, $Q_3 = 52.4$), onde a função objetivo é igual a 1.24, e o outro mínimo no ponto ($Q_2 = 12.2$, $Q_3 = 124$), onde a função objetivo é igual a 2.05. Para corroborar a afirmação sobre o aparecimento de falsos mínimos locais, observemos na Figura 4.13 a visão da função objetivo interpolada com a “métrica” linear no espaço de parâmetros. Nesta figura é evidente a má amostragem do espaço ocasionando o aparecimento de falsos mínimos locais.

4.5.1.2 – Modelo 1: Inversão simultânea de seis traços, sem vínculo de continuidade lateral

Lembremos que utilizar seis traços implica multiplicar por 6 o número de incógnitas. Para os valores verdadeiros de Q_2 e Q_3 , usados no Exemplo 3 acima, vamos repetir a inversão simultânea desses parâmetros, usando seis traços, mas sem adicionar vínculo de continuidade lateral. Nenhum ruído foi acrescentado à secção de GPR (Figura 4.8). As estimativas obtidas estão mostradas na Tabela 4.3 e as secções observada e modelada estão apresentadas na Figura 4.14. Por sua vez, os pulsos modelados com os valores estimados de Q_2 e Q_3 , para cada traço, podem ser comparados com os pulsos observados na Figura 4.15. A convergência no Complex foi alcançada em 718 iterações.

Nas figuras 4.15 [(a) e (c)] podemos observar que, apesar do erro alto na estimativa de Q_3 no traço 5 (erro de 55%), os sinais modelados não diferem muito do sinal observado. Para uma melhor análise da discrepância entre os sinais observado e modelado, para os vários traços, apresentamos nas figura 4.15 (b) e (d) os detalhes dos picos dos pulsos refletidos nas bases das camadas 2 e 3. Para cada traço, o pulso modelado associado à reflexão na base da camada 2 depende apenas de Q_2 e, assim, a amplitude do sinal modelado está diretamente relacionada com o valor estimado de Q_2 (Figura 4.15 (b)). Observe que, quanto menor é o fator de

qualidade, maior é a absorção do sinal e menor a amplitude. Por sua vez, o pulso modelado, associado à reflexão na base da camada 3, depende dos valores estimados de Q_2 e Q_3 .

Resultados da inversão sem vínculo				
Traço	Q_2^*	Erro (%)	Q_3^*	Erro (%)
1	14.9	0.7	48.2	3.6
2	15.4	2.7	47.3	5.4
3	14.2	5.3	59.5	19
4	15.0	0.0	47.0	6
5	14.5	3.3	77.6	55.2
6	14.9	0.7	57.6	4.8
Valores verdadeiros: $Q_2 = 15$, $Q_3 = 50$				

Tabela 4.3 – Resultados da inversão usando o Modelo 1 – Exemplo 3 e seis traços da secção de GPR, mostrada na Figura 4.14 a. As estimativas mostradas correspondem ao ponto mínimo do Complex, após satisfeitos os critérios de parada. Não foi utilizado o vínculo de continuidade lateral.

A má amostragem pode eventualmente dificultar a convergência do Complex. Esta situação foi constatada neste exemplo quando efetuamos a inversão simultânea de Q_2 e Q_3 , com seis traços (o que implica 12 incógnitas), mas utilizando apenas 21 pontos no Complex. Esta é uma escolha claramente inadequada e que pode levar a resultados desastrosos. Nesse caso, obtivemos, depois de 363 iterações, as estimativas $Q_2^*=13$ e $Q_3^*=158$ para o segundo traço. Apesar dos resultados obtidos para os demais traços não terem sido tão ruins, o resultado obtido para Q_3 no segundo traço difere do valor correto por um fator maior que 3. Por outro lado, o aumento excessivo de pontos no Complex torna a convergência muito lenta, elevando o custo computacional. Desta forma, o valor adequado de pontos no Complex é uma questão bastante crítica, e deve ser investigada com cuidado. Depois de vários testes, chegamos a conclusão que um bom compromisso entre amostragem e eficiência computacional é obtido com um número de pontos no Complex da ordem do triplo do número de incógnitas, proporção esta válida para um número de incógnitas da ordem de 10. Os resultados acima apresentados (Tabela 4.3) foram obtidos com 39 pontos no Complex, representando, portanto, resultados

típicos dentro desse compromisso entre eficiência computacional e amostragem do espaço de parâmetros. Podemos verificar que as estimativas de Q_2 são boas; apenas na estimativa do traço 3 houve um erro maior que 5%. A estimativa de Q_3 , entretanto, foi mais pobre, chegando a um erro maior que 55% no traço 5. Não obstante, observe que os sinais modelados com os valores estimados na inversão reproduzem bem o sinal observado, como pode ser apreciado na Figura 4.14.

4.5.1.3 – Modelo 1: Inversão simultânea de seis traços, com vínculo de continuidade lateral

Quando válido no problema geológico em estudo, a adição de um vínculo de continuidade lateral, pode resolver os problemas colocados tanto no sentido de proporcionar uma convergência mais rápida do Complex como de fornecer uma estimativa mais acurada de Q . Para testar essa hipótese, adicionamos como vínculo no Complex (além das restrições dadas nas equações (4.5) e (4.6) e do vínculo tipo “caixa”), uma exigência de continuidade lateral na variação espacial de Q . Este vínculo foi imposto exigindo que a variável $X = 80 \ln Q$, de uma dada camada e para o traço i , diferisse da correspondente variável no(s) traço(s) vizinho(s) por no máximo ± 1 . Embora seja não linear, esse vínculo é facilmente implementável no Complex através de uma restrição de desigualdade dependente dos parâmetros ou implícita. Observe que a condição de continuidade lateral está adequada para a “métrica” do espaço de parâmetros.

Alguns resultados da inversão, utilizando o vínculo de continuidade lateral, estão mostrados na Tabela 4.4. A convergência do Complex se deu após 398 iterações. O maior erro na estimativa de Q_2 foi de 1.3% para os traços 1, 4 e 5; o maior erro na estimativa de Q_3 foi de 4.4% para o traço 4. A seção modelada pode ser comparada com a seção observada na Figura 4.16.

Comparando os resultados listados nas Tabelas 4.3 e 4.4, pode-se verificar que o vínculo de continuidade lateral estabilizou as estimativas de Q_3 . Observe também a grande similaridade entre traços observados e modelados (Figura 4.16). A visualização das discrepâncias existentes entre eles só é possível detalhando, por exemplo, o pico principal do pulso refletido na base da camada 2, como é mostrado nas figuras 4.17 (a) e (b). Fica novamente aqui evidenciada a relação entre amplitude do pulso refletido na base da camada 2 e o valor de Q_2 . Nas figuras 4.17

(c) e (d) é mostrado o ajuste entre pulsos observado e modelado associados com a reflexão na base da camada 3; fica patente mais uma vez a grande similaridade entre todos eles.

Resultados da inversão com vínculo				
Traço	Q_2^*	Erro(%)	Q_3^*	Erro (%)
1	15.2	1.3	50.7	1.4
2	15.0	0.0	51.5	3.0
3	14.9	0.7	51.8	3.6
4	14.8	1.3	52.2	4.4
5	14.8	1.3	51.0	2.0
6	14.9	0.7	50.7	1.4
Valores verdadeiros: $Q_2 = 15$, $Q_3 = 50$				

Tabela 4.4 – Resultados da inversão usando o Modelo 1, seis traços da secção de GPR (Figura 4.16) e o vínculo de continuidade lateral. As estimativas mostradas correspondem ao ponto mínimo do Complex, após satisfeitos os critérios de parada.

Afim de melhor comparar os pulsos modelados resultantes da inversão sem e com o vínculo de continuidade lateral, devemos examinar em detalhe os picos principais das reflexões nas bases das camadas 2 e 3 (figuras 4.15 (b) e (d) e figuras 4.17 (b) e (d)). Quando não foi utilizado o vínculo, o pico do pulso refletido na base da 2 (Figura 4.15 (b)) varia de aproximadamente 16100 (traço 3) até 16900 (traço 2), o que corresponde a um erro na amplitude de 3.6 %. Por outro lado, quando o vínculo foi usado (Figura 4.17(b)), o pico do pulso refletido na mesma interface varia aproximadamente entre 16600 (traço 4) e 16800 (traço 1), o que corresponde a um erro na amplitude de apenas 0.6%. Por sua vez, para o pulso refletido na base da camada 3, quando não foi usado o vínculo (Figura 4.15 (d)), o pico varia entre -12700 (traço 4) e -13900 (traço 5), o que corresponde a um erro na amplitude de 7.8%; com o vínculo, o pico (Figura 4.17 (d)) variou entre -12900 (traço 4) e -13100 (traço 1), o que corresponde a um erro na amplitude de apenas 0.8%.

Como já destacamos, o programa de busca que utilizamos pode levar a uma solução equivocada, quando o espaço de parâmetros está mal amostrado, o que é agravado em regiões de baixo gradiente, situação em que a convergência é lenta. A solução para este problema seria utilizar na fase final de convergência um outro

programa de busca que apresentasse maior eficiência computacional, preservando evidentemente os vínculos em uso.

Outro ponto importante a ser mencionado é a questão da amplitude do sinal a ser invertido. Como já salientamos anteriormente, um dos pontos fortes da nossa proposta de inversão é que ela não depende do conhecimento da amplitude do sinal a ser analisado. Como estamos determinando o fator de qualidade a partir do deslocamento do centróide de frequência e como este, em princípio, não depende de um fator multiplicativo na amplitude do sinal, a nossa estimativa de Q não depende de um conhecimento da amplitude verdadeira do sinal. Dessa forma, não precisamos nos preocupar com os vários mecanismos que afetam a amplitude do sinal (espalhamento geométrico, coeficiente de reflexão e transmissão nas várias interfaces, etc) para obtermos uma boa estimativa de Q . Contudo, a validade dessa aproximação para situações reais pode ser eventualmente comprometida porque os mecanismos de perda de amplitude fazem com que as informações sobre o centróide de frequência fiquem mais difíceis de serem determinadas. Isso pode ocorrer tanto como uma consequência da existência de ruído no sinal, como devido ao próprio tratamento numérico do processamento. Este último fator é particularmente sério no caso de GPR, onde o sinal, em geral, é gravado em *RADAN 8 bits format*. Como consequência dessa perda de informação, o nosso programa de inversão pode tendenciosamente subestimar o valor de Q . Dessa forma, quando for possível reconhecer os fatores determinantes da diminuição de amplitude, esta deve ser corrigida adequadamente antes de se proceder à inversão. Em todas as seções de GPR sintéticas que utilizamos para testar o nosso esquema de inversão até aqui, a diminuição de amplitude do sinal é devida exclusivamente à atenuação do sinal causados pelos efeitos dissipativos do meio.

4.5.1.4 – Estabilidade quanto à velocidade de “*background*”

Um dos pontos fortes do nosso esquema de inversão é o fato de não necessitarmos do campo de velocidade. A atenuação é calculada com o uso de uma velocidade de *background* para o meio. Vamos mostrar que a solução obtida é estável para variações no valor desta velocidade.

Como vimos no Capítulo III, para o caso de meios fracos a moderadamente dissipativos ($Q > 5$), a atenuação tem uma dependência linear com a frequência

(Bano, 2004), como está mostrado na equação (4.1). Desta forma, conhecendo o tempo duplo de percurso ($t_i - t_{i-1}$) do raio na camada i podemos determinar o fator de qualidade Q_i calculando o deslocamento do centróide de frequência do pulso refletido na base da camada i , utilizando a equação (4.3). Assim, em princípio, a estimativa de Q_i não depende do valor da velocidade do meio e podemos utilizar uma velocidade de *background* V_r arbitrária para fazermos a inversão. Entretanto, para valores pequenos de Q , a equação (4.1) é válida apenas de forma aproximada e, nestes casos, a estimativa de Q deve depender do valor da velocidade de *background* utilizada.

Para testar a robustez da inversão à variação da velocidade de fundo (*background*), utilizamos os Exemplos 1 e 2 do Modelo 1 (na Tabela 4.2 estão apresentados os valores verdadeiros de Q). Nestes exemplos, observe que os valores de Q são pequenos e, portanto, a hipótese da independência da atenuação com a velocidade pode ser testada próximo do seu limite de validade.

		Exemplo 1				Exemplo 2			
ε_r	V_r (m/ηs)	Q_2^*	Q_3^*	F_{MIN}	N.iter.	Q_2^*	Q_3^*	F_{MIN}	N.iter.
6	0.1224	5.02	15.08	0.078	236	9.99	20.16	0.080	203
9	0.0999	5.02	14.95	0.026	239	10.01	19.79	0.081	203
25	0.0600	5.02	15.05	0.085	271	10.03	20.00	0.089	207
40	0.0474	5.03	14.88	0.035	250	10.00	20.26	0.116	182
		Valores verdadeiros $Q_2=5$ e $Q_3=15$				Valores verdadeiros $Q_2=10$ e $Q_3=20$			

Tabela 4.5 – Resultados da inversão usando o Modelo 1, um traço da secção de GPR (Figura 4.10), variando a velocidade de *background*. As estimativas mostradas correspondem ao ponto mínimo do Complex, após satisfeitos os critérios de parada.

Para o teste, variamos a velocidade de *background* entre 0.1224 m/ηs e 0.0474 m/ηs, desse modo variando a permissividade relativa do *background* desde 6 até 40, passando pelos valores 9 e 25. Os resultados que obtivemos estão expressos na Tabela 4.5.

Observe na Tabela 4.5 que, utilizando a velocidade de *background* igual a 0.0474 m/ηs ($\varepsilon_r = 40$), o maior erro percentual na estimativa de Q_2 foi igual a 0.6% e

o maior erro na estimativa de Q_3 foi de 0.8%. Para o Exemplo 2, os resultados não foram diferentes: o maior erro estimativa de Q_2 foi de 0.3%, quando utilizamos a velocidade de *background* de 0.0600 (m/ηs), e, na estimativa de Q_3 , o maior erro foi de 1.3%, quando utilizamos a velocidade de 0.0474 m/ηs. Desse modo concluímos que a abordagem de inversão é bastante robusta quanto ao valor da velocidade de *background*.

4.5.1.5 Estabilidade quanto a erros no tempo de “picagem”

Vamos agora examinar a estabilidade da estimativa de Q em relação a um erro no tempo de “picagem”, ou seja, um erro na determinação do valor inicial do tempo duplo de percurso ($t_j - t_{j-1}$) do raio na camada j . A determinação precisa de t_j (ou seja, a medição do instante da primeira quebra do pulso refletido na base da camada j) é bastante difícil de ser realizado na prática devido: a) à presença de ruído, que pode criar um falsa quebra, e b) à diminuição da amplitude, que pode mascarar o instante da primeira quebra. Estes dois fatores (além de outros) introduzem inevitavelmente uma imprecisão na determinação de ($t_j - t_{j-1}$). Além disso, mesmo que tivéssemos uma total precisão na determinação de t_j (caso em que o pulso seria uma função δ de Dirac), haveria, inevitavelmente, uma imprecisão na determinação do centróide de frequência, devido ao Princípio de Incerteza de Heisenberg.

Como já dissemos, o tempo de “picagem” estabelece apenas o valor inicial de ($t_j - t_{j-1}$). No processo de inversão, a grandeza ($t_j - t_{j-1}$) será otimizada como parte do processo de inversão, através da equação (4.5). Lembremos ainda que o critério de otimização é fazer com que seja minimizada a discrepância entre os tempos em que ocorrem os picos dos centróides de frequência observado e modelado. Em outras palavras, utilizamos as vantagens da Transformada S, de tal modo que a determinação do tempo duplo é corrigida pela comparação entre a posição do máximo do centróide de frequência do sinal observado e a posição do máximo do centróide de frequência do sinal modelado, de modo a satisfazer a condição dada pela equação (4.5).

Utilizando o Modelo 1, com os valores de Q do Exemplo 1, testamos o programa de inversão para vários valores iniciais do tempo t_2 , mantendo o mesmo tempo t_3 inicial. Os resultados da inversão estão mostrados na Tabela 4.6. Na Figura 4.18 é mostrado o sinal observado e o sinal modelado no caso em que o valor de t_2 na “picagem” foi adotado como sendo 20.0 ηs , que é claramente inadequado. Observe que, neste caso, o primeiro lóbulo do pulso refletido na base da segunda camada está fora da janela (t_2, t_3) onde será analisado o pulso. O programa automaticamente corrige a posição de t_2 , resultando em valores corretos dos tempos $(t_2^* - t_1^*)$ e $(t_3^* - t_2^*)$, que são os tempos duplos de percurso do raio nas camadas 2 e 3, respectivamente. Os valores finais dos tempos t_2^* e t_3^* podem ser avaliados na Tabela. 4.6.

Modelo 1 – Análise de sensibilidade em relação ao tempo de “picagem”							
t_2 inicial (ηs)	t_2^* ótimo (ηs)	t_3 inicial (ηs)	t_3^* ótimo (ηs)	Q_2^*	Q_3^*	Função Objetivo	No. Iter.
14.09	16.34	35.45	36.34	5.01	14.97	0.061	205
14.49	16.34	35.45	36.34	5.03	15.06	0.870	233
14.69	16.36	35.45	36.36	4.99	15.11	0.073	226
16.59	16.30	35.45	36.44	4.99	15.18	0.059	261
16.89	16.30	35.45	36.44	5.01	15.03	0.050	255
18.00	16.34	35.45	36.34	5.00	15.01	0.037	247
19.00	16.36	35.45	36.34	5.00	15.04	0.059	242
20.00	16.40	35.45	36.42	5.01	15.06	0.092	241
Valores Verdadeiros: $Q_2 = 5$ e $Q_3 = 15$							

Tabela 4.6 – GPR – Modelo 1 – Exemplo 1. Análise de sensibilidade das estimativas de fator de qualidade em relação ao tempo de “picagem”. As estimativas mostradas correspondem ao ponto mínimo do Complex, após satisfeitos os critérios de parada.

A variabilidade do tempo t_j pode também ser controlada com restrições de desigualdade dentro do programa de inversão, que podem ser acionados quando, por exemplo, dispomos de informações sobre a precisão na determinação de t_j e desejamos que sua variabilidade seja restrita a certo intervalo previamente determinado.

Outro aspecto a ressaltar na questão da identificação do instante da primeira quebra do pulso está relacionado com a maneira como foi construído o radargrama sintético. O uso de um pulso de fonte não causal (como o pulso de Ricker, por exemplo) implica, pelo menos em princípio, na não existência do instante da primeira quebra. Evidentemente, na prática, o pulso é cortado em um dado instante, o que pode trazer alguma dificuldade, principalmente quando trabalhamos no espaço de frequência, devido ao indesejável efeito de Gibbs. Para minimizar o efeito de Gibbs, estendemos o pulso um pouco além do verdadeiro instante da primeira quebra. Assim, na “picagem”, usualmente o valor de t_j é subestimado. Contudo, como foi mostrado, mesmo um erro grosseiro na “picagem” de t_j não compromete a convergência do esquema de inversão.

4.5.2 – GPR: Modelo de camadas não horizontais

O modelo utilizado neste teste de inversão, que vamos designar por Modelo 2, está apresentado na Figura 4.19. Este modelo simula um ambiente sedimentar em que os mergulhos das camadas são significativos, podendo atingir 30 graus. Na escala da Sísmica, este modelo representa o ambiente de uma bacia sedimentar. Na escala do GPR, ele poderia representar, por exemplo, a deposição em torno de um canal fluvial. O tempo de percurso, em função da posição da fonte para cada raio, está apresentado na Figura 4.20 e as trajetórias modeladas para os raios estão apresentadas na Figura 4.21. Uma seção de GPR *zero-offset* ilustrativa está mostrada na Figura 4.22. Para construir essa seção, utilizamos como sinal da fonte um pulso de Ricker de frequência de 200 MHz e consideramos que o fator de qualidade para todas as camadas é igual a 400. A seção de GPR contém 161 traços com um espaçamento entre os traços de 5 cm. Para melhor visualizar a forma do pulso refletido nas várias interfaces, apresentamos também na Figura 4.22 o traço 81, correspondente à coordenada horizontal igual a 4.0 m. Esta seção de GPR não será utilizada diretamente na inversão porque os valores de Q serão diferentes de 400 em algumas camadas.

No primeiro exemplo de inversão, utilizamos os valores verdadeiros de Q iguais a 400, 10, 10, 400 e 400 para as camadas 1 até 5, respectivamente. Na inversão foi utilizado apenas o traço 55, mantendo como incógnitas as quatro últimas camadas (lembramos que o pulso refletido na base da primeira camada define o

sinal de referência). Um detalhe do traçado dos raios no entorno do traço 55 (posição 3.7 m) está apresentado na Figura 4.23.

O ajuste entre os traços modelado e observado está apresentado na Figura 4.24, em cujo topo uma tabela registra a melhor estimativa do Complex. Observe que os valores estimados para o fator de qualidade das camadas 2 e 3 foram bons, corroborando o fato anteriormente já registrado que a estimativa de Q é de boa qualidade para camadas relativamente dispersivas. Por outro lado, para as camadas mais profundas (4 e 5), em que o valor verdadeiro de Q é alto, foram obtidas estimativas em geral bastante diferentes dos valores verdadeiros. Não obstante, as estimativas dessas camadas profundas indicam que as mesmas têm alto valor de fator de qualidade. Vale ainda registrar que, na “métrica” da inversão, a discrepância entre logaritmo de 400 e logaritmo de 676 é relativamente pequena, embora essa mesma diferença pareça ser maior no espaço “linear” de Q .

Neste modelo não é rigorosamente válida a hipótese de que seja único o caminho seguido pelo raio nas camadas superiores. Neste sentido, é surpreendente verificar que esta hipótese ainda é uma boa aproximação para o traço 55, que atravessa camadas apresentando mergulhos de até 22 graus (Figura 4.23).

Um segundo exemplo de inversão foi realizado com o Modelo 2, usando agora os valores verdadeiros de Q iguais a 400, 400, 400, 5 e 400, para as camadas de 1 a 5, respectivamente. Na inversão, foi utilizado o traço 21 (posição 2.0 m). O aspecto interessante deste caso é que, pelo fato da camada 5 ser pouco espessa no entorno do traço 21 (Figura 4.19, posição horizontal 2.0 m), os pulso refletidos nas bases das camadas 4 e 5 sofrem uma interferência construtiva (tunelamento). Assim, é difícil separar o pulso refletido na base da camada 4 daquele refletido na base da camada 5. Num primeiro teste fixamos corretamente ($Q=400$) os valores de Q de todas camadas, exceto o da camada 4, que deixamos livre.

O resultado da inversão é mostrado na Figura 4.25. Na parte (a) desta figura, é graficada a função objetivo $F(Q_4)$, em que pode ser observado que o mínimo da função objetivo foi de 1.7 para $Q_4^*=5.1$. Ainda na Figura 4.25 (a) vemos que esse mínimo é muito bem definido; isso evidencia que, apesar da camada estar profunda, o baixo valor de Q permite que seja realizada uma boa estimativa. Nas figuras 4.25 (b) e (c) vemos que o grau de ajuste entre os sinais observado e modelados é apenas razoável, quando comparado com os casos de ajuste anteriores.

Vamos agora discutir o mesmo exemplo, ainda com o traço 21, porém usando Q_5 como incógnita. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.26. Em (a) desta figura, podemos observar que a função objetivo não tem um mínimo bem definido como no caso anterior. Na verdade é possível obter apenas um limite inferior para a estimativa de Q_5 . Observe na Figura 4.26 (c) que o ajuste entre os sinais observado e modelado é muito bom para o valor $Q_5^* = 62$ (mínimo da função objetivo: $F(Q_5^*)=0.29$), e mesmo $Q_5=22.6$, quando a função objetivo é igual a 2.57, o ajuste ainda é bastante razoável.

O último exemplo de inversão usando o Modelo 2 foi realizado utilizando quatro camadas no modelo interpretativo. Em outras palavras, o traço 21 foi invertido admitindo-se que havia reflexões em apenas três camadas, além da camada aflorante associada com o pulso de referência. O nosso objetivo foi testar como se comporta a abordagem de inversão quando aplicada a um pulso resultante de um evento de tunelamento. Apenas Q_4 é incógnita na inversão. A “picagem” do pulso resultante do evento de tunelamento foi feito no entorno do tempo duplo de trânsito igual a 52 ns, registrando desse modo apenas o primeiro lóbulo negativo e o máximo central do pulso.

Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.27. Em (a), observe que a estimativa de Q_4 é muito bem definida: o valor obtido foi igual a 4.5, bastante próximo, portanto, do valor verdadeiro da camada 4 do modelo verdadeiro. As figuras 4.27 (b) e (c) mostram comparações entre os pulsos observado e modelados, tanto com a melhor estimativa de Q_4 , como com outros valores, de modo que se possa avaliar a sensibilidade do ajuste à variação de Q_4 . Observe que o ajuste do pulso é razoável e bastante sensível ao valor de Q_4 .

4.5.3 – GPR: Dados sintéticos com adição de ruído

Vamos denominar por Modelo 3 o modelo utilizado nesta inversão, cujos parâmetros físicos e geométricos estão apresentados na Tabela 4.7. Vamos adicionar ruído aos dados sintéticos de modo a averiguar a robustez da abordagem de inversão à presença de ruído. Para melhor simular um ruído real, será adicionado ruído ao radargrama, cobrindo uma ampla faixa de frequência, sendo o radargrama posteriormente filtrado, de modo a deixar ruído na janela de frequência do sinal. Lembremos que o pulso refletido na base da camada 1 continua sendo o pulso de

referência e, neste caso, também estará contaminado com ruído. Apenas o valor de Q_2 é incógnita na inversão. Vamos apresentar o resultado da inversão de seis traços, cada um deles com um ruído diferente, porém, cada traço sendo invertido isoladamente (ou seja, sem vínculo de continuidade lateral).

Modelo 3			
Camada	Espessura (m)	ϵ_r	Q
1	0.5	6	400
2	1.0	25	16
3	∞	9	

Tabela 4.7 – GPR - Modelo 3. Parâmetros físicos e geométricos do Modelo 3.

O radargrama sintético e sem ruído está apresentado na Figura 4.28. Este radargrama foi gerado com um pulso de Ricker de frequência 200 MHz. O ruído adicionado é Gaussiano em amplitude e branco em frequência. A amplitude corresponde a 21% do pico do pulso refletido na base da camada 2. O radargrama com ruído está apresentado na Figura 4.29. A escala de plotagem foi escolhida de modo a destacar a relação sinal/ruído no pulso a ser invertido (reflexão na base da camada 2). Por isso, o pulso resultante da reflexão na base da primeira camada ficou saturado.

O radargrama da Figura 4.29 foi submetido a um filtro passa-baixa com os seguintes parâmetros de corte: *upper plateau* = 650 MHz e *upper cutoff* = 700 MHz. A seção resultante está mostrada na Figura 4.30. O ruído remanescente nessa seção tem amplitude de cerca de 9 % do pico de amplitude do pulso refletido na base da camada 2, o que equivale a cerca de 2 % do pico de amplitude do sinal de referência (Figura 4.31). O ruído remanescente está agora concentrado na faixa de frequência abaixo de 700 MHz e, portanto, dentro da janela do espectro do pulso de referência. Devido à filtragem passa-banda, o ruído não é mais branco ou Gaussiano. Vale ainda registrar que a assimetria do filtro de corte introduz uma deformação nos pulsos, o que é o ponto relevante a destacar, já que a nossa abordagem de inversão se baseia na deformação do pulso.

De modo a permitir uma análise isolada do conteúdo de frequência tanto nos pulsos de referência como nos pulsos refletidos na base da camada 2, usamos janelas de tempo duplo adequadas para separar estes sinais. Assim, para isolar os pulsos de referência, usamos uma janela de tempo duplo de 0 a 40 ns (Figura 4.30).

Por sua vez, para isolar os pulsos refletidos na base da camada 2, usamos uma janela de tempo duplo no intervalo de 25 ns a 100 ns (Figura 4.30). A Figura 4.32 apresenta os espectros de amplitude dos pulsos de referência (sinais refletidos na base da camada 1), que contêm ruído remanescente. Estes espectros apresentam um pico em torno de 200 MHz e não fica claro a partir de que frequência (algo entre 440 MHz e 520 MHz) estes espectros são dominados pelo ruído. Por sua vez, a Figura 4.33 apresenta os espectros de amplitude com ruído remanescente dos sinais refletidos na base da camada 2, cujo parâmetro Q_2 é a incógnita na inversão. Os espectros de frequência destes sinais apresentam um pico em torno de 150 MHz e, a partir de 400 MHz, os espectros são totalmente dominados pelo ruído.

Como nosso esquema de inversão é baseado no deslocamento do centróide de frequência, a influência do ruído no cálculo dos centróides dos pulsos observados deve ser analisada cuidadosamente. Observemos na Figura 4.33 que o trecho do espectro entre aproximadamente 400 MHz e 700 MHz é devido exclusivamente ao ruído. Conseqüentemente, na operação de integração do espectro para o cálculo do centróide, se o limite superior for 700 MHz, a contribuição do ruído no trecho entre 400 MHz e 700 MHz fará com que o centróide do sinal observado seja deslocado para frequências mais altas e, conseqüentemente, a estimativa de Q estará contaminada com uma tendência ou viés para valores mais altos.

No cálculo do centróide de frequência, o parâmetro FCUT define o limite superior de integração para o cálculo do primeiro momento do espectro. Desta forma, independentemente do filtro utilizado no processamento do sinal, é possível evitar o viés introduzido pelo ruído na estimativa de Q escolhendo de forma adequada o parâmetro FCUT. Para tanto, utilizaremos dois valores de FCUT: 700 MHz e 440 MHz. Estão mostrados na Tabela 4.8 e na Figura 4.34 os resultados da inversão nas duas situações, para cada um dos seis traços invertidos isoladamente.

Na Tabela 4.8 verificamos que, para o caso FCUT = 700 MHz, o erro pode chegar a mais de 100% (traço 3), caso em que foi obtido $Q_2^* = 32.9$ e um valor médio de Q_2 igual a 23.4, com desvio padrão igual a 6.9 (média e desvio padrão não mostrados na Tabela 4.8). Isso demonstra a existência de um viés para valores mais altos na estimativa de Q . Como dissemos, este efeito pode ser minimizado com a escolha adequada do valor de FCUT. Para FCUT igual a 440 MHz, o erro no traço 3 foi reduzido para 8.7% e, assim, $Q_2^* = 17.4$. O valor médio de Q_2 melhorou bastante, ficando igual a 16.1 com desvio padrão de 1.4. No traço 5, entretanto, o valor de Q_2^*

piorou, passando de 14.0 para 13.5. Neste caso, o ruído introduziu no sinal observado um maior conteúdo de baixa frequência, o que resultou numa estimativa de Q_2 inferior a 16, que é o valor verdadeiro de Q_2 . Dessa forma, quando reduzimos a contribuição do ruído nas altas frequências, fazendo FCUT igual a 440 MHz, houve um maior deslocamento do centróide do sinal observado, resultando numa estimativa de Q um pouco menor.

Modelo 3 – Inversão com ruído no sinal				
	FCUT=700 MHz		FCUT=440 MHz	
Traço	Q_2^*	Erro (%)	Q_2^*	Erro (%)
1	23.8	48.8	16.2	1.3
2	29.0	81.3	16.7	4.3
3	32.9	105.6	17.4	8.7
4	18.1	13.1	16.1	0.6
5	14.0	12.5	13.5	15.6
6	22.4	40.0	16.9	5.6
Valor verdadeiro: $Q_2=16$				

Tabela 4.8 – GPR - Modelo 3 - Sinal com ruído. Resultados da inversão do pulso com adição de ruído. Cada traço foi invertido isoladamente. FCUT é o limite superior de integração no cálculo do centróide de frequência.

Nas Figuras 4.35 a 4.37 apresentamos os espectros de amplitude [figuras (a) e (c)] e o ajuste entre os pulsos observado e modelado [figuras (b) e (d)], para cada um dos seis traços e para os dois valores de FCUT. Por sua vez, na Tabela 4.9 apresentamos, para cada um dos traços, a frequência de pico f_p , em MHz, do espectro de amplitude dos sinais obtidos com as estimativas de Q_2 resultantes da utilização de cada um dos valores de FCUT. Devido à taxa de amostragem do sinal, as frequências no espectro são múltiplas de 9.98 MHz. Assim, o valor da frequência de pico do espectro tem uma incerteza de ± 5 MHz. Observe que os valores de frequência de pico do espectro de amplitude do sinal modelado, utilizando FCUT igual a 770 MHz, têm uma maior dispersão, variando de 140 ± 5 MHz para o traço 5 até 180 ± 5 MHz para o traço 3. Por outro lado, quando utilizamos FCUT = 440 MHz, a dispersão é bem menor, variando de 140 ± 5 MHz (traços 4 e 5) até 149 ± 5 MHz (demais traços).

Nas Figuras 4.35 a 4.37, os espectros de amplitude foram normalizados de modo que a integral dos espectros dos sinais modelados no intervalo (0, FCUT) fossem iguais à integral do espectro do sinal observado no mesmo intervalo. Mesmo

para o valor mais adequado de FCUT (440 MHz), note que o efeito do ruído no espectro do sinal observado faz com que a frequência associada ao seu pico de amplitude seja eventualmente deslocada em relação à frequência associada ao pico de amplitude do sinal modelado, como no caso dos traços 4 e 6. Isto evidencia que o uso da técnica para estimar Q , sugerida por Zhang & Ulrych (2002) e baseada na medida do deslocamento do pico de amplitude no espectro de frequência, pode resultar em sérios equívocos quando o sinal observado estiver contaminado, como no presente caso, por ruído na faixa de frequência do sinal. A estimativa de Q baseada no deslocamento do centróide de frequência é, nestas situações, claramente mais robusta, pois, ao integrar o espectro, o efeito do ruído é minimizado.

Modelo 3 – Frequência de pico				
	FCUT=700 MHz		FCUT=440 MHz	
Traço	Q_2^*	f_p (MHz)	Q_2^*	f_p (MHz)
1	23.8	160±5	16.2	149±5
2	29.0	170±5	16.7	149±5
3	32.9	180±5	17.4	149±5
4	18.1	149±5	16.1	140±5
5	14.0	140±5	13.5	140±5
6	22.4	160±5	16.9	149±5
Valor verdadeiro: $Q_2=16$				

Tabela 4.9 – GPR - Modelo 3 – Sinal com ruído. Frequências de pico do espectro de amplitude do sinal modelado para cada um dos seis traços. Cada traço foi invertido isoladamente. FCUT é o limite superior de integração no cálculo do centróide de frequência.

De modo geral, os valores estimados de Q , com a escolha adequada de FCUT (440 MHz), estão muito próximos do valor correto ($Q_2 = 16$). As maiores discrepâncias ocorrem nos traços 3 e 5 (Tabela 4.8). Entretanto, a introdução do ruído na faixa 0 a 700 MHz alterou o sinal de forma significativa. Uma análise detalhada do pico principal do sinal observado, refletido na base da camada 2, mostra que o ruído deslocou este pico apenas nos traços 3 e 5, embora estes deslocamentos sejam imperceptíveis na análise visual das figuras 4.36 (b) e 4.37 (b). Nos demais traços, o pico principal está em 46.5 ns, enquanto no traço 3 este pico foi deslocado para 46.4 ns, e, no traço 5, ele foi deslocado para 46.6 ns. Estes deslocamentos sofridos pelos picos dos traços 3 e 5 são exatamente iguais ao intervalo de amostragem do sinal que é de 0.1 ns (ou seja, está no limite de

detecção). Como o primeiro mínimo foi mantido constante, o pulso do traço 3 sofreu um pequeno estreitamento e o pulso do traço 5 sofreu um pequeno alargamento. Assim, as estimativas de Q_2 são maiores que 16 para o traço 3 e menores que 16 para o traço 5.

4.5.4 – Sísmica: Dados sintéticos gerados com um modelo de atenuação diferente do utilizado no modelo interpretativo

A proposta de inversão que estamos apresentando pode ser aplicada sem grandes alterações para o caso de dados de Sísmica. Usualmente, em Sísmica, a inversão de Q é feita com dados de VSP, dados de *crosswell* (Tonn, 1991) ou dados de CMP (Zhang & Ulrych, 2002), onde se conhece a informação sobre o campo de velocidades.

Vamos testar aqui a nossa proposta de inversão com dados sintéticos gerados com um modelo de atenuação diferente daquele que temos usado nos exemplos anteriores de inversão. Vamos utilizar um modelo de camadas horizontais, que designaremos como Modelo 4, cujos parâmetros físicos e geométricos estão definidos na Tabela 4.10.

Modelo 4			
Camada	Espessura(km)	V (km/s)	Q
1	1.0	2.7	∞
2	2.5	2.0	Variável
3	∞	3.7	

Tabela 4.10- – Sísmica - Modelo 4. Parâmetros físicos e geométricos do Modelo 4.

Utilizando o código SEIS88 (Cerveny & Psencik, 2006) obtivemos os dados sintéticos apresentado na Figura 4.38. Esta figura mostra a trajetória dos raios refletidos na base das camadas 1 e 2, o tempo de percurso da fonte aos receptores, e a variação da amplitude com a posição dos receptores, tanto para a componente radial como para a componente vertical da onda P. O sismograma sintético foi gerado com um pulso de Gabor com frequência f_M da portadora igual a 4 Hz e parâmetro $\lambda_c = 4$. A quantidade adimensional λ_c mede a largura do envelope

Gaussiano do pulso de Gabor (ou seja, λ_c^2 / f_M^2 é a variância da Gaussiana envoltória do sinal) (Cerveny, 2001).

Como modelo de atenuação, foi usado o modelo de Futterman (1962). A clássica relação de dispersão de Futterman tem uma propriedade muito interessante que é o fato de que o produto da velocidade de *background* pelo fator de qualidade ($V_r(w)Q(w)$) ser independente da frequência. Como consequência, o fator de absorção total $\Delta(R,S)$, definido pela integral ao longo do trajeto do raio da fonte S até o receptor R,

$$\Delta(R,S) = \int_S^R \frac{ds}{V_r Q} = \int_S^R \frac{dT}{Q}, \quad (4.7)$$

não depende da frequência. O filtro de dissipação $D(R,S)$ será dado por:

$$D(R,S) = \exp\left[-\frac{1}{2} w \Delta(R,S)\right]. \quad (4.8)$$

Testamos a nossa proposta de inversão para os seguintes valores de Q_2 : 7, 10 e 30. Com isso estamos testando o sensibilidade da inversão para vários valores do fator de absorção total $\Delta(R,S)$.

Para o caso $Q_2 = 7$, a secção CMP sintética está mostrada na Figura 4.39 e o resultado da inversão do primeiro traço (*zero offset*) está mostrado na Figura 4.40. Na parte (a) desta figura, a função objetivo mostra que o mínimo está muito bem definido no valor $Q_2^* = 7.2$. Em (c) vemos o detalhe do ajuste entre os pulsos observado e modelado que são refletidos na base da camada 2; observe que o ajuste é bastante bom.

Modelo 4 – Inversão de dados sintéticos gerados com o modelo atenuação de Futterman		
Q_2 Verdadeiro	Q_2^*	Erro (%)
7	7.2	2.9
10	10.1	1.0
30	30.8	2.7

Tabela 4.11 – Sísmica - Modelo 4 – Sinal sintético obtido com o modelo de atenuação de Futterman (1962).

Para os casos $Q_2 = 10$ e $Q_2 = 30$, as secções CMP sintéticas estão mostradas nas figuras 4.41 e 4.43, e os resultados da inversão do primeiro traço (*zero-offset*),

nas figuras 4.42 e 4.44, respectivamente. Os resultados da inversão nos três casos estão sintetizados na Tabela 4.11.

Observe na Tabela 4.11 que, em todos os casos, as estimativas obtidas para Q_2 foram sempre superiores aos valores verdadeiros. O erro é pequeno (menor que 3%) e os ajustes entre os pulsos observados e modelados são muito bons (figuras 4.40 (c), 4.42 (c), 4.44 (c)). Não obstante, examinando estas figuras em detalhe, é possível constatar que este ajuste piora conforme aumenta fator de absorção total $\Delta(R,S)$. Isto pode ser explicado pelo fato de que a aproximação de Futterman (1962) é mais pobre quando aumentamos o valor de $\Delta(R,S)$.

Segundo Cerveny (2005), o modelo de absorção de Futterman (1962) é uma boa aproximação para valores de absorção total no caso $\Delta(R,S) < 1$. Assim, esta seria a explicação para o fato de que o ajuste entre os pulsos observado e modelado piora com o aumento da absorção total (figuras 4.40 (c), 4.42 (c), 4.44 (c)). O deslocamento do centróide de freqüência, em direção às baixas freqüências, cresce com a absorção total $\Delta(R,S)$ e depende do parâmetro λ_c e da freqüência f_M da portadora: o deslocamento é maior para valores menores de λ_c e maiores f_M (Cerveny & Frangié, 1982). O modelo de absorção que utilizamos na inversão é o modelo de Bano (2004), em que, para baixos valores de Q ($Q < 10$), o produto $QV(w)$ depende fracamente da freqüência e, assim, difere um pouco do modelo de Futterman (1962).

Foi feita também a inversão simultânea dos dois primeiros traços da seção de CMP para o caso $Q_2 = 30$ (Figura 4.43). Os valores obtidos para a estimativa de Q_2 foram 30.73 e 30.68 para os traços 1 e 2, respectivamente. Apesar do traço 2 não satisfazer exatamente a hipótese de mesmo caminho do raio nas camadas superiores, há um excelente ajuste entre os pulsos observados e modelados, conforme mostra a Figura 4.45. No traço 2, o tempo de percurso do raio na camada 2 é, na realidade, maior do que o tempo $(t_2 - t_1)$. Assim, ao tratarmos o traço 2 como um traço *zero-offset* a estimativa de Q_2 será subestimada.

Para evidenciar melhor o aspecto acima colocado, fizemos também a inversão dos cinco primeiros traços da seção CMP com $Q_2 = 30$ (Figura 4.43). Note que com o aumento do *offset* nos afastamos cada vez mais da hipótese de que $(t_2 - t_1)$ é o tempo de percurso do raio na camada 2. Utilizamos como sinal de referência o pulso refletido na base da camada 1 do primeiro traço. Foram utilizados 50 pontos

no Complex e o parâmetro $\beta = 0.08$, para que, no final do processo iterativo, os pontos do Complex mostrassem uma boa visão da solução final com uma variância pequena. Na Figura 4.46 apresentamos as secções CMP (com os cinco primeiros traços) observada e modelada. Note que a inversão foi feita apenas para os valores de Q_2 . Os valores de Q_2^* estimados para cada traço, os valores médios e os desvios padrões dos pontos do Complex que resultam do processo iterativo estão mostrados na Tabela 4.12.

Modelo 4 – Seção CMP com cinco traços			
Traço	Q_2^*	Erro (%)	Média e DP de Q_2
1	30.2	0.7	29.31 ± 2.20
2	29.9	0.3	29.35 ± 2.54
3	31.7	5.7	28.97 ± 2.61
4	29.7	1.0	27.98 ± 2.64
5	26.3	12.3	26.05 ± 1.99
Valor verdadeiro: $Q_2=30$			

Tabela 4.12 – Sísmica. Modelo 4. Resultados da inversão simultânea de Q_2 da Seção CMP com cinco traços. O número de pontos do Complex é igual a 50. DP = desvio padrão.

Observe na Tabela 4.12 que os valores de Q_2^* são bastante razoáveis, apesar da inversão ter sido feita com a hipótese de que os traços são de uma secção *zero-offset* e geradas com um modelo de camadas paralelas; ou seja, que os tempos (t_2-t_1) "medem" o tempo de percurso do raio na camada 2. Assim, este é mais um exemplo de que a hipótese de mesmo caminho para o raio nas camadas superiores, quando o erro na absorção total é pequena, não afeta significativamente o processo de estimação de Q . A discrepância crescente com o aumento do *offset* só fica mais clara quando são analisados os valores médios dos pontos do Complex no final do processo iterativo. Na Tabela 4.12 observa-se que os valores médios decrescem com o aumento do *offset*, pois com o erro crescente no tempo de percurso do raio na camada 2, os valores de Q_2 devem ser cada vez menores, para fornecer a mesma absorção total observada.

4.6 – Uso de Q equivalente como diagnóstico da presença de gás em reservatórios

Vamos agora testar a sensibilidade do esquema de inversão na determinação de um fator de qualidade equivalente, Q_{eq} , que produziria, ao se propagar em uma dada camada equivalente, uma atenuação e dispersão igual ao *efeito combinado* de propagação e reflexão em uma interface cujo coeficiente de reflexão é dependente da frequência. Para tanto, precisamos previamente evidenciar a importância prática deste problema. Além disso, precisamos de uma formulação para a dependência com frequência do coeficiente de reflexão que nos permita gerar os dados a serem utilizados na inversão.

4.6.1 – Motivação

Interfaces com coeficientes de reflexão dependentes da frequência ocorrem em reservatórios saturados de óleo e gás. Especialmente no caso de reservatórios delgados (isto é, com espessura no limite da resolução sísmica), tal fenômeno pode ser muito importante para diagnóstico petrofísico. A questão que se coloca é se Q_{eq} conseguiria discriminar mudanças na refletividade da interface, devido às alterações nas características (densidade e viscosidade) do fluido contido no interior da camada/reservatório, cujo topo é responsável pela reflexão do pulso sísmico. De fato, em reservatórios de gás, espessos ou pouco consolidados, nos quais ocorre uma alta atenuação, “sombras de baixa frequência” (*low frequency shadows*) foram detectadas (Castagna *et al.*, 2003). Sombras de baixa frequência são anomalias de amplitude em seções tratadas com técnicas de decomposição espectral (Castagna *et al.*, 2003; Odebeatu *et al.*, 2006).

Em reservatórios pouco espessos, a alta atenuação não pode ser justificada com propagação da onda no seu interior, porque o pequeno tempo de percurso do sinal não explicaria a atenuação observada. Segundo Odebeatu *et al.* (2006), as atenuações anormalmente altas são produzidas pela saturação de gás e são acompanhadas de dispersão na velocidade. Desse modo, o reservatório pode ser visto como uma anomalia de dispersão e, conseqüentemente, o coeficiente de reflexão dependerá fortemente da frequência. Ainda segundo Odebeatu *et al.* (2006), o modelamento sintético mostra que este efeito é dominante em relação ao

efeito da atenuação produzida pela propagação através do meio. A nossa proposta é, portanto, analisar a possibilidade de diagnosticar a existência de reflexão dependente da frequência através do uso de um fator de qualidade equivalente, Q_{eq} . Tal fator produziria o mesmo deslocamento do centróide de frequência daquele causado por uma interface com coeficiente de reflexão dependente da frequência.

4.6.2 – Formulação para a dependência com frequência do coeficiente de reflexão

Para gerar os dados a serem utilizados na inversão, precisamos de uma formulação simples e realista para a dependência com frequência do coeficiente de reflexão (CR) produzido por uma interface, que é o topo de um reservatório. Vamos admitir que o reservatório delgado pode ser aproximado por uma película equivalente, no sentido de que o coeficiente de reflexão dessa película produz no pulso sísmico o mesmo efeito dispersivo que o reservatório delgado. Odebeatu *et al.* (2006) modelaram curvas de reflexão, para reservatórios delgados e saturados com gás, usando um código comercial de refletividade (ANISEIS). Este código permite o uso de materiais com velocidades e atenuações dependentes da frequência no intervalo de frequência de interesse da sísmica. As curvas de coeficiente de reflexão apresentadas por Odebeatu *et al.* (2006) podem servir para representar a película equivalente ao reservatório delgado.

Da análise das curvas de $CR(f)$ apresentadas por Odebeatu *et al.* (2006), propomos a seguinte expressão para $CR(f)$:

$$CR(f) = A_2 + \frac{(A_1 - A_2)}{1 + (f / f_0)^p}, \quad (4.9)$$

em que A_1 e A_2 são os coeficientes de reflexão assintóticos para baixas e altas frequências, respectivamente; f_0 é a frequência onde o coeficiente de reflexão é a média entre A_1 e A_2 ; e p é o expoente que determina a dependência do coeficiente de reflexão com a frequência nas proximidades de f_0 .

Exemplos de curvas de $CR(f)$ geradas pela equação (4.9) estão apresentadas na Figura 4.47. Para a curva I, por exemplo, $A_1 = -0.01859$, $A_2 = 0.00323$, $f_0 = f_C$ e $p = 1.67$. Esta curva foi obtida do ajuste de mínimos quadrados dos dados de $CR(f)$, para incidência quase normal, apresentados por Odebeatu *et al.* (2006). É interessante registrar que esta curva é muito semelhante, em forma, às curvas de

velocidade como função de frequência, obtidas por Berryman & Wang (2000) e Carcione & Picotti (2006), em ambos os casos usando formulações teóricas para a atenuação da onda elástica.

Variações nos parâmetros f_0 e p controlam a dependência de CR com frequência, desse modo controlando a interseção da janela em que $CR(f)$ varia significativamente com a janela de frequência do pulso sísmico. A análise de dispersão do pulso refletido, em relação ao pulso de referência, só é diagnóstica se a faixa de variação significativa de $CR(f)$ estiver contida na faixa de frequência do pulso incidente.

4.6.3 – Exemplos de inversão de fator de qualidade equivalente

Nos exemplos a seguir mostrados, os dados sísmicos a serem utilizados na inversão serão gerados com um pulso de Ricker, de frequência f_C . Este pulso propaga através de duas camadas, com fatores de qualidade Q_1 e Q_2 , e reflete numa interface cujo coeficiente de reflexão é dado pela equação (4.9). Como sempre, a primeira camada serve apenas para definir o sinal de referência. Por sua vez, o modelo interpretativo a ser utilizado na inversão terá também três camadas, mas todo efeito de atenuação será atribuído apenas à propagação na segunda camada.

Para que os exemplos sejam realistas, a variação de $CR(f)$ deve ter *range* compatível com aquele esperado devido à variação do conteúdo de fluido em um reservatório. Segundo Bain & Tatham (2005), a variação do coeficiente de reflexão para incidência normal na interface gás/óleo pode cair de 20% quando a viscosidade do fluido muda do valor da água para o valor do gás. Uma maneira simples de introduzir tal variação na expressão (4.9), é admitir uma variação no parâmetro f_0 entre $1.5 f_C$ e $2.0 f_C$, em que f_C é a frequência central do pulso sísmico. As curvas II e III, também apresentadas na Figura 4.47, foram geradas com esses valores extremos. O valor de p utilizado para gerar as curvas I, II e III foi 1.67. Por sua vez, a curva II foi gerada com $p = 2.5$. Nos testes de inversão, investigamos também o efeito da variação no parâmetro p .

Na Figura 4.48 estão apresentados resultados de vários exemplos de inversão. Em todos estes exemplos, $Q_2 = 100$. Cada exemplo está associado com uma curva $CR(f)$, que estão graficadas na Figura 4.48 (b). As curvas A, B e C de

$CR(f)$ foram geradas com $p = 1.67$ e $f_0 = f_c$, $f_0 = 1.5f_c$ e $f_0 = 2.0 f_c$, respectivamente. Os resultados da inversão dos pulsos associados às curvas A, B e C foram $Q_{eq}^* = 29.4$, $Q_{eq}^* = 35.0$ e $Q_{eq}^* = 41.0$, respectivamente. Estas estimativas são todas muito diferentes do valor verdadeiro de Q_2 . Sendo assim, elas são diagnósticas do efeito da reflexão no topo do reservatório. Além disso, num caso real, a variação das estimativas de Q_{eq} seria diagnóstica da variação espacial da petrofísica. Comparando os pulsos observados e resultante do processo de inversão (Figura 4.49 (a)), vemos ainda que os ajustes não são perfeitos, embora sejam razoáveis. Ajustes muito bons são praticamente impossíveis de serem obtidos porque o comportamento de CR com f não é uma reta como no modelo de Q constante, a exemplo da curva de dispersão D (Figura 4.49(b)), que está associada com a propagação no caso $Q_{eq}^* = 29.4$. Assim, em um caso real, seria diagnóstico da dependência de CR com f tanto a variação espacial de Q_{eq} como o desajuste entre os pulsos observados e modelados.

Os exemplos de inversão em que o parâmetro p variou mostraram um aspecto muito importante, a seguir descrito. Para as curvas A e E de $CR(f)$ (Figura 4.48 (b)), em que os pares (f_0, p) são iguais a $(f_c, 1.67)$ e $(1.5 f_c, 2.5)$, respectivamente, foram estimados valores literalmente iguais de Q_{eq} ($Q_{eq}^* = 29.4$). Q_{eq} foi o mesmo (dentro da precisão numérica) porque o logaritmo da função $CR(f)$, nos dois casos, apresenta a mesma derivada no entorno da frequência f_c , como pode ser observado na Figura 4.48 (b). Como consequência, o comportamento da função objetivo é virtualmente igual, conforme revela a Figura 4.48(a). Esta conclusão é muito importante porque ela significa que o efeito dominante da dispersão, devido à reflexão em uma camada, envolve um fator exponencial cuja “constante” de decaimento é quase linear com frequência. Isso, em essência, é o mesmo comportamento matemático para o modelo de Q constante devido à propagação no meio superior, antes da reflexão do pulso no topo desta camada. Como o coeficiente de reflexão é um fator multiplicativo no pulso incidente, os dois efeitos de amortecimento (α 's) se somam, justificando assim o uso da estimativa de um único Q para o efeito equivalente combinando propagação e reflexão.

Na Figura 4.49 (a) está mostrado o ajuste entre os sinais observados e modelados para o caso em que foi encontrada a mesma estimativa para Q_{eq} acima descrito. As curvas de coeficiente de reflexão não diferem apenas por um fator multiplicativo; assim os sinais refletidos não se superpõem exatamente. O sinal

modelado na inversão ($Q_{eq}^*=29.4$) apresenta uma pequena diferença de fase em relação aos sinais observados. Na Figura 4.48 (b) (e também 4.49 (b)) está graficado, como a curva D, o termo de atenuação $\left| \exp(-\pi f \tau_D / Q_{eq}^*) \right|$ com $Q_{eq}^* = 29.4$. Observe que a curva D apresenta uma derivada menor que a curva A ou E, no entorno de f_c , porque D também incorpora a atenuação devido a propagação na camada 2.

Deve-se registrar que, para testar a sensibilidade do esquema de inversão acima proposto para determinar Q_{eq} (e a sua possível utilização como um fator diagnóstico do fluido contido nos poros da interface), não basta conhecer de quanto varia o coeficiente de reflexão em associação com variações nas propriedades do fluido; é preciso também conhecer como as variações na viscosidade e densidade do fluido afetam o comportamento do logaritmo do coeficiente de reflexão nas proximidades da frequência central. Uma possível resposta a esta questão está no trabalho de Silin *et al.* (2006), onde se mostra que a dependência com a frequência do coeficiente de reflexão, em interfaces poroelásticas saturadas com fluido, dependem assintoticamente, para baixas frequências, da raiz quadrada do produto da frequência pela mobilidade do fluido no reservatório. Assim, conhecendo a permeabilidade do meio poroso, a densidade e viscosidade do fluido e os parâmetros elásticos dos meios, é possível conhecer a dependência do coeficiente de reflexão em torno da frequência central.

Vamos verificar agora como responde o esquema de inversão quando o logaritmo do coeficiente de reflexão apresenta uma forte variação não linear em torno da frequência central. Para testar esta situação, vamos analisar o caso $f_0=0.5f_c$. (curva F de $CR(f)$), mostrada na Figura 4.50 (a). Note que esta curva tem uma variação mais acentuada em torno da frequência central, quando comparada com o caso $f_0=f_c$ (curva A de $CR(f)$). Lembremos que o pulso sísmico, além do efeito dispersivo causado pela reflexão, também sofre um efeito dispersivo devido à propagação ($Q=100$) antes de refletir na interface. O efeito da propagação ($\left| \exp(-\pi f \tau_D / Q) \right|$, com $Q=100$) é mostrado na Figura 4.50 (a) através da curva G. Por sua vez, o efeito combinado de propagação e reflexão é mostrado como a curva F x G. Usando o efeito combinado de F e G (curva F x G) para gerar o pulso a ser usado na inversão, obtivemos a estimativa $Q_{eq}^* = 26.1$ (curva H, também na Figura

4.50 (a)). Note que a curva H aproxima razoavelmente bem o comportamento da derivada de $CR(f)$ no entorno de f_c .

Vale a pena investigar ainda como a cauda da função $CR(f)$ influencia na estimativa de Q_{eq} . Para tanto, vamos investigar o comportamento da estimativa de Q_{eq} com dados de entrada gerados com modelos de Q constante por partes para a camada que está acima do reservatório. O modelo de Q constante por partes aproxima a função derivada de $CR(f)$ por trechos de reta.

Para investigar a sensibilidade da cauda de alta freqüência da função $CR(f)$, vamos utilizar o caso

$$Q = \begin{cases} Q_1 = 16 & 0 < f < 0.8f_c \\ Q_1 = 26.1 & f > 0.8f_c \end{cases} . \quad (4.10)$$

A função acima aproxima o trecho de baixa freqüência da função derivada de $CR(f)$ por uma reta, além de amostrar bem a parte central do seu espectro. Todavia, a função (4.10) amostra muito mal o trecho de alta freqüência da função derivada de $CR(f)$. A curva de dispersão associada à função (4.10) é a curva J (Figura 4.50 (a)). O pulso sísmico gerado com este modelo de Q está apresentado na Figura 4.50 (b). Observe na Figura 4.50 (a) que a curva J coincide bastante bem com a curva F ($CR(f)$ para $f_0=0.5f_c$) para freqüências menores que $1.5 f_c$ e, para freqüências maiores que este valor, há uma discrepância crescente.

Da inversão do pulso gerado com a função (4.10), obtivemos a estimativa $Q_{eq}^* = 23.6$; o pulso modelado com este valor e a curva de dispersão associada (curva K) estão mostrados nas Figuras 4.50 (b) e 4.50 (a), respectivamente. Houve uma pequena variação de Q_{eq} em relação à inversão associada à curva F (de 26.1 para 23.6), evidenciando que a estimativa de Q_{eq} é relativamente sensível à cauda de alta freqüência de $CR(f)$.

Para confirmar o resultado acima reportado, vamos repetir a inversão para um modelo de Q constante por partes, definido agora em três intervalos, de modo a melhor aproximar a cauda de alta freqüência de da função derivada de $CR(f)$. Para tanto, utilizamos o modelo de Q constante por partes definido por

$$Q = \begin{cases} Q_1 = 16 & 0 < f < 0.8f_c \\ Q_2 = 26.1 & 0.8f_c < f < 1.5f_c \\ Q_3 = 42 & f > 1.5f_c \end{cases} . \quad (4.11)$$

A curva de dispersão associada a esta função está apresentada na Figura 4.50 (a) com a curva L. O resultado obtido foi $Q_{eq}^* = 26.2$, que é praticamente o mesmo resultado da inversão obtido com a curva E de $CR(f)$ ($Q_{eq}^* = 26.1$); por este motivo, o pulso modelado não foi apresentado na Figura 4.50 (b).

Os resultados acima descritos evidenciam que o esquema de inversão está respondendo a uma atenuação causada por uma faixa do espectro de largura máxima de cerca de $2 f_c$. É interessante registrar que a maioria dos sistemas de medida de GPR utiliza pulsos com razão $B/f_c \approx 1$, em que B é a semi-largura em frequência do espectro de amplitude do pulso; fazer $B/f_c \approx 1$ é um bom compromisso entre as exigências conflitantes (em consequência do Princípio de Incerteza de Heisenberg) de localizar muito bem o pulso no tempo e na frequência (Annan, 2001). Assim sendo, concluímos que é válida a abordagem de limitar a inversão a um único valor Q (pelo menos para dados de GPR), pois este parâmetro representa bem o comportamento médio do termo de perda na região significativa do espectro em torno da frequência central dos pulsos que são tecnologicamente gerados.

4.7 – Conclusão

Concluímos que a abordagem de inversão proposta apresenta potencial para utilização prática, pois ela: (a) prescinde do conhecimento do campo de velocidade, (b) é robusta à presença de ruído e a presença de mergulhos nas camadas, (c) dispensa o conhecimento da amplitude verdadeira do pulso, (d) não requer nenhuma hipótese sobre a natureza do pulso, a exemplo da hipótese de fase mínima, (e) pode diagnosticar a presença de interfaces com coeficiente de reflexão dependente de frequência, (f) pode ser facilmente adaptada para a inversão de dados de CMP e VSP, e (g) admite facilmente a adição de vínculos nos parâmetros a serem estimados. As principais deficiências são as necessidades de: (a) conhecimento a priori do pulso de referência, (b) processamento prévio para remoção de múltiplas, e (c) definição por parte do intérprete dos pulsos refletidos.

Do ponto de vista operacional, a implementação efetuada com o algoritmo Complex apresenta as grandes vantagens de permitir, facilmente, o uso de critérios robustos de ajuste e de funcionais não deriváveis, de introduzir vínculos não lineares e não deriváveis, além de fornecer um grupo de quase-soluções que permite avaliar

ao mesmo tempo acurácia e estabilidade. A principal desvantagem é a perda de eficiência computacional.

Modelo 1

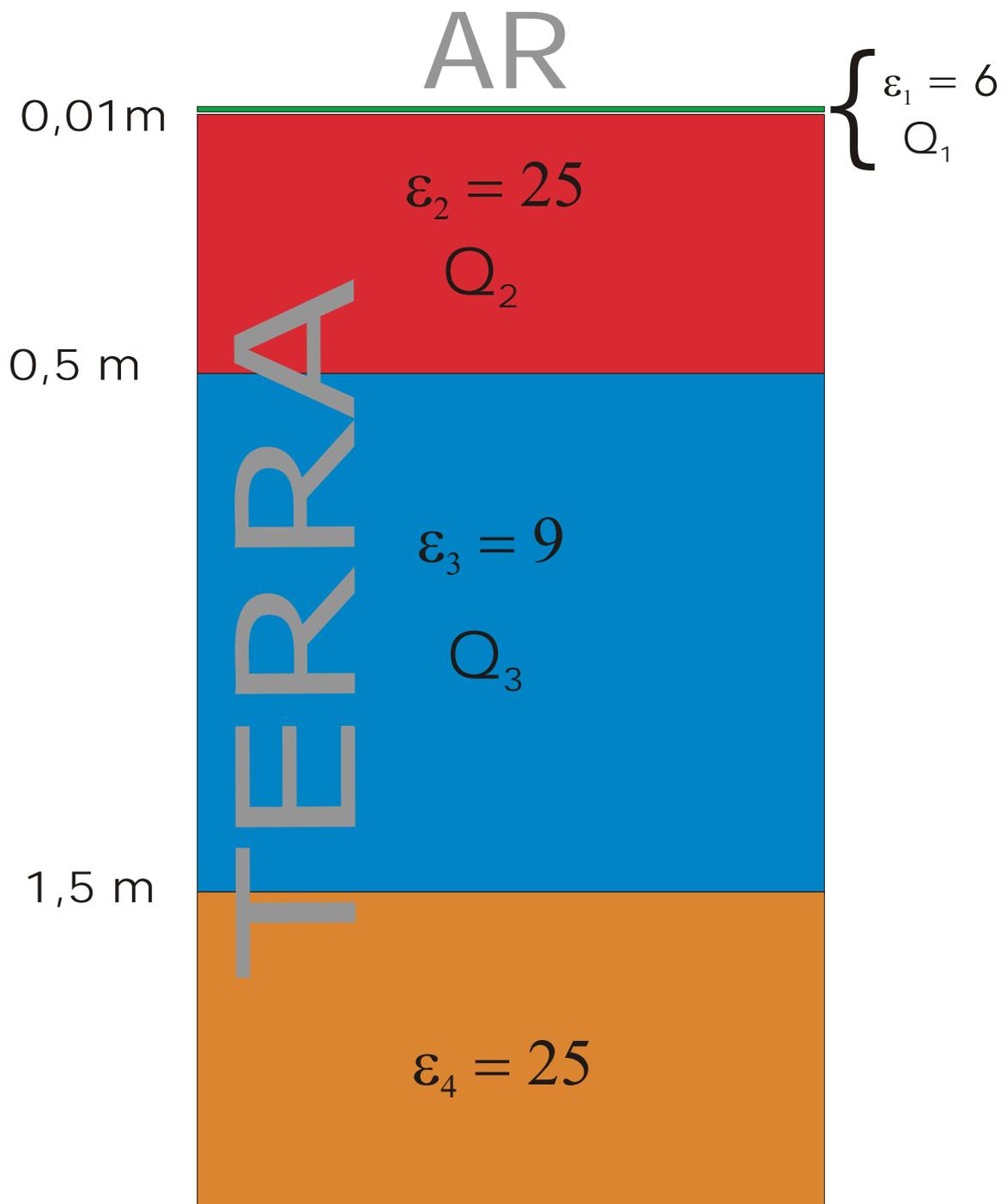


Figura 4.1 – GPR – Modelo 1. Modelo utilizado em exemplos de inversão do fator Q. Os valores de Q_1 , Q_2 e Q_3 são variados em cada exemplo.

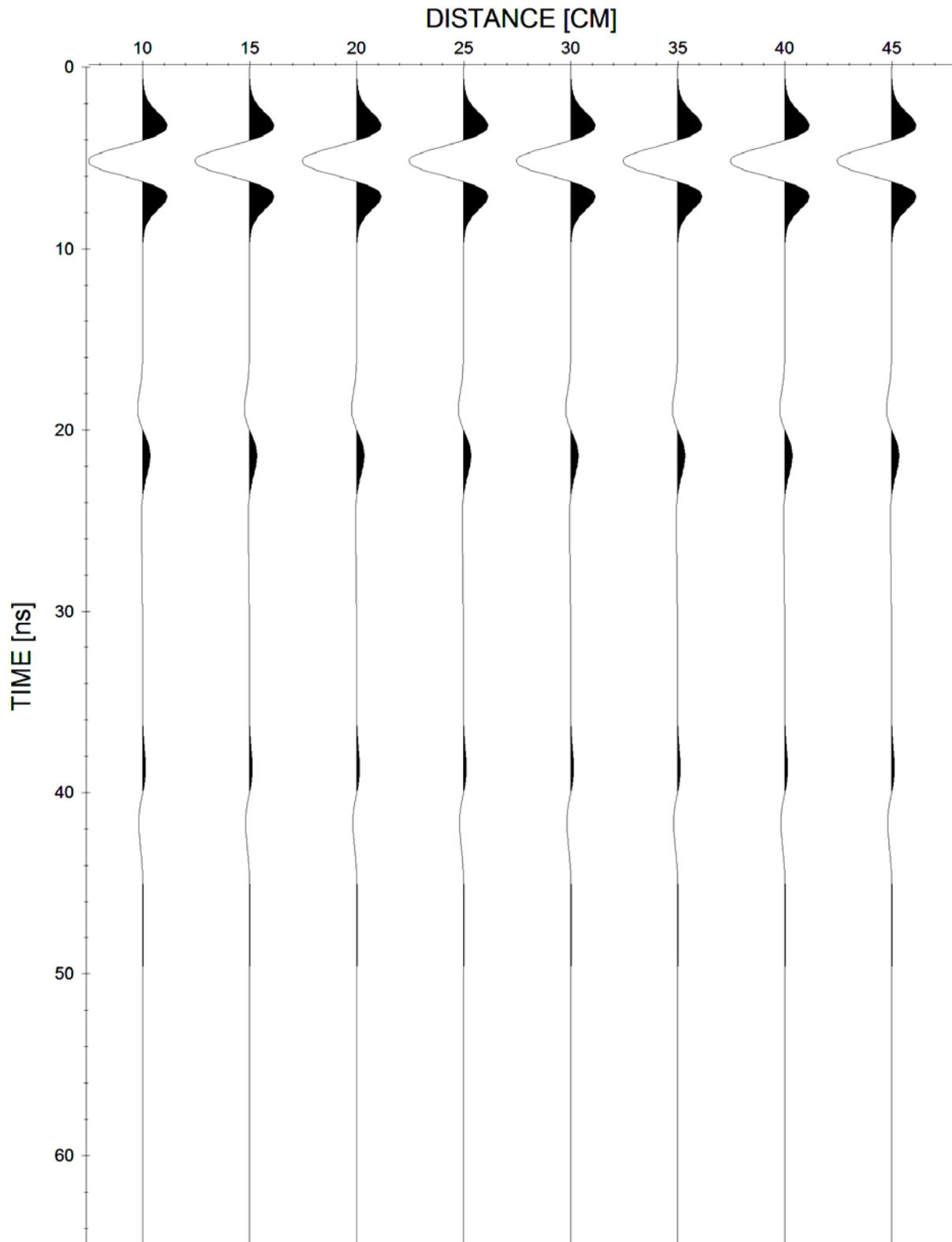


Figura 4.2 – GPR – Modelo 1. Exemplo 1. Secção de GPR sintética (200 MHz). Foram utilizados fatores de qualidade iguais a 400, 5 e 15 para as camadas 1, 2 e 3, respectivamente. Os efeitos da reflexão e do espalhamento geométrico na amplitude do sinal não foram considerados. Time = tempo duplo de trânsito.

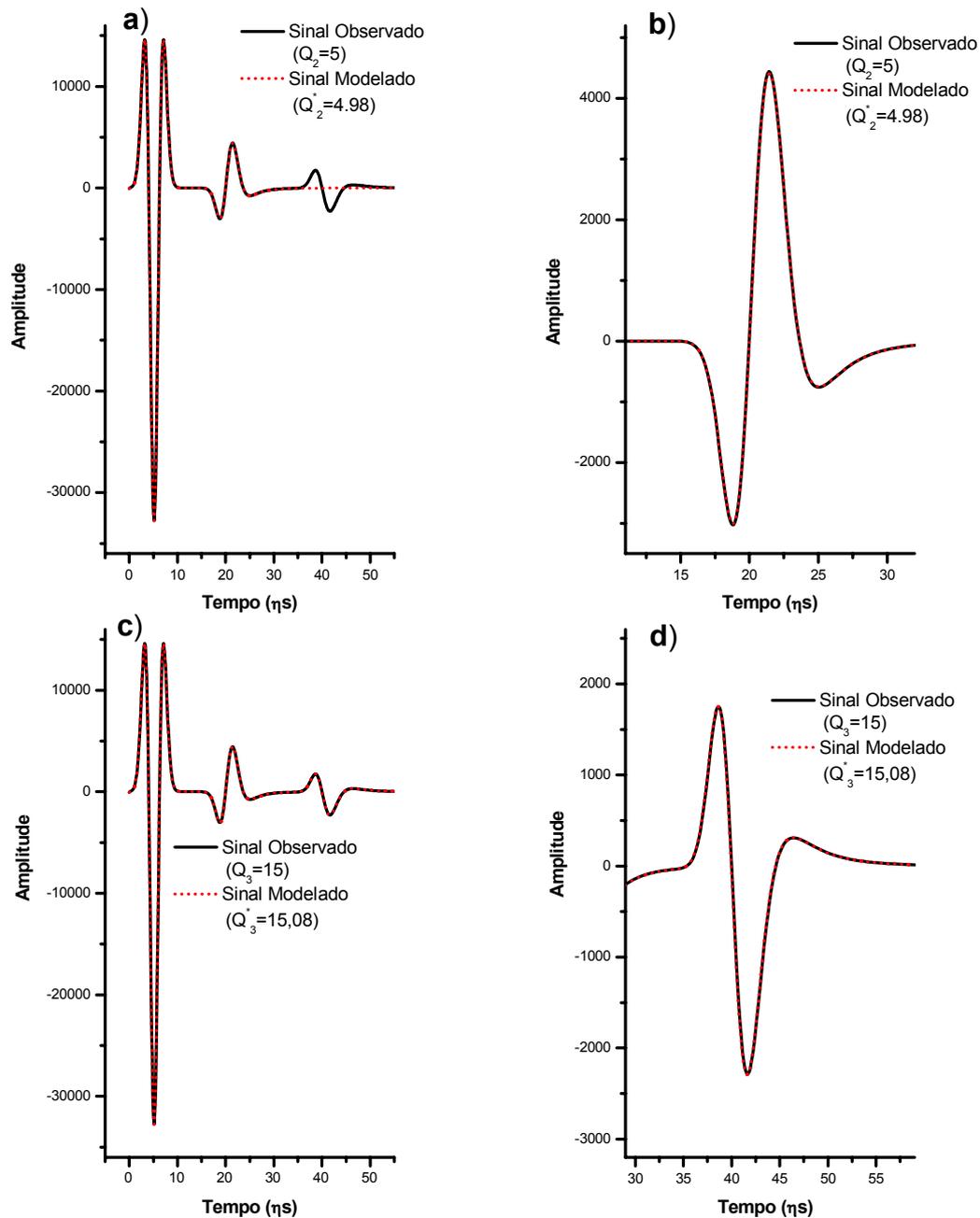


Figura 4.3 – GPR – Modelo 1. Exemplo 1. Inversão de um único traço e um só valor de Q . a) Ajuste entre os traços observado (em preto, $Q_2 = 5$) e modelado (em vermelho, $Q_2 = 4.98$) no caso da inversão isolada de Q_2 . b) Detalhe da figura (a) para o pulso refletido na base da camada 2. c) Ajuste entre os traços observado (em preto, $Q_3 = 15$) e modelado (em vermelho, $Q_3 = 15.08$) no caso da inversão isolada de Q_3 . d) Detalhe da figura (c) para o pulso refletido na base da camada 3.

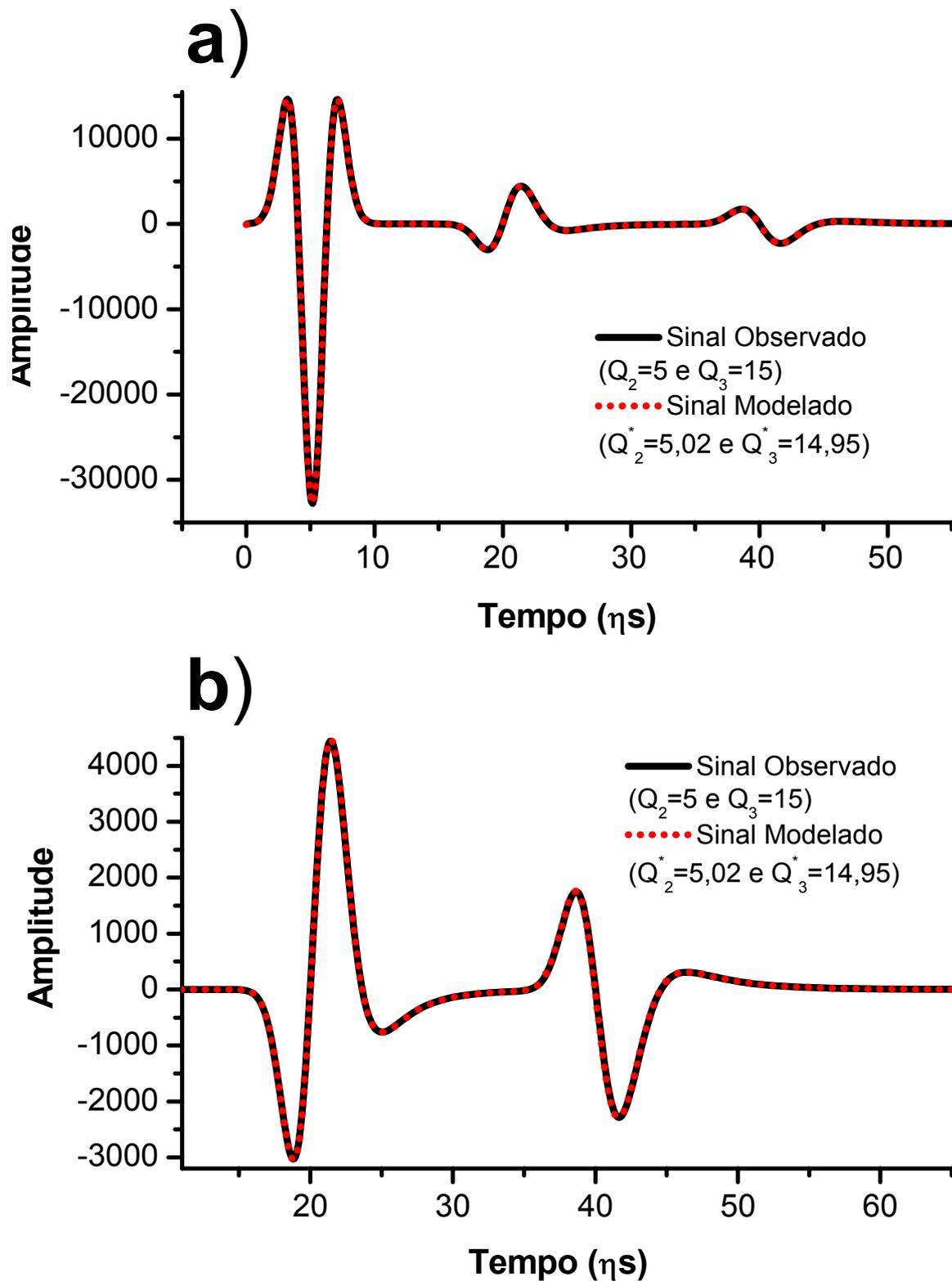


Figura 4.4. – GPR – Modelo 1. Exemplo 1. Inversão de um único traço e dois valores de Q . a) Ajuste entre os traços observado (em preto, $Q_2 = 5$, $Q_3 = 15$) e modelado (em vermelho, $Q_2^* = 5.02$ e $Q_3^* = 14.95$) para o caso da inversão simultânea de Q_2 e Q_3 b) Detalhe da figura (a) para os pulsos refletidos nas bases das camadas 2 e 3.

FUNÇÃO OBJETIVO $F(X_2, X_3)$

Valores Verdadeiros: $Q_2=5$ e $Q_3=15$

+ Pontos do Complex

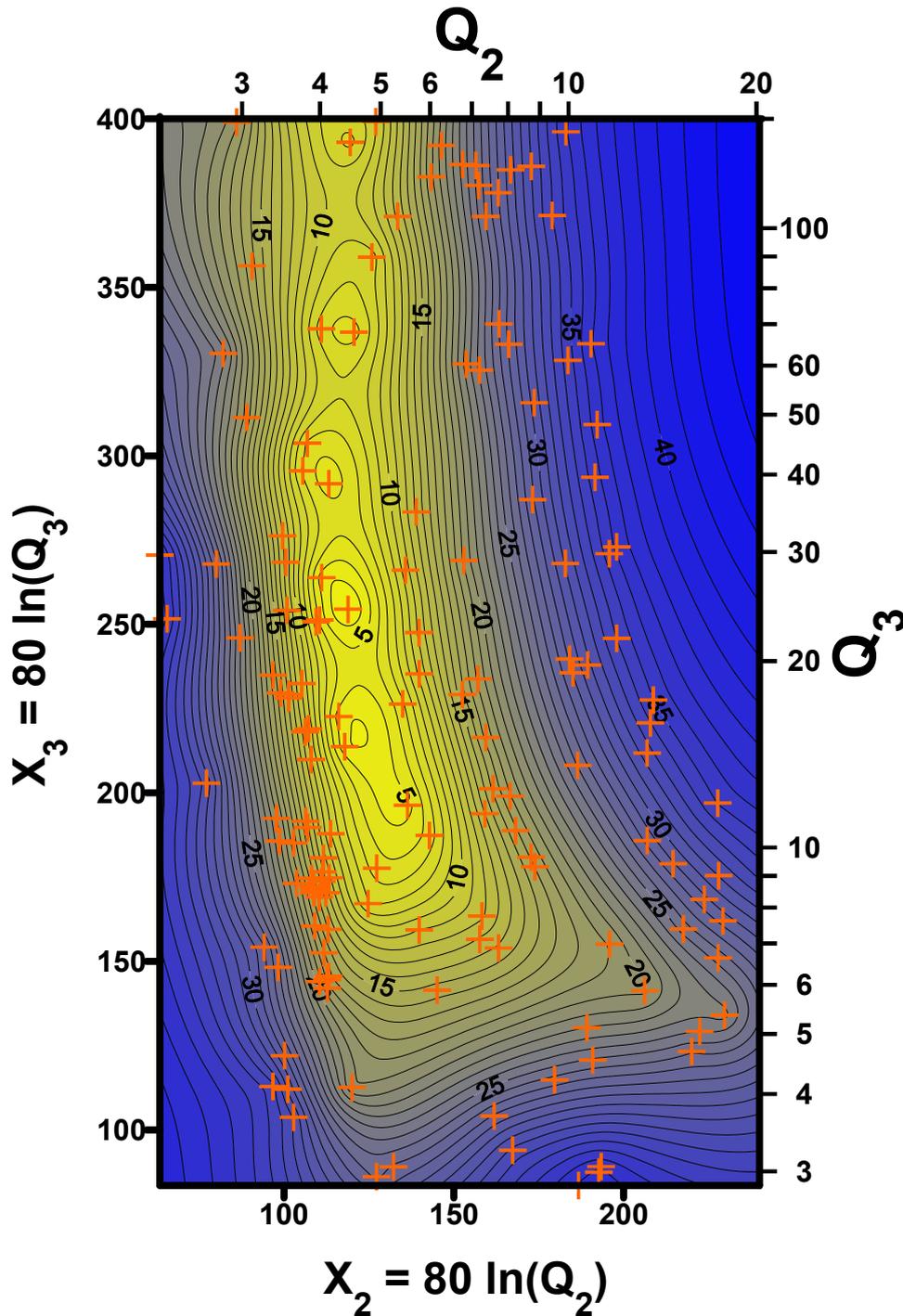


Figura 4.5 – GPR – Modelo 1. Exemplo 1. Inversão de um único traço e dois valores de Q. Curvas de isovalores da Função Objetivo $F(X_2, X_3)$, dada pela equação (4.6). As curvas resultam da interpolação (*kriging*) dos pontos do Complex na iteração de número 50. Nesta figura, foi utilizada a “métrica” logarítmica do espaço de parâmetros.

FUNÇÃO OBJETIVO $F(Q_2, Q_3)$

Valores Verdadeiros: $Q_2=5$ e $Q_3=15$

+ Pontos (Q_2, Q_3) do Complex

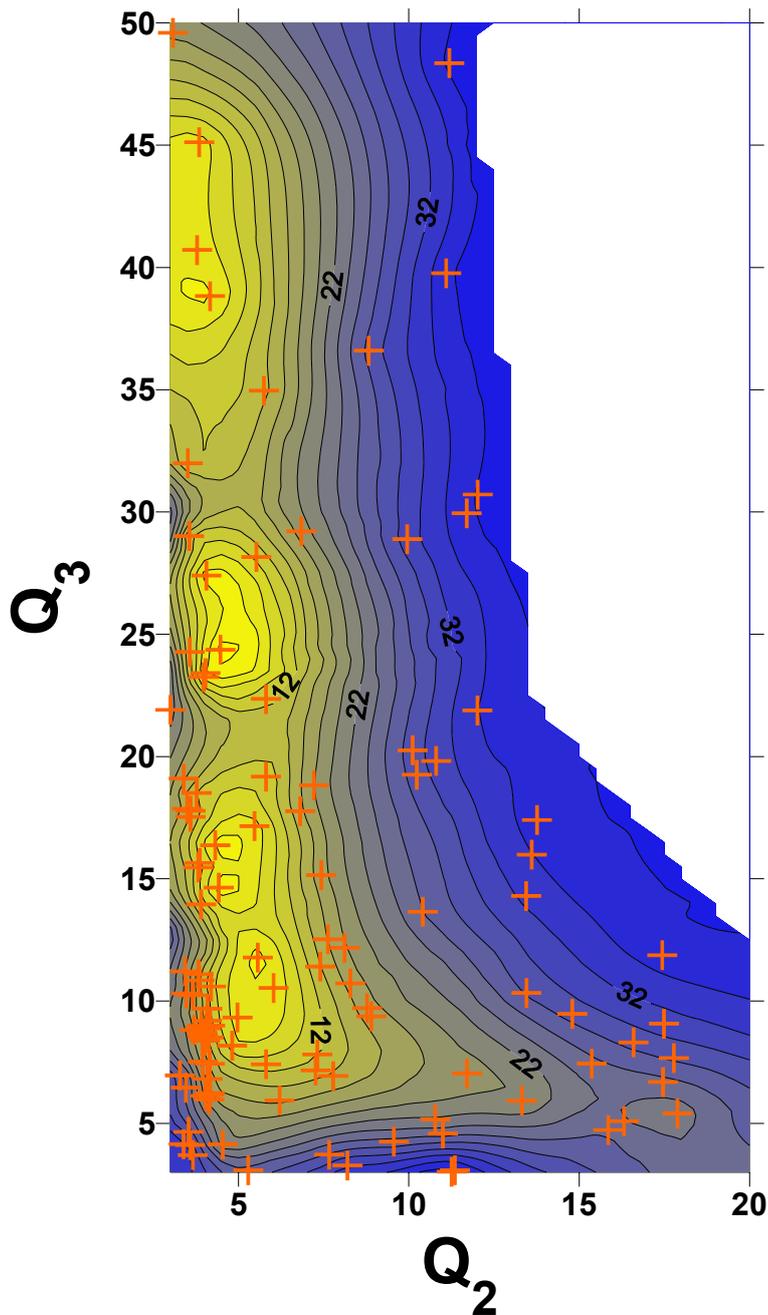


Figura 4.6 – GPR – Modelo 1. Exemplo 1. Inversão de um único traço e dois valores de Q . Curvas de isovalores da Função Objetivo $F(Q_2, Q_3)$, dada pela equação (4.6). As curvas resultam da interpolação (*kriging*) dos pontos do Complex na iteração de número 50. Nesta figura, foi utilizada a “métrica” linear do espaço de parâmetros.

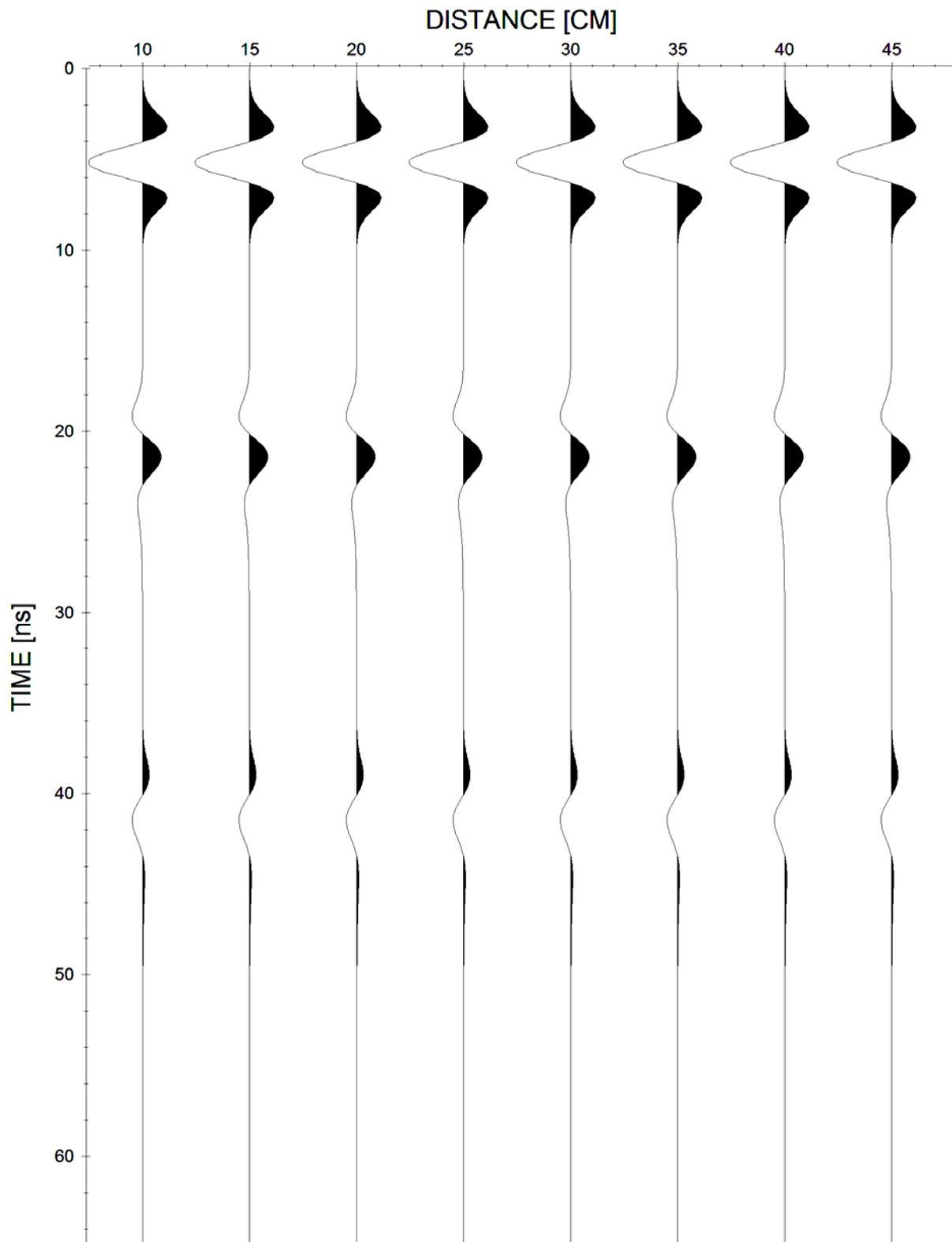


Figura 4.7 – GPR – Modelo 1. Exemplo 2. Secção de GPR sintética (200 MHz). Foram utilizados fatores de qualidade iguais a 400, 10 e 20 para as camadas 1, 2 e 3, respectivamente. Os efeitos da reflexão e do espalhamento geométrico na amplitude do sinal não foram considerados. Time = tempo duplo de trânsito.

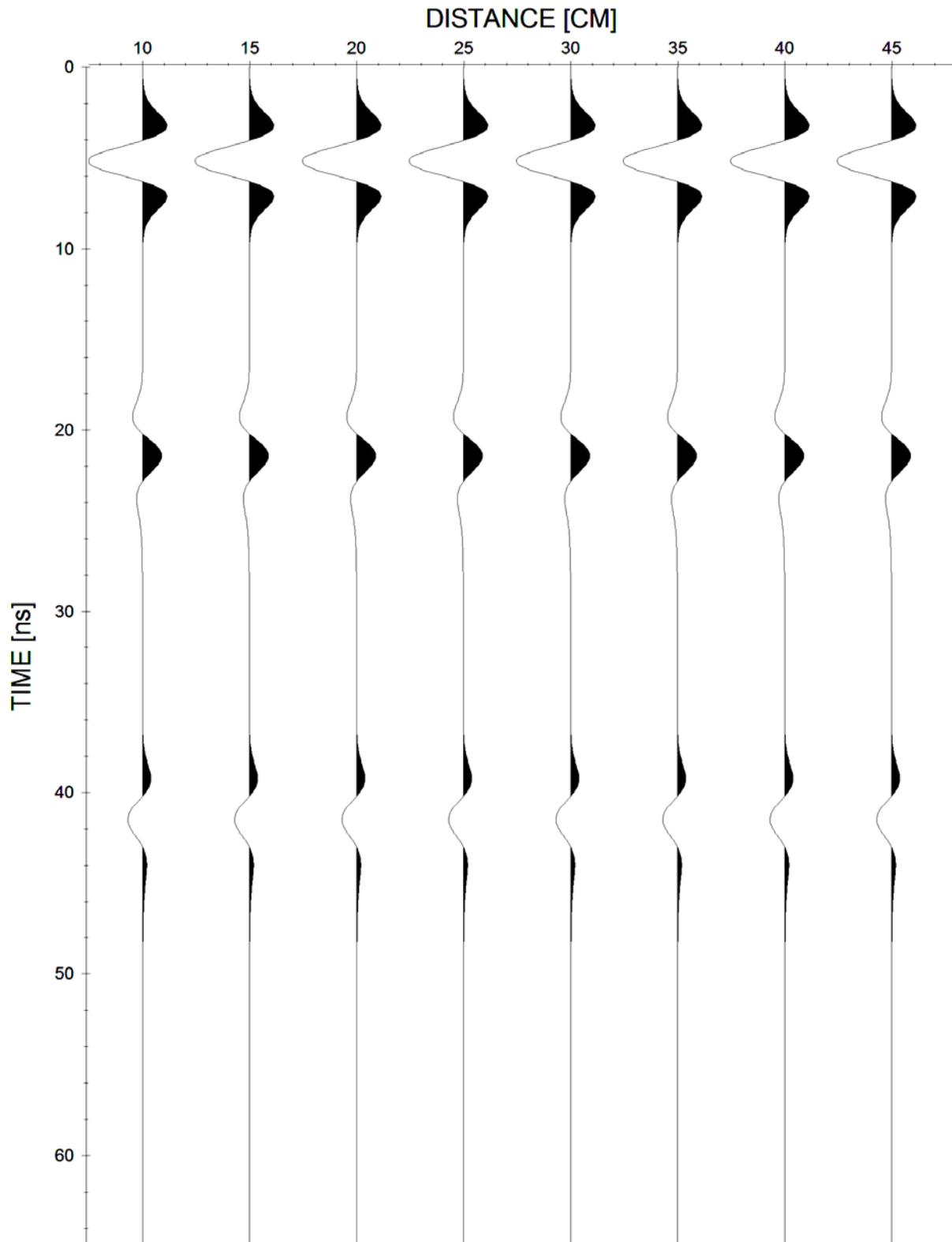


Figura 4.8 – GPR – Modelo 1. Exemplo 3. Secção de GPR sintética (200 MHz). Foram utilizados fatores de qualidade iguais a 400, 15 e 50 para as camadas 1, 2 e 3, respectivamente. Os efeitos da reflexão e do espalhamento geométrico na amplitude do sinal não foram considerados. Time = tempo duplo de trânsito.

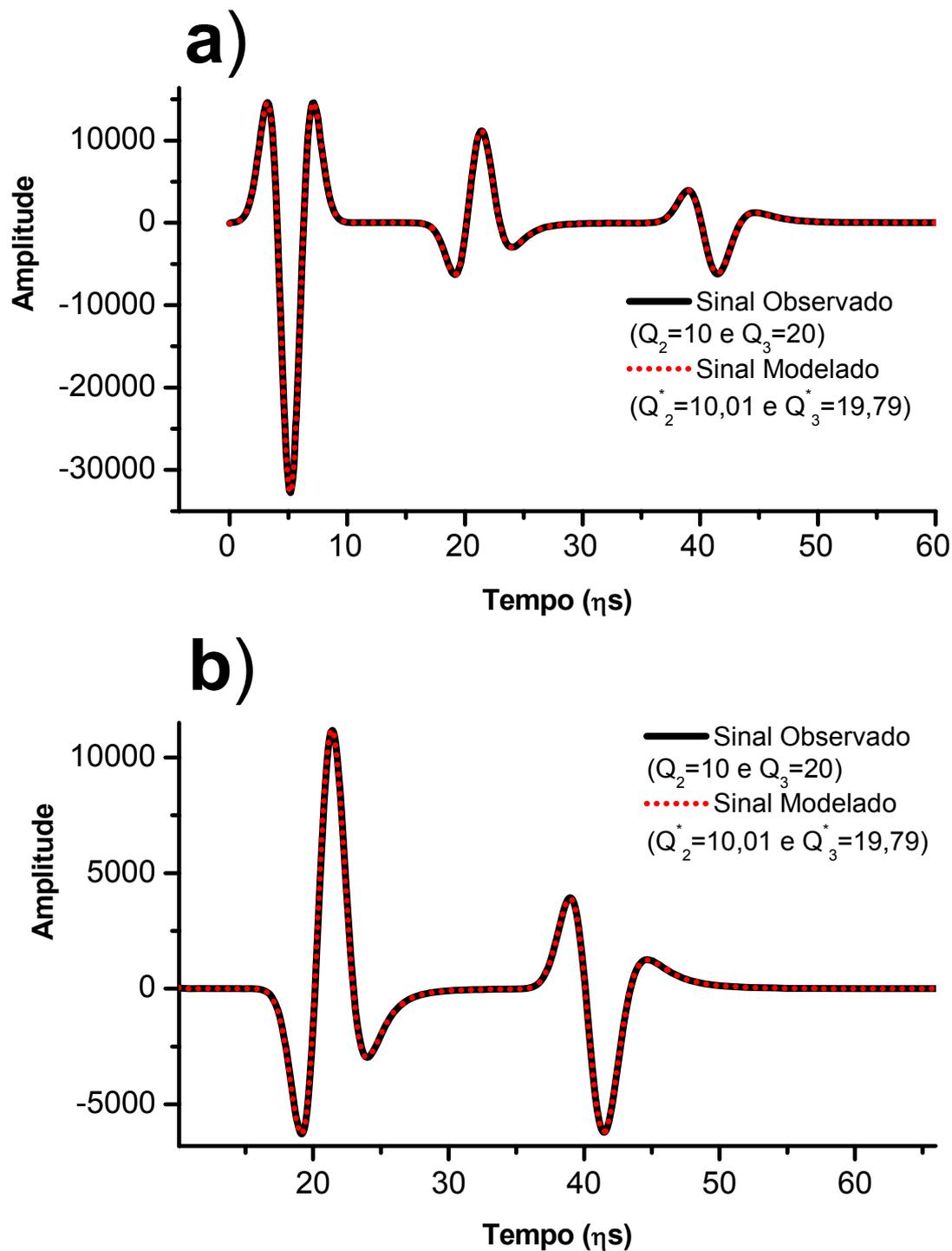


Figura 4.9 – GPR – Modelo 1. Exemplo 2. Inversão de um único traço e dois valores de Q . a) Ajuste entre os traços observado (em preto, $Q_2 = 10$, $Q_3 = 20$) e modelado (em vermelho, $Q_2^* = 10.01$ e $Q_3^* = 19.79$) para o caso da inversão simultânea de Q_2 e Q_3 . b) Detalhe da figura (a) para os pulsos refletidos nas bases das camadas 2 e 3.

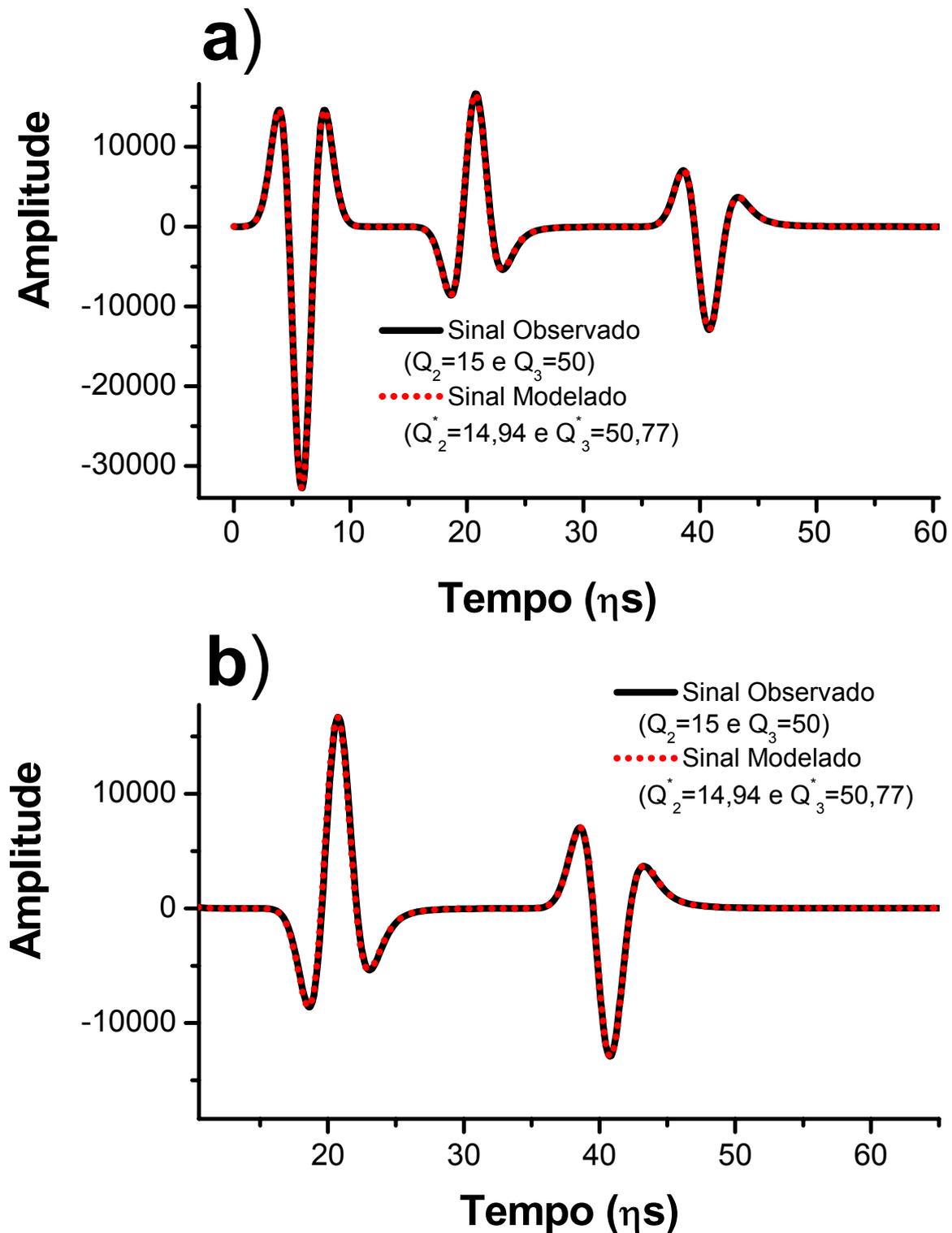


Figura 4.10 – GPR – Modelo 1. Exemplo 3. Inversão de um único traço e dois valores de Q . a) Ajuste entre os traços observado (em preto, $Q_2 = 15$, $Q_3 = 50$) e modelado (em vermelho, $Q_2^* = 14.94$ e $Q_3^* = 50.77$) para o caso da inversão simultânea de Q_2 e Q_3 . b) Detalhe da figura (a) para os pulsos refletidos nas bases das camadas 2 e 3.

FUNÇÃO OBJETIVO $F(X_2, X_3)$

Valores Verdadeiros: $Q_2=10$ e $Q_3=20$

+ Pontos do Complex

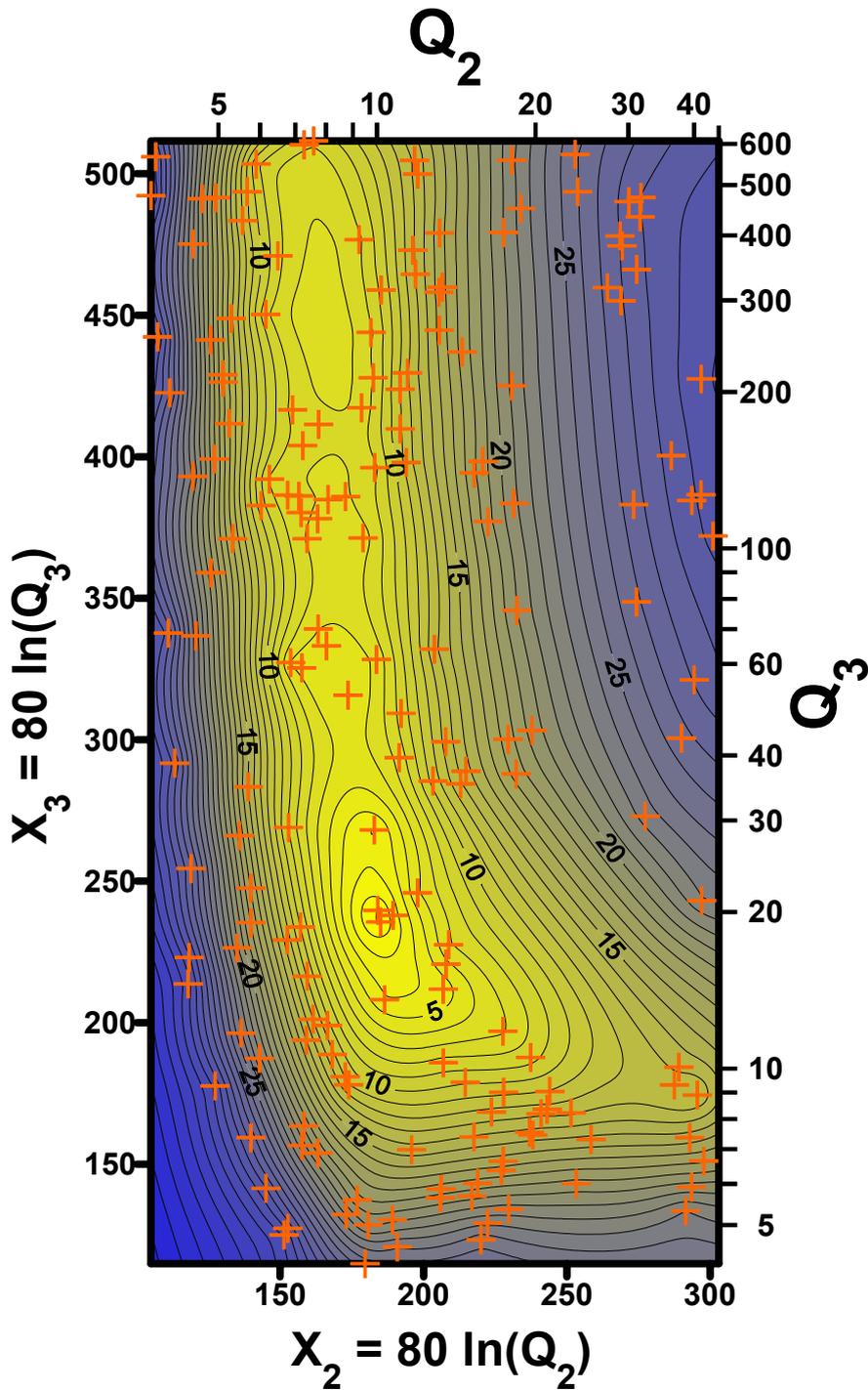


Figura 4.11 – GPR – Modelo 1. Exemplo 2. Inversão de um único traço e dois valores de Q. Curvas de isovalores da Função Objetivo $F(X_2, X_3)$, dada pela equação (4.6). As curvas resultam da interpolação (*kriging*) dos pontos do Complex na iteração de número 50. Nesta figura, foi utilizada a “métrica” logarítmica do espaço de parâmetros.

FUNÇÃO OBJETIVO $F(X_2, X_3)$

Valores Verdadeiros: $Q_2=15$ e $Q_3=50$

+ Pontos do Complex

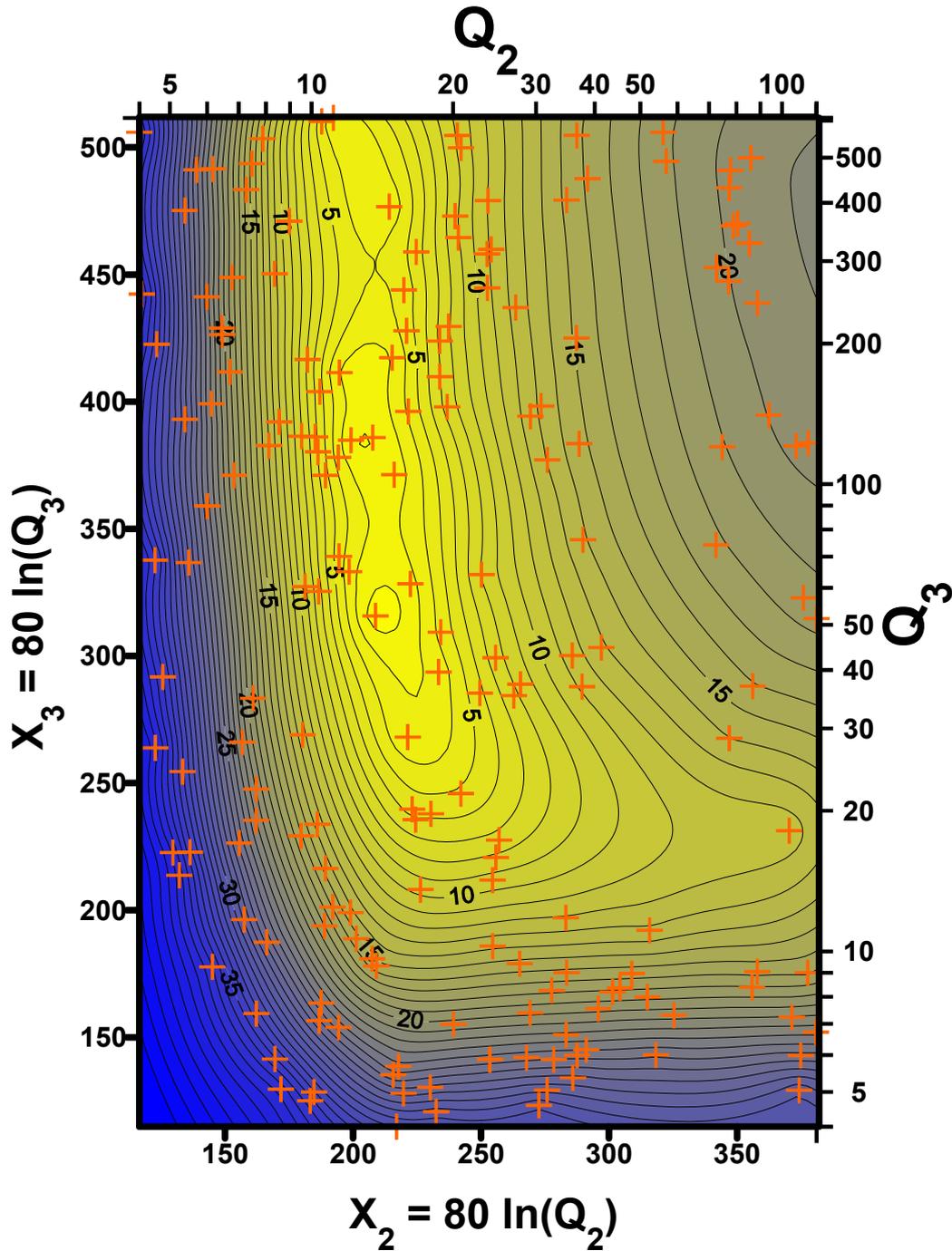


Figura 4.12 – GPR – Modelo 1. Exemplo 3. Inversão de um único traço e dois valores de Q. Curvas de isovalores da Função Objetivo $F(X_2, X_3)$, dada pela equação (4.6). As curvas resultam da interpolação (*kriging*) dos pontos do Complex na iteração de número 50. Nesta figura, foi utilizada a “métrica” logarítmica do espaço de parâmetros.

FUNÇÃO OBJETIVO $F(Q_2, Q_3)$

Valores Verdadeiros: $Q_2=15$ e $Q_3=50$

+ Pontos (Q_2, Q_3) do Complex

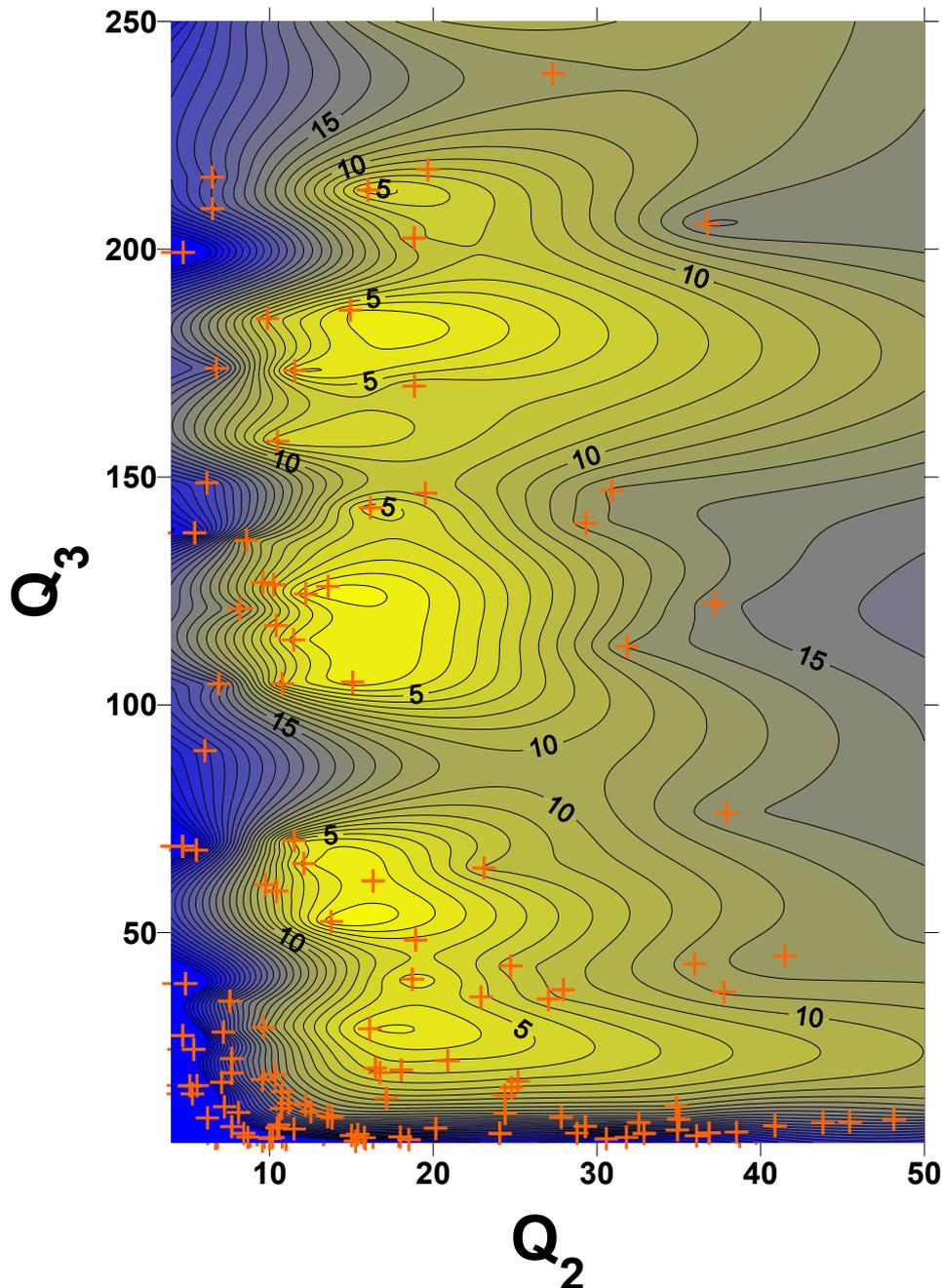


Figura 4.13 – GPR – Modelo 1. Exemplo 3. Inversão de um único traço e dois valores de Q . Curvas de isovalores da Função Objetivo $F(Q_2, Q_3)$, dada pela equação (4.6). As curvas resultam da interpolação (*kriging*) dos pontos do Complex na iteração de número 50. Nesta figura, foi utilizada a “métrica” linear do espaço de parâmetros.

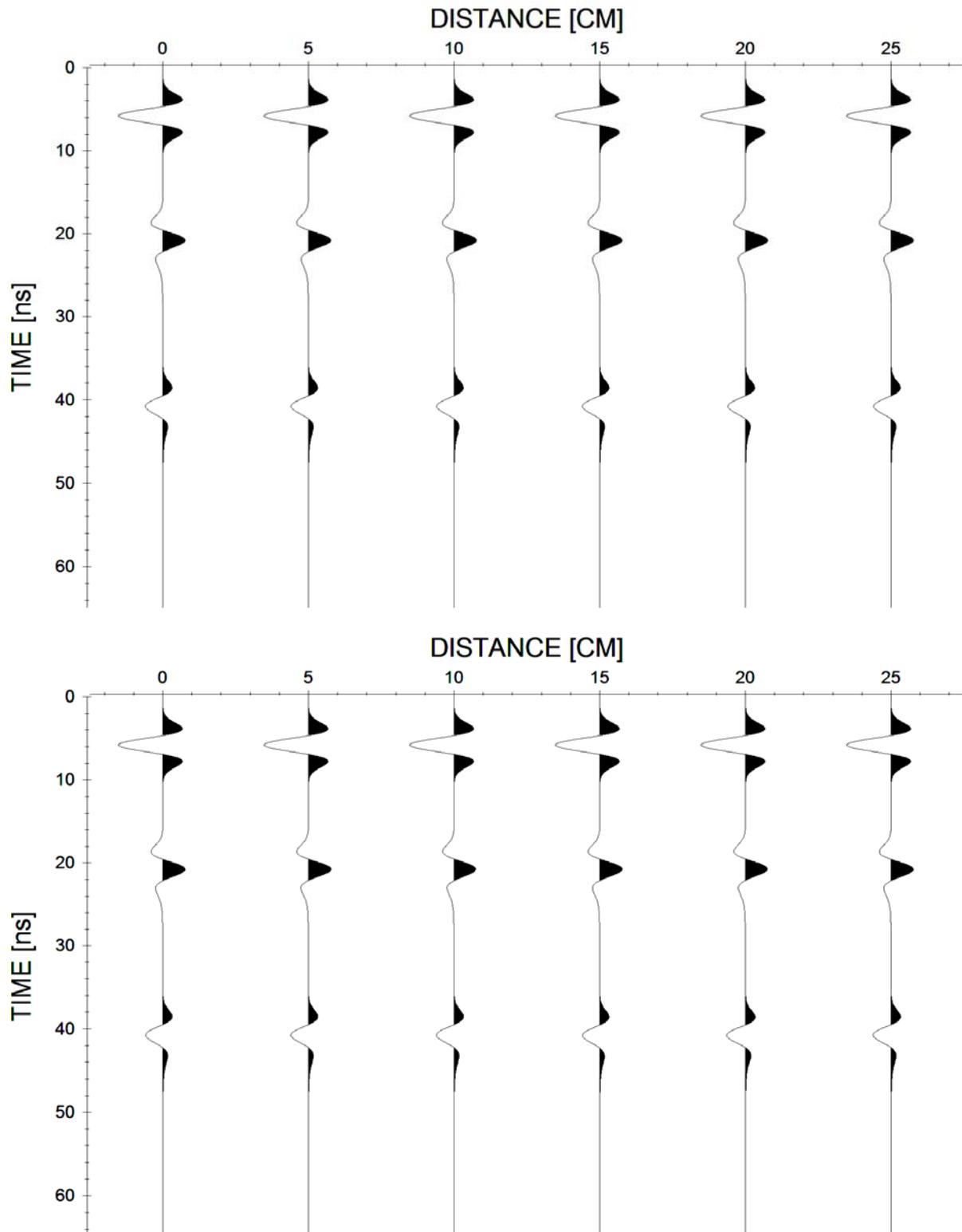


Figura 4.14 – GPR – Modelo 1. Exemplo 3. Superior: Secção de GPR sintética com seis traços, gerada com os valores verdadeiros dos fatores de qualidade (400, 15 e 50 para as camadas 1, 2 e 3, respectivamente). Inferior: Secção de GPR resultante da inversão simultânea dos seis traços, sem vínculo de continuidade lateral. As estimativas de Q_2 e Q_3 associadas com cada traço estão apresentadas na Tabela 4.3.

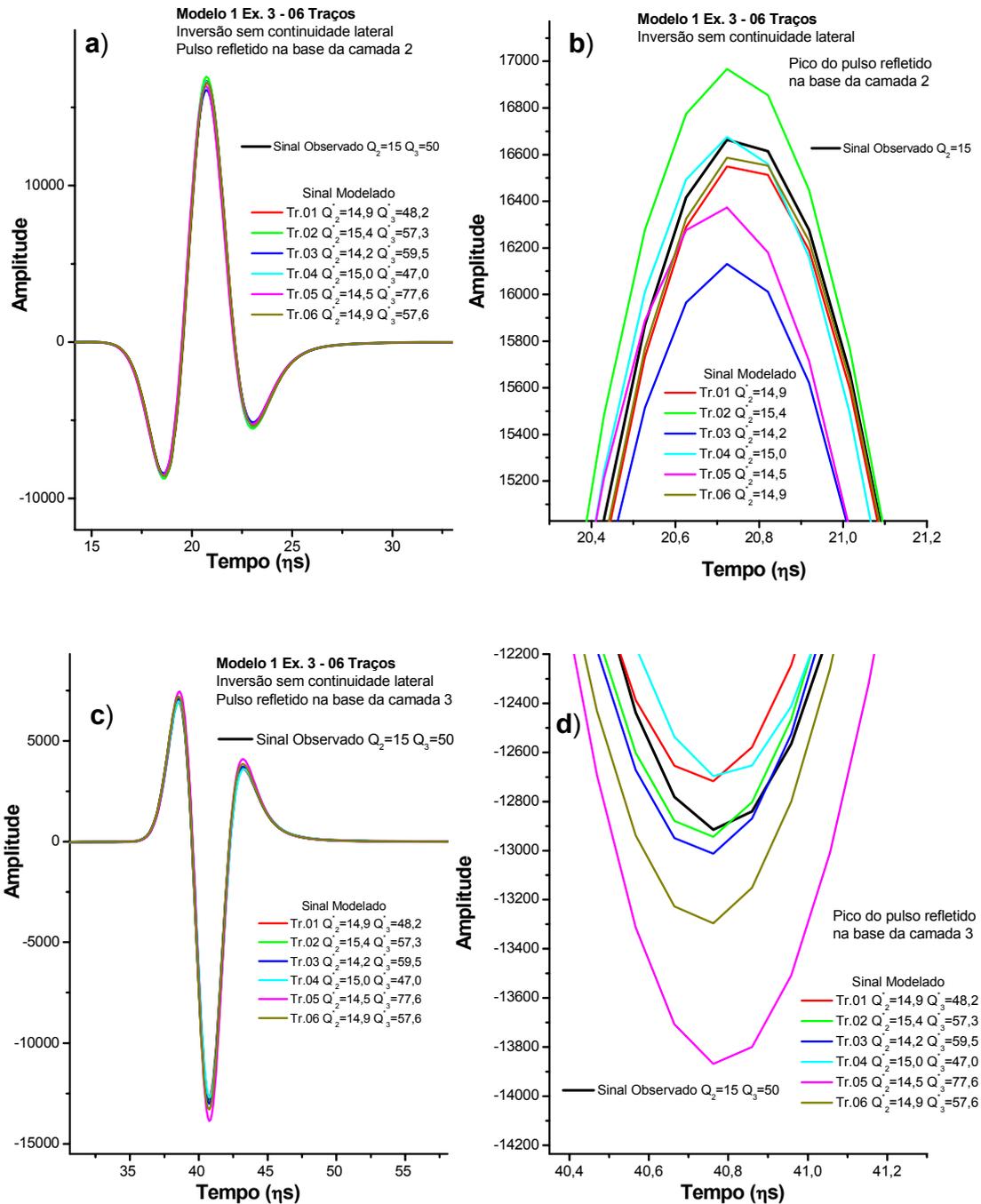


Figura 4.15 – GPR – Modelo 1. Exemplo 3. Inversão simultânea de seis traços, sem vínculo de continuidade lateral. Ajuste entre pulsos observado e modelado. a) pulso refletido na base da camada 2. b) Detalhe de (a) no entorno do pico de maior amplitude. c) Pulso refletido na base da camada 3. d) Detalhe de (c) no entorno do pico de maior amplitude. As estimativas de Q_2 e Q_3 associadas com cada traço estão apresentadas na Tabela 4.3. O pulso observado foi gerado com $Q_2 = 15$ e $Q_3 = 50$.

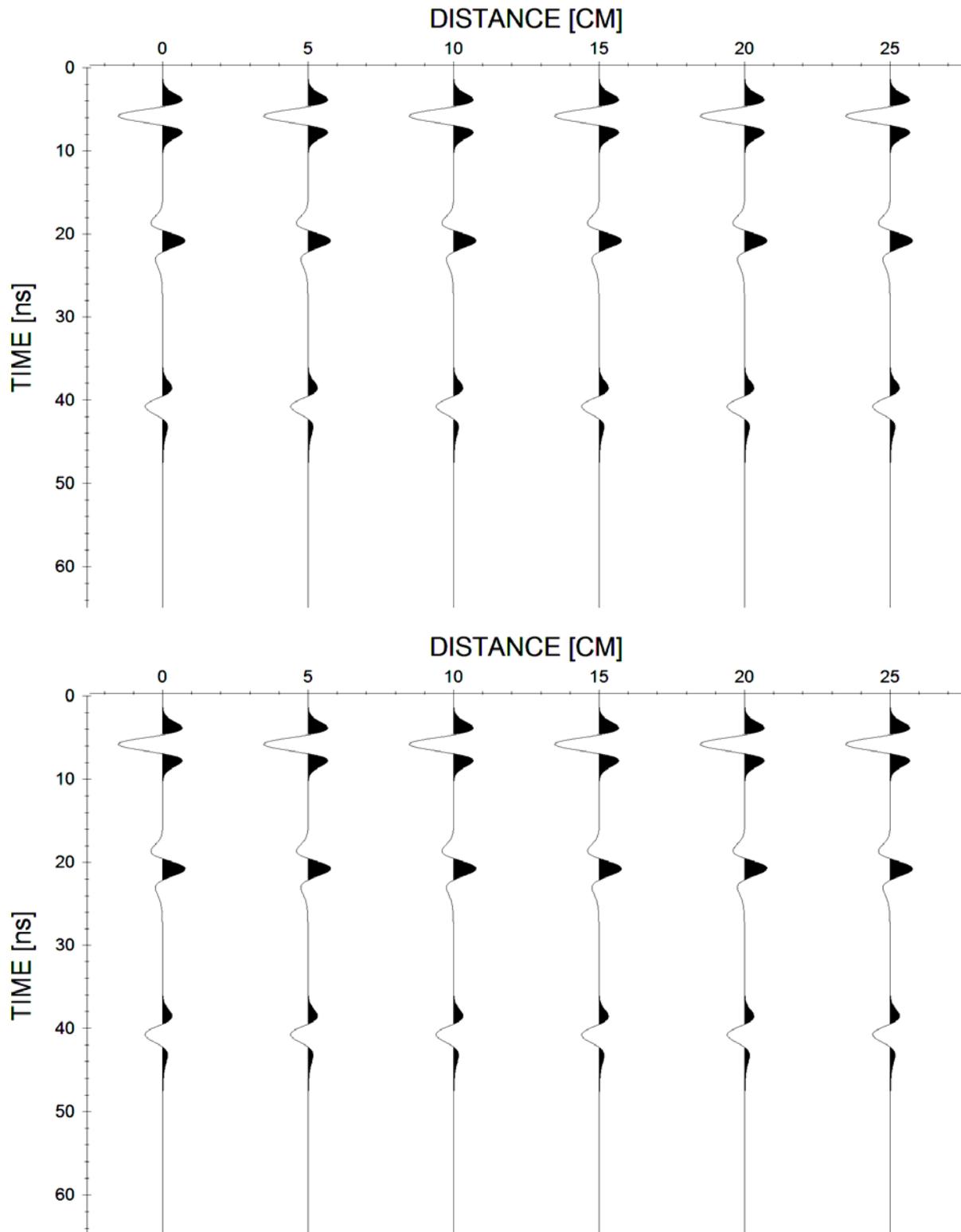


Figura 4.16 – GPR – Modelo 1. Exemplo 3. Superior: Secção de GPR sintética com seis traços, gerada com os valores verdadeiros dos fatores de qualidade (400, 15 e 50 para as camadas 1, 2 e 3, respectivamente). Inferior: Secção de GPR resultante da inversão simultânea dos seis traços, com adição de vínculo de continuidade lateral. As estimativas de Q_2 e Q_3 associadas com cada traço estão apresentadas na Tabela 4.4.

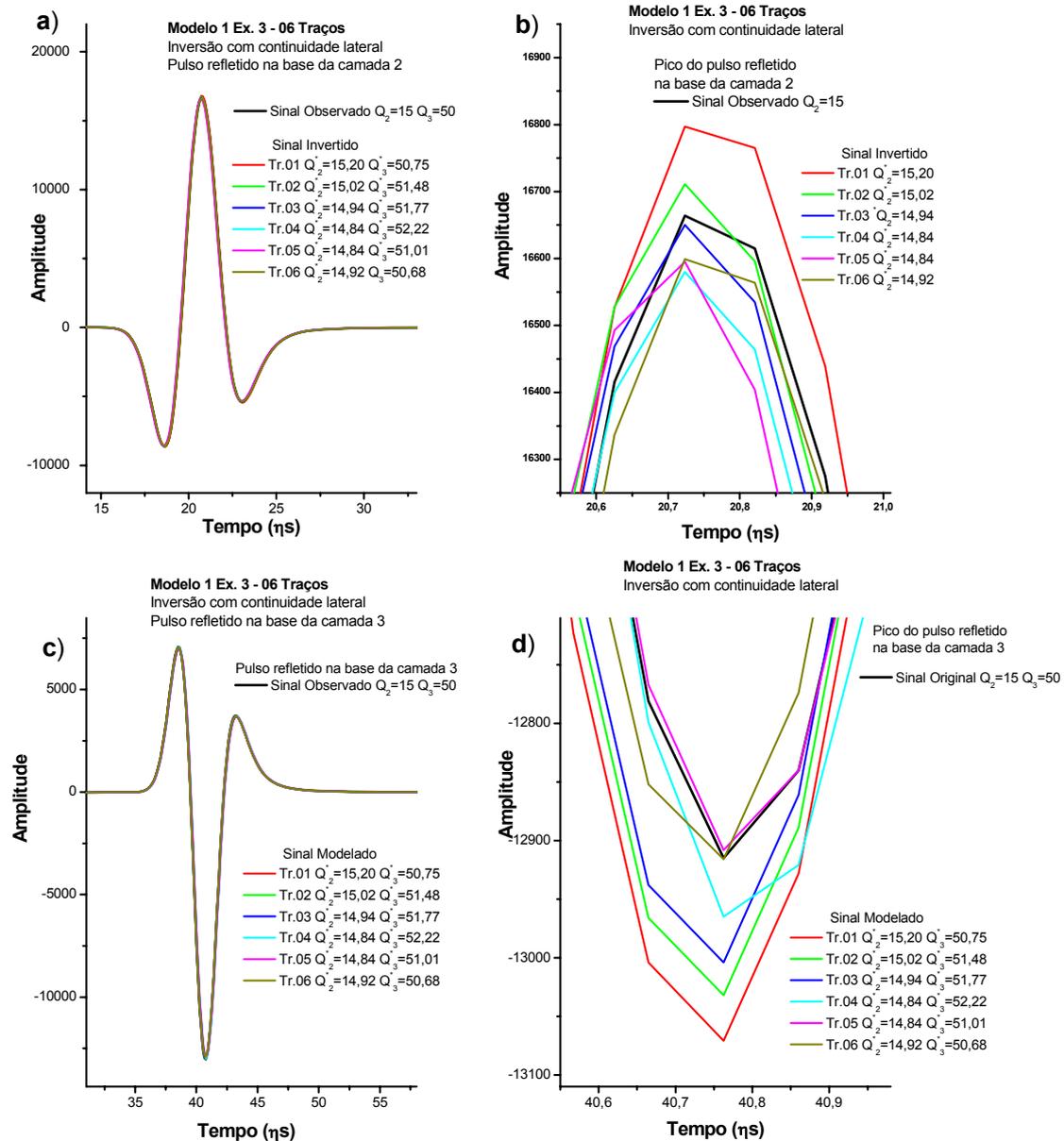


Figura 4.17 – GPR – Modelo 1. Exemplo 3. Inversão simultânea de seis traços, com vínculo de continuidade lateral. Ajuste entre pulsos observado e modelado. a) pulso refletido na base da camada 2. b) Detalhe de (a) no entorno do pico de maior amplitude. c) Pulso refletido na base da camada 3. d) Detalhe de (c) no entorno do pico de maior amplitude. As estimativas de Q_2 e Q_3 associadas com cada traço estão apresentadas na Tabela 4.4. O pulso observado foi gerado com $Q_2 = 15$ e $Q_3 = 50$.

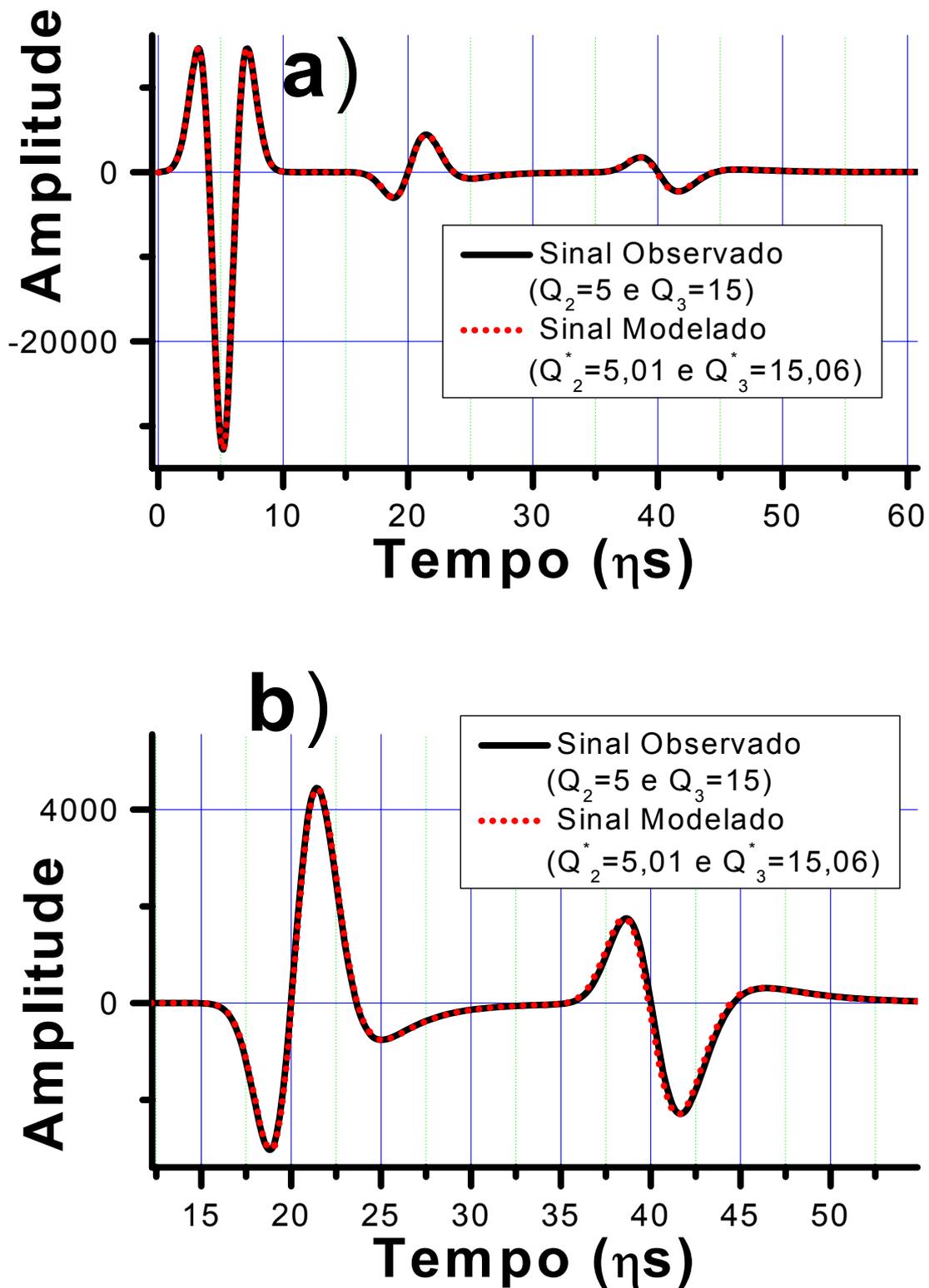


Figura 4.18 – GPR – Modelo 1. Exemplo 1. Análise da robustez em relação ao tempo de “picagem”. Ajuste entre os traços observado (em preto) e modelado (em vermelho), estando este último associado ao tempo de “picagem” $t_2 = 20.0 \eta\text{s}$ e $t_3 = 35.45 \eta\text{s}$. a) Traço inteiro b) Detalhes nos pulsos refletidos nas bases das camadas 2 e 3. O processo de otimização das equações (4.5) e (4.6) corrige o tempo duplo de percurso ($t_j - t_{j-1}$), deslocando corretamente o tempo t_2 para o início do pulso.

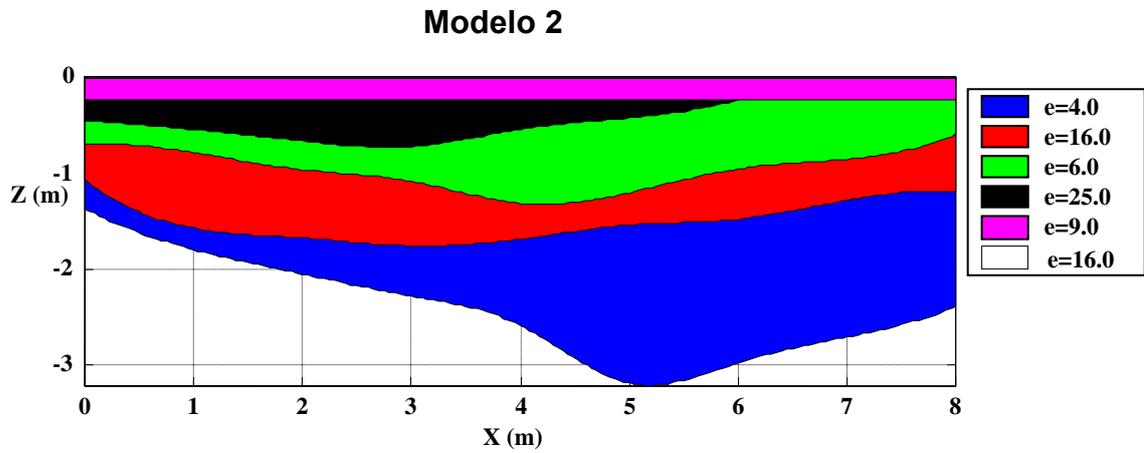


Figura 4.19 - GPR – Modelo 2. Modelo de camadas não horizontais usado para testar a sensibilidade da abordagem de inversão à relaxação da hipótese de caminho único para o raio em uma dada vertical.

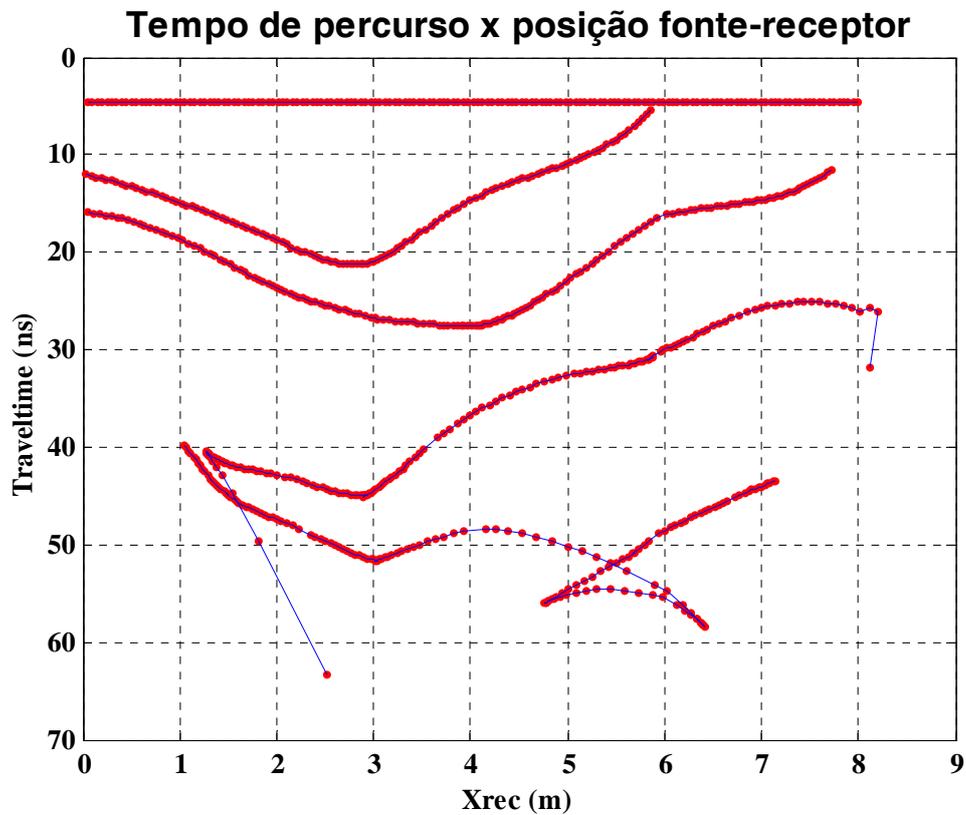


Figura 4.20 - GPR - Modelo 2. Tempo de percurso em função da posição de fonte na condição zero-offset.

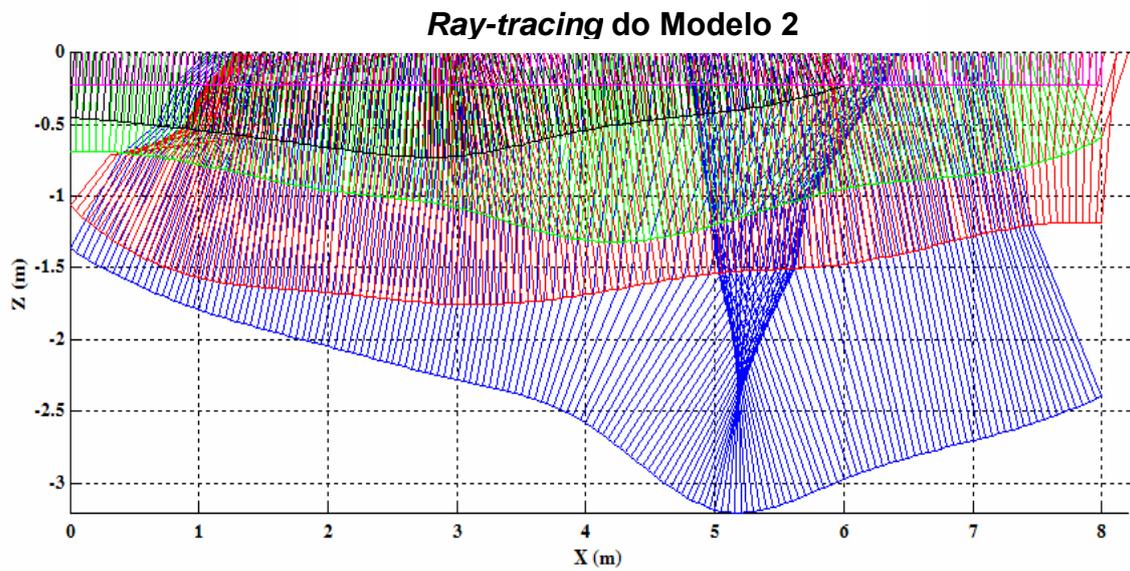


Figura 4.21 - GPR - Modelo 2. Traçado dos raios na condição zero-offset. Foi utilizado o programa de ray-tracing descrito no Anexo desta tese.

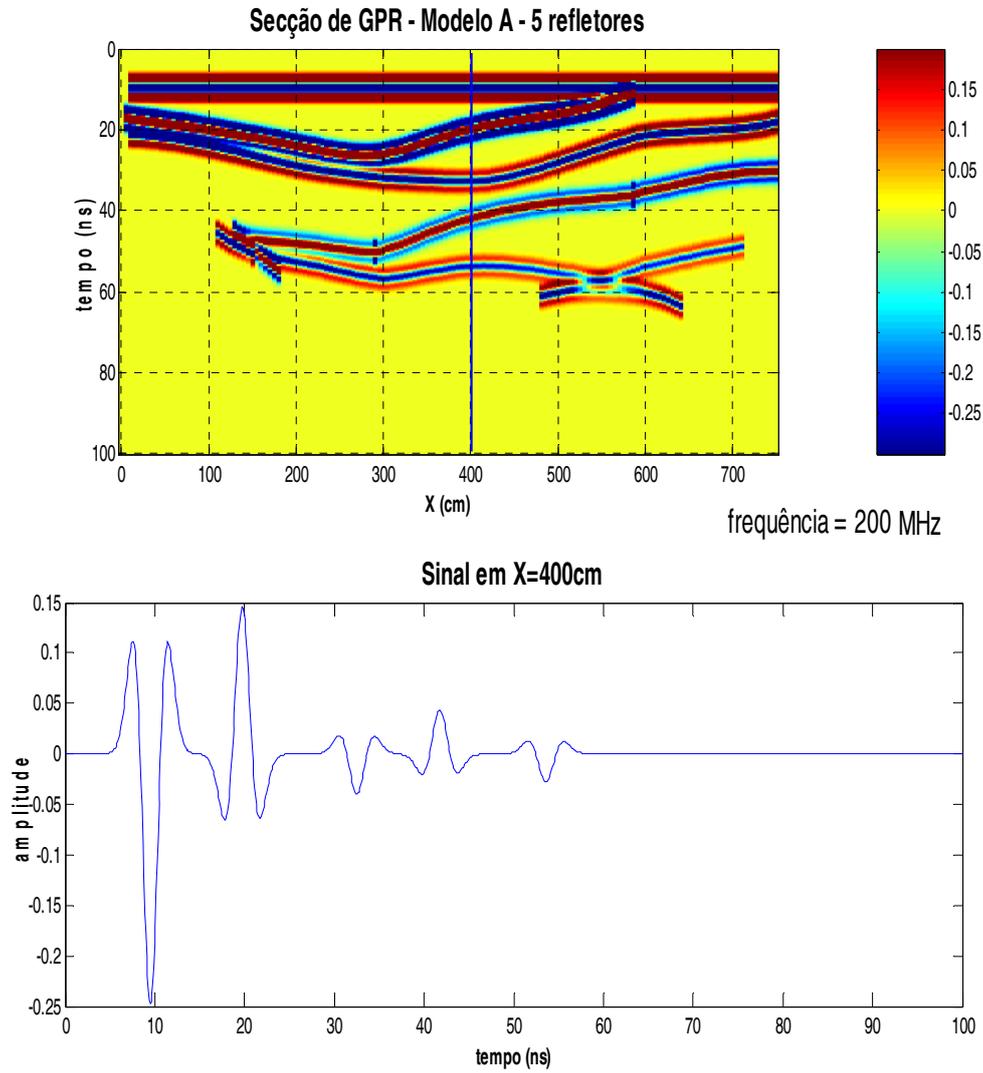


Figura 4.22 - GPR – Modelo 2. Superior: Secção de GPR zero-offset gerada com a frequência de 200 MHz e utilizando fator de qualidade constante para todas as camadas e igual a 400. Inferior: Traço 81 na posição 4.0 m

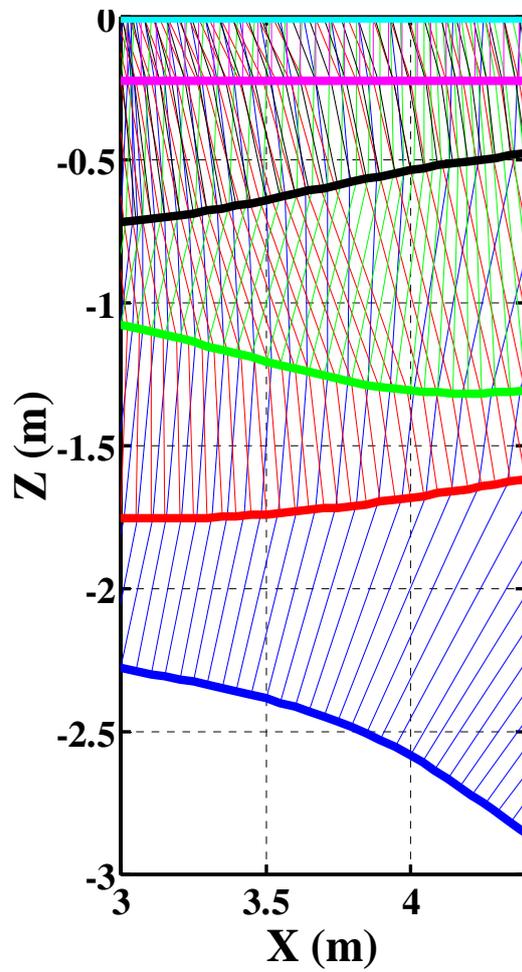


Figura 4.23 - GPR – Modelo 2. Ampliação do traçado dos raios no entorno do traço 55 (posição horizontal igual a 3.7 m), que foi utilizado no primeiro exemplo de inversão.

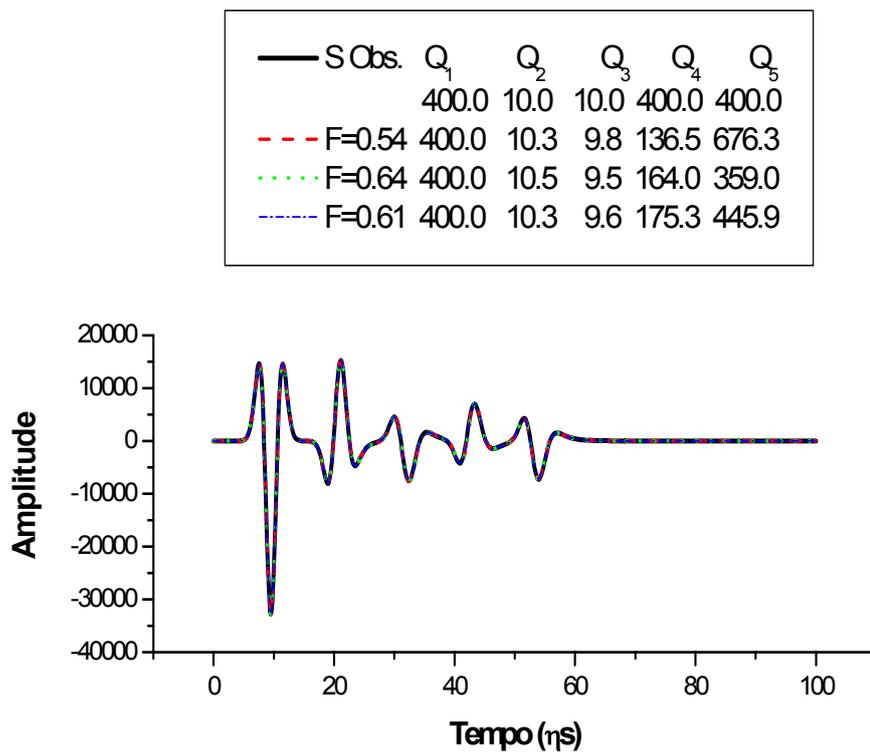


Figura 4.24 – GPR – Modelo 2. Exemplo 1. Traço 55 (posição horizontal 3.7 m), mostrando o ajuste do sinal observado com o sinal resultante da inversão de Q.

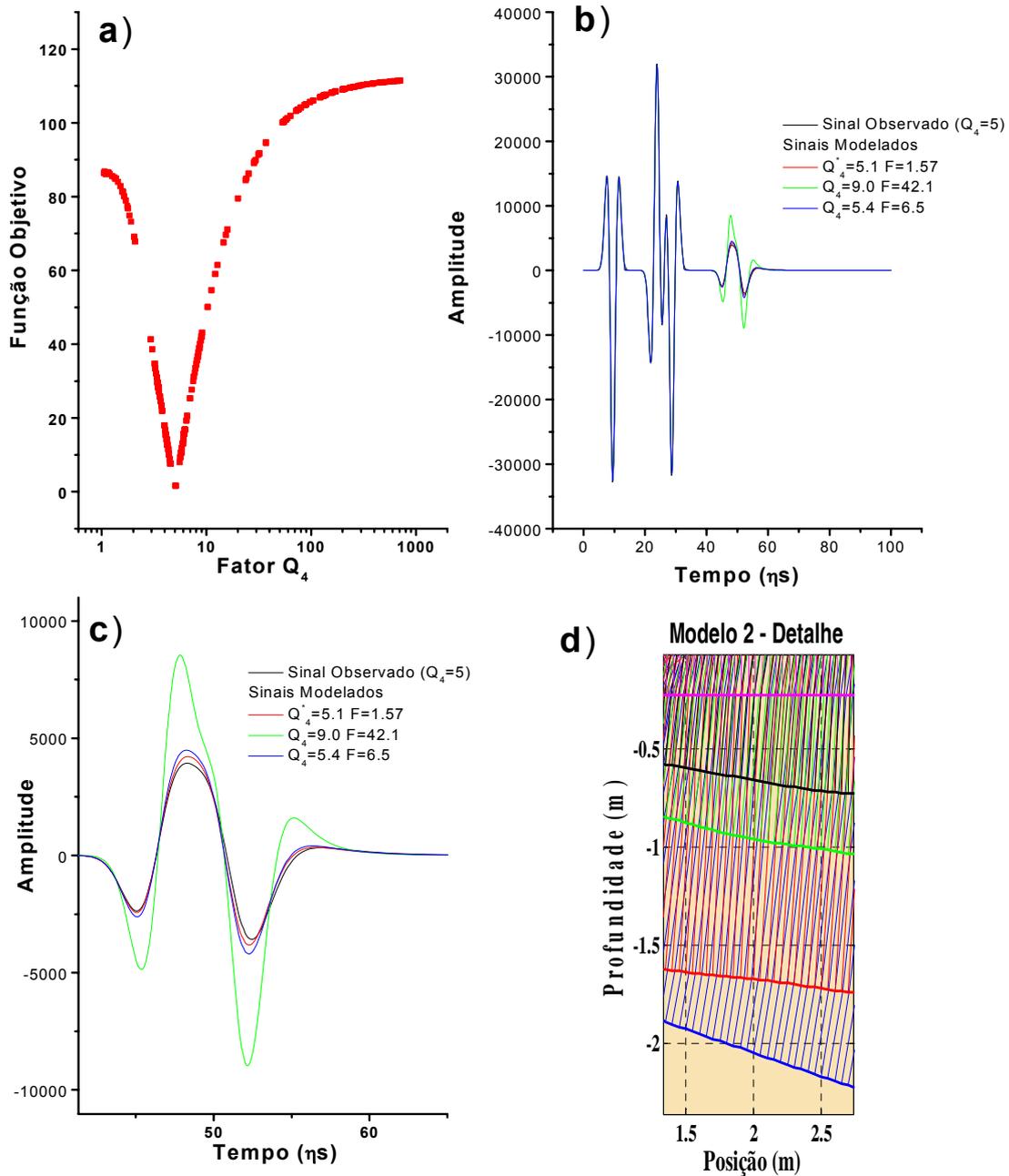


Figura 4.25 – GPR – Modelo 2. Exemplo 2. Traço 21. Inversão isolada de Q_4 . a) Variação da função objetivo com Q_4 . b) Comparação entre traços observado e modelados. Além do valor ótimo de Q_4 , são também mostrados os traços gerados com outros valores de Q , de modo a se avaliar a sensibilidade do ajuste. c) Ampliação de (b) para os pulsos refletidos nas bases das camadas 4 e 5. Estes dois pulsos sofrem interferência construtiva (tunelamento). d) Ampliação da Figura 4.21 no entorno do traço 51 (posição horizontal 2.0 m).

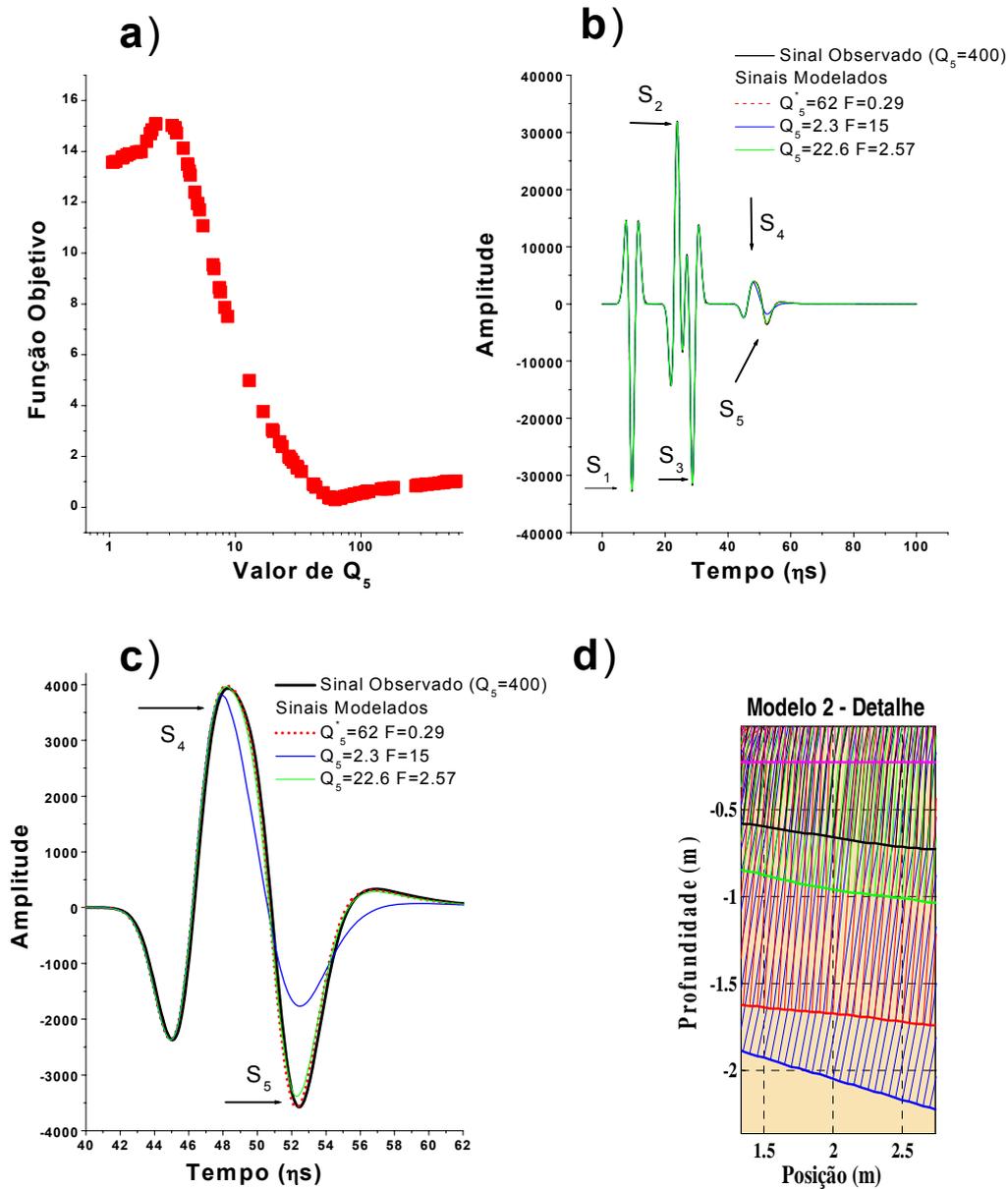


Figura 4.26 – GPR – Modelo 2. Exemplo 2. Inversão isolada de Q_5 . a) Função Objetiva. b) Ajuste do traço 21 para vários valores de Q_5 ; são indicados os picos dos pulsos refletidos nas cinco camadas. c) Ampliação de (b) mostrando o detalhe dos ajustes dos sinais refletidos nas bases das camadas 4 e 5, para vários valores de Q_5 . d) Detalhe do Modelo 2 em torno de $X=2$ m.

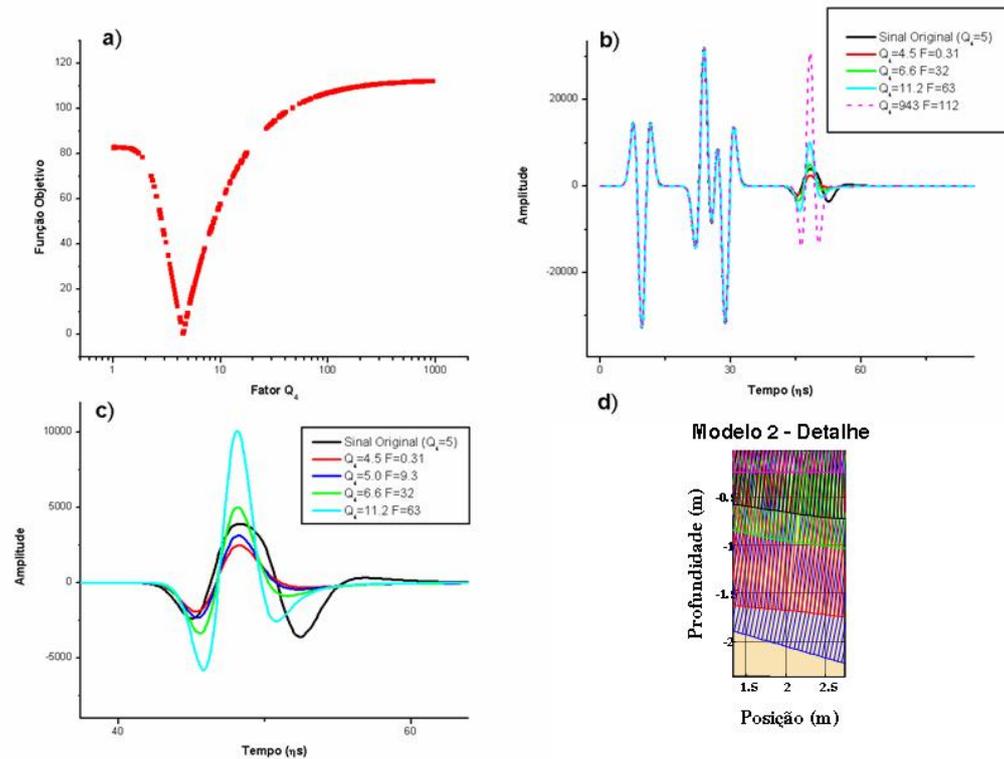


Figura 4.27 – GPR – Modelo 2. Exemplo 2. Traço 21. Inversão com modelo interpretativo diferente do modelo de geração do dado observado. a) Função Objetivo, mostrando um mínimo em $Q_4=4.5$. b) Ajuste do Traço 21 para vários valores de Q_4 . c) Ampliação de (b) mostrando o detalhe dos ajustes dos sinais refletidos na base da camada 4 para vários valores de Q_4 . d) Detalhe do Modelo 2 em torno do traço 21 ($X=2$ m). No traço 21 os sinais refletidos nas bases das camadas 4 e 5 sofrem interferência construtiva (tunelamento). O valor verdadeiro de Q_4 é 5.

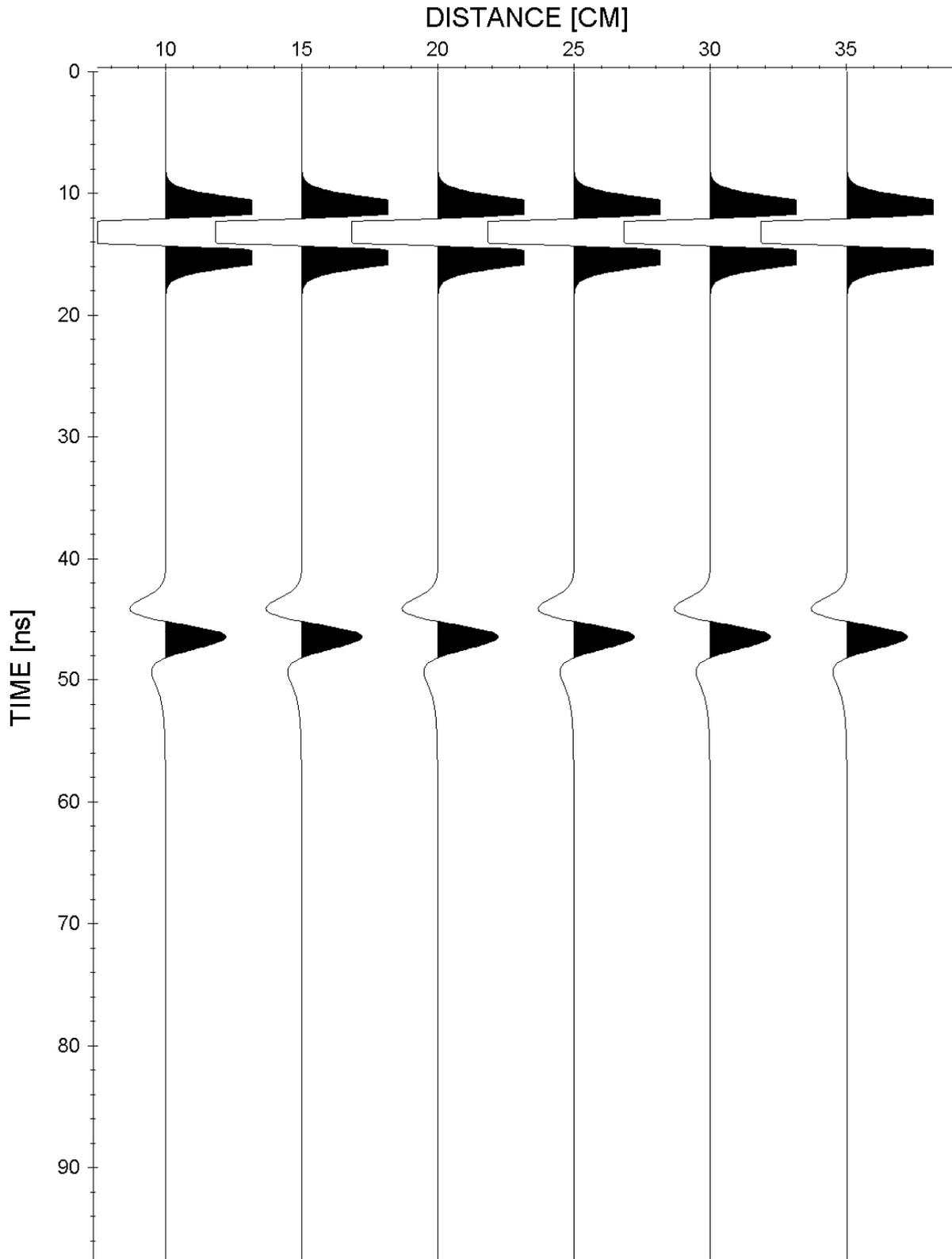


Figura 4.28 – GPR - Modelo 3. Radargrama sintético e sem ruído gerado com um modelo de duas camadas ($Q_1 = 400$ e $Q_2=16$).

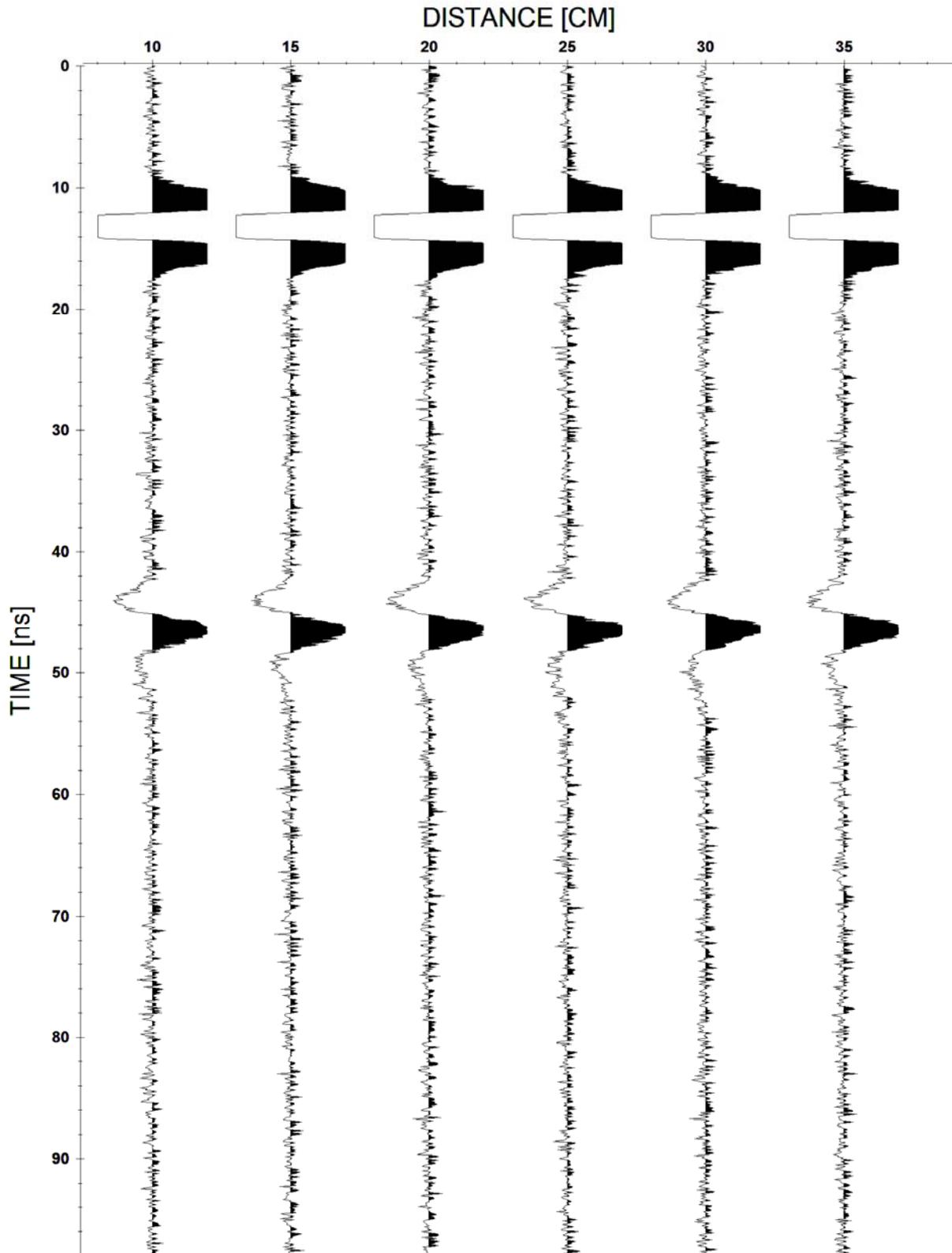


Figura 4.29 – GPR - Modelo 3. Radargrama sintético com adição de ruído. O radargrama sem ruído está apresentado na Figura 4.28. Foi adicionado ruído Gaussiano em amplitude e branco em frequência. A amplitude máxima do ruído é igual a 20% do pico do pulso refletido na base da camada 2.

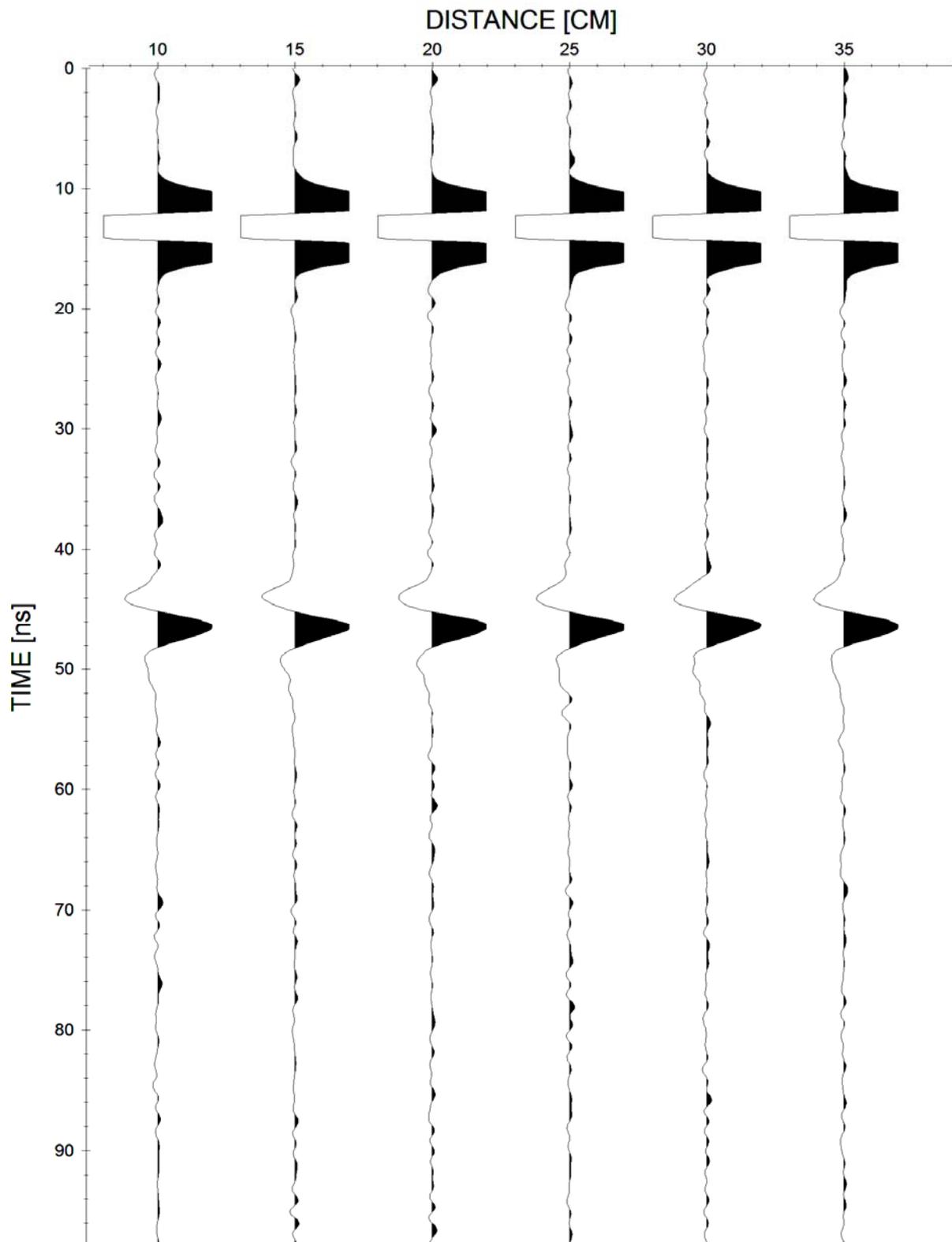


Figura 4.30 – GPR - Modelo 3. Radargrama resultante da filtragem do radargrama apresentada na Figura 4.29. O filtro utilizado é passa baixa com parâmetros de corte: *upper plateau* = 650 MHz e *upper cutoff* = 700 MHz. A amplitude máxima do ruído remanescente é da ordem de 9% do pico do pulso refletido na base da camada 2.

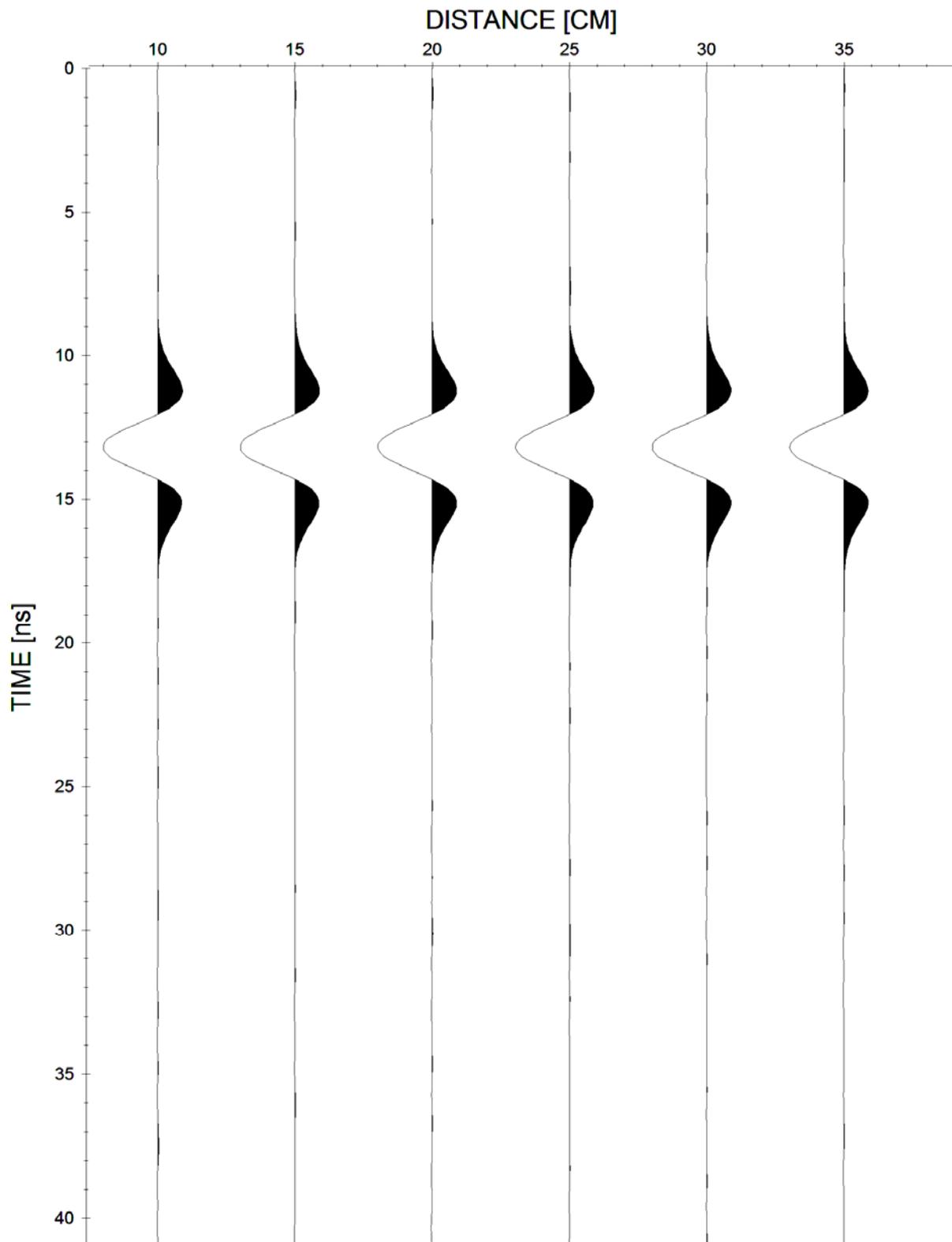


Figura 4.31 – GPR - Modelo 3. Pulsos de referência correspondentes aos pulsos refletidos na base da camada 1. A amplitude máxima do ruído remanescente é da ordem de 1.9% do pico máximo desse pulso sem ruído.

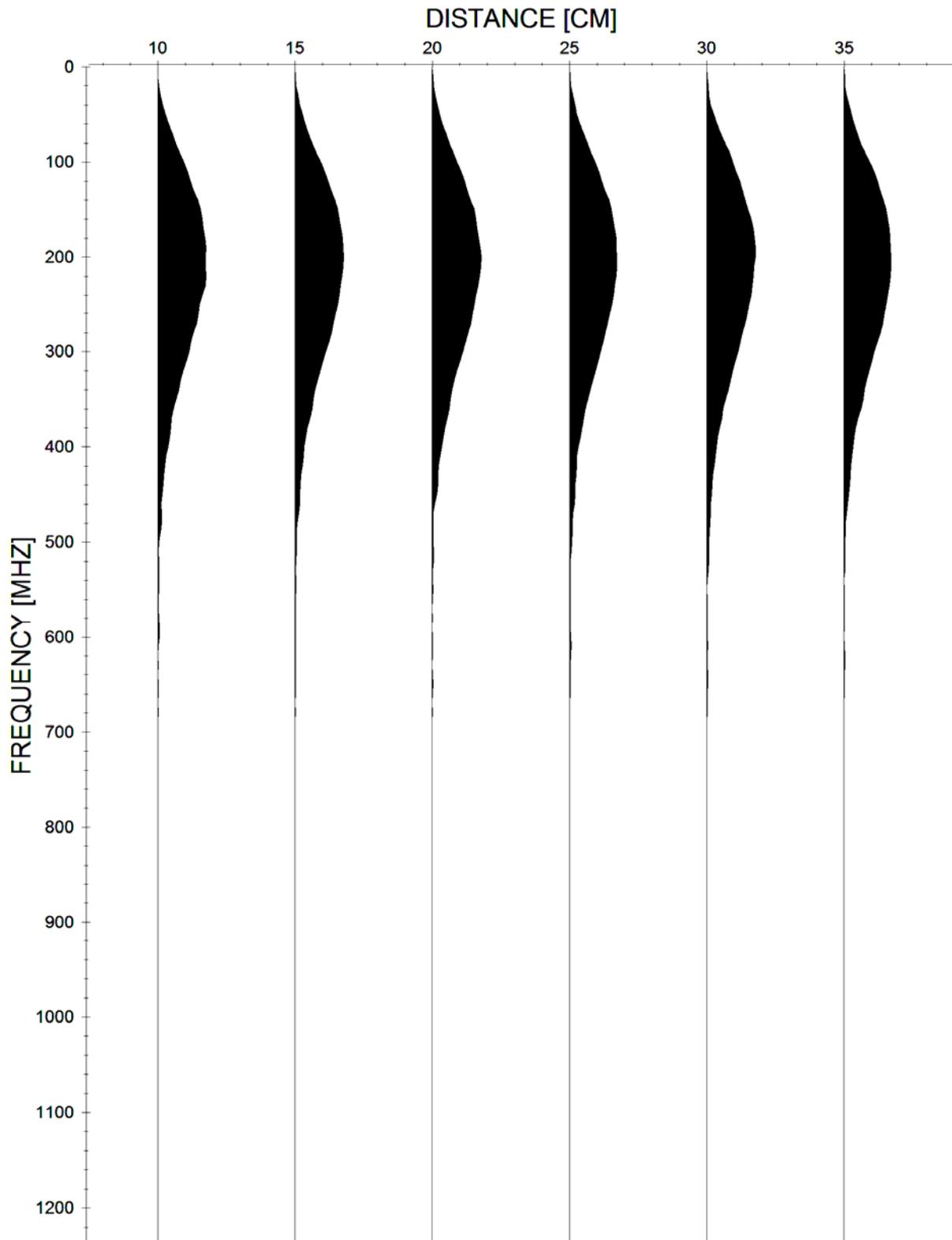


Figura 4.32 – GPR - Modelo 3. Espectros de amplitude dos pulsos de referência mostrados na Figura 4.31. O conteúdo de frequência está concentrado em torno de 200 MHz. O início da faixa do espectro que é dominado pelo ruído não está muito bem definido, podendo estar entre 440 e 500 MHz.

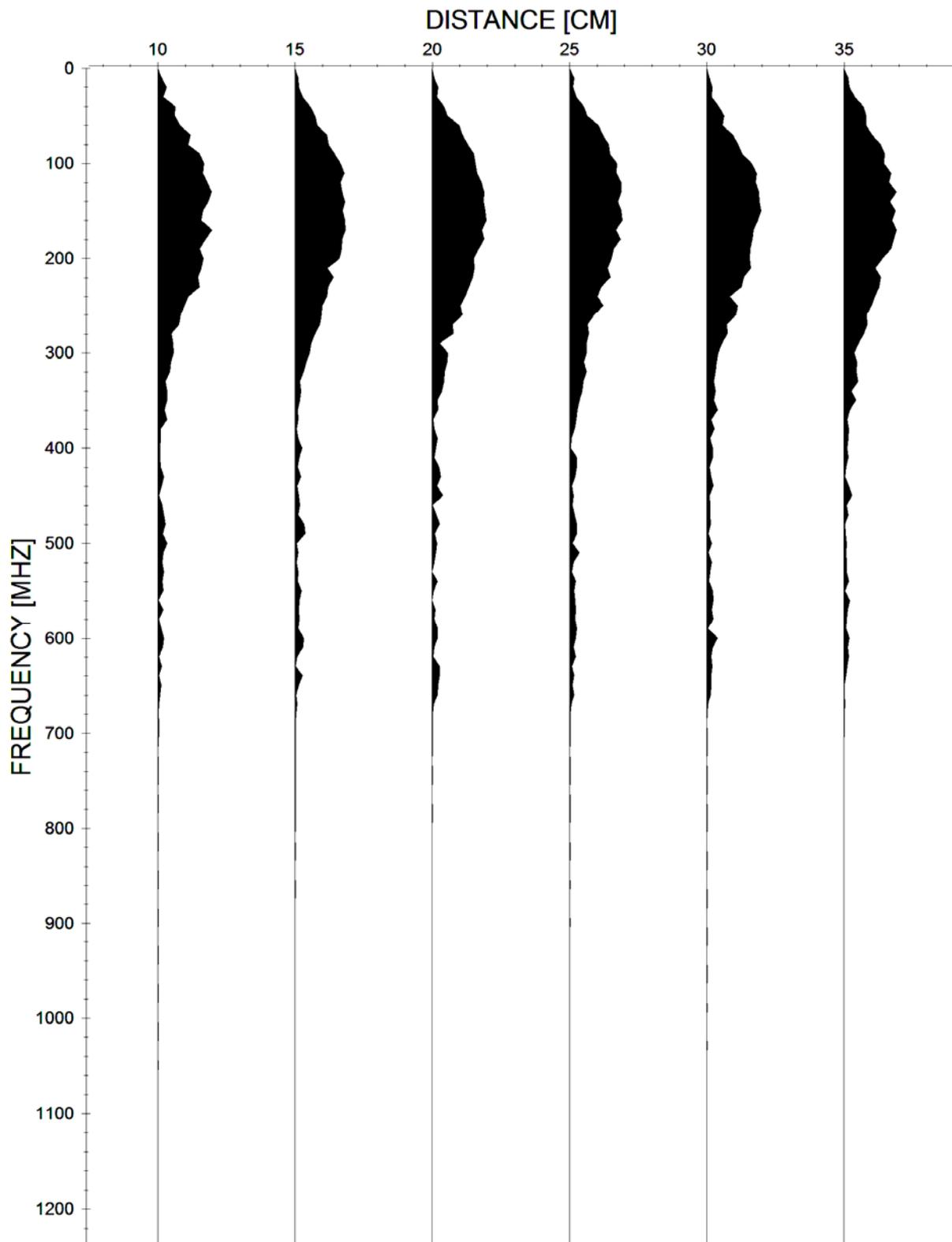


Figura 4.33 – GPR - Modelo 3. Espectro de amplitude dos pulsos refletidos na base da camada 2, mostrados na Figura 4.30. Foi utilizada uma janela entre 25 ns e 100 ns para eliminar a contribuição do pulso da primeira reflexão. O conteúdo de frequência está concentrado em torno de 150 MHz. A faixa do espectro entre 400 MHz e 700 MHz é dominada pelo ruído.

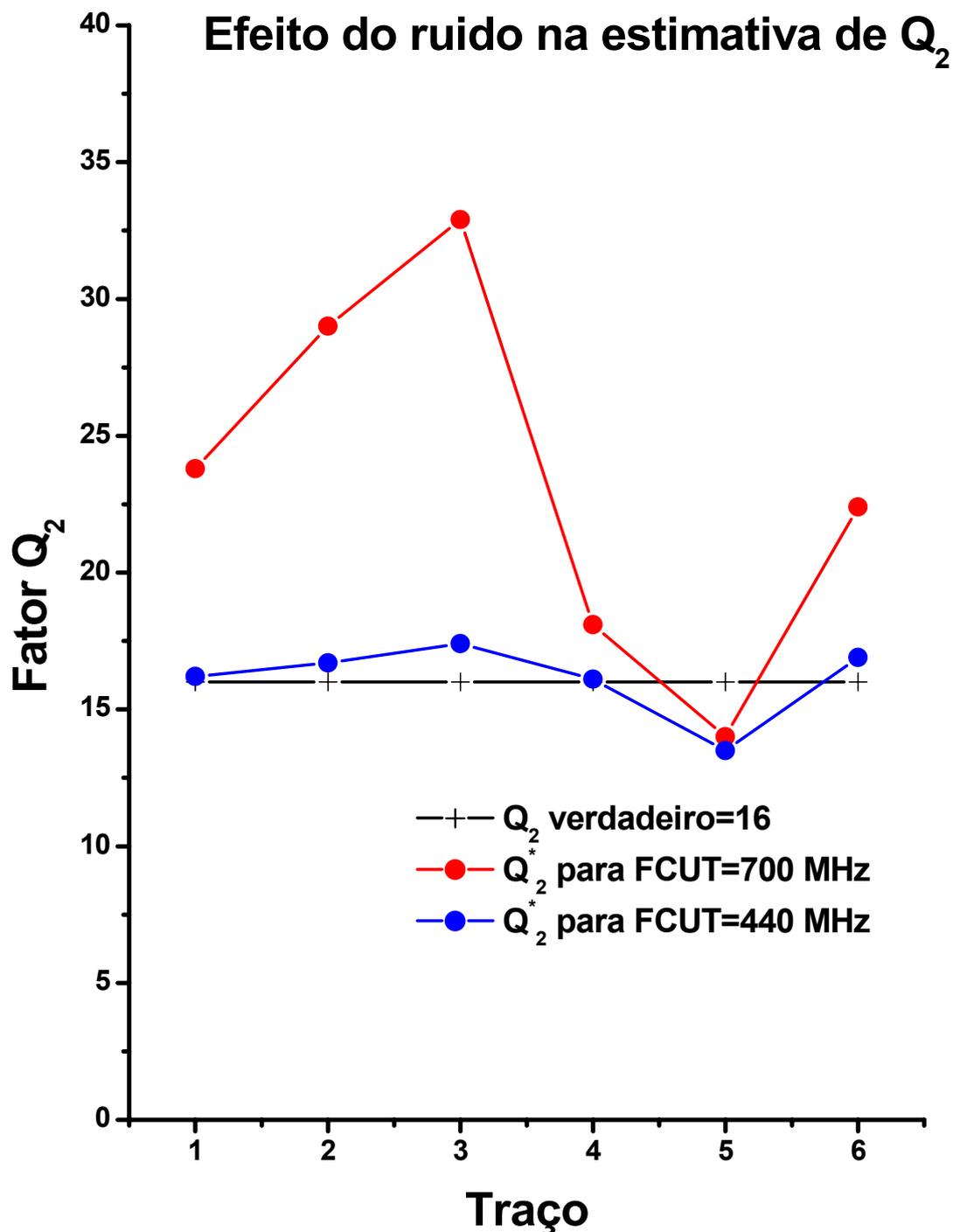


Figura 4.34 – GPR – Modelo 3. Estimativa de Q para cada um dos seis traços mostrados na Figura 4.30. O sinal está contaminado com ruído que está concentrado na faixa de frequência do sinal de referência (< 700 MHz) e tem amplitude máxima igual a 9% do pico do sinal a ser invertido. FCUT é o limite de integração do espectro para o cálculo do centróide de frequência. Em vermelho, os valores de Q estimados usando FCUT=700 MHz. Em azul, os valores de Q estimados usando FCUT=440 MHz. A inversão de cada traço foi realizada isoladamente.

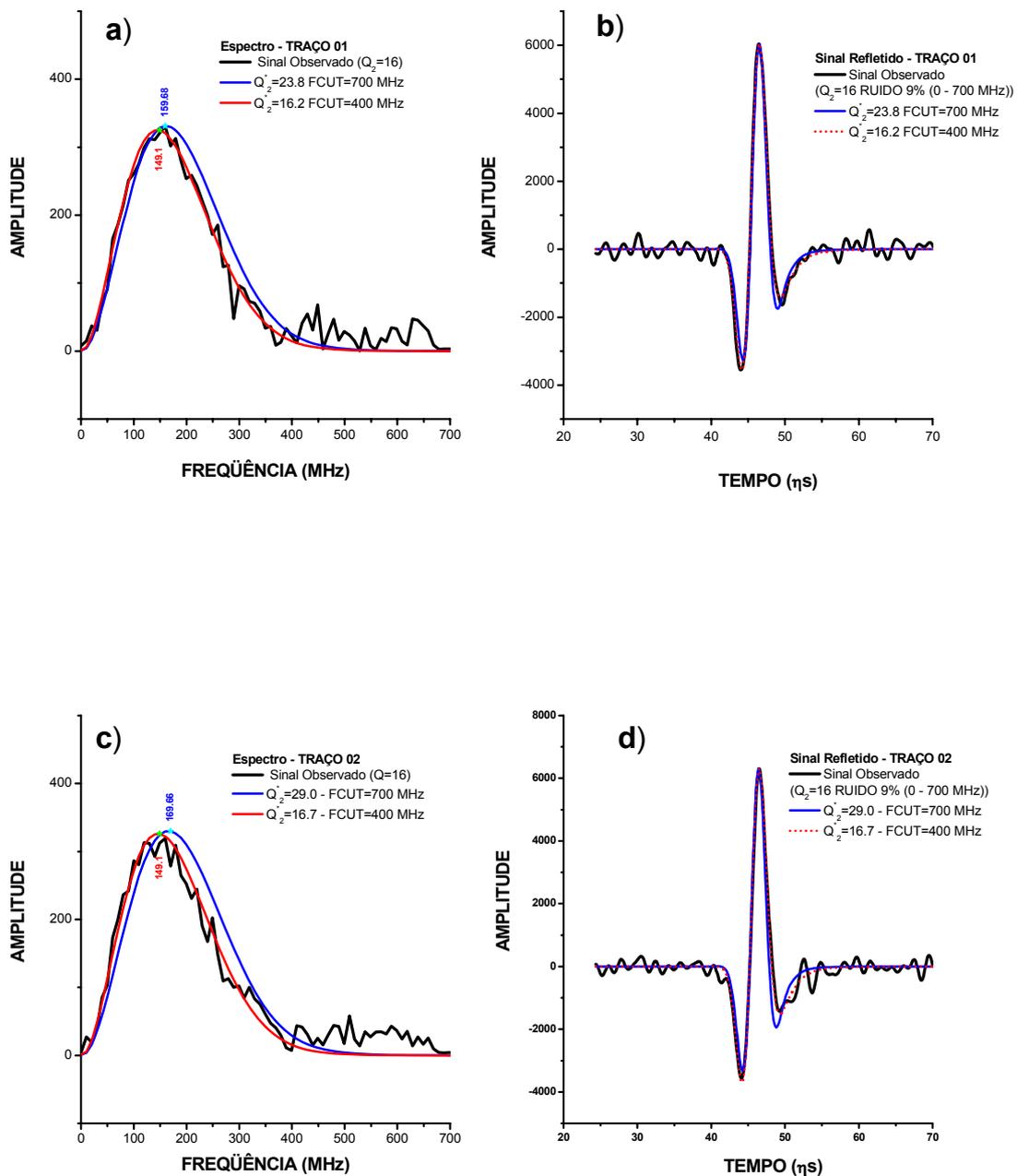


Figura 4.35 – GPR – Modelo 3. (a) e (b) se referem ao traço 1 e (c) e (d), ao traço 2. a) Espectros dos sinais observado e modelados; b) Sinais observado e modelados. Em preto, sinal observado. Em azul e vermelho, sinais modelados para FCUT=700 MHz e FCUT=440 MHz, respectivamente. Os espectros dos sinais modelados foram normalizados (vide texto). O sinal observado contém ruído (faixa de 0 a 700 MHz) de cerca de 9% do pico de amplitude do pulso refletido na base da camada 2.

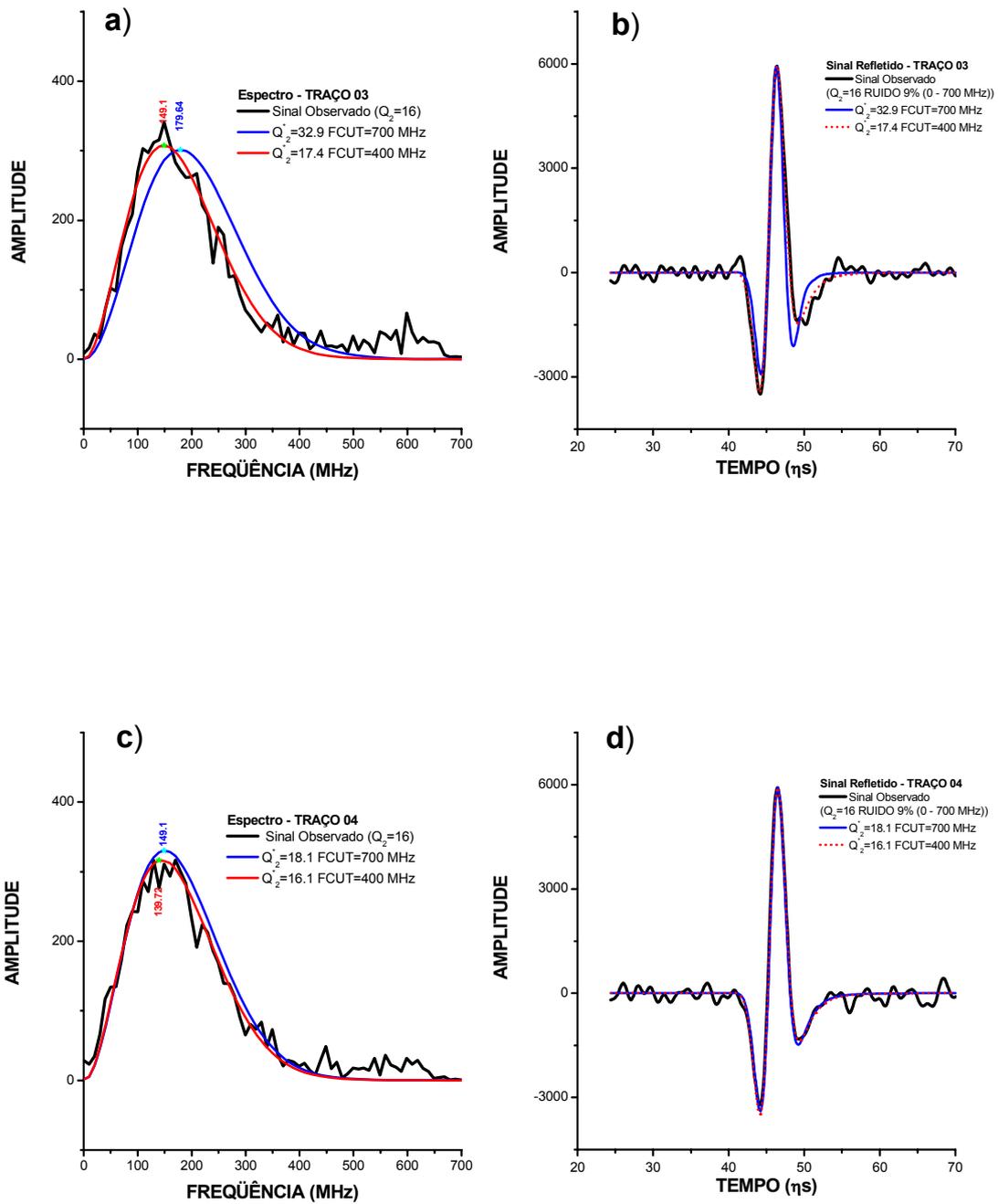


Figura 4.36 – GPR – Modelo 3. (a) e (b) se referem ao traço 3 e (c) e (d), ao traço 4. a) Espectros dos sinais observado e modelados; b) Sinais observado e modelados. Em preto, sinal observado. Em azul e vermelho, sinais modelados para FCUT=700 MHz e FCUT=440 MHz, respectivamente. Os espectros dos sinais modelados foram normalizados (vide texto). O sinal observado contém ruído (faixa de 0 a 700 MHz) de cerca de 9% do pico de amplitude do pulso refletido na base da camada 2.

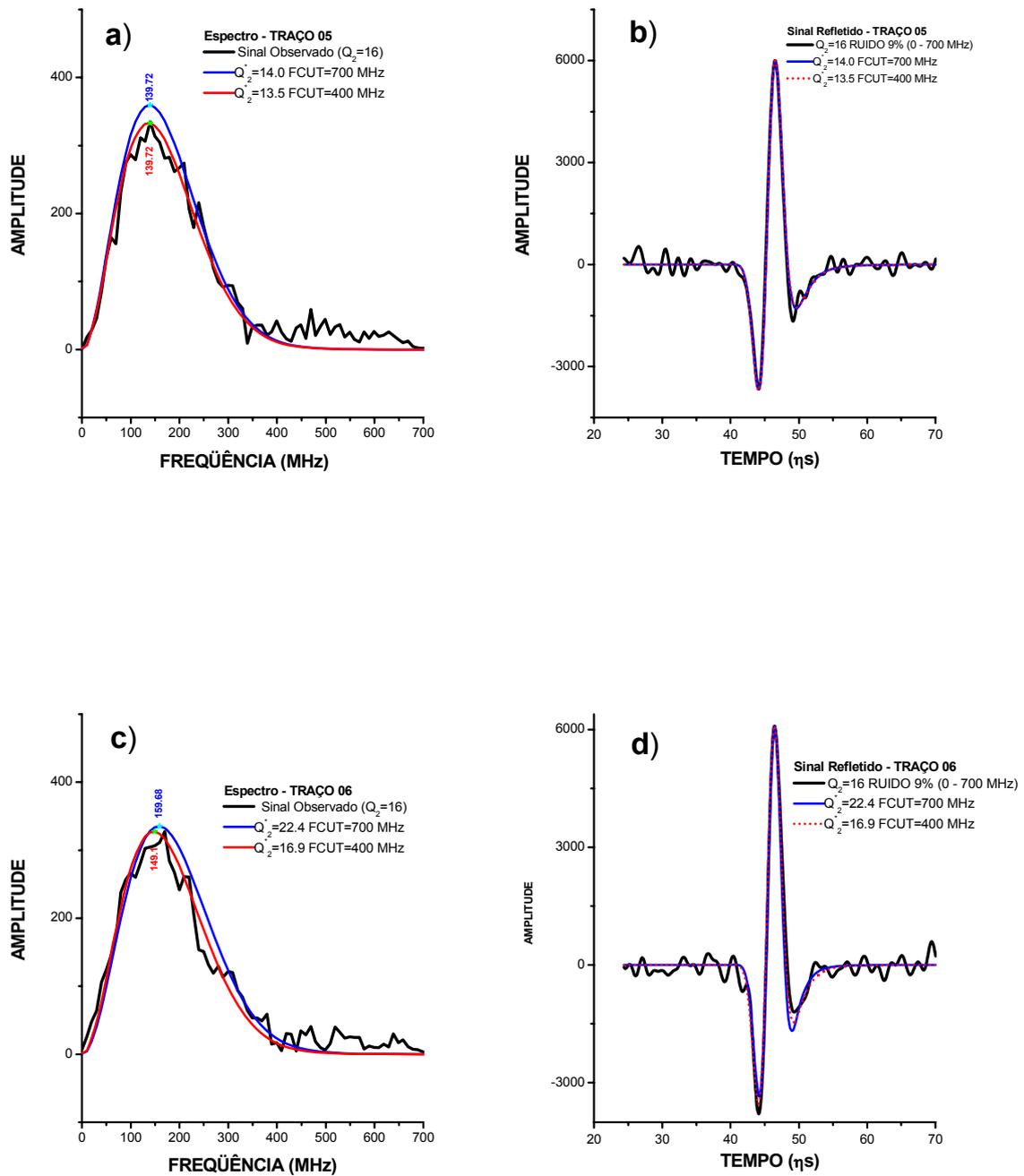


Figura 4.37 – GPR – Modelo 3. (a) e (b) se referem ao traço 5 e (c) e (d), ao traço 6. a) Espectros dos sinais observado e modelados; b) Sinais observado e modelados. Em preto, sinal observado. Em azul e vermelho, sinais modelados para FCUT=700 MHz e FCUT=440 MHz, respectivamente. Os espectros dos sinais modelados foram normalizados (vide texto). O sinal observado contém ruído (faixa de 0 a 700 MHz) de cerca de 9% do pico de amplitude do pulso refletido na base da camada 2.

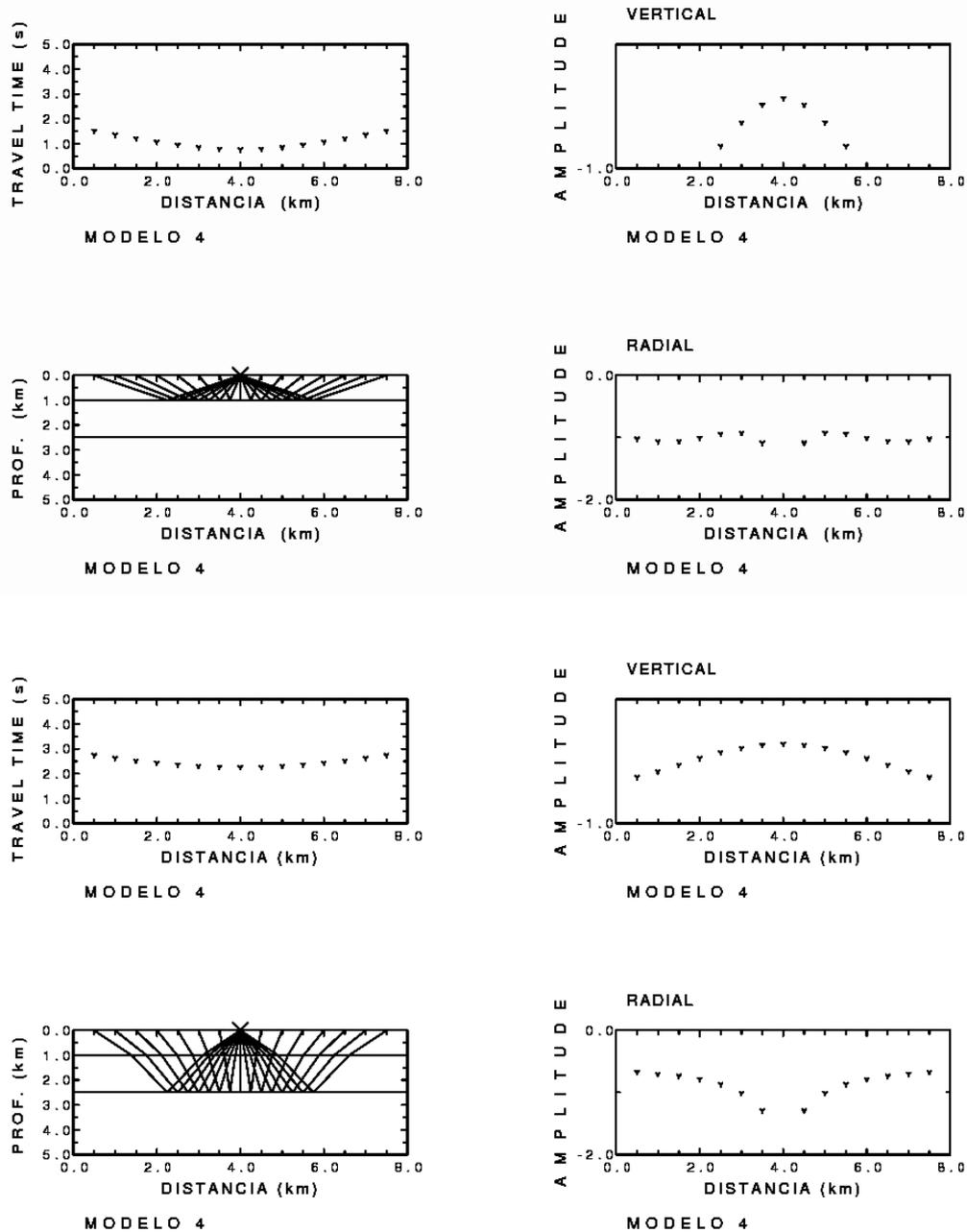


Figura 4.38– Sísmica – Modelo 4. Trajetória dos raios refletidos na base das camadas 1 e 2 e gráficos associados de tempo de trânsito (*travel time*) e amplitudes das componentes radial e vertical da onda P. A fonte está na posição 4.0 km. Foi utilizado o código SEIS88 (Cerveny & Psencik, 2006).

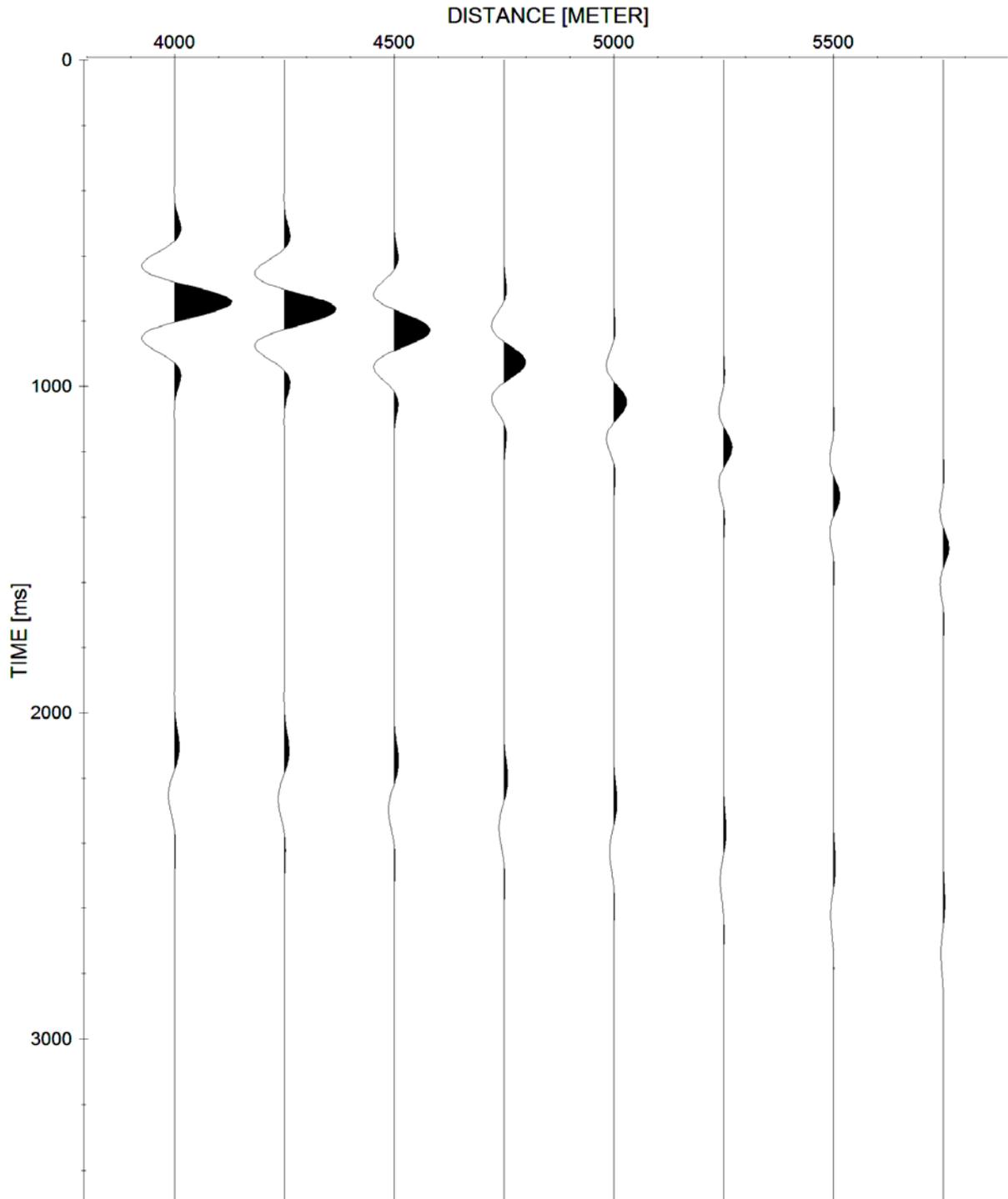


Figura 4.39 – Sísmica – Modelo 4. Caso $Q_2 = 7$. Secção CMP obtida com o programa SEIS88 de Cervený & Psencik (2006), utilizando um pulso de Gabor ($f = 4\text{KHz}$ e $\gamma_c = 4$), como sinal da fonte, e o modelo de dissipação de Futterman (1962).

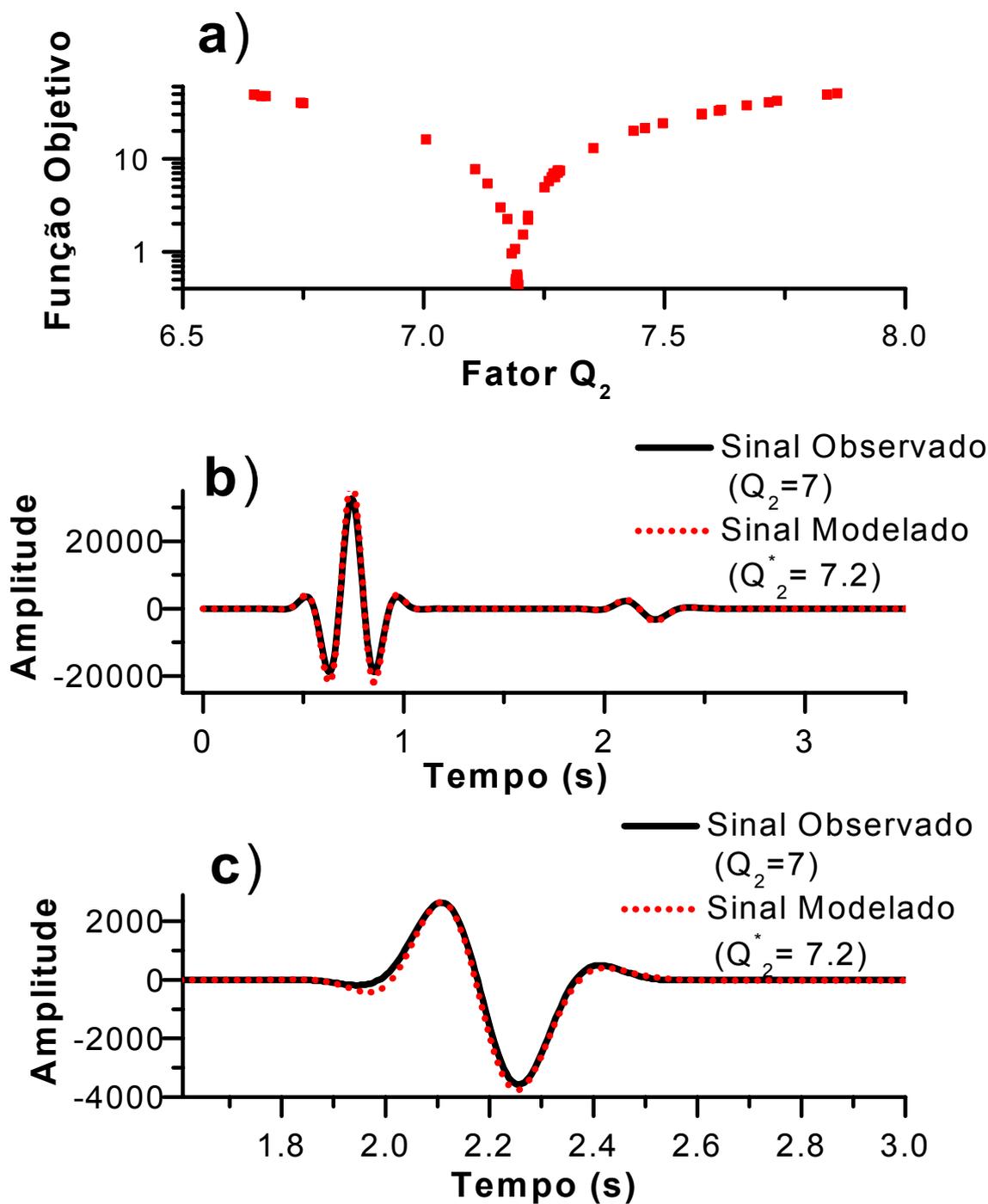


Figura 4.40 – Sísmica – Modelo 4. Caso $Q_2 = 7$. Resultados da inversão. a) Função objetivo. b) Ajuste entre pulsos observado e modelado, associados à reflexão na base da camada 2. c) Ampliação de (b) do pulso refletido na base da camada 2.

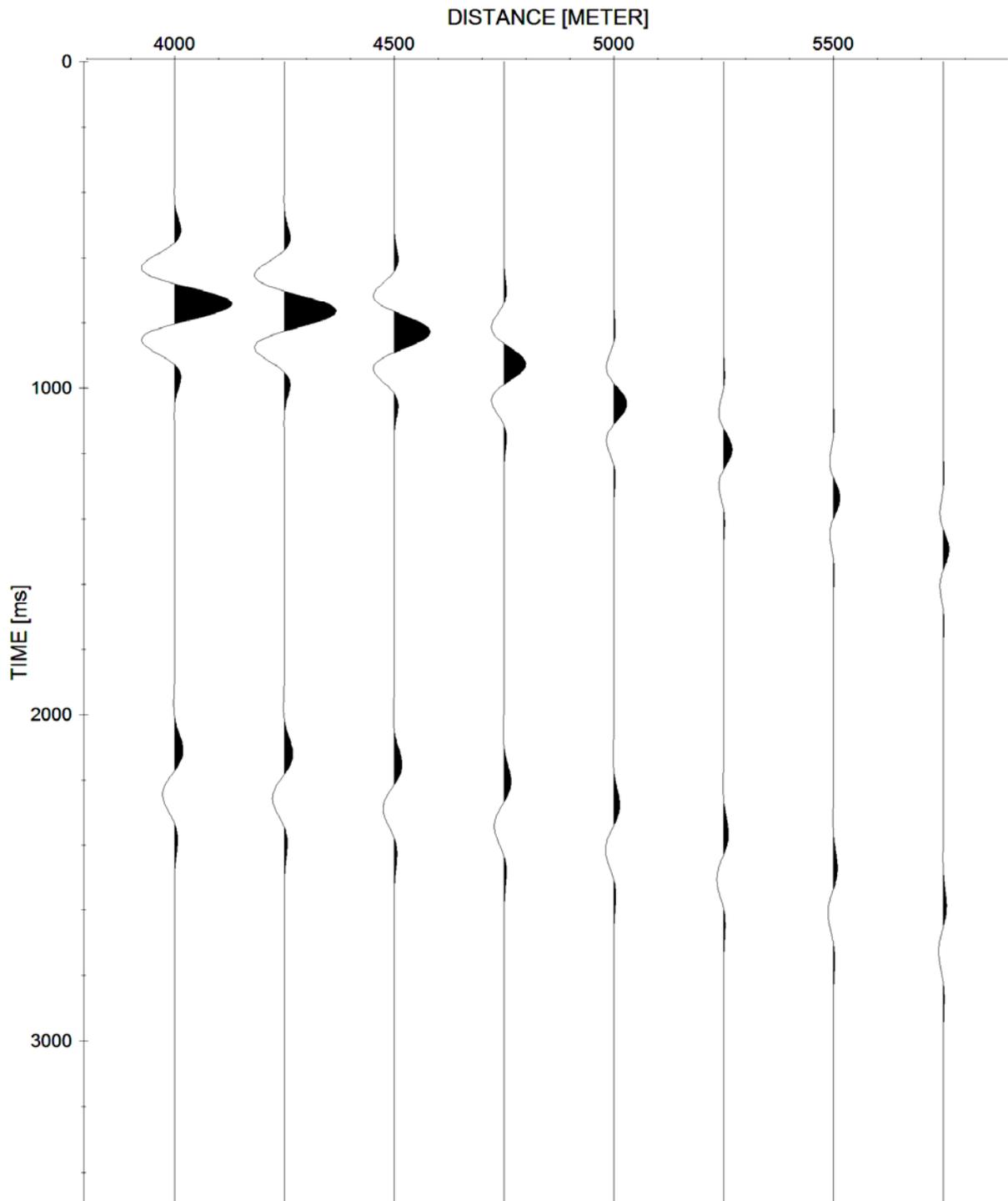


Figura 4.41 – Sísmica – Modelo 4. Caso $Q_2 = 10$. Secção CMP obtida com o programa SEIS88 de Cervený & Psencik (2006), utilizando um pulso de Gabor ($f = 4\text{KHz}$ e $\gamma_c = 4$), como sinal da fonte, e o modelo de dissipação de Futterman (1962).

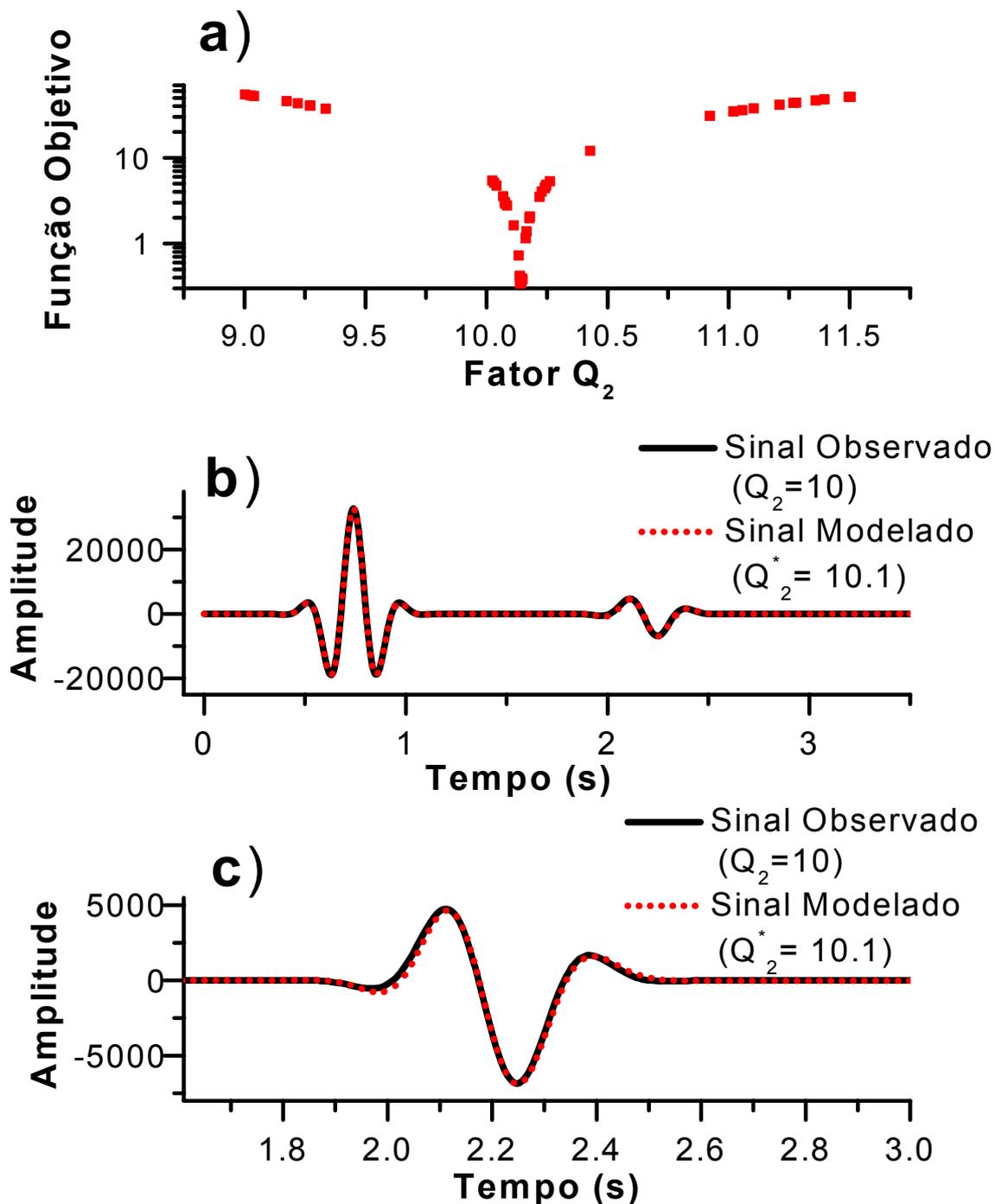


Figura 4.42 – Sísmica – Modelo 4. Caso $Q_2 = 10$. Resultados da inversão. a) Função objetivo. b) Ajuste entre pulsos observado e modelado, associados à reflexão na base da camada 2. c) Ampliação de (b) do pulso refletido na base da camada 2.

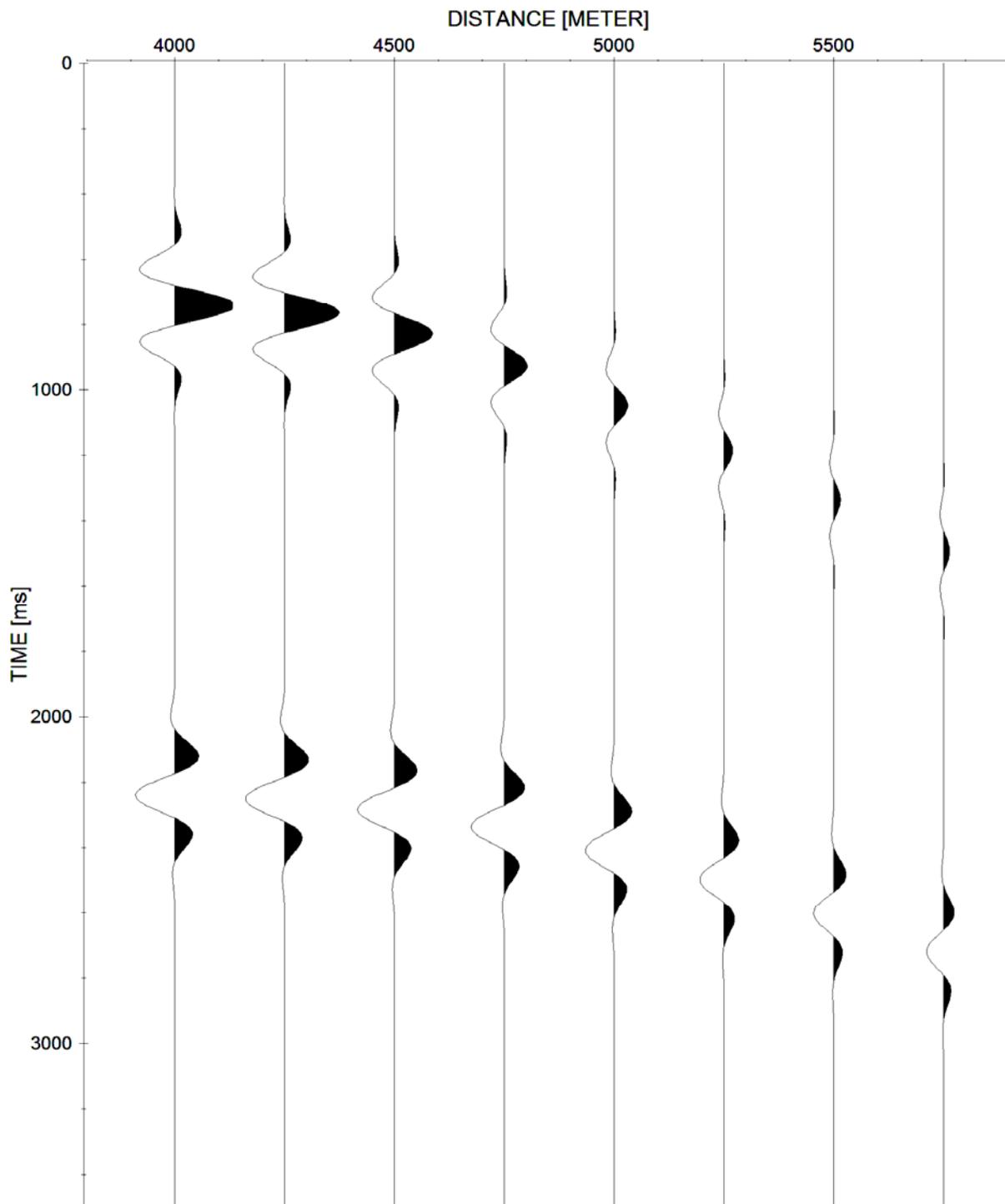


Figura 4.43 – Sísmica – Modelo 4. Caso $Q_2 = 30$. Secção CMP obtida com o programa SEIS88 de Cervený & Psencik (2006), utilizando um pulso de Gabor ($f = 4\text{KHz}$ e $\gamma_c = 4$), como sinal da fonte, e o modelo de dissipação de Futterman (1962).

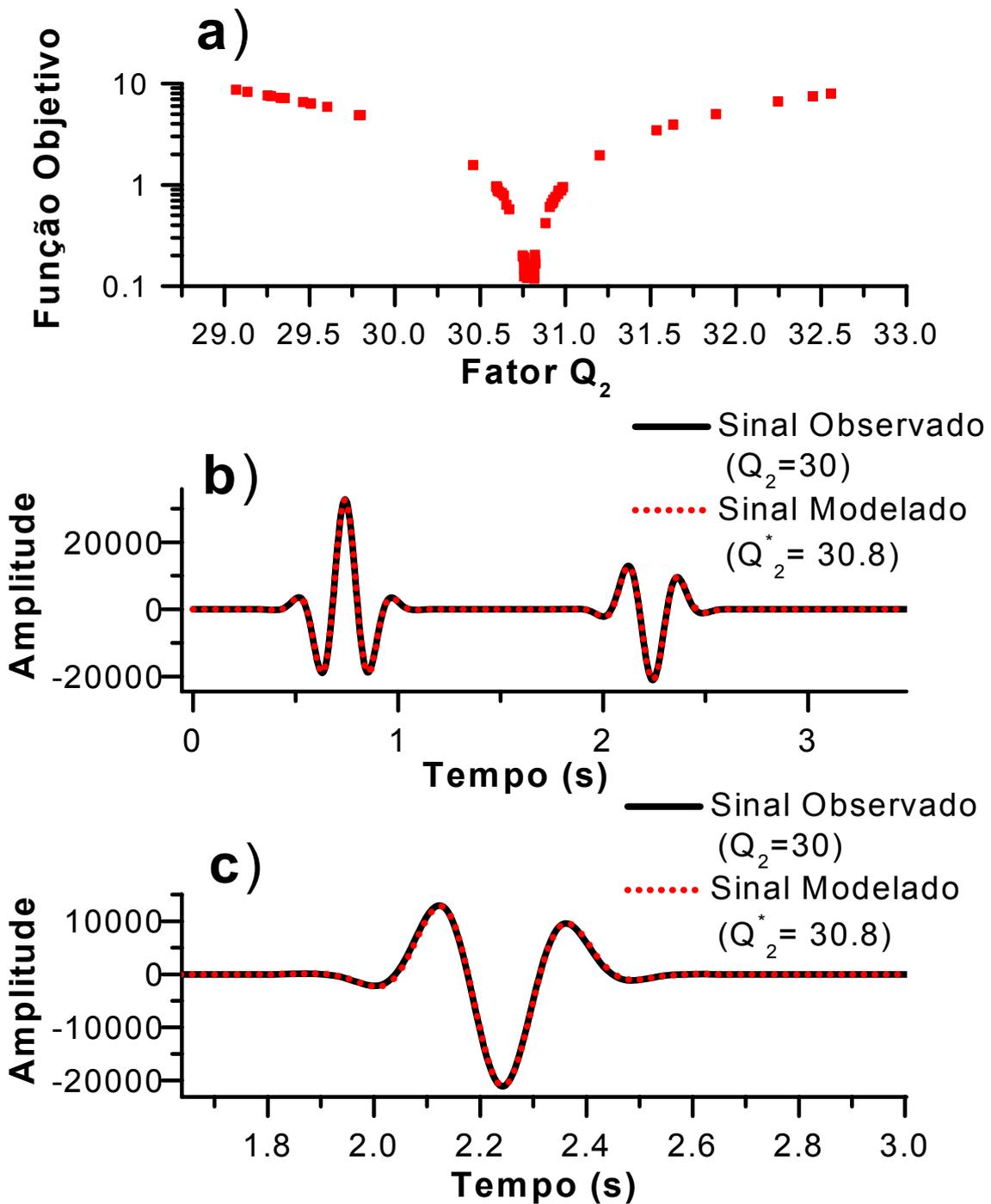


Figura 4.44 – Sísmica – Modelo 4. Caso $Q_2 = 30$. Resultados da inversão. a) Função objetivo. b) Ajuste entre pulsos observado e modelado, associados à reflexão na base da camada 2. c) Ampliação de (b) do pulso refletido na base da camada 2.

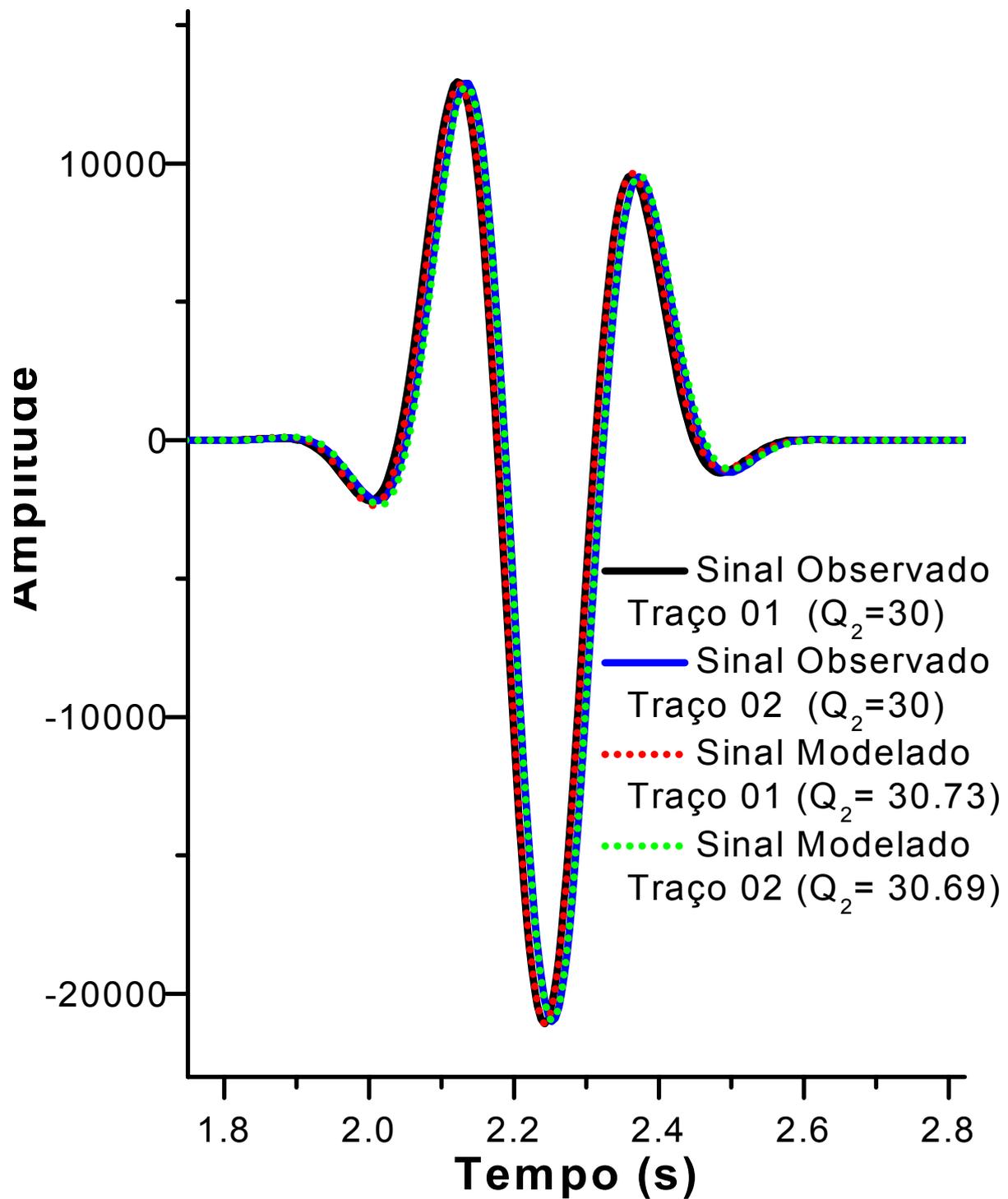


Figura 4.45 – Sísmica – Modelo 4. Caso $Q_2 = 30$. Inversão simultânea dos traços 1 e 2 da secção CMP da Figura 4.43. Não foi utilizado o vínculo de continuidade lateral.

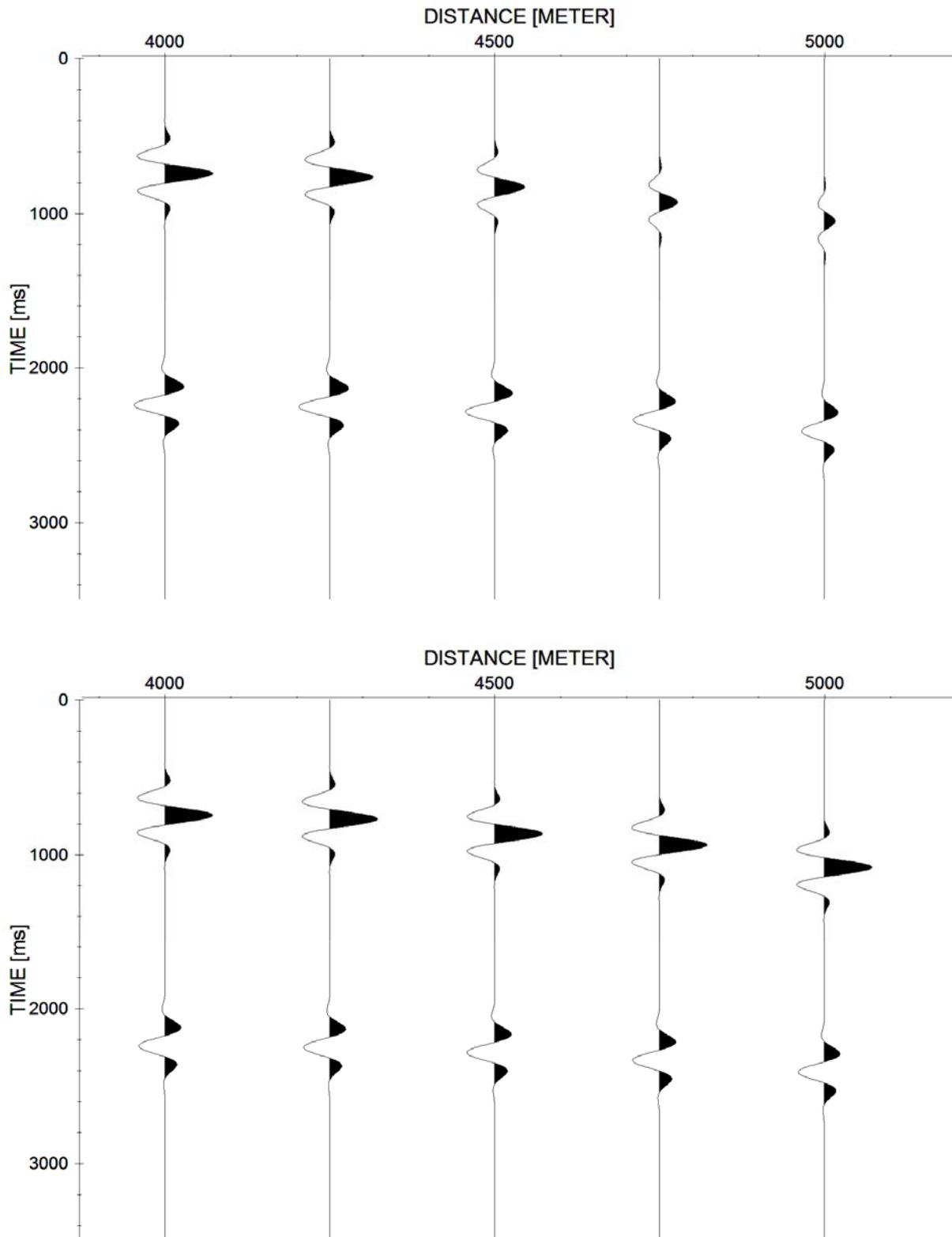


Figura 4.46 – Sísmica – Modelo 4. Caso $Q_2 = 30$. Inversão simultânea de Q_2 dos cinco primeiros traços da secção CMP mostrada na Figura 4.43. Superior: traços observados. Inferior: traços modelados. Foi usado com sinal de referência o pulso refletido na base da camada 1 e registrado no primeiro traço. A diminuição de amplitude associada à diferença de *offset* e ao espalhamento geométrico não foi modelada. Os valores estimados de Q_2 para cada traço estão apresentados na Tabela 4.12.

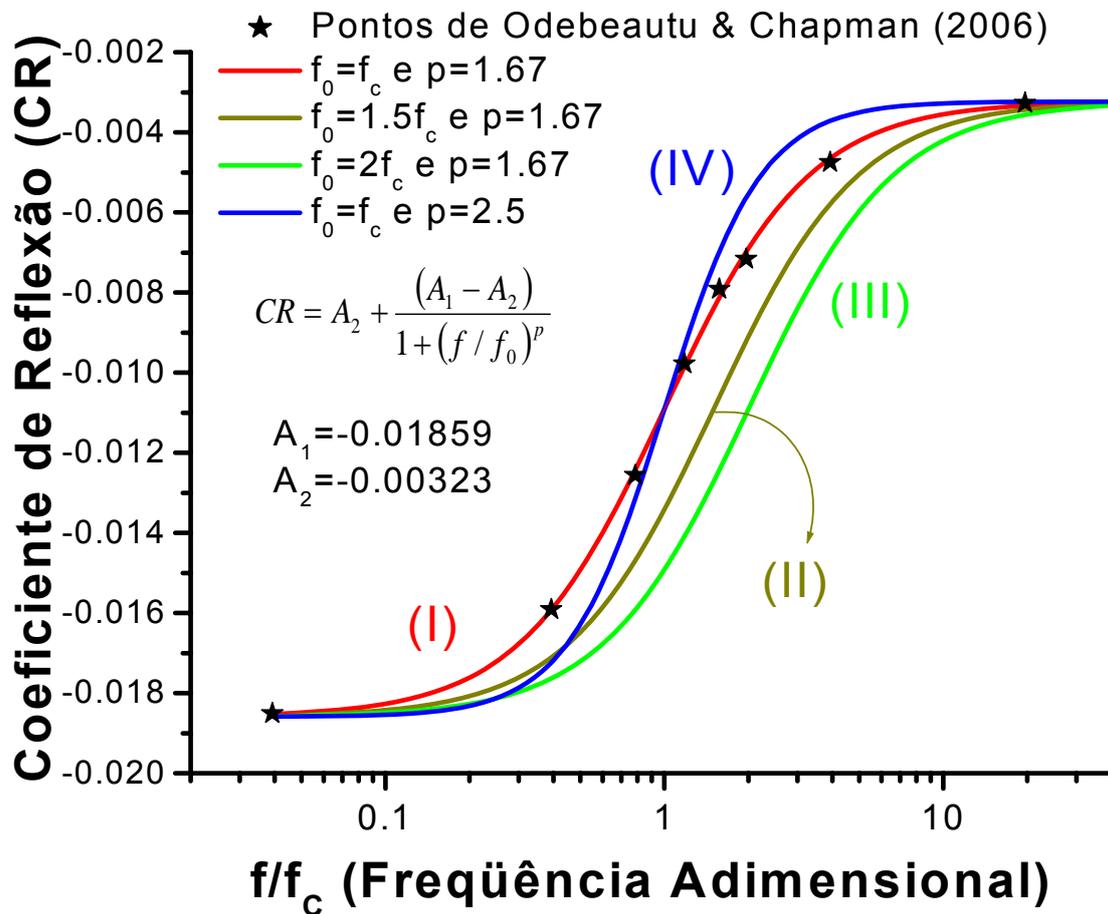


Figura 4.47 – Sísmica – Coeficiente de reflexão (CR) dependente de frequência. Curvas de $CR(f)$. As frequências estão normalizadas em relação à frequência central. A curva (I) é o ajuste de mínimos quadrados dos dados de Odebeautu *et al.* (2006) na condição de ângulo de incidência quase normal. O ponto de simetria da curva é controlado pelo parâmetro f_0 , como pode ser visto comparando as curvas (I), (II) e (III).

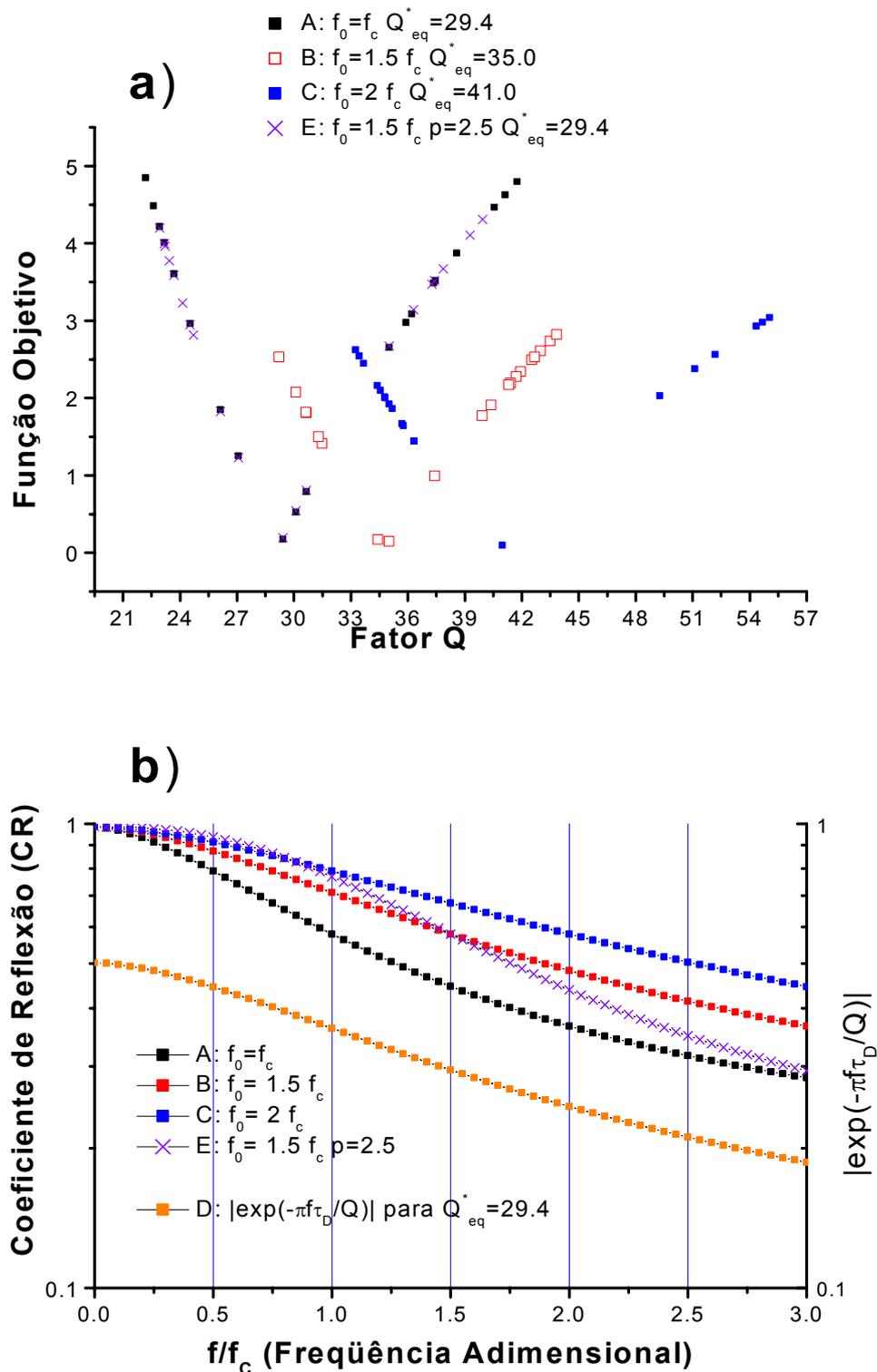


Figura 4.48 – Sísmica – Coeficiente de reflexão dependente de frequência. a) Função objetivo. b) Curvas de dispersão, que podem estar associadas com o coeficiente de reflexão no topo da camada 3 (eixo na esquerda) ou com a propagação através da camada 2 (eixo na direita); curvas normalizadas em ambos os casos.

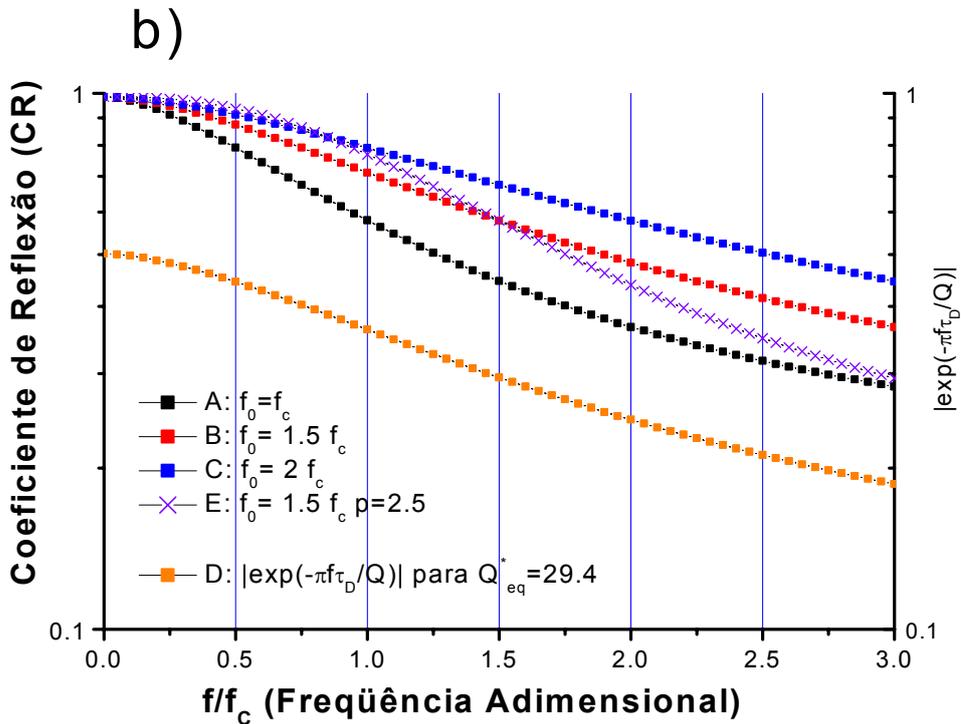
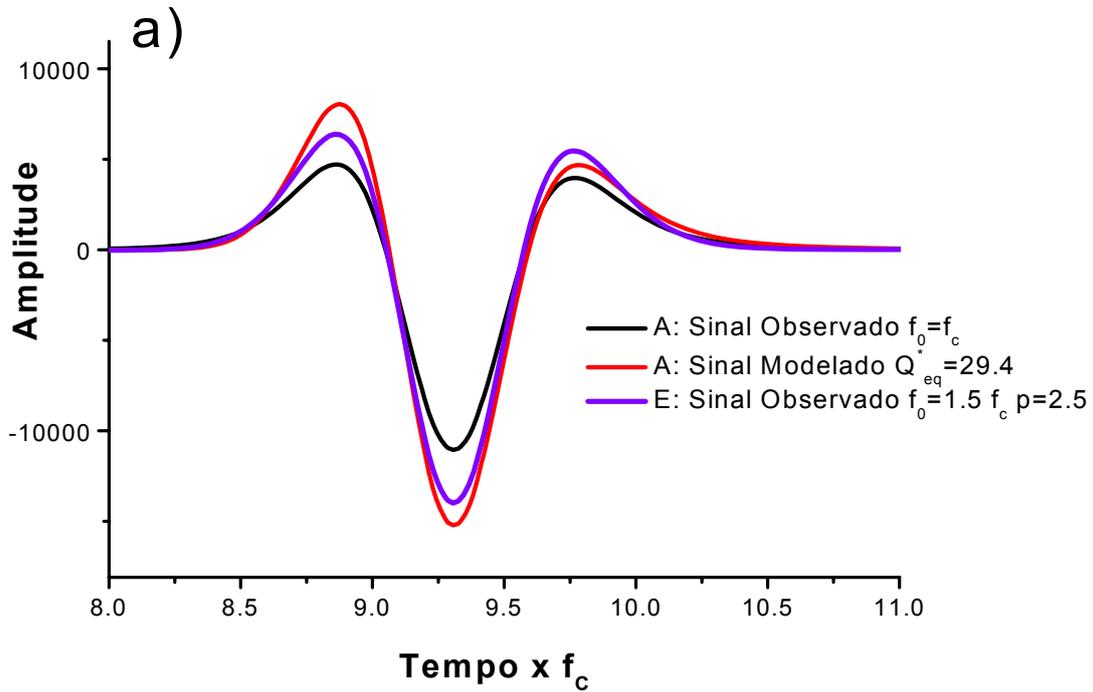


Figura 4.49– Sísmica – Coeficiente de reflexão dependente de frequência. a) Pulsos observados e modelado. b) Curvas de dispersão, que podem estar associadas com o coeficiente de reflexão no topo da camada 3 (eixo na esquerda) ou com a propagação através da camada 2 (eixo na direita); curvas normalizadas em ambos os casos. (b) é a reprodução da Figura 4.48 (b), aqui repetida para facilitar a comparação.

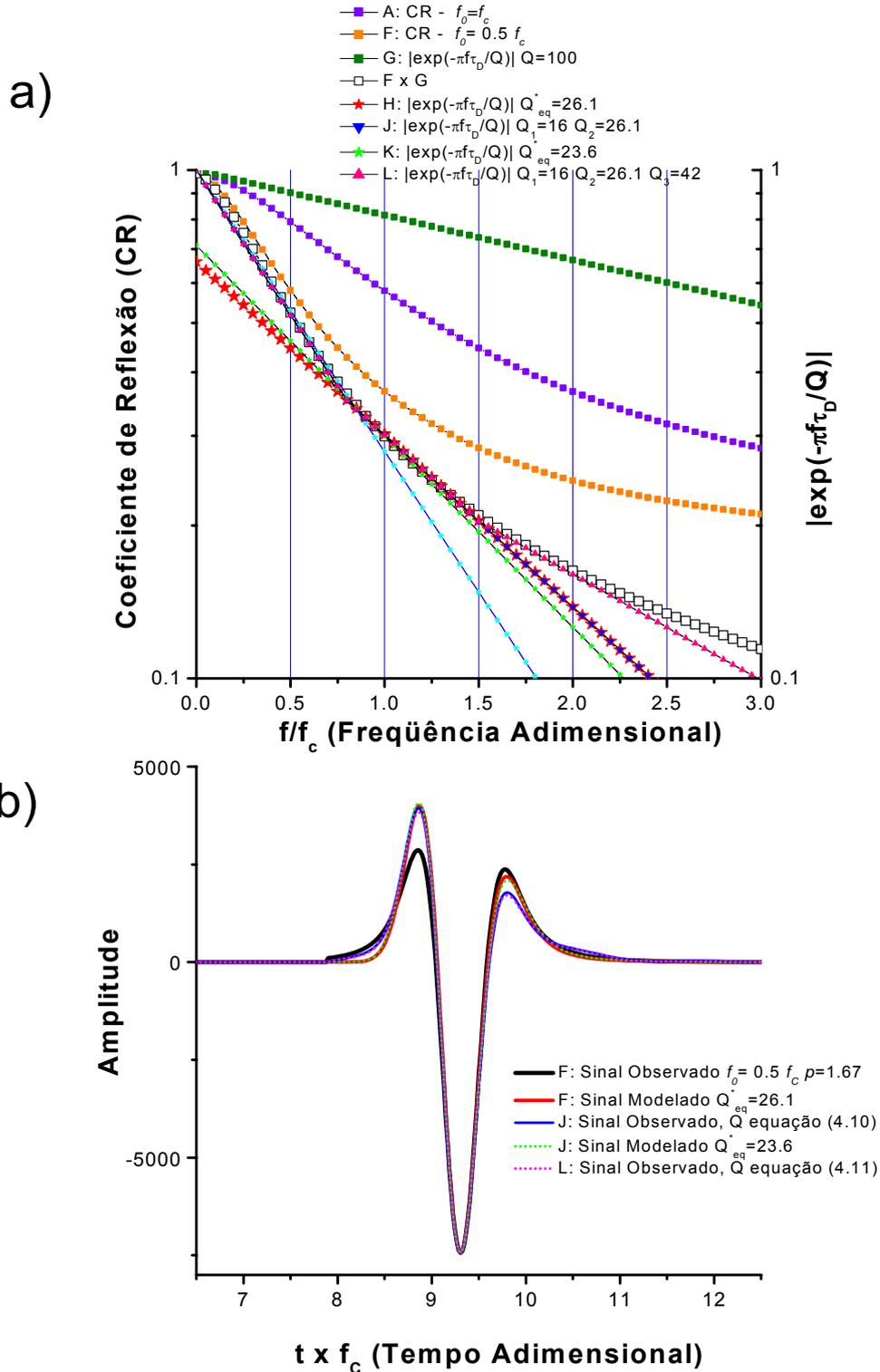


Figura 4.50 – Sísmica – Coeficiente de reflexão dependente de frequência. a) Curvas de dispersão, que podem estar associadas com o coeficiente de reflexão no topo da camada 3 (eixo na esquerda) ou com a propagação através da camada 2 (eixo na direita); curvas normalizadas em ambos os casos. b) Pulsos observados e modelados.

Capítulo V – Conclusões e recomendações

Com o advento da sísmica 3D, houve uma crescente tendência em associar atributos sísmicos às características petrofísicas das rochas. Contudo, usando apenas dados de sísmica, esta associação não é única. Assim, é necessária a calibração dos atributos acústicos com medidas de parâmetros em testemunhos. A situação fica ainda mais delicada com a sísmica 4D, caso em que se procura associar a interpretação sísmica com os modelos dinâmicos do reservatório. Neste caso, os efeitos de remoção de hidrocarbonetos e mudanças de temperatura e pressão, eventualmente resultantes de processos de recuperação avançada, também deverão ser levados em conta. Para uma quantificação apropriada de todos estes efeitos, os modelos utilizados devem ser aperfeiçoados para permitir uma associação mais confiável entre atributos e características petrofísicas.

Resultados recentes têm demonstrado que a dispersão na faixa de baixa frequência tem fortes implicações na análise dos atributos sísmicos (Carcione & Picotti, 2006; Castagna *et al.*, 2003; Chapman *et al.*, 2005; Dvorkin & Mavko, 2006; Odebeatu *et al.*, 2006). Desta forma, o problema da atenuação do sinal sísmico passou a ocupar um lugar de destaque na pesquisa, pois se espera que os atributos relacionados com atenuação possam desempenhar um importante papel na identificação de litologias e características de fluidos no reservatório.

Diante da relevância que a questão da atenuação apresenta no presente contexto, entendemos que é auspiciosa a apresentação de uma nova técnica para estimação do fator de qualidade Q , apresentando as características demonstradas pela nossa proposta.

As principais propriedades demonstradas para a proposta de inversão de Q apresentada nesta tese são:

- 1- Ela é baseada no deslocamento do centróide de frequência e faz uso da transformada S para monitorar a evolução temporal desse centróide. Desse modo, ela combina vantagens das abordagens correntes de inversão de Q , dicotomicamente divididas entre abordagens no domínio do tempo e no domínio da frequência;

- 2- A estimativa de Q depende apenas da variação da forma do pulso. Desse modo, a abordagem prescinde da modelagem de amplitude. Contudo, o seu uso em um pulso de muito baixa amplitude pode ocasionar uma subestimação no valor de Q. Em todo caso, esta estimativa seria pelo menos um limite inferior para o valor verdadeiro de Q;
- 3- Pelo fato de não demandar o conhecimento da amplitude do pulso, a abordagem prescinde do conhecimento do campo de velocidade, desde que seja válida a aproximação de que o caminho seguido pelo raio que é refletido na base de uma dada camada, durante sua passagem pelas camadas superiores, seja o mesmo caminho seguido, nessas mesmas camadas superiores, pelo raio refletido no topo da camada em questão. Esta hipótese de efeito cumulativo, igual para todos os pulsos registrados em um mesmo traço, só é rigorosamente válida se as camadas forem paralelas e horizontais e o arranjo for *zero-offset*. Contudo, verificamos com exemplos numéricos, que esta aproximação ainda é válida para camadas apresentando mergulhos de, pelo menos, vinte graus;
- 4- A abordagem é robusta à presença de ruídos na faixa de frequência do sinal. Isso representa uma nítida vantagem em relação aos métodos de estimativa de Q baseados na posição em frequência do pico de amplitude, que é bem mais sensível à presença de ruído desse tipo;
- 5- É necessário o concurso do intérprete para isolar no traço os pulsos associados às reflexões em cada interface. Neste sentido, o uso da técnica requer a aplicação de um processamento prévio que remova múltiplas, sem alterar a forma dos pulsos presentes nos traços.

Para a validade da abordagem, devem ser satisfeitas as seguintes condições:

- 1- O meio pode ser aproximado por partes por um conjunto de camadas com boa continuidade lateral. Admite-se que os valores de Q e de espessura das camadas possam variar lateralmente, conforme registrado em diferentes traços;

- 2- O sinal de referência ou de entrada deve ser conhecido;
- 3- Não é admitido explicitamente que o coeficiente de reflexão dependa de frequência. O efeito dispersivo modelado resulta apenas da propagação, sendo cumulativo. Apesar de não ser introduzida na modelagem, a dependência da reflexão com a frequência pode ser diagnosticada através da estimativa de um fator de qualidade equivalente.

Estamos conscientes do fato de que a abordagem não foi testada com dados sísmicos reais. Porém os resultados com testes sintéticos e a robustez demonstrada pela transformada S no trato com dados reais de GPR são bastante animadores.

Como principais recomendações, registramos:

- 1- Realizar uma análise comparativa desta abordagem com as técnicas similares existentes na literatura, se possível com dados reais, de modo a melhor estabelecer as vantagens e desvantagens de cada método, bem como o seu domínio de validade;
- 2- Generalizar a proposta de inversão para permitir a escolha de outros modelos de atenuação, além do modelo de Bano (2004);
- 3- Realizar um estudo de utilização do deslocamento do centróide de frequência como um atributo sísmico. Esta proposta justifica-se perante os fatos de que: (i) tal grandeza pode ser calculada diretamente do traço, sem o concurso de um modelo e (ii) ela é diagnóstica da variação petrofísica.

Referências bibliográficas

- Aki, K. & Richards, P. G. 1980. Quantitative Seismology. W.H. Freeman and Company, New York.
- Annan, A.P. 2001. Ground Penetration Radar – Workshop notes. Sensors and Software Inc. Mississauga, Ontario/Canadá. 192 pp.
- Bain, K. & Tatham, R. H. 2005. Sensitivity of P-P and P-SV AVO reflectivity to fluid properties in porous media: extension of P-P results and P-SV investigation. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 320-323. <http://link.aip.org/link/?SEGEAB/24/320/1>
- Bano, M. 1996a. Constant dielectric losses of ground-penetrating radar waves. Geophys. J. Int. 124: 279-288.
- Bano, M. 1996b. Modeling and inverse Q imaging of ground penetrating radar waves in 1 and 2D: Geophys. Res. Lett. 23: 3123-3126.
- 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.
- Berryman, J. G. & Wang, H. F. 2000. Elastic wave propagation and attenuation in a double-porosity dual-permeability medium. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 37: 63-78.
- Brzostowski, M.A. & McMechan, G. A. 1992. 3-D tomographic imaging of near-surface seismic velocity and attenuation. Geophysics, 57: 396-403.
- Brown, A.R. 2004. Interpretation of three-dimensional seismic data. SEG Investigations in Geophysics, N° 9. Tulsa, USA.
- Carcione, J. M. & Picotti, S. 2006. P-wave seismic attenuation by slow-wave diffusion: Effects of inhomogeneous rock properties. Geophysics, 71: 1-8.
- Castagna, J. P., Sun, S. & Siegfried, R. W. 2003. Instantaneous spectral analysis: detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons. The Leading Edge, 22: 120-127.
- Cerveny, V. & Frangié, A. B. 1982. Effects of causal absorption on seismic body waves. Studia Geoph. et Geod. 26: 238-253.
- Cerveny, V. 2001. Seismic Ray Theory, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

- Cervený, V. & Psencik, I. 2006. Program SEIS88: Numerical Modelling of seismic wave fields in 2-D laterally varying layered structures by the ray method. <http://sw3d.mff.cuni.cz/software/sw3dcd7/seis/seistext/s88.htm>
- Chapman, M., Liu, E. & Li, X.-Y. 2005. The influence of abnormally high reservoir attenuation on the AVO signature. *The Leading Edge*, 24: 1120-1125.
- Cole, K.S. & Cole, R.H. 1941. Dispersion and absorption in dielectrics. *J. Chem. Phys.* 9: 341-351.
- Dasgupta, R. & Clark, R. A. 1998. Estimation of Q from surface seismic reflection data. *Geophysics*, 63: 2120-2128.
- Debye, P. 1929. Polar molecules. Chemical Catalog Co., New York, USA.
- Dvorkin, J.P. & Mavko, G. 2006. Modeling attenuation in reservoir and nonreservoir rocks. *The Leading Edge*, 25: 194-197.
- Ebrom, D. 2004. The low-frequency gas shadow on seismic sections. *The Leading Edge*, 23: 772-772.
- Engelhard, L. 1990. Determination of the seismic wave attenuation by complex trace analysis. *Geophys. J.* in press.
- Engelhard, L., Doan, D., Dohr, G., Drews, P., Gross, T., Neupert, F., Sattlegger, J. & Shönfeld, U. 1986. Determination of the attenuation of seismic wave from actual field data, as well as considerations to fundamental questions from model and laboratory measurements. *DGMK Report 254*: 83-119.
- Futterman, W. I. 1962. Dispersive body waves. *J. Geophys. Res.* 67: 5279-5291.
- Irving, J. D. & Knight, R. J. 2003. Removal of wavelet dispersion from ground penetrating radar data. *Geophysics*, 68: 960-970.
- Jonscher, A. K. 1977. The universal dielectric response. *Nature*, 267: 673-679.
- Jonscher, A. K. 1999. Dielectric Relaxation in solids. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 32: R57-R70.
- Kim, Y. Y & Kim, E.-H. 2001. Effectiveness of the continuous wavelet transform in the analysis of some dispersive elastic waves. *J. Acoust. Soc. Am.*, 110: 86-94.
- Klimentos, T. 1995. Attenuation of P- and S- waves as a method of distinguishing gas and condensate from oil and water. *Geophysics*, 60: 447-458.
- LaFléche, P. T., Todoeschuck, J. P., Jensen, O.G. & Judge, A. S. 1991. Analysis of ground-probing radar data: Predictive deconvolution. *Can. Geotech. J.* 28: 134-139.

- Leaney, W. S. 1999. Walkaway Q inversion. 69th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1311-1314.
- Liu, L., Lane, J. W. & Quan Y. 1998. Radar attenuation tomography using the centroid frequency downshift method. *J. Appl. Geophys.* 40: 105-116.
- 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.
- Mallat, S. 2001. A wavelet tour of signal processing. Academic Press.
- Murphy, W. F. III. 1982. Effects of partial water saturation on attenuation in Massilon Sandstone and Vycor Porous Glass. *J. Acoust. Soc. Am.*, 71: 1458-1468.
- Odebeatu, E., Zhang, J., Chapman, M., Liu, E. & Li, X.-Y. 2006. Application of spectral decomposition to detection of dispersion anomalies associated with gas saturation. *The Leading Edge*, 25: 206-210.
- Oliveira Jr, J. G. 2001. Dois testes de imageamento com GPR em problemas de controle ambiental em regiões tropicais: migração de dunas e localização de dutos de óleo. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica/UFRN, Natal/RN. Dissertação de Mestrado.
- Oliveira Jr., J.G., Medeiros, W.E., Vital, H., Xavier Neto, P. & Stattegger, K. 2003. GPR imaging of the internal structure of a sand dune in Rio Grande do Norte State, NE Brazil. *J. Coastal Res.* 35 (Special Issue): 271 – 278.
- Parra, J.O., Hackert, C.L. & Xu, P-C. 2005. Attenuation analysis and modeling of acoustic waveforms in borehole intercepted by a sand-shale sequence. 75th SEG Annual Meeting, Expanded Abstract, 388-392.
- Powers, M. H. 1995. Dispersive ground penetrating radar modeling in 2-D. Colorado School of Mines. : Ph.D. Thesis.
- Pramanik, A.G., Singh, V., Dubey, A.K., Painuly, P.K. & Sinha, D.P. 2000. Estimation of Q from borehole data and its application to enhance surface seismic resolution: A case study. 70th SEG Meeting, Expanded Abstract, 2013-2016.
- Quan, Y. & Harris, J.M. 1997. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method. *Geophysics*, 62: 895-905.
- Rees, H. V. & Glover, J. M. 1992. Digital enhancement of ground probing radar data. In: Pilon, J. (Ed.). *Ground penetrating radar: Geol. Surv. Can. Paper* 90(4): 187-192.

- 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. Integrated estimation of interval-attenuation profiles. *Geophysics*, 71: A19-A23.
- Sams, M. S., Neep, J. P., Worthington, M. H. & King, M. S. 1997. The measurement of velocity dispersion and frequency-dependent intrinsic attenuation in sedimentary rocks. *Geophysics*, 62: 1466-1464.
- Sheriff, R. E. & Geldart, L. P. 1995. *Exploration seismology*. Cambridge University Press.
- Silin, D.B., Korneev, V.A., Goloshubin, G.M. & Patzek, T.W. 2006. Low-frequency asymptotic analysis of seismic reflection from a fluid-saturated medium. *Transport in Porous Media*, 62: 283-305.
- Stockwell, R.G. Mansinha, I. & Lowe, R.P. 1996. Localization of the complex spectrum: The S-transform. *IEEE Trans. Signal Processing*, 44: 998-1001.
- Stratton, J. A. 1941. *Electromagnetic Theory*. McGraw-Hill Book Co.
- Tonn, R. 1991. The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: A comparison of different computational method. *Geophys. Prosp.* 39: 1-27.
- Turner, G. 1994. Subsurface radar propagation deconvolution. *Geophysics*, 59: 215-223.
- Turner, G. & Siggins, A. F. 1994. Constant Q attenuation of subsurface radar pulses: *Geophysics*, 59: 1192-1200.
- Vasco, D.W., Peterson Jr., J.E. & Majer, E. L. 1996. A simultaneous inversion of seismic traveltimes and amplitudes for velocity and attenuation. *Geophysics*, 61: 1738-1757.
- Ward, R.W. & Toksöz, M.N. 1971. Causes of regional variation of magnitude. *Bull. Seis. Soc. Am.* 61: 649-670.
- Winkler, K. W. & Nur, A. 1982. Attenuation: Effects of pore fluids and frictional sliding. *Geophysics*, 47: 1-15.
- Xavier Neto, P., 2006. *Processamento e interpretação de dados 2D e 3D de GPR: aplicações no imageamento de feições cársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo de Fazenda Belém – CE*. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica/UFRN, Natal/RN. Tese de Doutorado.
- Xavier Neto, P. & Medeiros, W.E. 2006, A practical approach to correct attenuation effects in GPR data. *J. Appl. Geophys.* 59: 140-151.

- Zhang, C. & Ulrych, T.J. 2002. Estimation of quality factors from CMP records. *Geophysics*, 67: 1542–1547.
- Zhou, C., Liu, L. & Lane Jr., J. W. 2001. Nonlinear inversion of borehole-radar tomography data to reconstruct velocity and attenuation distribution in earth materials. *J. Appl. Geophys.* 47: 271-284.

Anexo A – *Ray-Tracing* com incorporação dos efeitos de atenuação e dispersão

A.1 – Apresentação

Os modelos de Terra utilizados nesta tese são bidimensionais e compostos por camadas homogêneas e isotrópicas, separadas por interfaces que são contínuas, deriváveis e apresentando curvaturas pouco intensas. Para esta classe de modelos, o *ray-tracing* é um excelente método de modelagem cinemática da propagação de ondas. O *ray-tracing* tem a grande vantagem de requerer baixo custo computacional, quando comparado com métodos de modelagem baseados em discretizações da equação de onda.

Nesta tese, construímos um *ray-tracing* simplificado, na condição *zero-offset*, incorporando a posteriori os efeitos de dispersão. Para tanto, programamos um código Fortran que, dada a geometria e os parâmetros eletromagnéticos das camadas (modelo 2-D), produz a secção *zero-offset* do sinal de GPR do modo TE. Para permitir o tratamento de um número maior de interfaces, sem comprometer excessivamente o tempo de computação, não foram consideradas as múltiplas. Desta forma, a secção de GPR que obtemos incorpora apenas os raios refletidos perpendicularmente em pontos de cada uma das interfaces que compõem o modelo. Uma vez determinadas as trajetórias dos raios, são posteriormente incorporados ao pulso os efeitos de atenuação e dispersão.

Para levar em conta os efeitos causados pelos diversos mecanismos de dissipação dependentes da frequência (condução e diferentes mecanismos de relaxação dielétrica), consideramos que estes efeitos, quando combinados, resultam em um único efeito dissipativo (*bulk dissipation*), que pode ser descrito por uma tangente de perda, característica de cada camada e determinada pelo fator de qualidade Q. Assim, uma vez conhecida a trajetória do raio, o efeito dissipativo para cada frequência do pulso é incorporado, a posteriori, com o conhecimento da função $Q(f)$ de cada camada. Nesta tese, foram utilizados apenas modelos de Q constante ou modelos com Q constante por partes com frequência. Contudo, o algoritmo

também fornece bons resultados para qualquer função $Q(f)$ contínua em f , desde que os valores de Q estejam dentro do domínio de validade da aproximação do dielétrico de baixa a moderada perda ($Q > 5$).

Para incorporar o efeito dispersivo, utilizamos o modelo de dispersão de Bano (2004), onde Q não depende da frequência. Neste modelo, para baixos valores de Q ($Q < 5$), há uma pequena dispersão na velocidade para baixas frequências. Rigorosamente, portanto, há uma perturbação do tempo de percurso associada com a dependência da velocidade com frequência. Contudo, como estamos tratando com sistemas fracamente dissipativos, a mudança de trajetória devida à dependência da velocidade com frequência é desprezível. Em outras palavras, os tempos de percurso são calculados com o modelo de *background*. O cálculo é feito no domínio de frequência, com o filtro de dissipação sendo obtido para cada raio e cada frequência. Se necessária, a perda de amplitude associada com espalhamento geométrico pode ser também calculada.

Como estamos trabalhando com modelos 2D e no modo TE, as contribuições de cada raio são adicionadas independentemente da direção de chegada. Não foram incorporados no *ray-tracing* os efeitos do padrão de radiação da antena e os efeitos da transmissividade na amplitude do sinal. Entretanto, a refletividade da interface refletora é considerada, quando do cálculo da amplitude do sinal observado no receptor.

O *ray-tracing* utilizado, apesar das limitações inerentes às aproximações realizadas e do método em si, permite um tratamento quantitativo bastante eficiente para determinar os efeitos dispersivos do meio.

Apresentamos a seguir a estrutura geral do código Fortran, indicando os principais passos seguidos na construção da secção *zero-offset* sintética:

Leitura dos dados de entrada:

P1 – Entrada: tipo de pulso da fonte (Ricker, Gabor, etc), número de interfaces, número de vértices que discretizam espacialmente cada interface, posição (x, z) dos vértices e propriedades físicas (permissividade elétrica e parâmetro Q) da camada sob cada interface. A coordenada x é a superfície da Terra, admitida horizontal, e a coordenada z é a profundidade.

Determinação da trajetória dos raios:

P2 – Para cada interface, os vértices (x, z) são interpolados com a rotina *cubic spline* CSINT (IMSL), obtendo assim uma curva que define a interface. Neste ponto, é feita a escolha adequada do número de raios que deve partir de cada interface, de modo a garantir que raios vizinhos sigam trajetórias muito próximas. O critério de proximidade tem que ser rigoroso para que o passo **P4** abaixo descrito não incorpore erros grosseiros.

P3 – Iniciando pela interface mais profunda, e finalizando com a interface que é a base da primeira camada, é construída a trajetória de cada raio que parte perpendicularmente dos pontos escolhidos das interfaces. Cada raio será refratado ao cruzar as interfaces imediatamente superiores, até atingir um ponto na superfície da Terra. No final deste passo, para cada interface, está disponível uma família de raios que parte perpendicularmente da interface e atinge pontos da superfície da Terra. Em geral, estes pontos não estão uniformemente distribuídos na coordenada x. Para obter uma família de raios com pontos de chegada uniformemente distribuídos é executado o passo seguinte.

P4 – Um conjunto de receptores é uniformemente distribuído na superfície da Terra. Os raios de chegada em cada receptor e que partem de cada interface são obtidos pela interpolação das trajetórias de raios que partem de pontos próximos da interface. Deste passo, resultam as trajetórias e os tempos de chegada em cada receptor dos raios que partem das interfaces.

Incorporação a posteriori da dispersão:

P5 – Para cada receptor, um traço é construído adicionando a contribuição de cada raio que chega ao receptor e incorporando devidamente neste raio os efeitos de dispersão da trajetória associada.

A.2– Exemplo

Na Figura 4.19 foi apresentado o Modelo 2, que é constituído de seis camadas cujos parâmetros físicos estão descritos na legenda desta figura. Utilizando o algoritmo de *ray-tracing* acima descrito, foram obtidas as trajetórias mostradas na Figura 4.21 e calculados os tempos de percursos mostrados na Figura 4.20. A Figura 4.22 (a) apresenta a secção (*zero off-set*) de GPR correspondente,

enquanto que a Figura 4.22 (b) mostra o traço registrado no receptor localizado na posição $x=400$ cm. Neste exemplo, foi adotado $Q=400$ para todas as camadas e, assim, o efeito dispersivo é muito pequeno. O sinal da fonte é um pulso de Ricker de 200 MHz. Como pode ser observado (Figura 4.22 (b)), nas bases das camadas 1, 3 e 5 há mudanças de fase de π , pois essas interfaces apresentam coeficientes de reflexão negativos. Os efeitos de atenuação do sinal devido ao espalhamento geométrico também podem ser observados.

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](#)