



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0918037-0 B1



(22) Data do Depósito: 03/09/2009

(45) Data de Concessão: 10/12/2019

(54) Título: MÉTODO PARA ESTIMAR UMA ESPESSURA DE UMA CAMADA GEOLÓGICA, PROGRAMA DE COMPUTADOR, E, MÍDIA LEGÍVEL POR COMPUTADOR.

(51) Int.Cl.: G01V 1/28; G01V 1/30.

(52) CPC: G01V 1/282; G01V 1/30.

(30) Prioridade Unionista: 05/09/2008 GB 0816241.4.

(73) Titular(es): STATOIL PETROLEUM AS.

(72) Inventor(es): ESPEN OEN LIE.

(86) Pedido PCT: PCT NO2009000308 de 03/09/2009

(87) Publicação PCT: WO 2010/027270 de 11/03/2010

(85) Data do Início da Fase Nacional: 03/03/2011

(57) Resumo: MÉTODO PARA ESTIMAR UMA ESPESSURA DE UMA CAMADA GEOLÓGICA, PROGRAMA DE COMPUTADOR, E, MÍDIA LEGÍVEL POR COMPUTADOR. A invenção é um método para estimar a espessura de uma camada geológica (L), o método compreendendo as etapas de: (a) selecionar os dados de campo de reflexão sísmica a partir de um intervalo de interesse de profundidade subsuperficial; (b) prover uma pluralidade de modelos geológicos com diferentes espessuras da camada e prover respectivas respostas do modelo a partir da pluralidade de modelos geológicos; (c) comparar um espectro de frequência dos dados de campo de reflexão sísmica com cada um dos espectros de frequência das respostas do modelo para derivar dados de comparação associados com as diferentes espessuras da camada dos modelos; e (d) derivar, a partir dos dados de comparação, uma espessura da camada modelo que é indicativa da espessura da camada geológica.

“MÉTODO PARA ESTIMAR UMA ESPESSURA DE UMA CAMADA GEOLÓGICA, PROGRAMA DE COMPUTADOR, E, MÍDIA LEGÍVEL POR COMPUTADOR”

[0001] A presente invenção diz respeito a um método para estimar quantitativamente uma espessura de uma camada geológica subterrânea.

[0002] A presente invenção diz respeito, no geral, a um método para fazer uma estimativa de espessura de uma camada geológica subterrânea com base em dados de reflexão sísmica. Mais especificamente, o método diz respeito à estimativa da espessura de finas camadas geológicas utilizando as propriedades de domínio de frequência dos sinais de reflexão em vez de interpretar a espessura da fina camada geológica com base apenas nos sinais do domínio de tempo.

Introdução

[0003] Em geofísica, é desejável interpretar espessuras da camada geológica. Tais espessuras são usualmente expressadas pela diferença de tempo de reflexão Δt entre o tempo de reflexão bidirecional entre o topo e a base da camada

$$\Delta t = t_{\text{base}} - t_{\text{topo}}$$

[0004] As espessuras de interesse podem ser tanto uma espessura de uma camada geológica em um reservatório de petróleo em potencial ou confirmado, uma espessura de uma zona de gás no topo de um reservatório de petróleo como este, uma espessura da zona de óleo em um reservatório de petróleo quanto a espessura de qualquer outra camada geológica. Encontrar a espessura de uma camada geológica espessa uniforme é fácil a partir dos dados de reflexão do domínio de tempo, simplesmente pela seleção da reflexão do topo e da base, quando claramente separados, e pelo cálculo da diferença de tempo.

[0005] O problema a ser abordado por esta invenção surge quando a espessura de uma camada indicada nos dados sísmicos for pequena, a camada tendo uma espessura comparável com a assim denominada espessura de sintonia, abaixo da qual a espessura interpretada se torna maior que a espessura verdadeira.

[0006] A figura 1a é uma ilustração do efeito de sintonia na interpretação da espessura. Um modelo de cunha geológica horizontal ilustrado pela linha contínua da figura 1a é centralizado na figura 1a no tempo de reflexão bidirecional (“*twt*”) de 200 ms

ilustrado por suas reflexões do topo e da base. A abscissa indica a espessura da camada verdadeira do modelo. Na figura 1b, a espessura proveniente dos dados interpretados foi sobreposta no modelo. Claramente, para as partes mais espessas da cunha, entre 25 e 40 ms twt, há boa correspondência entre a espessura interpretada, ilustrada pela linha pontilhada, e a espessura verdadeira, indicada pela linha contínua. Mas, para as camadas mais finas, há dois tipos de discrepâncias entre as espessuras interpretadas e as espessuras verdadeiras. Isto é mais bem ilustrado na figura 2.

[0007] A figura 2 é um diagrama da espessura da camada interpretada em função da espessura da camada verdadeira. A espessura da camada interpretada, ilustrada pela linha curvada neste diagrama, é interpretada a partir de dados sísmicos modelados de reflexão de tempo bidirecional, tal como ilustrado na figura 1a, e a espessura da camada verdadeira, indicada pela linha reta, é tomada a partir do modelo de cunha indicado pelas linhas de cunha contínuas da figura 1b.

[0008] Na figura 2, observa-se melhor que, para as partes mais espessas da cunha, entre 25 e 40 ms twt, há boa correspondência entre a espessura interpretada, ilustrada pela linha pontilhada, e a espessura verdadeira, indicada pela linha contínua. Mas, para as camadas mais finas, abaixo de 14 ms, a espessura interpretada excede a espessura verdadeira. De fato, a espessura interpretada nivela-se em um valor de cerca de 11 até 12 ms twt da camada que realmente acunha até zero espessura verdadeira. Adicionalmente, entre 14 e cerca de 28 até 30 ms espessura da camada verdadeira, as espessuras da camada interpretadas são, sistematicamente, um pouco menores que as espessuras verdadeiras.

[0009] O fato de que as espessuras da camada interpretadas se tornam maiores que as espessuras verdadeiras para camadas finas pode ser explicado pela interferência das reflexões. A figura 3a é uma ilustração de um modelo geológico muito simples com uma rocha uniforme a partir da superfície e descendo até 0,400 s, com uma impedância acústica de $5 \cdot 10^6$ kg/m²s na qual uma fina camada horizontal de impedância acústica de $4 \cdot 10^6$ kg/m²s fica residente entre 0,176 s e 0,200 s para uma espessura temporal de 0,024 s. A curva de impedância é, assim, uma linha reta com um pulso quadrático com estreitamento negativo acentuado.

Uma refletividade é mostrada na Figura 3b como pontos de taxa de amostragem de 4 ms, a refletividade no topo da camada em 0,176 s sendo $r_t = -0.1$ e a refletividade na base da camada em $t = 0,200$ s sendo $r_b = 0,1$. Se estas refletividades forem convolvidas com uma pequena onda de fonte digital, que é uma pequena onda de Ricker de 30 Hz, o resultado é exibido na figura 3c (As refletividades aqui mostradas têm zero deslocamento, mas não há exigência no presente método de usar dados com zero deslocamento.). Ryan, na publicação "CSEG Recorder", setembro de 1994, declara que uma aproximação da amplitude da pequena onda de Ricker (em tempo) é $0,7797 / f * 1,28$, que corresponde a 40 ms. Assim, a diferença de tempo entre o pico de tempo zero e um lobo do lado negativo é de 20 ms. Isto resulta em possível interferência entre os lobos complementares e o pico principal para camadas finas, tal como ilustrado na figura 3c.

[0010] Um problema principal com estimativas de espessura convencional é que elas operam no domínio de tempo. No domínio de tempo, parâmetros temporais são bem resolvidos, mas parâmetros de frequência não ficam localizados no domínio de tempo, mas são distribuídos de forma que eles não possam ser facilmente avaliados. Quando reflexões do topo e da base de uma camada sofrerem interferência devido à sintonia, algumas frequências podem não ser mais representadas no intervalo. Isto implica que, no domínio de tempo, tais frequências não contribuem para a amplitude de tais reflexões temporalmente próximas. Mas o fato de que algumas frequências estão ausentes, devido às reflexões temporalmente próximas, não é facilmente observado no domínio de tempo.

[0011] Entretanto, se observarmos o problema no domínio de frequência, os problemas se tornam mais visíveis. Na figura 6, a assinatura da fonte é exibida no domínio de frequência, da forma mostrada na parte direita da folha. Na parte esquerda principal da folha é mostrado o espectro de frequência do modelo de cunha da figura 1b. A figura 6 é a versão geral da figura 3f, que corresponde à seção através da linha para espessura da camada de 25 ms. Favor notar a fenda em 40 Hz na figura 3f e na figura 6. A figura 7 exhibe a amplitude do espectro de frequência para um par de refletividades de sinais opostos, tal como exibido na figura 3b.

Assim, a seção vertical através da espessura da camada de 25 ms da figura 7 corresponde à figura 3e com suas fendas em 40 Hz, 80 Hz e 120 Hz.

[0012] Como o gráfico da figura 3f exhibe o espectro de frequência da refletividade exibido na figura 3e multiplicado pelo espectro de frequência do espectro de frequência do pulso de Ricker de 25 Hz da fonte sísmica exibida na figura 3d, similarmente, a representação do domínio de frequência mostrada na figura 6 do modelo de cunha exibido na figura 1b é o padrão de interferência do domínio de frequência de refletores opostos, da forma exibida na figura 7, multiplicado pelo espectro de frequência do pulso de Ricker de 25 Hz da fonte sísmica exibida na parte direita da figura 8.

[0013] A partir da figura 6, fica óbvio que nenhum traço do padrão de interferência do domínio de frequência dos refletores de impedância sísmica opostos fica acima das frequências superiores do espectro de assinatura da fonte, isto é, nenhum traço fica acima de cerca de 70 Hz.

[0014] A pequena onda de Ricker de 30 Hz é mostrada no domínio de frequência na figura 3d. A refletividade no domínio de frequência é mostrada na figura 3e como uma "frequência de batida", aqui 40 Hz. Esta refletividade no domínio de frequência multiplicada pela pequena onda de Ricker de 30 Hz, também no domínio de frequência, provê os dados no domínio de frequência, favor ver a figura 3f. Os 40 Hz baixos são proeminentes. Favor notar que a frequência de amplitude zero é independente da frequência de pulso de Ricker.

FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO

[0015] Em US 5 870 691 de Partyka et al., "Spectral decomposition for seismic interpretation", é apresentado um problema para encontrar uma espessura temporal de um fino leito, que é similar ao problema a ser resolvido pela presente invenção. Partyka resolveu este problema de uma maneira qualitativa. O espectro da reflexão de um fino leito é ilustrado na figura 3B de US 5 870 691, renderizado na indicação de duas fendas, devido à multiplicação no domínio de Fourier do espectro de refletividade, da forma mostrada em nossa figura 3e, e o espectro de pequena onda fonte é ilustrado em US 5 870 691, na figura 3A. As fendas no espectro de reflexão

do fino leito de Partyka têm uma separação que é igual a

$$\Delta t = 1 / \text{espessura temporal.}$$

[0016] Partyka expressou sua invenção da forma citada a partir da coluna 7, linha 2: "Mais em particular, a invenção aqui divulgada é motivada pela observação de que a reflexão de um fino leito tem uma expressão característica no domínio de frequência que é indicativa da espessura do leito: um fino leito homogêneo introduz uma sequência periódica de fendas no espectro de amplitude da reflexão composta, as ditas fendas sendo espaçadas em uma distância que é inversamente proporcional à espessura temporal do fino leito. Adicionalmente, se os coeficientes da transformada de Fourier forem apropriadamente exibidos, esta expressão característica pode ser explorada pelo interpretador para rastrear reflexões do fino leito através de um volume 3D e estimar suas espessuras e extensão em um grau até aqui impossível."

[0017] Partyka reivindica o seguinte na primeira reivindicação de US 5 870 691, da forma citada:

"Método para a exploração de hidrocarbonetos, caracterizado pelo fato de que compreende as etapas de:

- (a) acessar um conjunto de traços sísmicos espacialmente relacionados, os ditos traços sísmicos espacialmente relacionados contendo amostras digitais que são caracterizadas por pelo menos um de tempo, posição e amplitude;
- (b) selecionar uma parte do dito conjunto de traços sísmicos espacialmente relacionados para definir uma zona de interesse;
- (c) transformar pelo menos uma parte dos ditos traços sísmicos na dita zona de interesse usando uma transformada de Fourier, a dita transformada de Fourier
 - (i) sendo caracterizada por uma pluralidade de funções de base ortonormal, e
 - (ii) sendo aplicada em uma janela que contém as ditas amostras digitais para produzir uma pluralidade de coeficientes transformados associados com

as ditas funções de base ortonormal;

(d) organizar os ditos coeficientes transformados em um cubo de sintonia;

(e) multiplicar os ditos coeficientes transformados por um valor de escalonamento para formar um cubo de sintonia escalonado, o dito valor de escalonamento sendo determinado pela

(i) seleção de pelo menos dois coeficientes transformados correspondentes a uma mesma dita função de base,

(ii) cálculo de uma complexa magnitude de todos os coeficientes transformados assim selecionados,

(iii) cálculo de um valor médio de todas as magnitudes de coeficientes transformados assim calculadas, e

(iv) cálculo de um valor de escalonamento a partir do dito valor médio;

e,

(f) exibir o dito cubo de sintonia escalonado."

[0018] Uma desvantagem da abordagem de Partyka ocorre quando a camada se torna muito fina, de forma que a primeira das fendas apareça afastada à direita, isto é, para altas frequências no gráfico de frequência, da forma ilustrada na figura 3h. A segunda fenda ficará ainda mais fora na frequência, e pode se provar impossível de detectar no espectro de frequência do espectro de pequena onda fonte. Então, a espessura temporal de um fino leito não pode ser deduzida pela estimativa da separação de duas fendas, já que há apenas uma. Para leitos ainda mais finos, a primeira fenda pode nem cair integralmente no espectro de frequência da pequena onda fonte. Assim, o método de US5 870 691 é qualitativo e não muito robusto.

BREVE SUMÁRIO DA INVENÇÃO

[0019] Os supramencionados problemas relacionados à descoberta da espessura de uma fina camada são resolvidos de uma maneira quantitativa pela presente invenção.

[0020] De acordo com um aspecto da presente invenção, é provido um método para estimar a espessura de uma camada geológica (L), o método compreendendo

as etapas de:

- (a) selecionar dados de campo de reflexão sísmica adquiridos a partir de um intervalo de interesse de profundidade subsuperficial usando uma fonte sísmica tendo um espectro de pequena onda fonte;
- (b) prover uma pluralidade de modelos geológicos com diferentes espessuras da camada e prover respectivas respostas do modelo a partir da pluralidade de modelos geológicos;
- (c) correlacionar um espectro de frequência dos dados de campo de reflexão sísmica com um espectro de frequência de cada uma das respostas do modelo para derivar valores de correlação associados com as diferentes espessuras da camada dos modelos; e
- (d) derivar, a partir dos valores de correlação, uma espessura da camada modelo que é indicativa da espessura da camada geológica.

[0021] Uma concretização da presente invenção, provê um método para estimar quantitativamente uma espessura de uma camada geológica subterrânea (L – vide Figura 3a), compreendendo as seguintes etapas:

- usar uma fonte sísmica com um espectro de pequena onda fonte,
- registrar um traço sísmico dos dados de domínio de tempo de reflexão ($5t$ – vide Figura 4a), e
 - selecionar um intervalo temporal (t_1, t_2 - vide Figuras 3a e 4a) do dito traço dos dados de reflexão sísmica ($5t$) que produzem uma série de intervalo de tempo dos dados de reflexão sísmica ($5ts$ – vide Figura 4a) para os quais uma espessura (Δt ou d – vide Figura 4a) da dita camada (L) no dito intervalo temporal deve ser determinada,
 - transformar os ditos dados de reflexão do intervalo de tempo ($5ts$) em um espectro de frequência de intervalo sísmico ($5f$ – vide Figuras 4e e 5b).
 - repetir as seguintes etapas para inúmeras espessuras temporais (Δt – vide Figura 3a):
 - gerar um modelo de impedância acústica com uma camada (L_m – vide Figuras 3a e 5a) com um contraste de impedância (Δz – vide Figura 3a) e a dita

espessura temporal (Δt), e formar uma função de refletividade modelo (L_{mt} – vide Figura 3b) no tempo,

- transformar a dita função de refletividade modelo (L_{mt}) no domínio de frequência produzindo um espectro de refletividade modelo (L_{mf} - vide Figura 3e),

- [ou formar espectro de refletividade modelo como este diretamente]

- multiplicar o dito espectro de refletividade modelo (L_{mf}) pelo dito espectro de pequena onda fonte, produzindo um espectro modelo de fina camada (L_{ms} – vide Figuras 3f e 3b),

- correlacionar o dito espectro modelo de fina camada (L_{ms}) com o dito espectro de frequência de intervalo sísmico ($5f$), produzindo um (único) valor de correlação ($C(\Delta t)$ – vide Figura 5a) em função da espessura temporal atual (Δt – vide Figura 5a),

- selecionar um valor de pico (C_{alto} – vide Figura 5a) na assim produzida série de valores de correlação ($C(\Delta t)$) em função da espessura temporal atual ($C(\Delta t)$), e permitir que a espessura temporal (Δt) correspondente ao dito valor de pico (C_{alto}) indique uma estimativa de espessura (L_m) da dita camada geológica subterrânea (L).

[0022] As etapas de geração de um modelo de impedância acústica com uma camada (L_m) com um contraste de impedância (Δz) e a dita espessura temporal (Δt), de formação de uma função de refletividade modelo (L_{mt}) no tempo e de transformação da dita função de refletividade modelo (L_{mt}) no domínio de frequência, que produzem um espectro de refletividade modelo (L_{mf}), podem ser alternativamente conduzidas pela formação de um espectro de refletividade modelo como este (L_{mf}) diretamente, apenas sabendo que ele corresponde à função de refletividade modelo no tempo.

[0023] Em uma modalidade, o método compreende o fato de que o espectro de refletividade (L_{mf}) é um espectro de refletividade com zero deslocamento que representa uma espessura temporal atual (Δt) de uma função de refletividade com zero deslocamento (L_{mt}).

[0024] Em uma modalidade, o método compreende o fato de que o traço sísmico

dos dados de domínio de tempo de reflexão ($5t$) é uma assim denominada pilha de deslocamento próximo de traços sísmicos de deslocamento próximo.

[0025] Em uma modalidade, o método compreende o fato de que o traço sísmico dos dados de domínio de tempo de reflexão ($5t$) é um assim denominada pilha de deslocamento intermediário de traços sísmicos de deslocamento intermediário.

[0026] Em uma modalidade, o método compreende o fato de que o traço sísmico dos dados de domínio de tempo de reflexão ($5t$) é uma assim denominada pilha de deslocamento distante de traços sísmicos de deslocamento distante.

[0027] Em uma modalidade, o método de acordo com a invenção, antes da etapa de formação de um espectro de refletividade modelo (L_{mf}) que representa uma espessura temporal atual (Δt) de uma função de refletividade (L_{mt}), compreende

- gerar um modelo de impedância acústica com uma camada (L_m) com um contraste de impedância (Δz) e a dita espessura temporal (Δt) e formar a dita função de refletividade modelo (L_{mt}) no tempo, e

- transformar a dita função de refletividade modelo (L_{mt}) no domínio de frequência, produzindo um espectro de refletividade modelo (L_{mf}).

[0028] Em uma modalidade, o método compreende selecionar um valor máximo (C_{max} – vide Figura 5a) a partir dos ditos valores de pico (C_{alto}) dos valores de correlação ($C(\Delta t)$) em função da espessura temporal atual ($C(\Delta t)$), e permitir que a espessura temporal (Δt) correspondente ao dito valor máximo (C_{max}) indique a dita estimativa de espessura (L_m) da dita camada geológica subterrânea (L).

[0029] Em uma modalidade, o método compreende adicionalmente conduzir o processo para inúmeros traços de reflexão sísmica ($5t$) registrados em diferentes locais geográficos para produzir uma estimativa de espessura (L_m) da dita camada geológica subterrânea (L) para parte dos ditos locais geográficos ou todos eles.

[0030] Em uma modalidade, o método compreende adicionalmente o fato de que inúmeros traços de reflexão sísmica são registrados em inúmeros diferentes locais geográficos que cobrem uma seção da linha de perfil sísmico da Terra.

[0031] Em uma modalidade, o método compreende adicionalmente o fato de que inúmeros traços de reflexão sísmica são registrados em inúmeros diferentes locais

geográficos que cobrem um volume da Terra.

[0032] Em uma modalidade, a invenção compreende selecionar o intervalo temporal (t_1 , t_2) do traço dos dados de reflexão sísmica ($5t$) que produzem uma série de intervalo de tempo dos dados de reflexão sísmica ($5ts$) para a qual uma espessura (d) de uma camada (L) no intervalo temporal deve ser determinada, com base na determinação manual do intervalo temporal (t_1 , t_2) a partir de reflexões aparentes no traço dos dados de reflexão sísmica ($5t$).

[0033] Em uma modalidade, a invenção compreende selecionar o intervalo temporal (t_1 , t_2) do traço dos dados de reflexão sísmica ($5t$) que produzem uma série de intervalo de tempo dos dados de reflexão sísmica ($5ts$) para a qual uma espessura (d) de uma camada (L) no intervalo temporal deve ser determinada, com base na interpolação ou extrapolação correspondentes a um intervalo temporal (t_{1n} , t_{2n}) que compreende reflexões relevantes em um ou mais traços vizinhos dos dados de reflexão sísmica ($5t_n$).

[0034] Em uma modalidade, a invenção compreende produzir a pequena onda fonte do domínio de frequência pela medição de uma pequena onda de assinatura fonte no domínio de tempo e pela transformação da pequena onda de domínio de tempo fonte na pequena onda fonte do domínio de frequência por uma transformada de Fourier.

[0035] Em uma modalidade, a invenção compreende produzir a pequena onda fonte do domínio de frequência pela transformação de um ou mais traços de reflexão sísmica extensivos no domínio de frequência, desse modo, produzindo uma pequena onda fonte.

[0036] Em uma modalidade da invenção, o traço sísmico dos dados de domínio de tempo de reflexão ($5t$) é um traço registrado em um único sensor sísmico.

[0037] Em uma modalidade da invenção, o traço sísmico dos dados de domínio de tempo de reflexão ($5t$) compreende traços registrados em uma multiplicidade de sensores sísmicos e empilhados para formar o traço sísmico dos dados de domínio de tempo de reflexão ($5t$).

[0038] Em uma modalidade, o intervalo temporal (t_1 , t_2) varia em uma área

geográfica, a fim de captar uma fina camada cuja profundidade do topo à base varia na área geográfica.

[0039] Em uma modalidade da invenção, nas etapas de gerar um modelo de impedância acústica com uma camada (L_m) com um contraste de impedância (Δz) e a espessura temporal (Δt) e de formar uma função de refletividade modelo (L_{mt}) no tempo, introduz-se, no intervalo temporal (t_1, t_2), outros contrastes de impedância e espessuras temporais empíricos para camadas à frente da dita camada, ou depois dela (L_m).

[0040] Uma modalidade da presente invenção será explicada a seguir sob o parágrafo com título "Descrição de uma Modalidade da Invenção".

DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS DESENHOS

[0041] A invenção é ilustrada nos desenhos anexos, que são propostos para ilustrar a invenção sem limitar o escopo da invenção. Nos desenhos:

[0042] A figura 1 é uma ilustração de um sinal de reflexão observado em função de uma espessura da camada verdadeira ou modelo mostrada na figura 1b. Um modelo de cunha interpretado também é ilustrado na figura 1a, no qual o modelo interpretado se torna muito espesso para camadas finas. O modelo de cunha é centralizado no tempo de reflexão bidirecional de 200 ms.

[0043] A figura 2 apresenta gráficos da espessura da camada interpretada em função da espessura da camada modelo, para o modelo ilustrado na figura 1b. Como exposto, a espessura interpretada não se estende abaixo de 11 ms, apesar de o modelo de trás se aproximar de espessura zero.

[0044] A figura 3a ilustra uma impedância acústica de um modelo geológico com uma camada anômala formando um contraste com as rochas homogêneas superficiais e subjacentes. Isto é, o modelo é um limiar em termos geológicos. $z_1 = 5 * 10^6 \text{ (m/s)} * \text{(kg/m}^3\text{)}$, $z_2 = 4 * 10^6 \text{ (m/s)} * \text{(kg/m}^3\text{)}$.

[0045] A figura 3b é uma exibição de uma refletividade com zero deslocamento de acordo com o modelo da figura 3a, os coeficientes de reflexão assim sendo:

$$r_1 = (z_2 - z_1) / (z_2 + z_1) = -0,11$$

$$r_2 = (z_3 - z_2) / (z_3 + z_2) = +0,11.$$

[0046] A figura 3c ilustra os dados da refletividade com zero deslocamento da figura 3b convolvida com um pulso de Ricker de 30 Hz. Note que isto é no domínio de tempo e que a interferência dos lobos complementares dos pulsos de Ricker não é muito visível.

[0047] A figura 3d mostra a transformada de Fourier do pulso de Ricker de 30 Hz da figura 3c. O espectro de frequência é simétrico em cerca de 0 Hz.

[0048] A figura 3e exibe gráficos da transformada de Fourier da refletividade com zero deslocamento para refletores de impedância acústica opostos de acordo com a figura 3b, que é uma curva $|\sin|$, que é zero para 0 Hz, e a curva rompida representa a transformada correspondente para refletores de sinal igual, que é uma curva $|\cos|$ similar com fendas, mas deslocada pela metade da separação da fenda em relação à curva $|\sin|$.

[0049] A figura 3f é o espectro de frequência do espectro de refletividade com zero deslocamento da figura 3d multiplicado pelo espectro de pequena onda do pulso de Ricker. Assim, esta figura representa um modelo idealizado do espectro de uma reflexão sem ruído de uma única formação geológica de reflexão.

[0050] A figura 3g ilustra tecnologia anterior, ilustrando um espectro de pequena onda fonte no lado esquerdo da folha e, no lado direito da folha, o espectro de uma reflexão de um leito geológico cuja separação temporal entre o topo e a base do leito geológico é avaliada com base na separação de frequência entre duas fendas no espectro de reflexão.

[0051] A figura 3h ilustra um problema relacionado à tecnologia anterior suprailustrada quando a espessura temporal se tornar muito pequena, e a primeira fenda for alta no espectro da pequena onda fonte e a segunda fenda estiver acima do espectro, assim, tornando a avaliação da espessura difícil.

[0052] A figura 4a é similar à figura 3a e tem, adicionada em si, uma série de variações de impedância acústica extras para se assemelhar a um modelo geológico mais realístico, e retendo a zona de baixa impedância em cerca de 200 ms twt.

[0053] A figura 4b é a refletividade com zero deslocamento da figura 4a, ilustrando o ruído adicionado. Note que as refletividades r_1 no topo e r_2 na base da

zona de baixa impedância não são iguais.

[0054] A figura 4c corresponde à figura 3c e exibe uma curva da refletividade com zero deslocamento ligeiramente ruidosa convolvida com uma pequena onda do pulso de Ricker de 30 Hz.

[0055] A figura 4d corresponde à figura 3d e é a transformada de Fourier da pequena onda de Ricker de 30 Hz.

[0056] A figura 4e corresponde à figura 3e e representa a transformada de Fourier da série de domínio de tempo da refletividade com zero deslocamento ilustrada na figura 4b.

[0057] A figura 4f exibe o espectro de refletividade com zero deslocamento um tanto ruidoso da figura 4e multiplicado pelo espectro da pequena onda de Ricker da figura 4d e, assim, provê uma imagem mais realística dos dados com zero deslocamento no domínio de frequência. Assim, o espectro de frequência mostrado na figura 4f pode representar o espectro de frequência de uma seção de tempo relativamente curta dos dados sísmicos contendo uma camada relativamente fina, a possível presença da fina camada revelada pela fenda em 40 Hz.

[0058] A figura 5a ilustra um recurso da invenção em que uma correlação pode ser automaticamente calculada entre o espectro de frequência de uma seção de tempo selecionada dos dados de reflexão sísmica e um conjunto de modelos de espectro de frequência ao longo da abscissa, os modelos de espectro de frequência representando uma camada contida de espessura temporal crescente. A espessura temporal da camada modelo variando de 4 ms (a taxa de amostragem usual) até 85 ms.

[0059] O valor de correlação máximo corresponde a uma espessura temporal da camada contida no modelo que melhor adéqua os dados medidos ao modelo. Assim, o processo de correlação pode ser robusto, em que não é necessário que todo o espectro que inclui uma primeira fenda, a fim de encontrar uma correlação entre o modelo e os dados medidos, contanto que os dados estejam acima do nível de ruído.

[0060] A figura 5b exibe o espectro de frequência de uma curta série de tempo

de dados do modelo ruidoso, de cima a baixo de uma camada (linha recortada), e um espectro de frequência correspondente de um espectro fonte multiplicado por um espectro modelo com base em uma dada espessura da camada modelo. Uma série de duas tais curvas é correlacionada na figura 5a.

[0061] A figura 6 exhibe uma série contínua geral dos espectros de frequência dos modelos com espessuras da camada crescentes a partir de zero no lado esquerdo, até a espessura de camada 40 ms no lado direito, na qual os espectros de frequência são multiplicados por um espectro de frequência da assinatura da fonte de uma pequena onda de Ricker. Favor notar a ausência de fendas acima das frequências superiores do espectro da pequena ondas de Ricker.

[0062] A figura 7 exhibe uma série contínua geral dos espectros de frequência dos modelos com espessuras da camada de acordo com a figura 6. Aqui, a assinatura da fonte não foi multiplicada e, assim, a forma $|\text{sen}(w)|$ de cada perfil prevalece sem limites do espectro de amplitude de qualquer pequena onda de Ricker.

[0063] A figura 8a é um exemplo de um mapa de espessuras interpretadas comparado com um mapa de espessuras invertidas feito usando seleção de domínio de tempo da tecnologia anterior em função de um mapa da figura 8b feito usando o método de correlação da presente invenção para encontrar uma estimativa das espessuras da camada.

[0064] A figura 8c é similar à figura 2 e exhibe as espessuras interpretadas exibidas no mapa da figura 8a graficamente representadas em função das espessuras invertidas calculadas de acordo com o método da presente invenção.

DESCRIÇÃO DE UMA MODALIDADE DA INVENÇÃO

[0065] Assim, o padrão de interferência de dois refletores no domínio de frequência é qualquer um de:

- uma função $|\text{sen}|$ mostrada na figura 3e, se os refletores forem de sinais opostos, como nas figuras 3a e 3b,

ou

- uma função $|\text{cos}|$ mostrada pela linha rompida na figura 3e, se os refletores forem do mesmo sinal.

[0066] O sinal sísmico de dois refletores no domínio de frequência é, como exposto, a assinatura da fonte multiplicada por um |seno| ou |cosseno| como estes, dependendo dos dois contrastes de impedância acústica representados pela fina camada em questão. Com o propósito de estimar as espessuras, a fase não é relevante, então, é apenas o espectro de energia que importa. Isto fornece duas equações:

$$|d_o(\omega)| = |W(\omega)| \cdot |\sin(\omega)|, \text{ para refletores de sinais opostos, e}$$
$$|d_s(\omega)| = |W(\omega)| \cdot |\cos(\omega)|, \text{ para refletores do mesmo sinal,}$$

em que $W(\omega)$ é a assinatura da fonte sísmica.

[0067] Como é bem conhecido, o espectro de assinatura da fonte pode ser medido tanto diretamente quanto pelo cálculo da média do espectro sísmico durante uma longa série de tempo de reflexões. Assim, a espessura da camada pode ser encontrada como a frequência para a qual a correlação da assinatura da fonte e da onda |sen| ou |cos| maximiza $|d(\omega)|$.

[0068] Em vez de usar a abordagem qualitativa de Partyka et al, na presente invenção, é feita uma abordagem quantitativa para descobrir as espessuras temporais de uma fina camada. Se tivermos um espectro de pequena onda real, podemos tentar corresponder os dados reais com diferentes espessuras. Adicionar alguns refletores extras proverá um teste mais realístico. A figura 4a ilustra uma geologia similar àquele do modelo muito simplificado da figura 3a, mas, além da zona de baixa impedância de 0,024 s entre 0,176 s e 0,200 s, foram adicionadas aleatoriamente impedâncias variáveis em torno da impedância acústica média de $5 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$, para cada 4 ms de intervalo de amostragem digital. Adicionalmente, as mesmas variações aleatórias foram adicionadas à zona de baixa impedância de $4 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$. A refletividade com zero deslocamento do modelo dado na figura 4a é mostrada na figura 4b, que, além de mostrar as refletividades das refletividades limites superior e inferior das zonas de baixa impedância, também exhibe as menores refletividades aleatórias. A figura 4c exhibe as refletividades com zero deslocamento da zona de baixa impedância com ruído aleatório, de acordo com a figura 4b, convolvidas com a pequena onda de Ricker de 30 Hz da mesma maneira da figura

3c.

[0069] Pode-se continuar observando os dados correspondentes no domínio de frequência. A pequena onda do pulso de Ricker, tal como ilustrado na figura 3d, é repetida na figura 4d. A refletividade com zero deslocamento que mostrou amostra de 4 ms na figura 4b passa por transformada de Fourier no domínio de frequência e é mostrada na figura 4e. Observa-se a semelhança da repetição da "frequência de batida" de 40 Hz, mesmo embora a refletividade expressada no domínio de frequência não seja tipo "seno", quanto ao modelo sem ruído da figura 3a, os dados de domínio de frequência com zero deslocamento resultantes mantiveram sua forma.

[0070] O método descreveu dados modelos no domínio de frequência dadas uma pequena onda e uma espessura da fina camada proposta, tal como mostrado na figura 3f. Então, os dados modelados são correlacionados com a transformada do domínio de frequência dos dados reais e a espessura, tal como na figura 4f, e uma correlação máxima em função de espessura modelo é selecionada. A figura 5a mostra tais correlações dadas em função das espessuras propostas dadas em milissegundos. A figura 5b é uma ilustração de uma comparação entre dados no domínio de frequência dadas uma pequena onda e uma espessura da fina camada proposta de 0,0232 s (linha mais lisa), e o dados de domínio de frequência ruidosos modelados e uma dada espessura de uma camada de baixa impedância, tal como a partir da figura 4f. Esta correlação fornece a correlação máxima para a espessura do fino leito de baixa impedância, tal como dado na figura 5a, para uma espessura temporal de 0,0232 s. Esta correlação máxima analiticamente encontrada para um único traço compara bem com o correto valor modelo de 0,024 s. O erro é de 0,0008 s, que é 1/5 da taxa de amostra de 4 ms. Observa-se que há máximos inferiores na figura 5a próximos de 48 ms e também de 72 ms, que são múltiplos da espessura de 24 ms. Isto exemplifica uma robustez do presente método que é independente da seleção de uma fenda no espectro de frequência. A presente invenção calcula a correlação entre toda a curva (L_{ms}) do espectro de frequência da pequena onda fonte que compreende a fenda, de acordo com a espessura modelada, e o espectro

de frequência que contém a fenda do fino leito real suspeito (5f) do intervalo de tempo (intervalo de profundidade) sob consideração, tal como ilustrado na figura 5b.

[0071] Para algumas pesquisas sísmicas, um recurso geológico de interesse pode aparecer apenas em alguns traços sísmicos para uma dada faixa de deslocamento, tais como deslocamentos próximo ou intermediário. O método de acordo com a invenção pode ser usado com os assim denominados dados sísmicos empilhados dos traços de deslocamento próximo, com os assim denominados dados sísmicos empilhados de deslocamento intermediário dos traços de deslocamento intermediário, com as assim denominadas pilhas de deslocamento distante dos traços de deslocamento distante, a fim de captar tais recursos geológicos de interesse. Certamente, também pode-se utilizar assim denominados dados de pilha cheia de todos os traços sísmicos próximos até distantes disponíveis com o presente método. Entretanto, deve-se estar ciente do problema da atenuação das altas frequências do sinal sísmico e do fato de que a "assinatura da fonte" aparente tem uma amplitude reduzida na parte de alta frequência para os dados de deslocamento distante. Também deve-se estar ciente do fato de que o espectro da fonte sísmica deve ter uma largura a fim de que o método funcione, isto é, a fonte não deve ser um gerador de onda seno de frequência única. O método de acordo com a invenção não deve ter limitação em relação aos modos de onda, sejam ondas P ou S, ambas devem funcionar bem.

VANTAGENS DA INVENÇÃO

[0072] A invenção tem as seguintes vantagens:

[0073] O método de acordo com a invenção pode ser conduzido pela repetição das seguintes etapas para inúmeras espessuras temporais (Δt), desse modo, tornando o método mais ou menos automático. Um modelo de impedância acústica é gerado, o modelo tendo uma camada (L_m) com um contraste de impedância (Δz) e a espessura temporal gradual gerada exposta (Δt). Assim, uma função de refletividade modelo (L_m) em função de tempo é formada.

[0074] A função de refletividade modelo (L_{mf}) é transformada no domínio de frequência, produzindo um espectro de refletividade modelo (L_{mf}).

[0075] O espectro de refletividade modelo (L_{mf}) é multiplicado pelo dito espectro de pequena onda fonte, resultando em um espectro modelo de refletividade (L_{ms}).

[0076] Vantajosamente, em vez de selecionar diferenças entre fendas no espectro de frequência de intervalo sísmico, da forma feita por Partyka et al, todo o espectro do espectro de frequência de intervalo sísmico ($5f$) é usado na etapa de correlacionar o espectro modelo de refletividade (L_{ms}) com o espectro de frequência de intervalo sísmico ($5f$), produzindo um único valor de correlação ($C(\Delta t)$) em função da espessura temporal atual (Δt). Este processo é repetido para todas as espessuras temporais relevantes, por exemplo, feito em um laço de algoritmo que começa com uma grande espessura temporal, tal como 85 ms, e que diminui incrementalmente para cada laço até que a menor espessura temporal, tal como 4 ms, seja alcançada, isto é, indo da direita para esquerda ao longo do eixo geométrico da espessura temporal no diagrama da figura 5a.

[0077] Selecionar automaticamente um valor de pico (C_{alto}), preferivelmente, um valor máximo, na assim produzida série de valores de correlação ($C(\Delta t)$) em função das espessuras temporais atuais (Δt) e permitir que a espessura temporal (Δt) correspondente ao dito valor de pico (C_{alto}) ou ao valor máximo indique uma estimativa de espessura (L_m) da dita camada geológica subterrânea (L) pode prover um eficiente método para delinear mais precisamente uma fina camada e prover uma estimativa mais realística da distribuição geográfica das espessuras da camada.

[0078] Um exemplo dos resultados quantitativos do método é dado na figura 8b, se comparado com os resultados da interpretação convencional da seleção de topo e base da espessura sísmica (isto é, temporal, em ms) de uma camada selecionada, da forma mostrada na figura 8a. A área mapeada exibida na figura 8a e na figura 8b se estende de 945 km até 990 km, isto é, 45 km na direção N-S, e de 1.150 km até 1.175 km, isto é, 25 km na direção W-E.

[0079] Na figura 8a, as espessuras interpretadas da camada em questão variam de mais de 25 ms e, para baixo, até cerca 9 ou 10 ms no mínimo. Nenhuma área com uma espessura da camada sísmica (em tempo) menor que cerca de 10 ms é

indicada, da forma esperada a partir do limite inferior mostrado na figura 2, exibindo espessura da camada interpretada em função da espessura da camada "verdadeira" (modelo). Fora da espessura interpretada inferior claramente indicada, não é indicada nenhuma espessura sísmica, o que seria uma situação geológica improvável.

[0080] Na figura 8c, é ilustrado um gráfico das espessuras interpretadas em função das espessuras invertidas calculadas de acordo com a invenção. Claramente, um limite inferior de uma maior proporção de espessuras interpretadas é de cerca de 9 ms, enquanto que uma maior proporção das espessuras invertidas de acordo com a invenção cai até quase zero. Este exemplo corresponde muito bem ao gráfico da figura 2.

[0081] Na figura 8b, as espessuras invertidas da camada em questão variam bastante em relação às espessuras interpretadas quando a espessura da camada for maior que cerca de 10 ms. Uma área mais ou menos circular é indicada por uma linha rompida negra (8) com a mesma posição em ambos os mapas da figura 8a e da figura 8b. Embora, no geral, todas as espessuras interpretadas na área indicada (8) na figura 8a tenham mais de 10 ms de espessura, há uma subárea (81) na figura 8b, na área indicada que é limitada por uma linha limite rompida (82), a dita subárea (81) tendo partes coerentes que indicam claramente uma espessura temporal calculada de acordo com a invenção significativamente menor que 10 ms. Claramente, a espessura interpretada em grandes partes da subárea (81) é maior que a espessura invertida de acordo com a invenção. É uma vantagem da presente invenção produzir uma espessura mais correta, menor que a espessura interpretada. Reduzir a estimativa de espessura pode prover estimativas de volume mais realísticas de uma camada.

[0082] Além disto, a linha limite rompida (82) que delimita a subárea coerente (81) indicada na figura 8b foi copiada para a mesma posição na figura 8a. Claramente, a linha limite de distribuição da fina camada coerente (82) que forma o limite para além de onde há mais ou menos ruído (ou instabilidade) nos dados invertidos (o ruído ou instabilidade indicados por uma distribuição de todas as cores)

se estende para fora de uma correspondente subárea interpretada (83) da figura 8a. Isto provê uma indicação de que o método de acordo com a invenção provê estáveis estimativas de espessura temporal abaixo dos limites inferiores da interpretação de domínio de tempo da espessura de uma fina camada geológica.

SUMÁRIO

[0083] De modo geral, o método de acordo com a invenção provê um método automatizado para estimar as espessuras de uma fina camada em dados sísmicos. A camada pode ser uma camada geológica com um contraste de impedância acústica superior e inferior. A camada também pode ser uma camada fluida em uma camada geológica na qual uma interface do fluido provê um contraste de impedância acústica, por exemplo, devido a uma interface água / óleo, uma interface água / gás ou uma interface óleo / gás. Assim, o método de acordo com a invenção pode ser usado em avaliações sísmicas 4D durante a produção de um campo para monitorar a elevação ou a espessura de uma camada fluida. Adicionalmente, o método de acordo com a invenção pode ser usado para prover mais precisamente uma distribuição de espessura invertida de uma fina camada em uma área geográfica. Ainda adicionalmente, o método de acordo com a invenção pode prover uma distribuição de espessura quantitativa de uma fina camada que se estende mais que uma distribuição de espessura geográfica qualitativa de acordo com a tecnologia anterior. Uma estimativa de fina camada mais fina e mais realística pode indicar volume de reservatório menor que a tecnologia anterior. Uma maior distribuição da camada mais fina indicará uma maior extensão do reservatório e, possivelmente, também, mais conectividade entre partes geograficamente distribuídas da fina camada que, previamente, acreditava-se estar disjuntas.

[0084] Apêndice: Documento Preliminar de Espen Oen Lie: "Estimativa de Espessura a Partir da Resposta de Frequência da Fina Camada"

Estimativa de espessura A PARTIR DA resposta de frequência da fina camada

Espen Oen Lie

20 de junho de 2008

1. Introdução

Em geofísica, há um frequente interesse na espessura das camadas. Esta pode ser a espessura de um reservatório em potencial ou da zona do reservatório. A maneira comum de medir a espessura é por interpretação. Isto é, selecionar o topo e a base e calcular a diferença. Entretanto, esta abordagem sofre fortemente de um efeito chamado de sintonia. Isto é, na avaliação sísmica, esta posição de topo e de base não são correspondentes ao topo e à base reais quando a camada for fina. Em que espessura este efeito começa a ocorrer, depende do conteúdo da frequência.

A seguir, é derivada uma técnica que utiliza este efeito de sintonia para estimar a espessura verdadeira. Nos dados sintéticos, pode-se mostrar que o método é exato até um nível mais baixo de ruído em que a amplitude da reflexão fica no mesmo nível do ruído de fundo.

2. Derivação da inversão de espessura

Considera que tem-se dados sísmicos de uma fina camada no domínio de Fourier, isto é, uma reflexão do topo e da base:

$$d(\omega) = W(\omega) (r_t e^{i\omega t_t} + r_b e^{i\omega t_b}) . \quad (1)$$

em que W é pequena onda, r_b e r_t são coeficientes de reflexão na base e no topo da camada e t_b , e t_t são posições da base e do topo (em twt). Pela introdução de medições de média e de diferença

$$\bar{t} = t_b + t_t, \quad t_b = \frac{1}{2}(\bar{t} + \Delta t) \quad (2)$$

$$\Delta t = t_b - t_t, \quad t_t = \frac{1}{2}(\bar{t} - \Delta t) \quad (3)$$

$$\bar{r} = r_b + r_t, \quad r_b = \frac{1}{2}(\bar{r} + \Delta r) \quad (4)$$

$$\Delta r = r_b - r_t, \quad r_t = \frac{1}{2}(\bar{r} - \Delta r) \quad (5)$$

$$(6)$$

tem-se

$$d(\omega) = W(\omega)e^{i\omega\frac{1}{2}t} \left(\frac{1}{2}\bar{r} \left(e^{i\frac{1}{2}\omega\Delta t} + e^{-i\frac{1}{2}\omega\Delta t} \right) + \frac{1}{2}\Delta r \left(e^{i\frac{1}{2}\omega\Delta t} - e^{-i\frac{1}{2}\omega\Delta t} \right) \right) \quad (7)$$

$$= W(\omega)e^{i\omega\frac{1}{2}t} \left(\bar{r} \cos\left(\frac{1}{2}\omega\Delta t\right) + i\Delta r \sin\left(\frac{1}{2}\omega\Delta t\right) \right) \quad (8)$$

Agora, pode-se observar o valor absoluto desta resposta.

$$|d(\omega)| = |W(\omega)| \left| \bar{r} \cos\left(\frac{1}{2}\omega\Delta t\right) + i\Delta r \sin\left(\frac{1}{2}\omega\Delta t\right) \right| \quad (9)$$

Esta equação tem dois termos, além do espectro de pequena onda. Se calcula-se os termos com valor real para a parte trigonométrica, tem-se:

$$|d(\omega)| = |W(\omega)| \sqrt{\bar{r}^2 \cos^2\left(\frac{1}{2}\omega\Delta t\right) + \Delta r^2 \sin^2\left(\frac{1}{2}\omega\Delta t\right)}. \quad (10)$$

Reescrevendo a equação:

$$|d(\omega)| = |W(\omega)| |\Delta r| \sqrt{\sin^2\left(\frac{1}{2}\omega\Delta t\right) + \frac{\bar{r}^2}{\Delta r^2} \cos^2\left(\frac{1}{2}\omega\Delta t\right)}, \quad (11)$$

observa-se que, se $r^2/L1r \ll 1$, então

$$|d(\omega)| \approx |W(\omega)| |\Delta r| \sqrt{\sin^2\left(\frac{1}{2}\omega\Delta t\right)} = |W(\omega)| |\Delta r| \sin\left(\frac{1}{2}\omega\Delta t\right) \quad (12)$$

3. Solução Do problema inverso

Na equação (12), que declara o problema, entram três termos: intensidade da reflexão, espectro de pequena onda e espessura. Aqui, há um interesse primário na espessura. E, já que esta é uma abordagem muito simplificada, não pode-se esperar extrair o espectro de pequena onda desta equação. Assim, deseja-se estimar o espectro de pequena onda antes disto e cancelar Δr .

Uma abordagem que satisfaz estes critérios é otimizar a correlação entre o modelo sintético e os dados reais. Se denota-se os dados reais como $d(\omega)$ e os dados sintéticos as $d_s(\omega)$, a função que está se maximizando é:

$$C(\Delta t) = \max \frac{\langle |d_s|, |d| \rangle^2}{\langle |d_s|, |d_s| \rangle \langle |d|, |d| \rangle} \quad (13)$$

em que $|d_s|$ e $|d|$ foram equalizados de forma que $\int |d_s| d\omega = \int |d| d\omega = 0$. Se nosso modelo estiver correto, então a função pode ser escrita como:

$$C(\Delta t_s) = \frac{|\Delta r_s|^2 |\Delta r|^2 \left(\int |W_s(\omega)| |W(\omega)| \left| \sin\left(\frac{1}{2}\omega \Delta t_s\right) \right| \left| \sin\left(\frac{1}{2}\omega \Delta t\right) \right| d\omega \right)^2}{|\Delta r_s|^2 |\Delta r|^2 \int |W_s(\omega)|^2 \left| \sin\left(\frac{1}{2}\omega \Delta t_s\right) \right|^2 d\omega \int |W(\omega)|^2 \left| \sin\left(\frac{1}{2}\omega \Delta t\right) \right|^2 d\omega} \quad (14)$$

$$= \frac{\left(\int |W_s(\omega)| |W(\omega)| \left| \sin\left(\frac{1}{2}\omega \Delta t_s\right) \right| \left| \sin\left(\frac{1}{2}\omega \Delta t\right) \right| d\omega \right)^2}{\int |W_s(\omega)| \left| \sin\left(\frac{1}{2}\omega \Delta t_s\right) \right|^2 d\omega \int |W(\omega)| \left| \sin\left(\frac{1}{2}\omega \Delta t\right) \right|^2 d\omega} \quad (15)$$

Se o espectro de pequena onda estiver correto, então $C(\Delta t) = 1$ e $C(\Delta t_s \neq \Delta t) < 1$.

3.1 Estimativa de pequena onda

Estimativa de pequena onda não é realmente parte do método. Entretanto, este método demanda menos da qualidade da pequena onda do que outros métodos inversos. Antes de mais nada, fase não entra, apenas o espectro. Em segundo lugar, amplitude não tem importância (ela cancela no método). Ainda pode-se usar um vínculo bem comum, mas há uma abordagem mais simples. Se considera-se que um traço consiste em algumas reflexões modeladas por uma pequena onda, então

$$d(\omega) = W(\omega) \sum_j r_j e^{i\omega t_j}. \quad (16)$$

Então, se observa-se os valores absolutos:

$$|d(\omega)| = |W(\omega)| \left| \sum_j r_j e^{i\omega t_j} \right| = |W(\omega)| I(r_j, t_j) \quad (17)$$

em que $I(r_j, t_j)$ é o padrão de interferência para o traço atual. Além do mais, se considera-se que este padrão de interferência é suficientemente diferente de traço para traço, ou inclui-se traços suficientes fora da área de interesse, então:

$$W(\omega) \approx \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |W(\omega)| I(r_{j,k}, t_{j,k}) \quad (18)$$

Há modelos analíticos em que pode-se prover a última equação (coeficientes de reflexão sendo gaussianos e uniformemente espaçados), mas

estes, usualmente, não são muito realísticos, então, deixa-se a aproximação matematicamente não justificada.

3.2. Possíveis falhas

Há muitos motivos para que esta abordagem falhe. As mais importantes são o caso em que nossos dados não se adéquam ao modelo. Isto é, nossos dados não consistem em uma única reflexão do topo e da base. As três falhas mais importantes são:

1. Refletor de topo / base não são igualmente fortes;
2. Reflexões de amplitude mais altas na janela escolhida;
3. Pequena onda incorreta.

O primeiro caso, em que o topo e a base não são iguais, é incluído na derivação ((11)). Isto implica que há uma adição de um termo cosseno no espectro. Isto não é sério em termos de otimização da correlação, já que apenas reduz a correlação máxima, e não a espessura da correlação máxima.

O segundo caso é o mais sério. Se tem-se reflexões de amplitude mais altas na janela, então, não é fácil prever qual par de reflexões proporcionará a correlação mais alta. Por este motivo, a janela usada para inversão de espessura deve ser tão ampla que ela não altere a amplitude do evento de interesse, mas não mais ampla.

O caso com a pequena onda incorreta ou, mais preciso, espectro de pequena onda incorreto. Resultados serão errados. Isto é mais sério para pequenas espessuras, em que não há fendas no espectro. Para espessuras maiores, isto não deve ser tão problemático, mas espessuras maiores não são tão interessantes, já que elas podem ser interpretadas.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para estimar uma espessura de uma camada geológica (L), o método compreendendo as etapas de:

(a) selecionar dados de campo de reflexão sísmica adquiridos de um intervalo de interesse de profundidade subsuperficial usando uma fonte sísmica tendo um espectro de pequena onda fonte;

(b) prover uma pluralidade de modelos geológicos com diferentes espessuras da camada e prover respectivas respostas do modelo a partir da pluralidade de modelos geológicos;

caracterizado por:

(c) correlacionar um espectro de frequência dos dados de campo de reflexão sísmica com um espectro de frequência de cada uma das respostas do modelo para derivar valores de correlação associados com as diferentes espessuras da camada dos modelos; e

(d) derivar, a partir dos valores de correlação, uma espessura da camada modelo que é indicativa da espessura da camada geológica.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que compreende ainda as etapas de adequar uma curva aos valores de correlação e derivar a espessura da camada modelo indicativa da espessura da camada geológica a partir de um valor da curva adequada.

3. Método, de acordo com as reivindicações 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que a etapa de correlacionar o espectro de frequência dos dados de campo de reflexão sísmica com cada um dos espectros de frequência das respostas do modelo é realizada em relação à uma largura total do espectro de frequência.

4. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, caracterizado pelo fato de que o espectro de frequência dos dados de campo de reflexão sísmica e os espectros de frequência das respostas do modelo tomam a forma de espectros de energia.

5. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo fato de que inclui ainda a etapa de selecionar um valor de pico

dos valores de correlação e derivar a espessura da camada modelo, que é indicativa da espessura da camada geológica, a partir do valor de pico.

6. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5, caracterizado pelo fato de que inclui ainda a etapa de selecionar um valor máximo dos valores de correlação e de derivar a espessura da camada modelo, que é indicativa da espessura da camada geológica, a partir do valor máximo.

7. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizado pelo fato de que o intervalo de interesse de profundidade subsuperficial contém a camada geológica e os dados sísmicos selecionados são associados com a camada geológica.

8. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 7, caracterizado pelo fato de que os dados de campo de reflexão sísmica selecionados são na forma dos dados sísmicos da série de tempo e o método inclui a etapa de transformar os dados da série de tempo para formar o espectro de frequência dos dados de campo de reflexão sísmica.

9. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, caracterizado pelo fato de que o método inclui formar a pluralidade de modelos e correspondentes respostas do modelo iterativamente e mudar a espessura da camada modelo nas sucessivas iterações.

10. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 9, caracterizado pelo fato de que o método inclui prover uma pluralidade de modelos nos quais as camadas têm espessuras pré-determinadas.

11. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 10, caracterizado pelo fato de que os modelos providos na etapa (b) diferem exclusivamente pela espessura da camada modelo.

12. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 11, caracterizado pelo fato de que inclui a etapa de definir um ou mais parâmetros do modelo selecionado a partir do grupo que compreende: impedância acústica, refletividade, profundidade, espessura da camada, forma de onda da fonte e frequência da fonte.

13. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 12, caracterizado pelo fato de que compreende ainda:

- usar uma fonte sísmica (3) com um espectro de pequena onda fonte (3f);
- registrar um traço sísmico dos dados de domínio de tempo de reflexão (5t);

em que a etapa (a) compreende selecionar um intervalo temporal (t_1 , t_2) do dito traço dos dados de reflexão sísmica (5t), produzindo uma série de intervalo de tempo dos dados de reflexão sísmica (5ts) para a qual uma espessura (Δt ou d) da dita camada (L) no dito intervalo temporal deve ser determinada;

- compreendendo ainda transformar os ditos dados de reflexão do intervalo de tempo (5ts) em um espectro de frequência de intervalo sísmico (5f);

- em que a etapa (b) compreende repetir as seguintes etapas para inúmeras espessuras temporais (Δt):

- formar um espectro de refletividade modelo (L_{mf}) que representa uma espessura temporal atual (Δt) de uma função de refletividade (L_{mt});

- multiplicar o dito espectro de refletividade modelo (L_{mf}) pelo dito espectro de pequena onda fonte, produzindo um espectro modelo de fina camada (L_{ms});

em que a etapa (c) compreende repetir a seguinte etapa para as inúmeras espessuras temporais (Δt):

- correlacionar o dito espectro modelo de fina camada (L_{ms}) com o dito espectro de frequência de intervalo sísmico (5f), produzindo um (único) valor de correlação ($C(\Delta t)$) em função da espessura temporal atual (Δt); e

- em que a etapa (d) compreende repetir a seguinte etapa para as inúmeras espessuras temporais (Δt):

- selecionar um valor de pico (C_{alto}) na assim produzida série de valores de correlação ($C(\Delta t)$) em função da espessura temporal atual ($C(\Delta t)$), e permite que a espessura temporal (Δt) correspondente ao dito valor de pico (C_{alto}) indique uma estimativa de espessura (L_m) da dita camada geológica subterrânea (L).

14. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de

que o dito espectro de refletividade (L_{mf}) é um espectro de refletividade com zero deslocamento que representa uma espessura temporal atual (Δt) de uma função de refletividade com zero deslocamento (L_{mt}).

15. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que o dito traço sísmico dos dados de domínio de tempo de reflexão ($5t$) é uma pilha de deslocamento próximo dos traços sísmicos de deslocamento próximo.

16. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que o dito traço sísmico dos dados de domínio de tempo de reflexão ($5t$) é uma pilha de deslocamento intermediário dos traços sísmicos de deslocamento intermediário.

17. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que o dito traço sísmico dos dados de domínio de tempo de reflexão ($5t$) é uma pilha de deslocamento distante dos traços sísmicos de deslocamento distante.

18. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que, antes da etapa de formar um espectro de refletividade modelo (L_{mf}) que representa uma espessura temporal atual (Δt) de uma função de refletividade (L_{mt}),

- gerar um modelo de impedância acústica com uma camada (L_m) com um contraste de impedância (Δz) e a dita espessura temporal (Δt), e formar a dita função de refletividade modelo (L_m) no tempo, e

- transformar a dita função de refletividade modelo (L_{mt}) no domínio de frequência, produzindo um espectro de refletividade modelo (L_{mf}).

19. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que compreende ainda as etapas de:

selecionar um valor máximo (C_{max}) a partir dos ditos valores de pico (C_{alto}) dos valores de correlação ($C(\Delta t)$) em função da espessura temporal atual ($C(\Delta t)$); e

permitir que a espessura temporal (Δt) correspondente ao dito valor máximo (C_{max}) indique a dita estimativa de espessura (L_m) da dita camada geológica subterrânea (L).

20. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que compreende conduzir o processo para inúmeros traços de reflexão sísmica ($5t$) registrados em diferentes locais geográficos, para produzir uma estimativa de

espessura (L_m) da dita camada geológica subterrânea (L) para parte dos ditos locais geográficos ou todos eles.

21. Método, de acordo com a reivindicação 20, caracterizado pelo fato de que inúmeros traços de reflexão sísmica são registrados em inúmeros diferentes locais geográficos que cobrem uma seção da linha de perfil sísmico da Terra.

22. Método, de acordo com a reivindicação 20, caracterizado pelo fato de que inúmeros traços de reflexão sísmica são registrados em inúmeros diferentes locais geográficos que cobrem um volume da Terra.

23. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que compreende selecionar o dito intervalo temporal (t_1, t_2) do dito traço dos dados de reflexão sísmica ($5t$), produzindo uma série de intervalo de tempo dos dados de reflexão sísmica ($5ts$) para a qual uma espessura (d) de uma camada (L) no dito intervalo temporal deve ser determinada com base na determinação manual do dito intervalo temporal (t_1, t_2) a partir das reflexões aparentes no dito traço dos dados de reflexão sísmica ($5t$).

24. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que compreende selecionar o dito intervalo temporal (t_1, t_2) do dito traço dos dados de reflexão sísmica ($5t$), produzindo uma série de intervalo de tempo dos dados de reflexão sísmica ($5ts$) para a qual uma espessura (d) de uma camada (L) no dito intervalo temporal deve ser determinada, com base na interpolação ou na extrapolação de um intervalo temporal (t_{1n}, t_{2n}) correspondente que compreende reflexões relevantes em um ou mais traços vizinhos dos dados de reflexão sísmica ($5t_n$).

25. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que compreende ainda a etapa de produzir o espectro de pequena onda fonte pela medição de uma pequena onda de assinatura fonte no domínio de tempo e pela transformação da dita pequena onda de domínio de tempo fonte na pequena onda fonte do domínio de frequência por uma transformada de Fourier.

26. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que compreende ainda produzir o espectro de pequena onda fonte pela

transformação de um ou mais traços de reflexão sísmica no domínio de frequência, desse modo, produzindo uma pequena onda fonte.

27. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que o dito traço sísmico dos dados de domínio de tempo de reflexão (5t) é um traço registrado em um único sensor sísmico.

28. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que o dito traço sísmico dos dados de domínio de tempo de reflexão (5t) compreendem traços registrados em uma multiplicidade de sensores sísmicos e empilhados para formar o dito traço sísmico dos dados de domínio de tempo de reflexão (5t).

29. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que o dito intervalo temporal (t_1 , t_2) varia em uma área geográfica, a fim de captar uma fina camada da qual uma profundidade do topo até a base varia na área geográfica.

30. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que compreende ainda a etapa de geração de um modelo de impedância acústica com uma camada (L_m) com um contraste de impedância (Δz) e a dita espessura temporal (Δt) e de formação de uma função de refletividade modelo (L_{mt}) no tempo, introduz-se, no dito intervalo temporal (t_1 , t_2) outros contrastes de impedância e espessuras temporais empíricos para camadas à frente da dita camada (L_m) ou depois dela.

31. Mídia legível por computador, caracterizada pelo fato de que é adaptada para executar o método como definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 12.

Fig. 1a

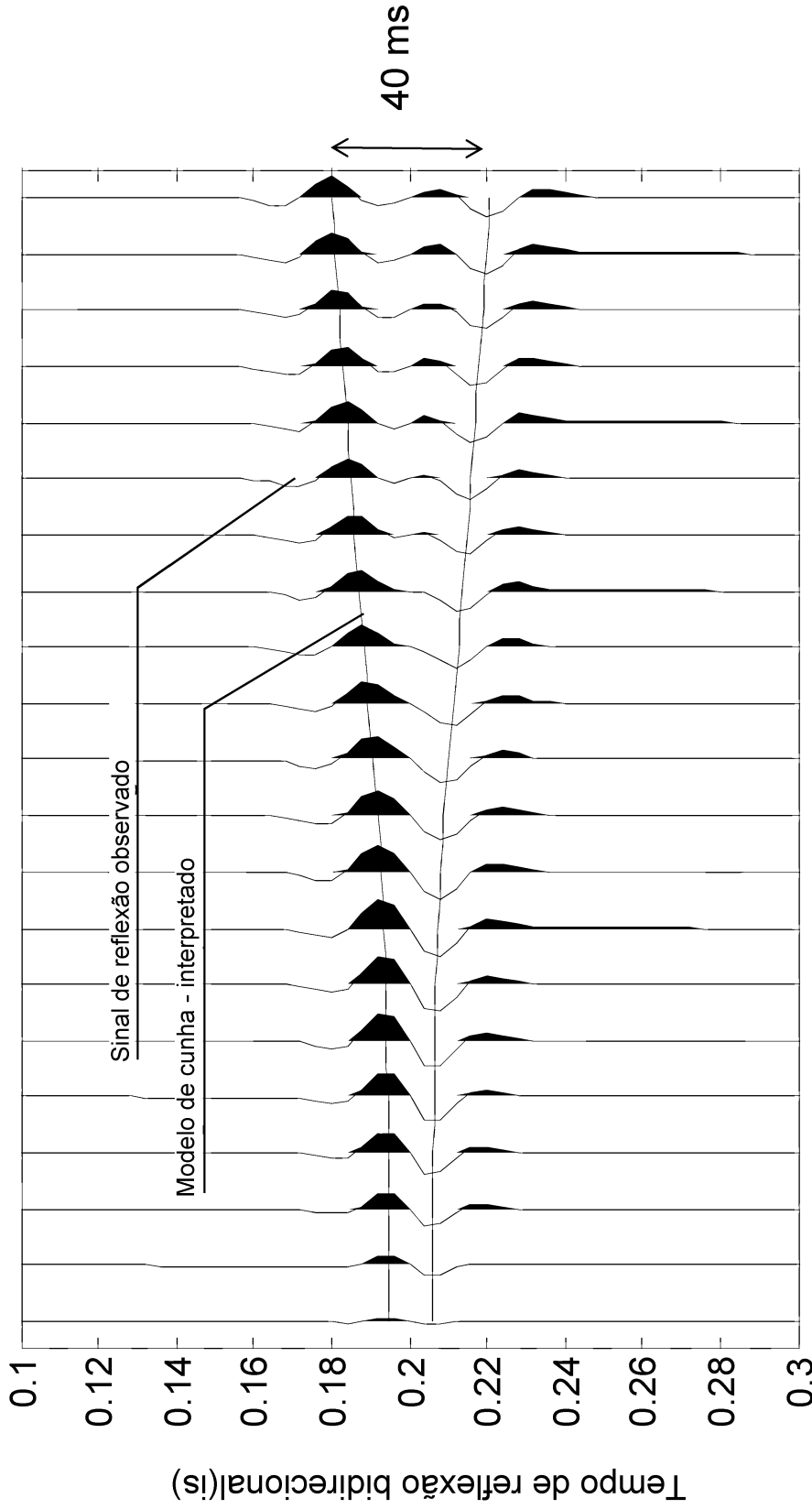
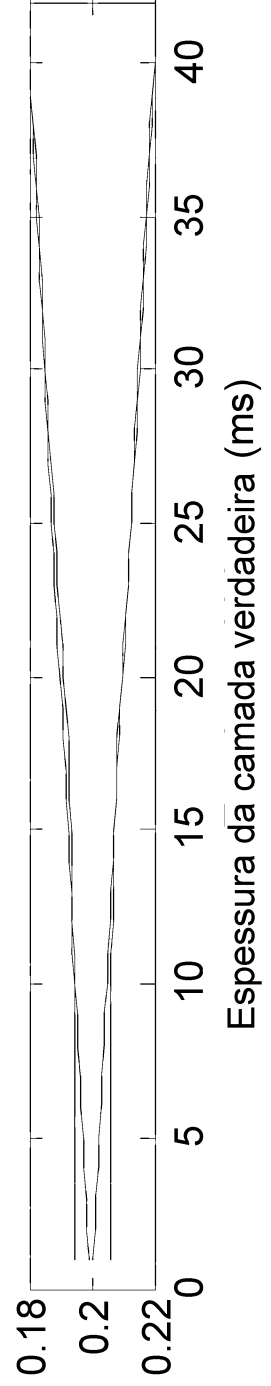


Fig. 1b



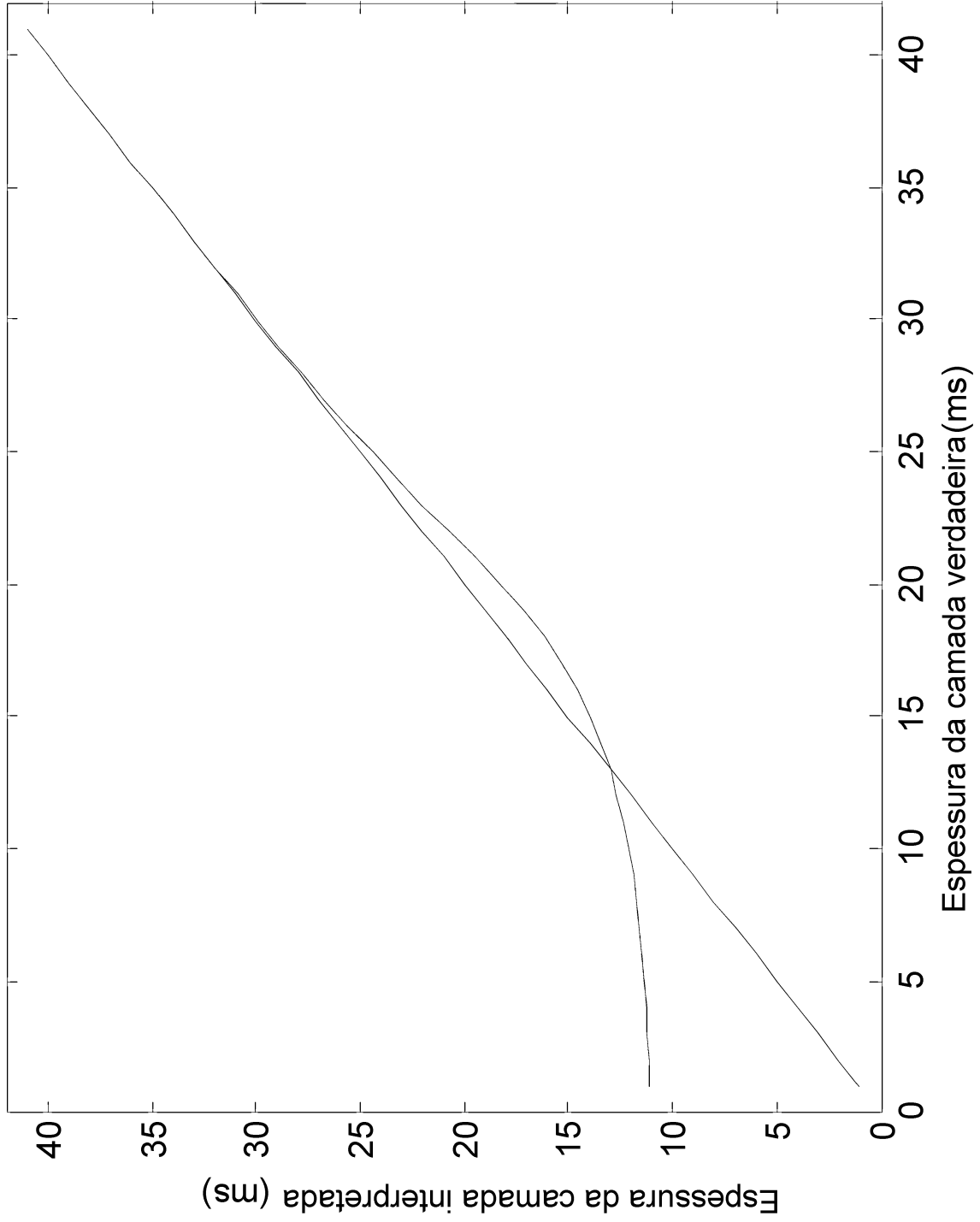


Fig. 2

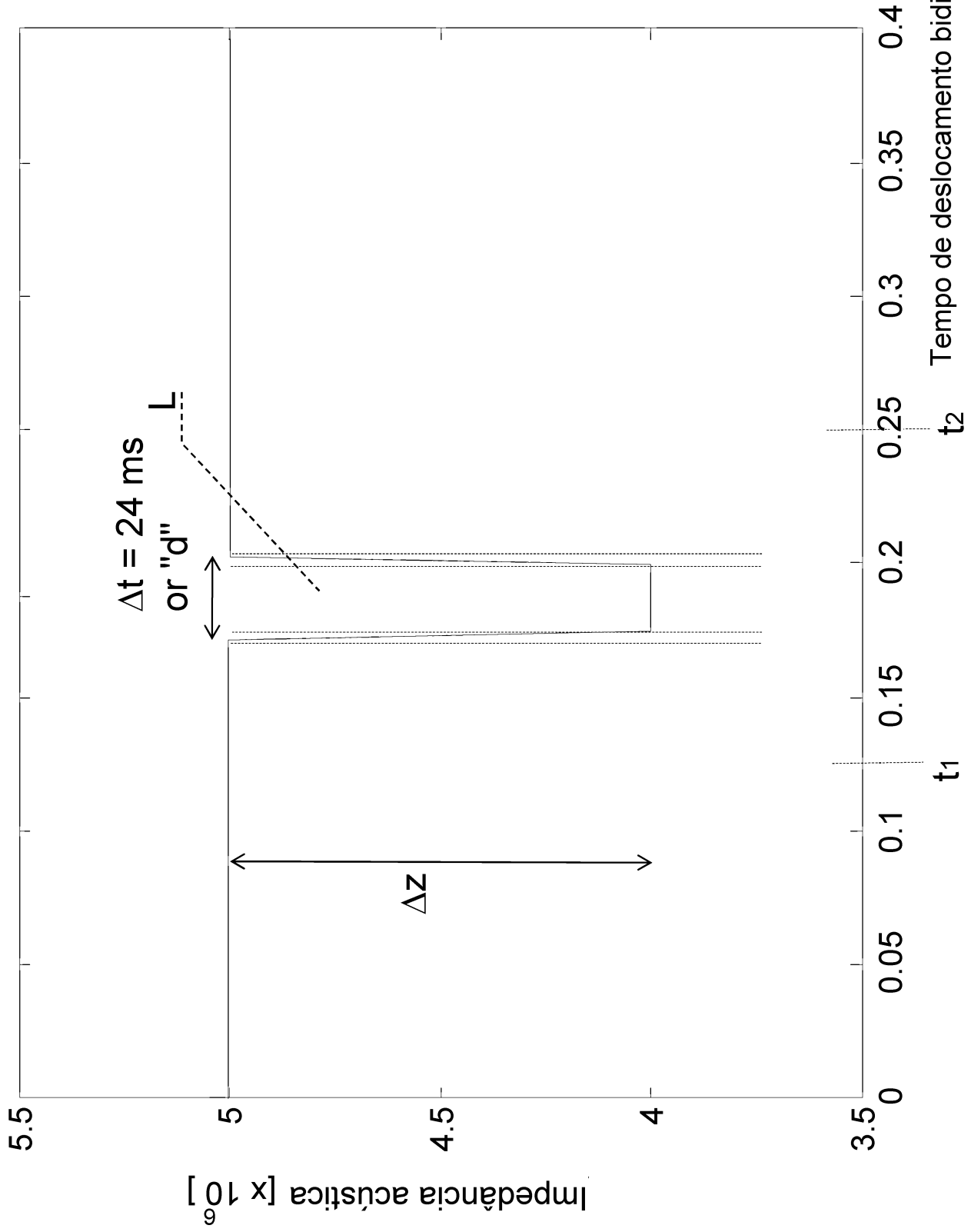


Fig. 3a

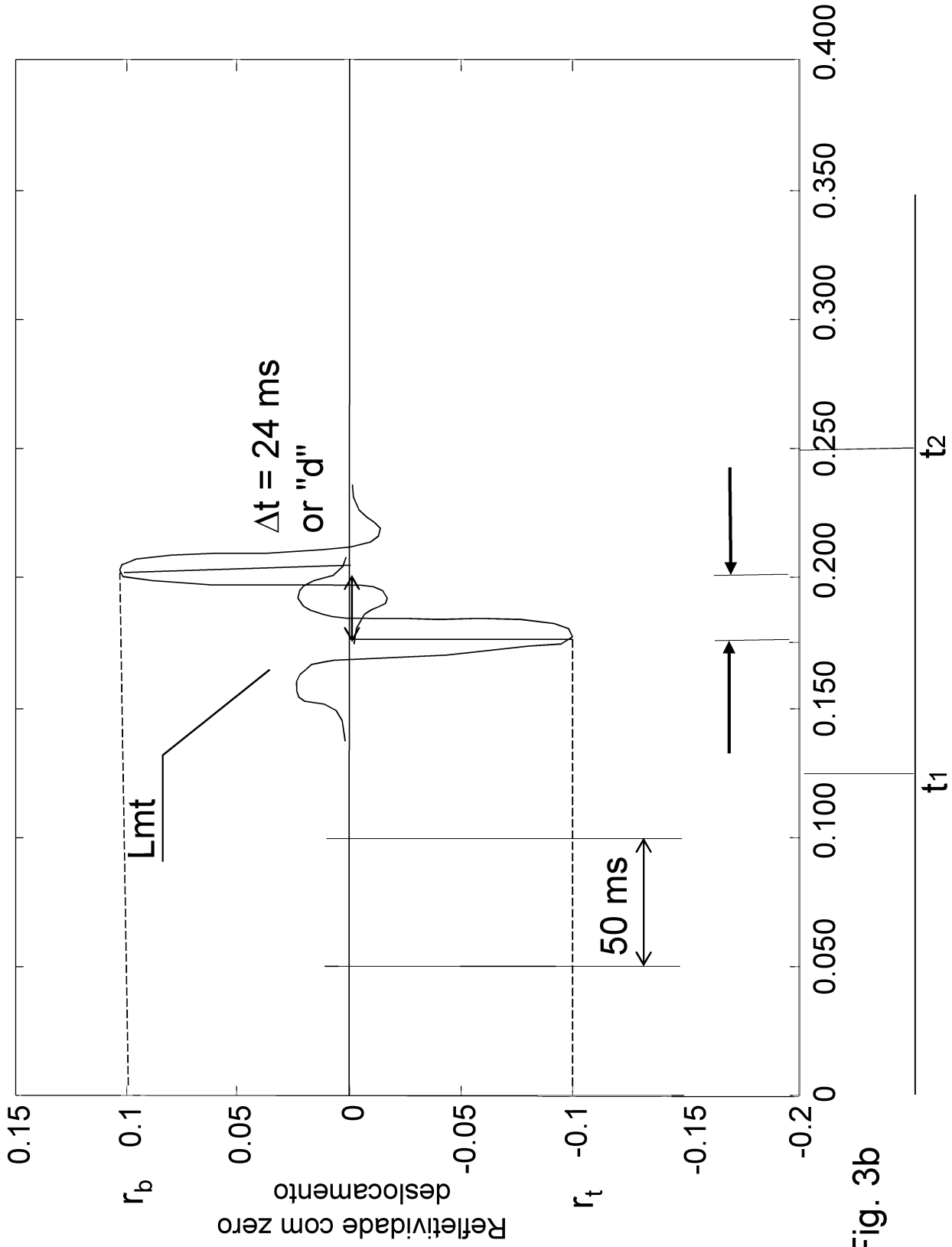


Fig. 3b

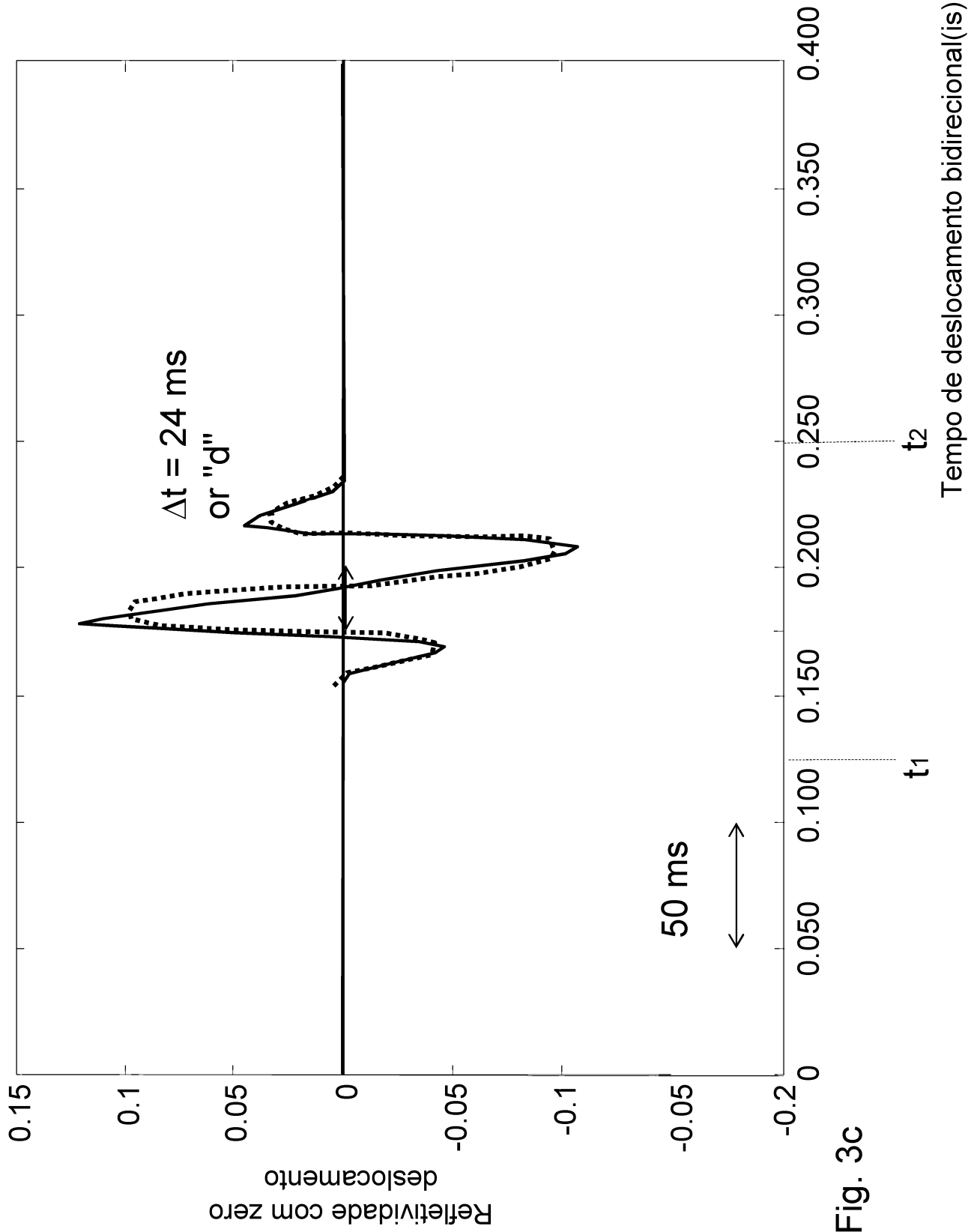


Fig. 3c

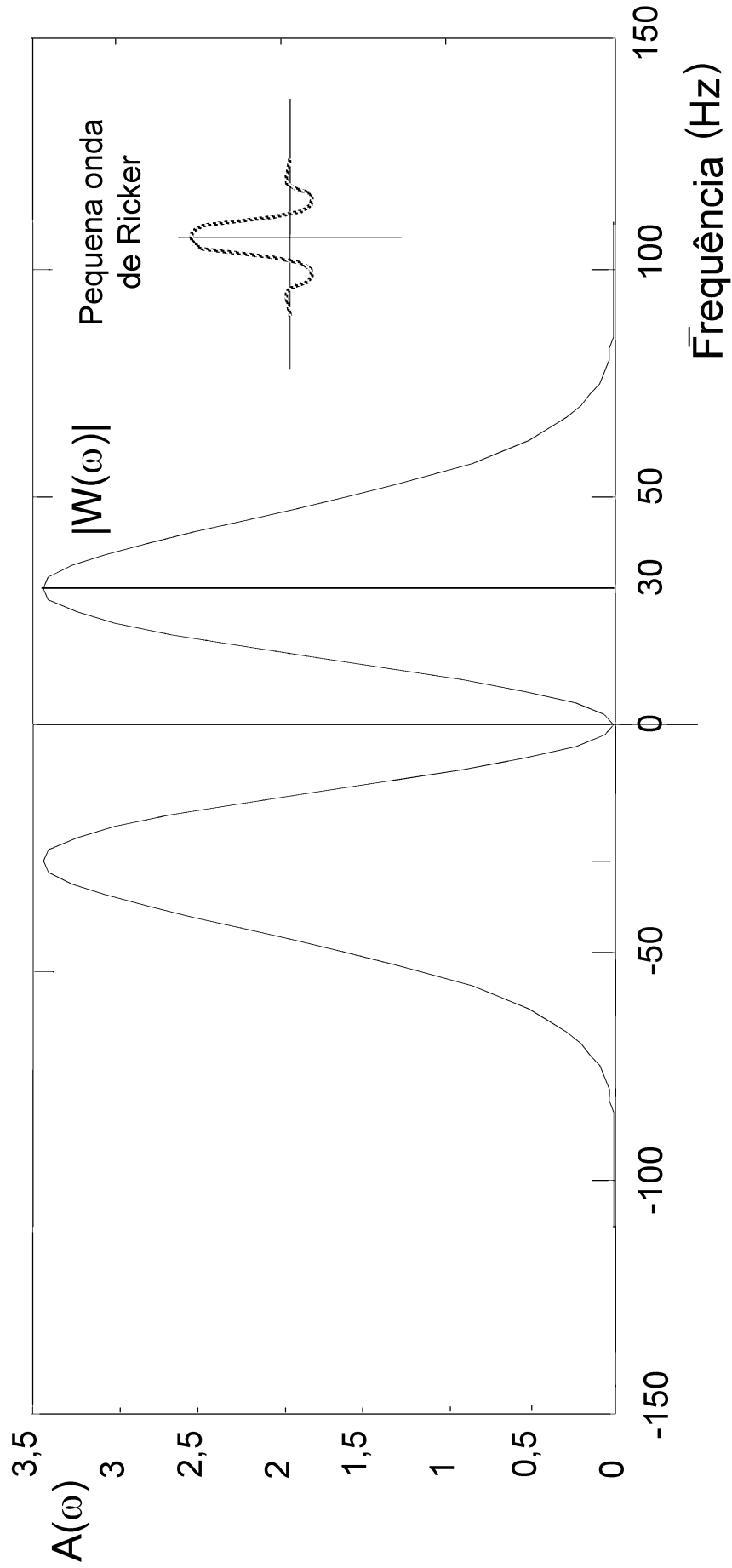


Fig. 3d

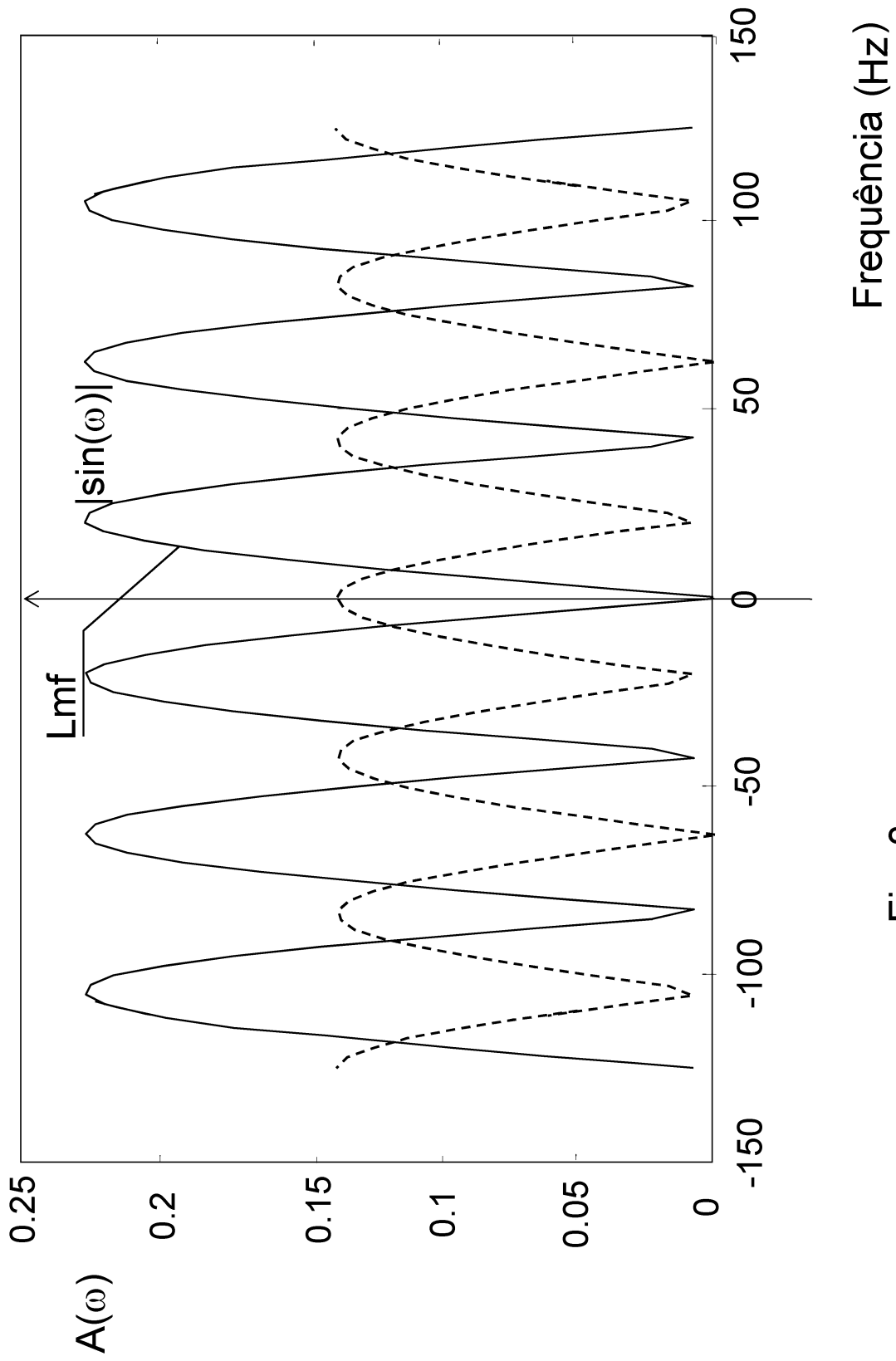


Fig. 3e

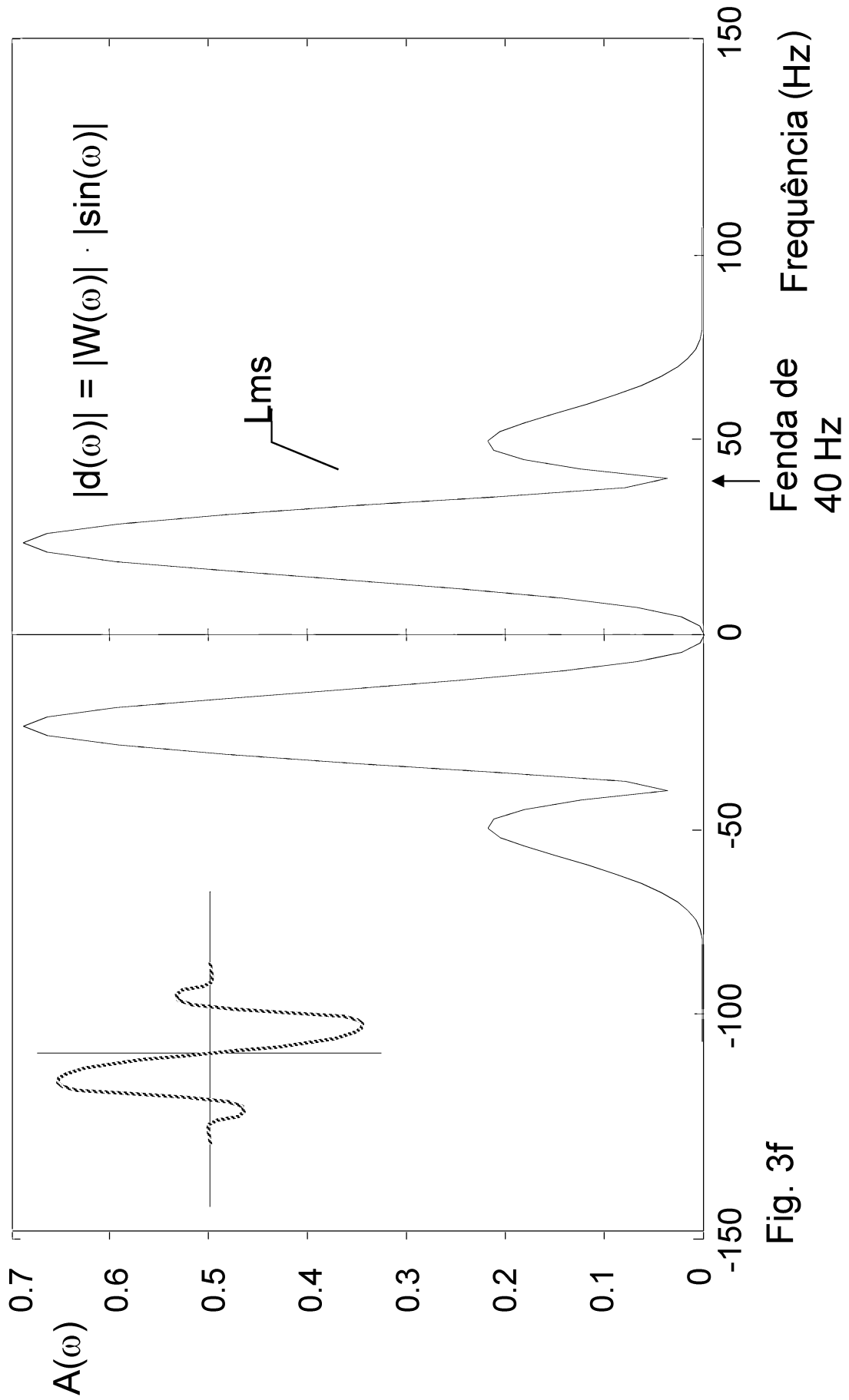


Fig. 3f

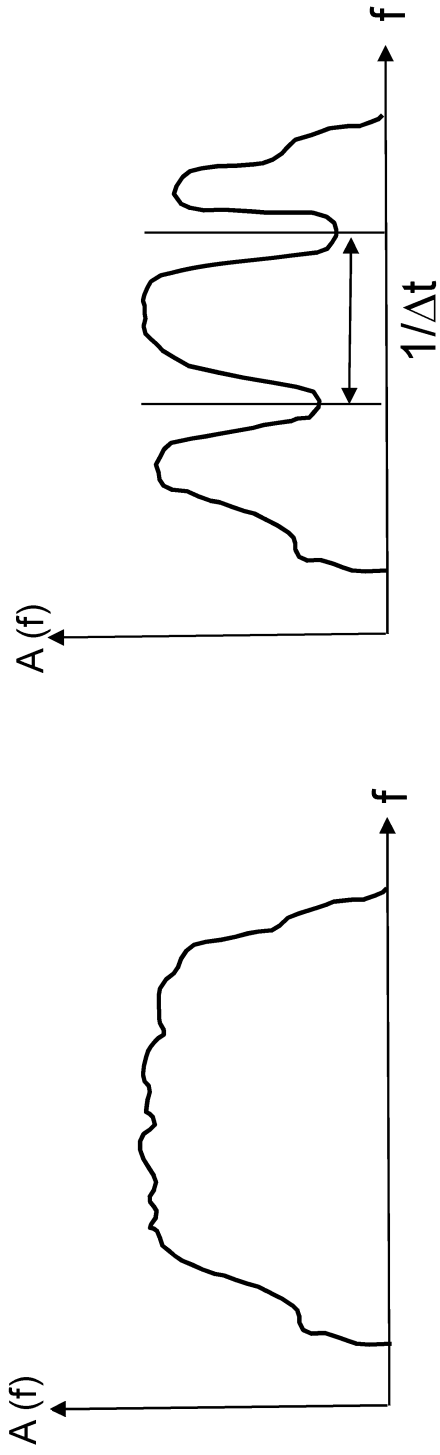


Fig. 3g (Tecnologia anterior)

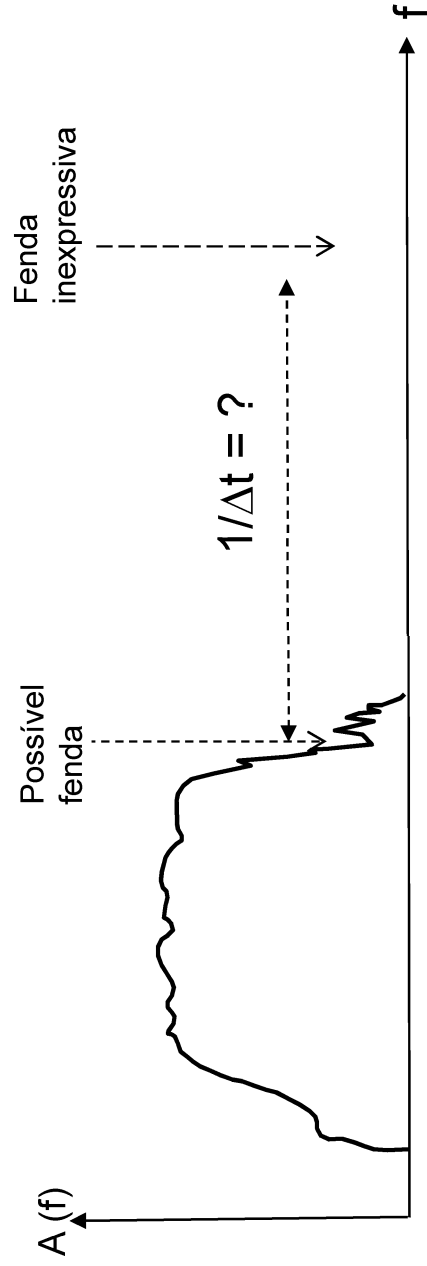


Fig. 3h

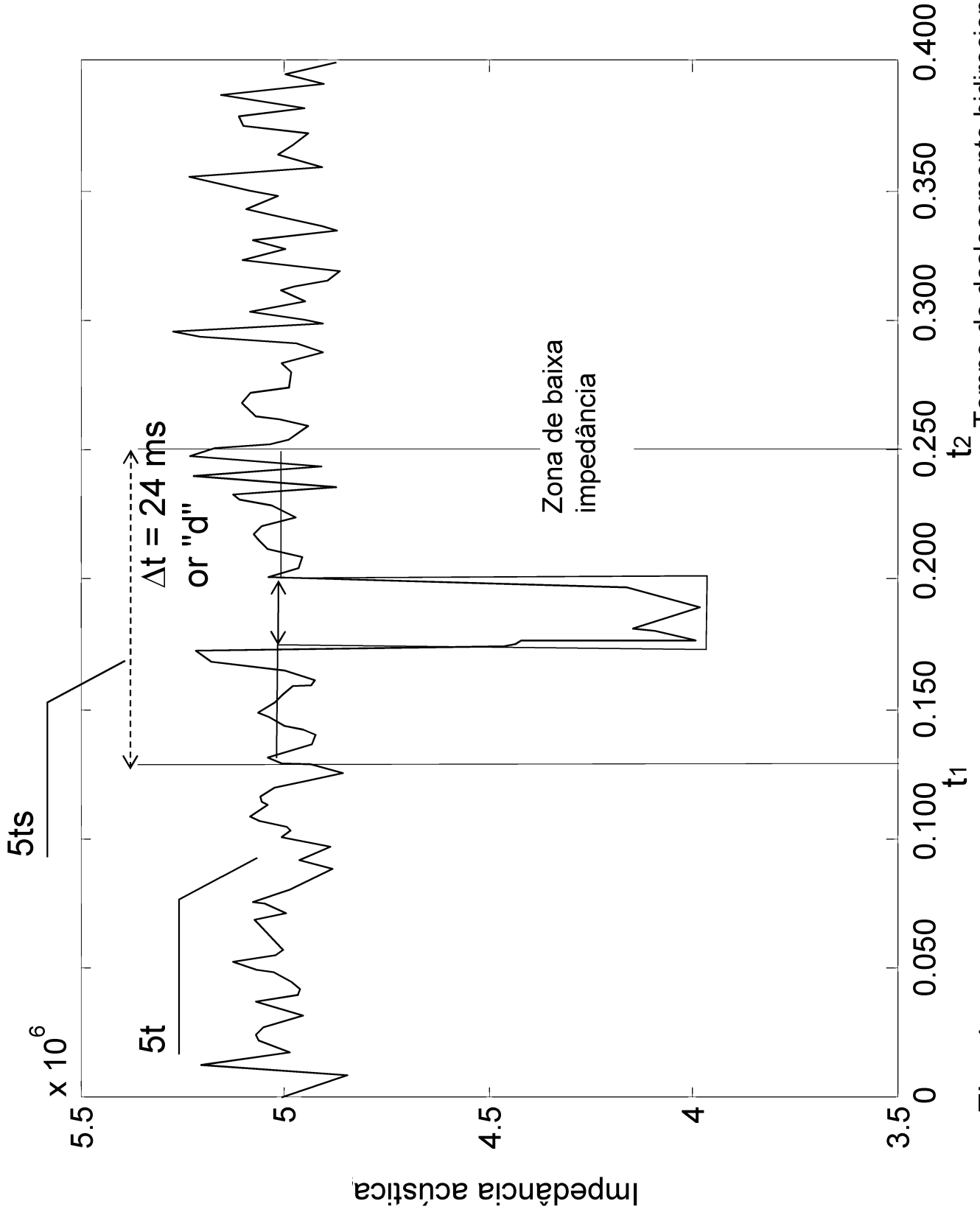


Fig. 4a

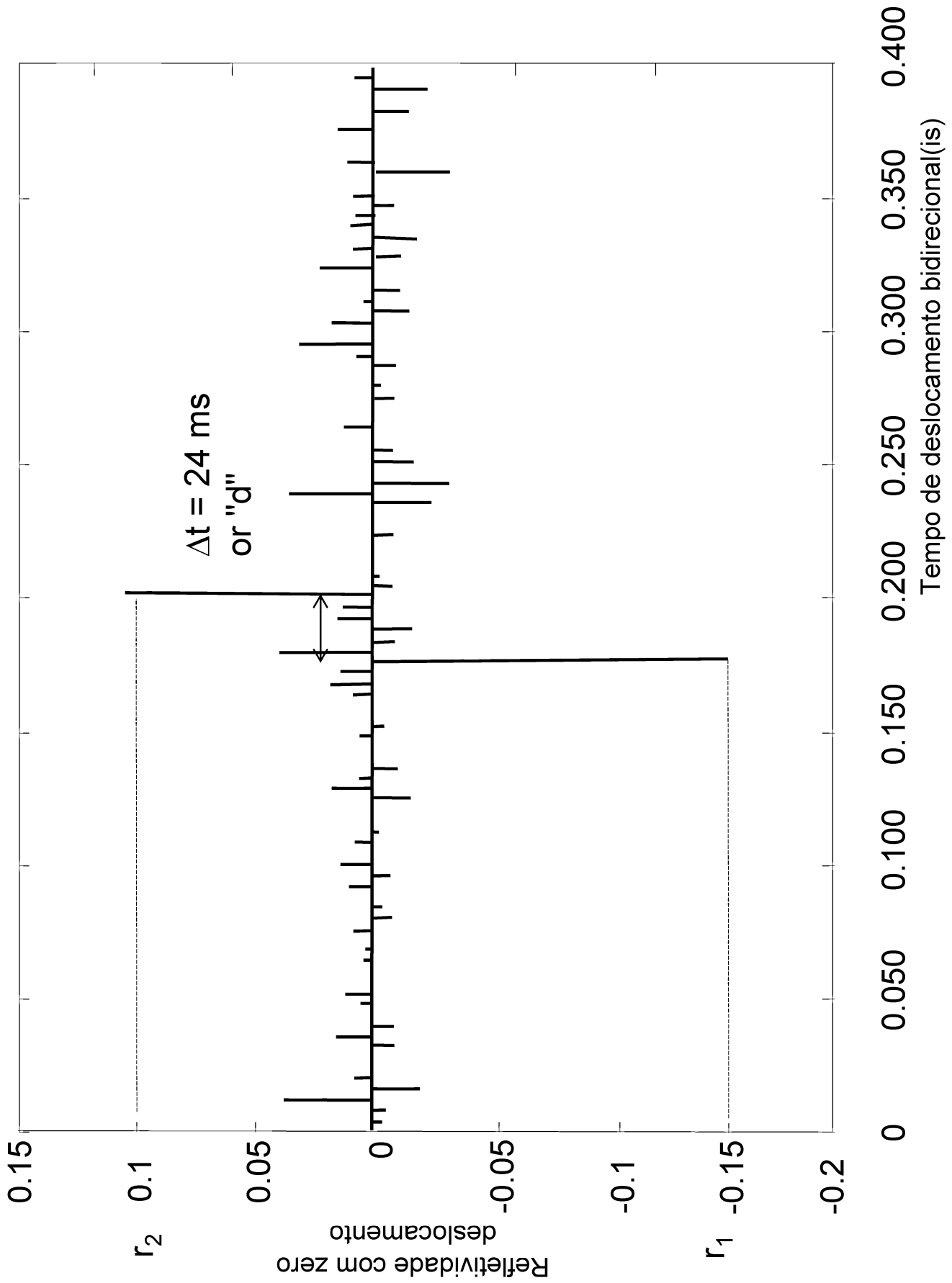


Fig. 4b

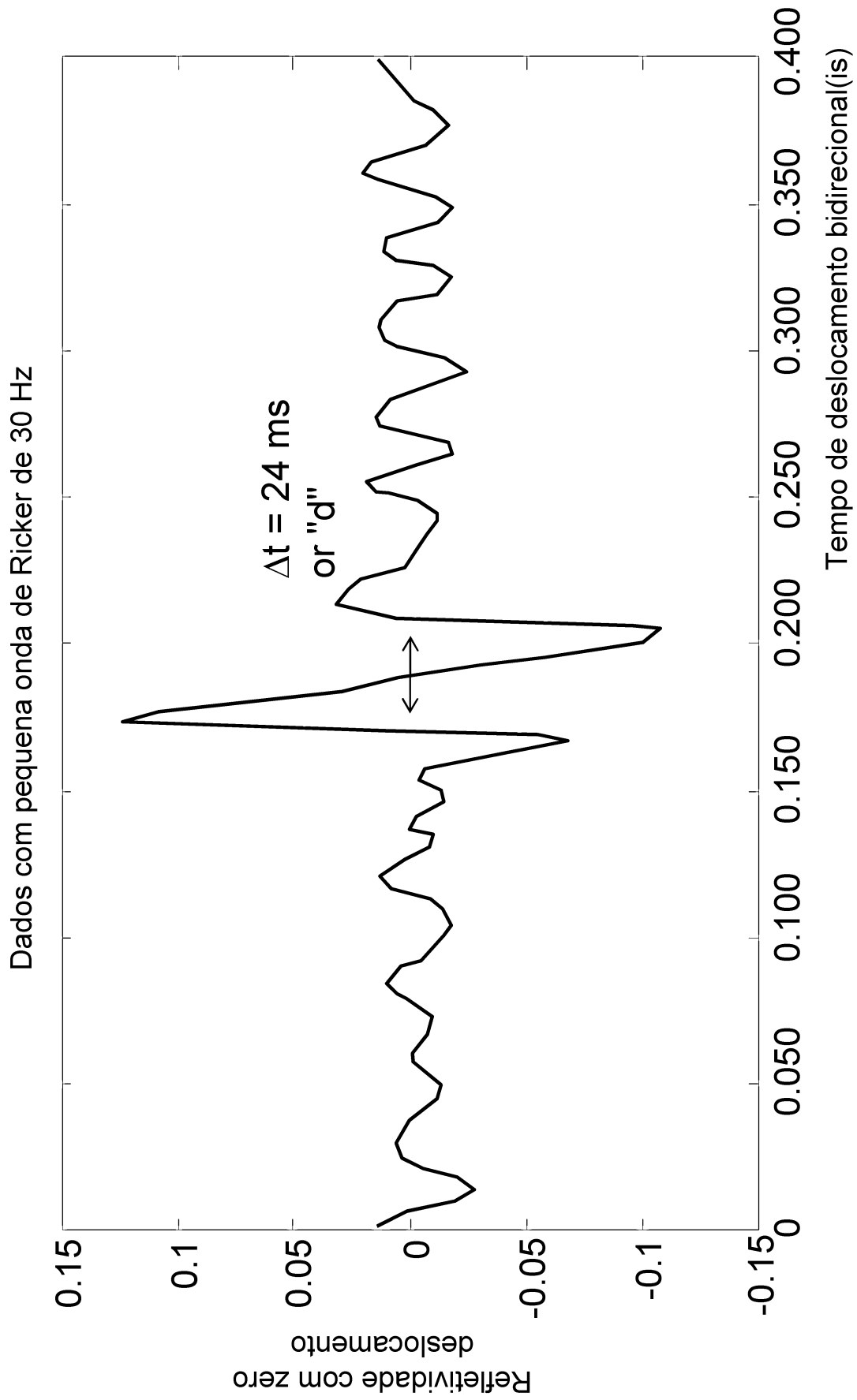


Fig. 4c

Pequena onda no espaço de Fourier

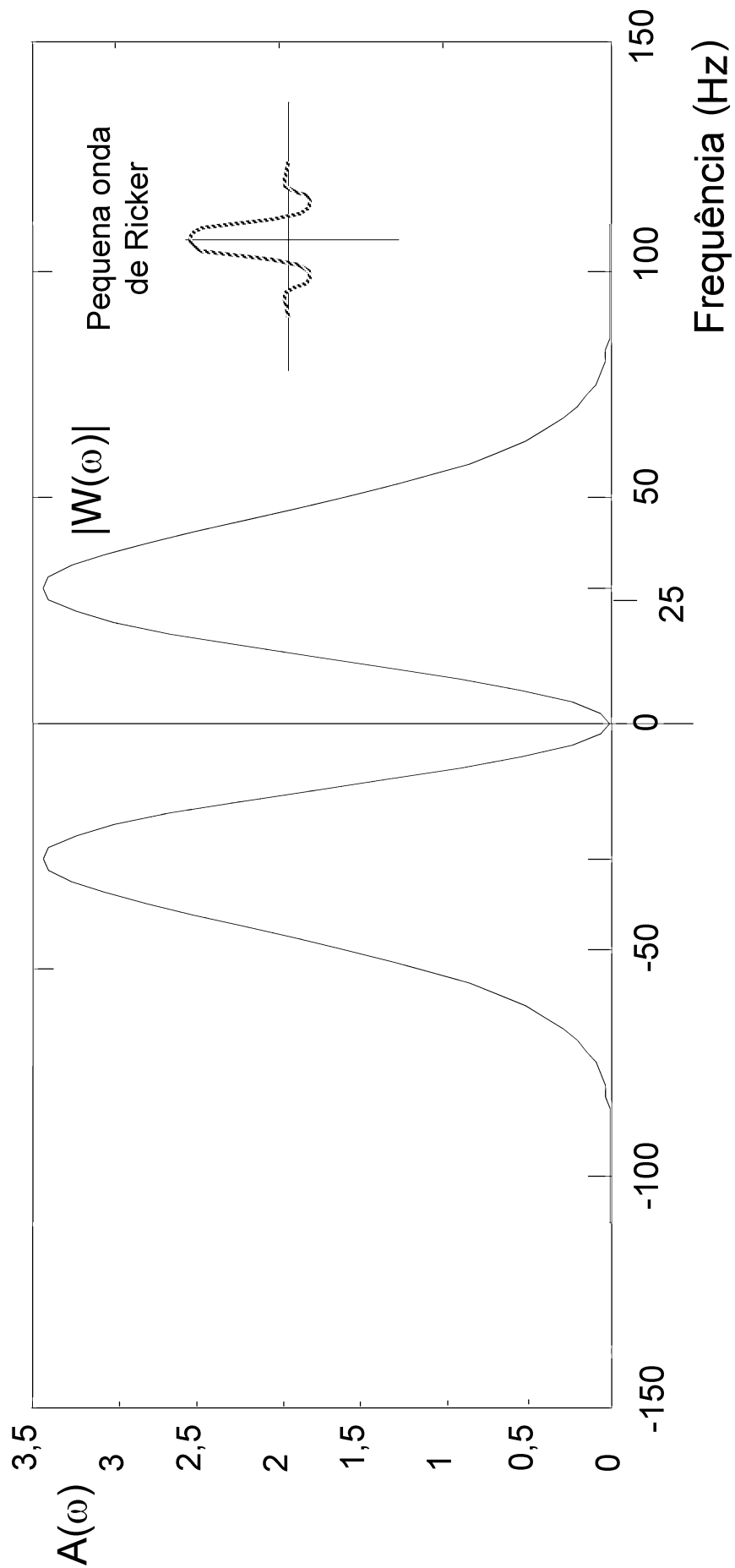


Fig. 4d

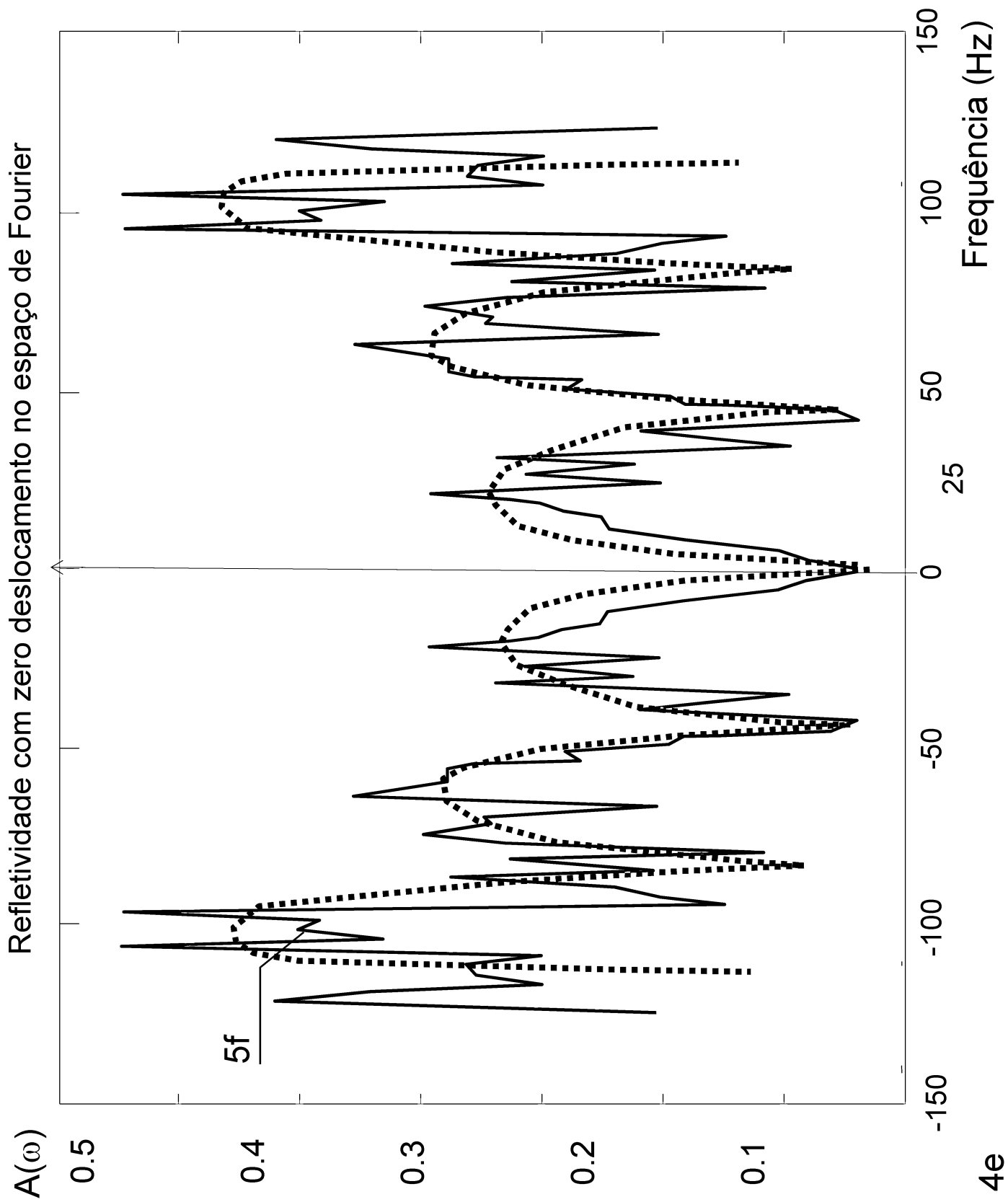


Fig. 4e

Dados no espaço Fourier

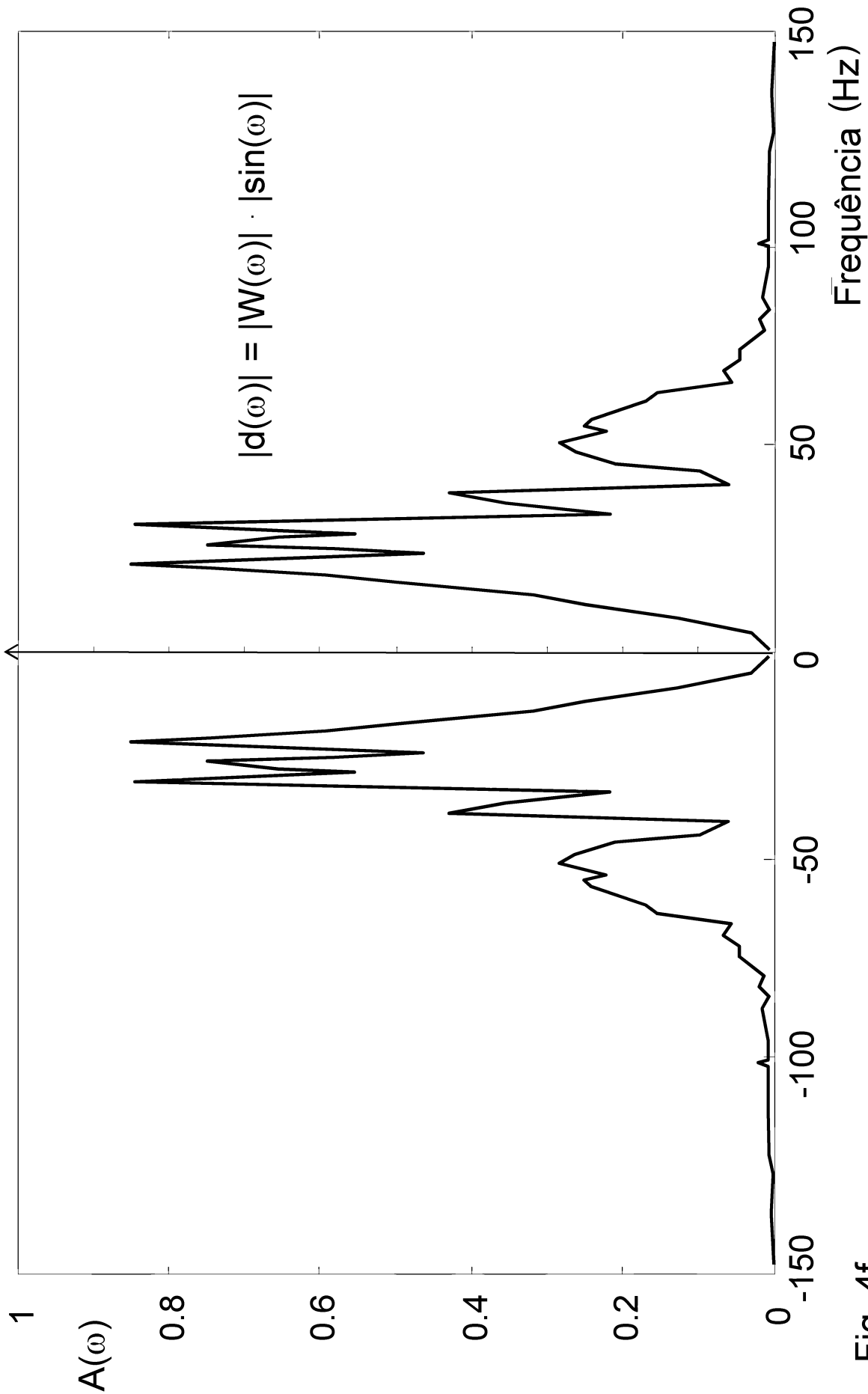


Fig. 4f

Correlação em função da espessura da zona de baixa impedância

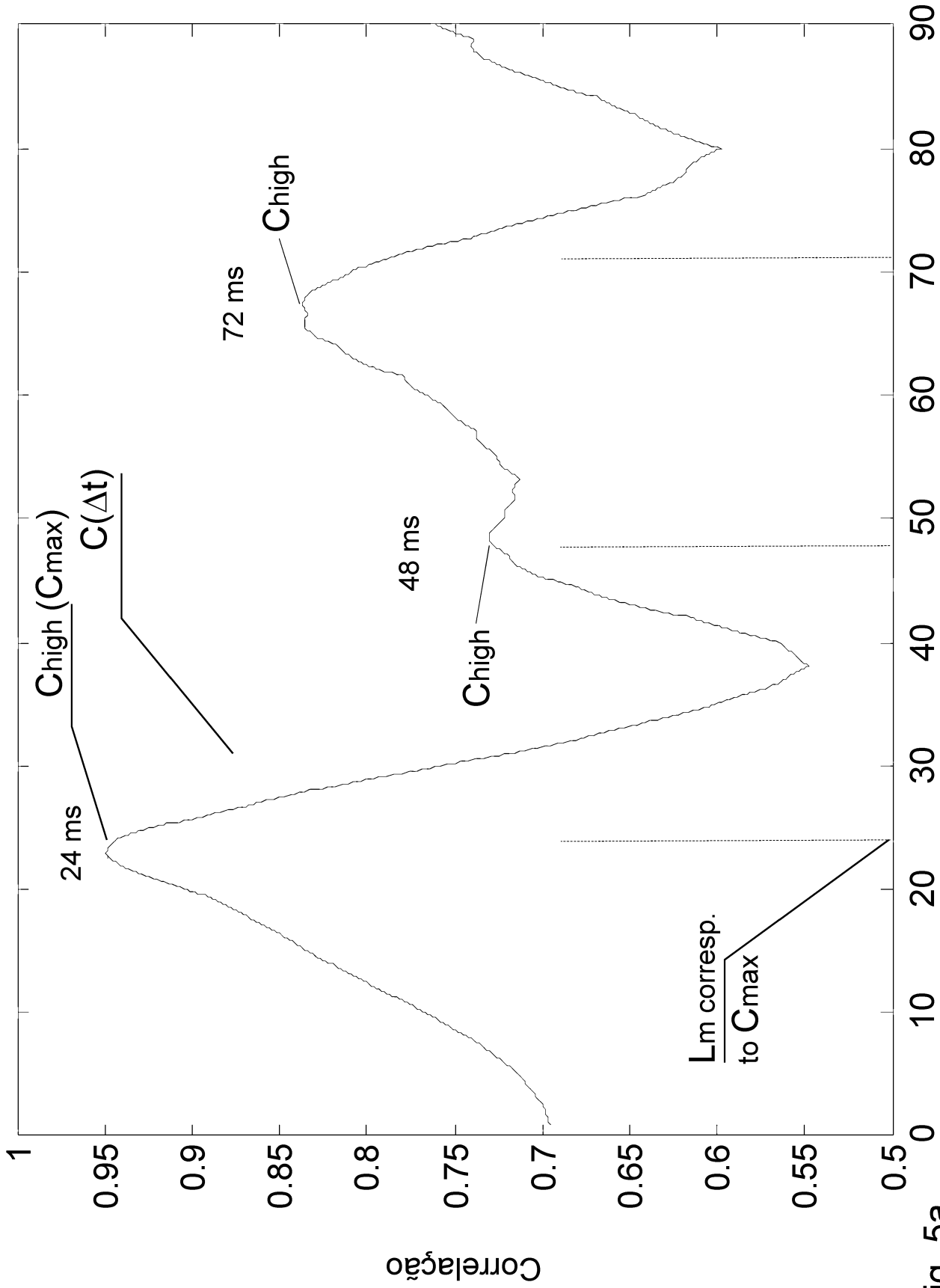


Fig. 5a Δt : Velocidade da espessura temporal no processo de correlação (ms)

Resultado da inversão e dados no espaço de Fourier

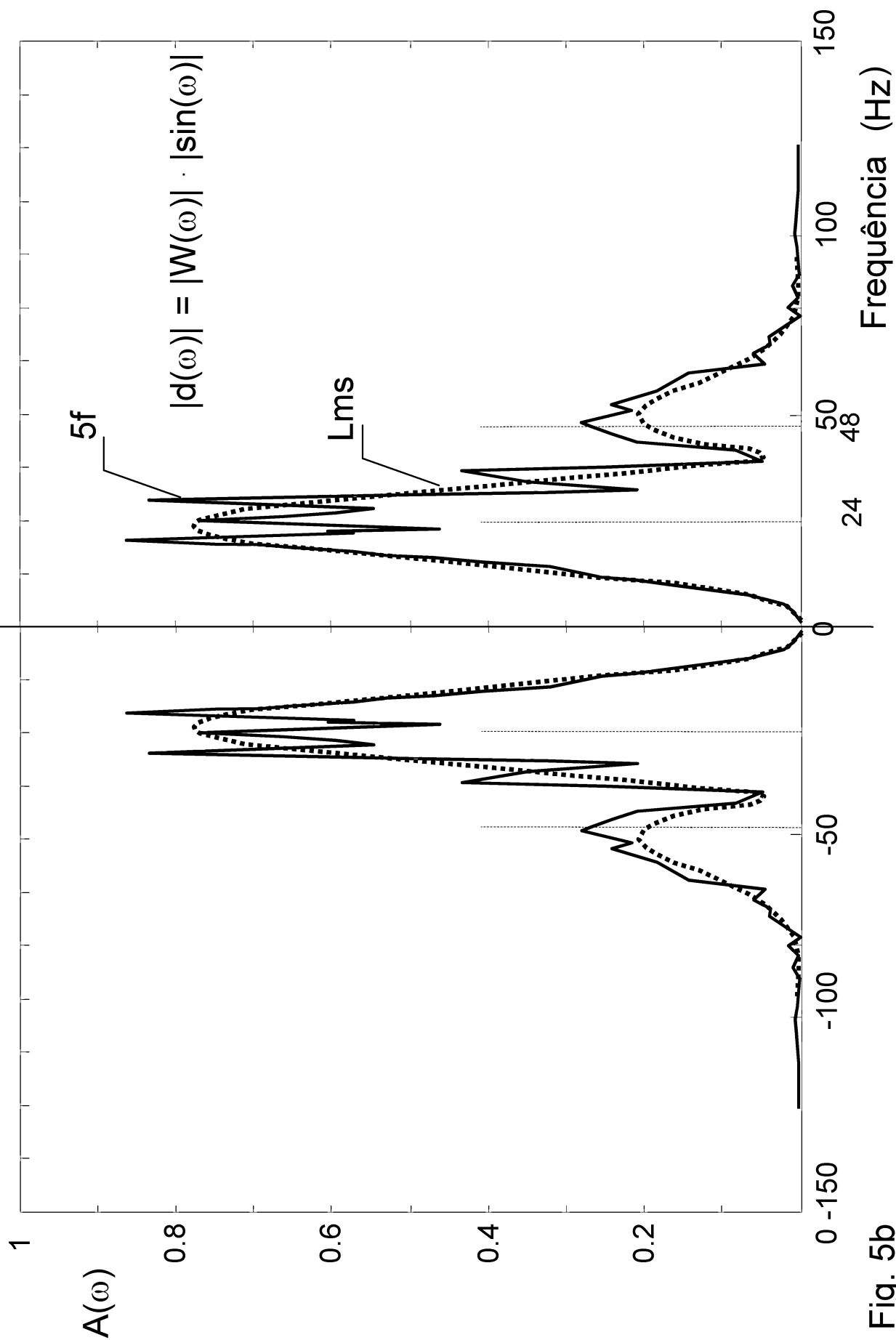


Fig. 5b

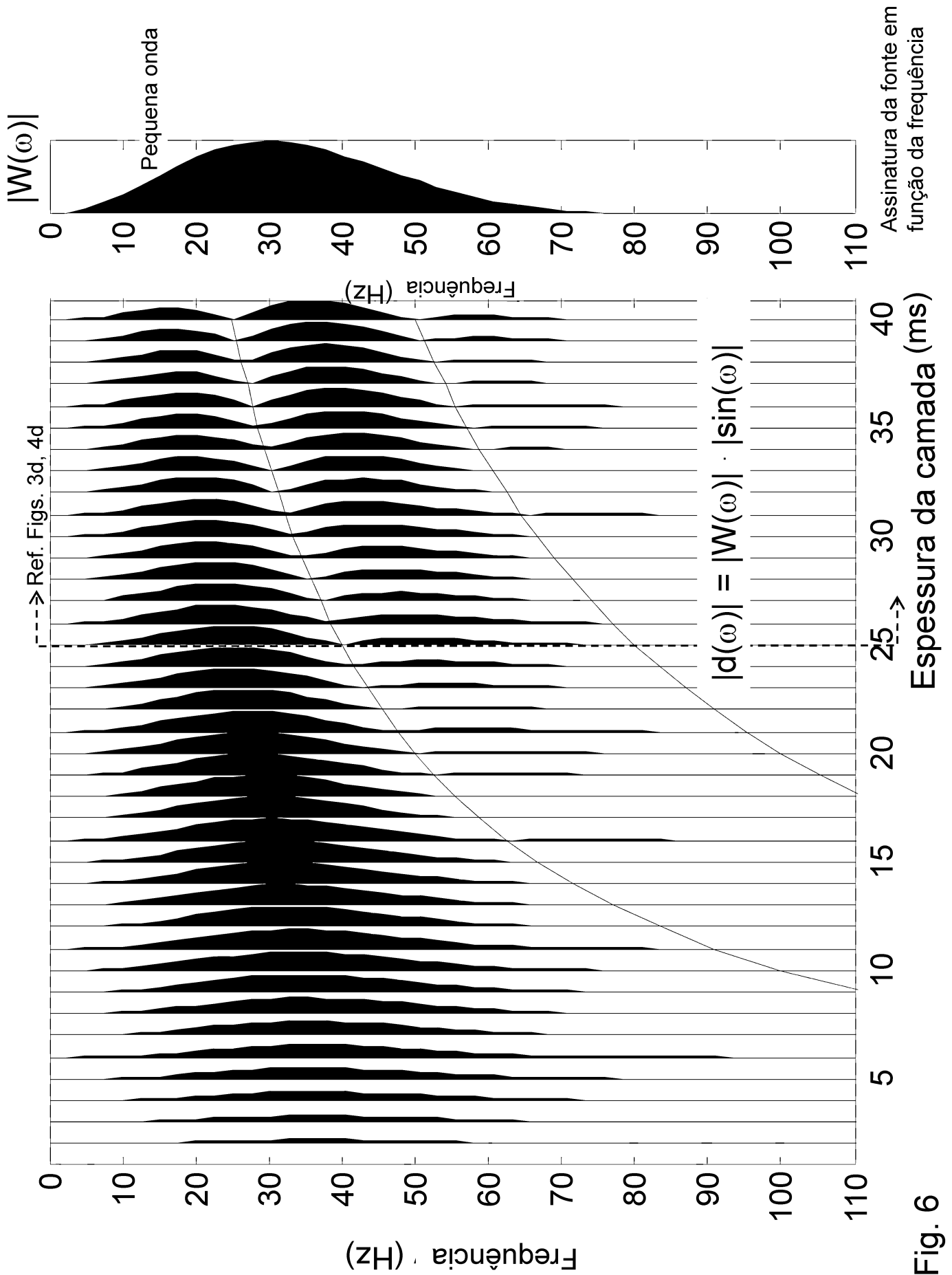


Fig. 6

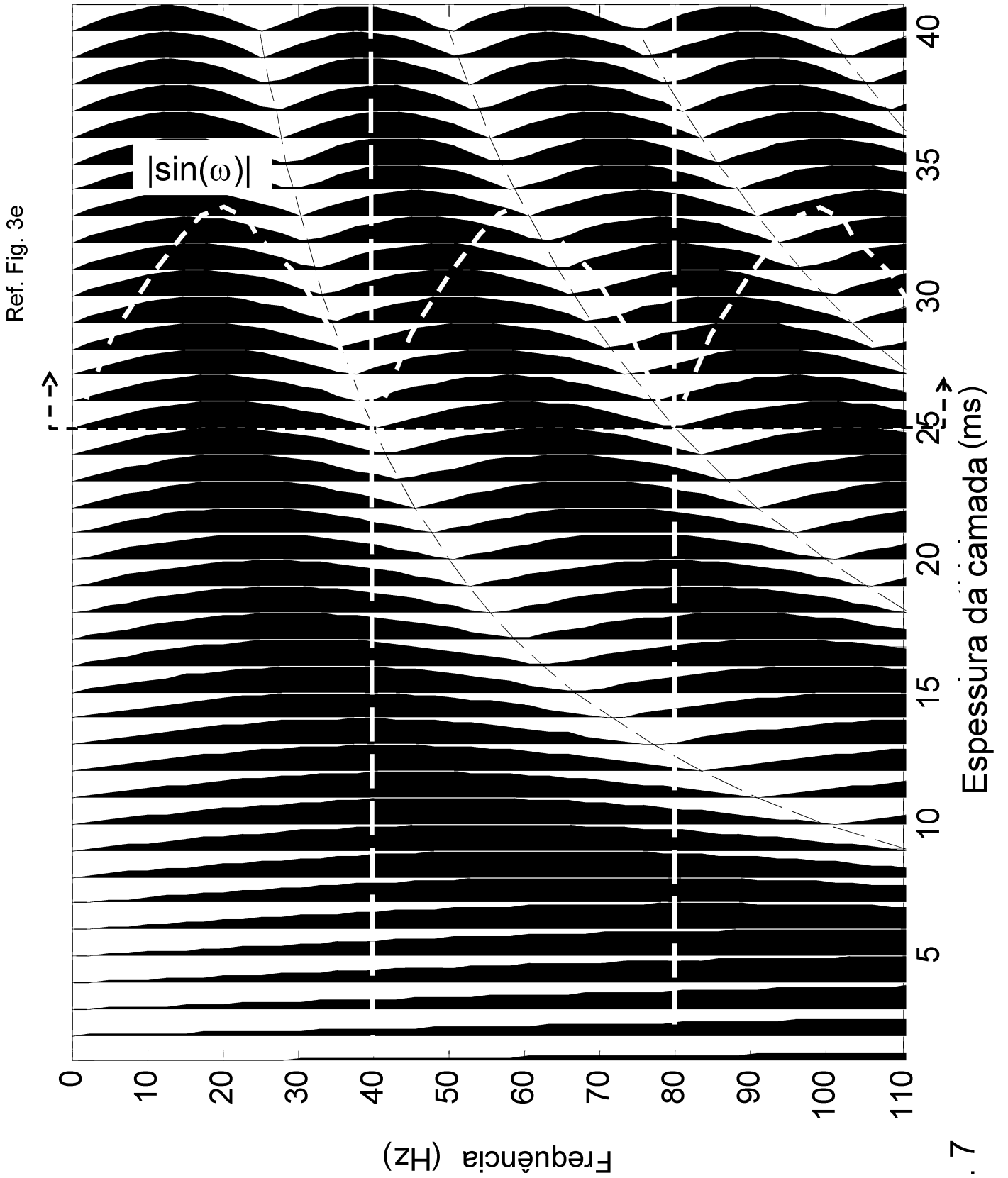


Fig. 7

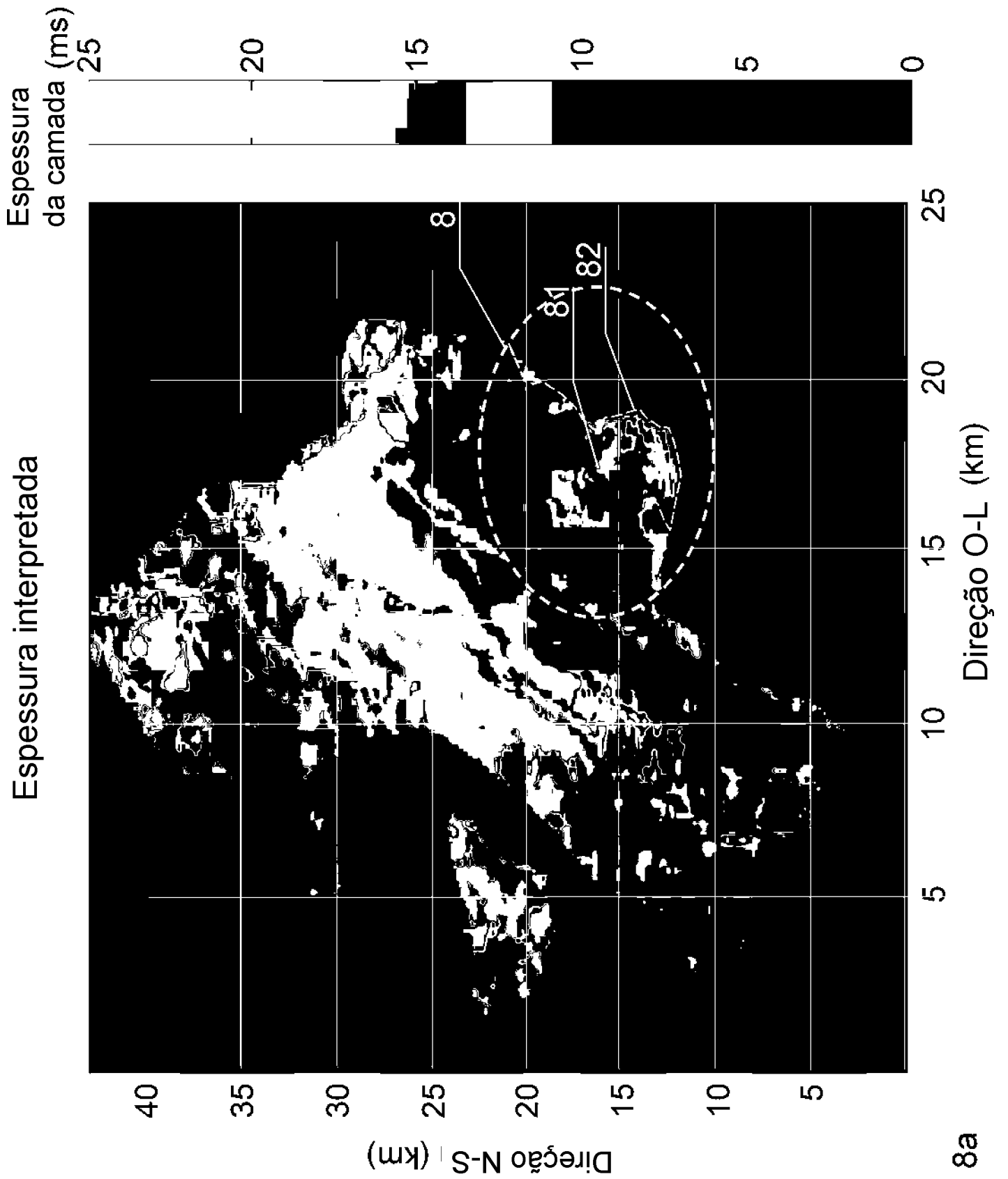


Fig. 8a

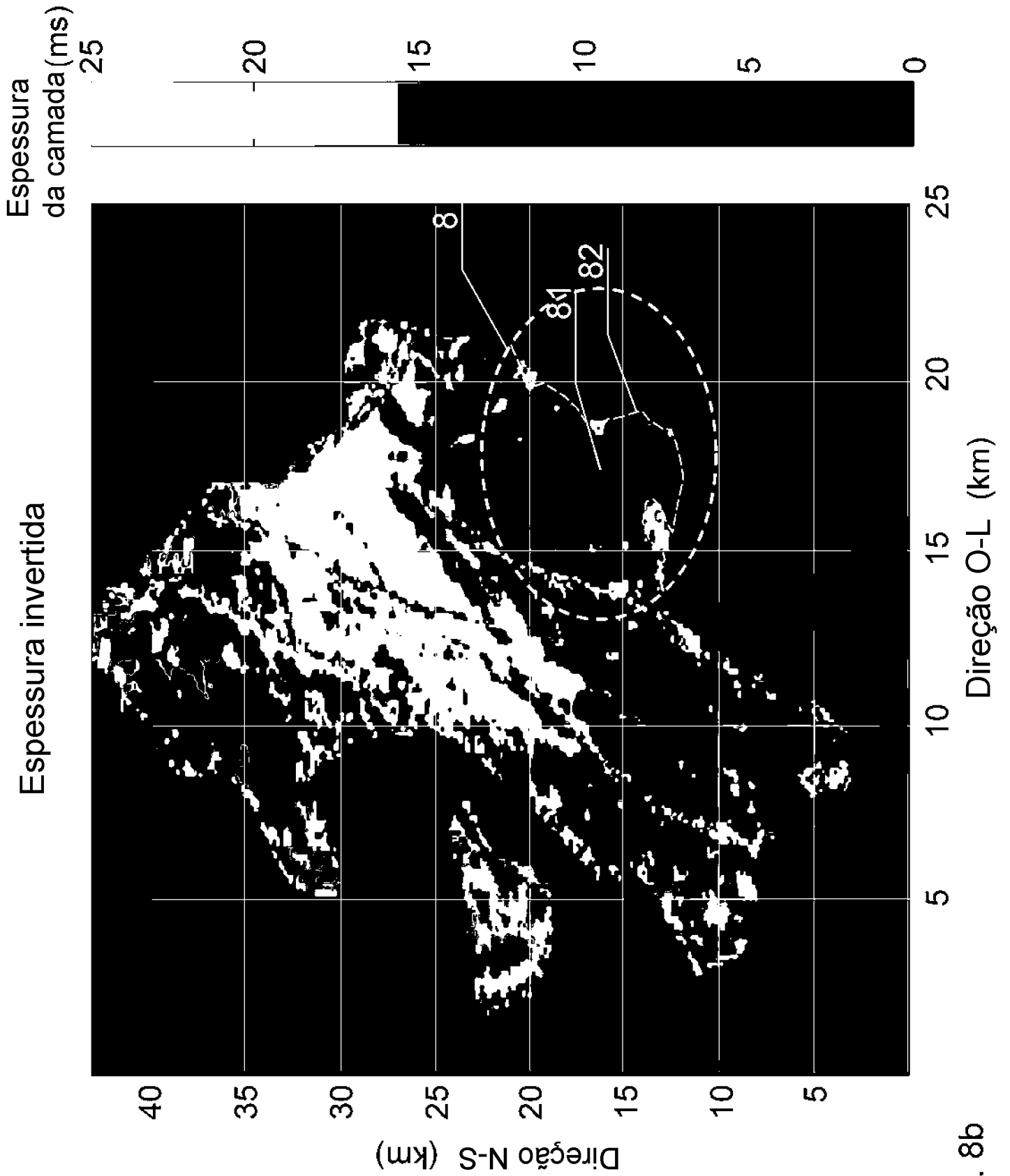


Fig. 8b

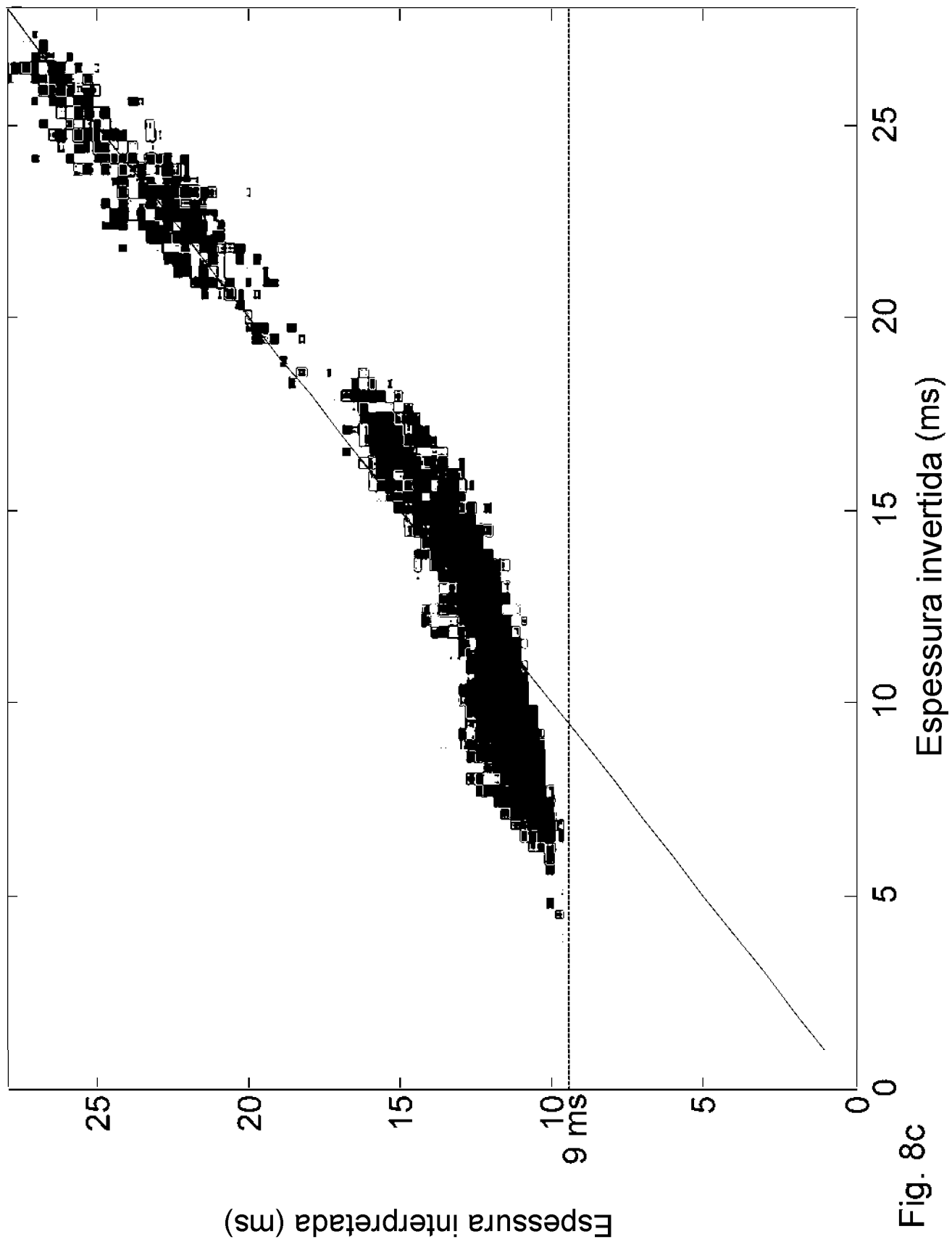


Fig. 8c