UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA

THAÍSA CABRAL NUNES DE MELO

IMPORTÂNCIA DO *DEGHOST* NO PROCESSAMENTO MARÍTIMO CONVENCIONAL

MONOGRAFIA

CURSO DE GRAGUAÇÃO EM GEOFÍSICA

Niterói, RJ
2020

THAÍSA CABRAL NUNES DE MELO

IMPORTÂNCIA DO *DEGHOST* NO PROCESSAMENTO MARÍTIMO CONVENCIONAL

Monografia apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Curso de Graduação em Geofísica para a obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientador
Prof. Marco Antonio Cetale Santos

Niterói, RJ
2020

THAÍSA CABRAL NUNES DE MELO

IMPORTÂNCIA DO *DEGHOST* NO PROCESSAMENTO MARÍTIMO CONVENCIONAL

Monografia apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Curso de Graduação em Geofísica para a obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Aprovada em 15/12/2020 pela banca examinadora abaixo:

_____

Prof. Marco Antonio Cetale Santos, DSc.

UFF / GGO

_____

Marília da Silva Ramos Carneiro, DSc.

UFF / GISIS

_____

Felipe Timóteo da Costa, DSc.
UFF / GISIS

Niterói, RJ
2020

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, em especial à minha mãe, por todo o incentivo e toda força que pode me dar em todas as etapas da minha vida. Mulher, você é meu maior exemplo. Ao meu pai, por toda a base e incentivo que tive nos meus estudos. Sem vocês eu certamente não chegaria onde cheguei. Ao meu irmão, por sempre ser minha maior inspiração. Tenho muito orgulho de você e de todas as suas conquistas. Por vocês eu sinto o maior amor que esse mundo já viu.

Ao meu padrasto, muito obrigada por todo o carinho e por acreditar que eu seria capaz de alcançar tudo o que alcancei. Agradeço ao meu doguinho Bartholomeu, por ouvir minhas reclamações e por seu olhar atencioso. Tenho certeza que me entendia.

Agradeço ao meu namorado, pelo apoio e pela credibilidade em mim. Você conseguiu deixar a minha vida mais leve e melhor quando eu estava para baixo e quando eu mesma não acreditava em mim. Obrigada por ser você e por todo cuidado que tem comigo.

As minhas amigas e amigos, por toda a paciência e por sempre estarem presentes quando eu precisava de um refúgio. Amanda Schimidt, Vinicius Ribeiro, Felippe Guedes, Filipe Mota, Luana Albuquerque, Carol Carvalho, Bruna Beatriz e Marina Oliveira, eu amo vocês imensamente. Para as mulheres que me inspiram diáriamente, Tassia, Norrany, Bianca e Bia, muito obrigada por todo o carinho e por todas as palavras de apoio.

Aos meus amigos da UFF, meus tralhas em latim e VBB, muito obrigada pela amizade, por todo o suporte e todas as opiniões quanto a melhoria do meu TCC. Obrigada pelas boas risadas e por todo ranço compartilhado. Em especial, meu muitissimo obrigada à minha panela querida, Natacha Oliveira, Hellen Rosa, Peruano e Rominho. Sem vocês eu não sei o que seria de mim nessa graduação. Eu amo vocês demais.

Um agradecimento muito especial ao Douglas Silva, meu colega de trabalho, que teve muita paciência em me ajudar em absolutamente tudo no meu TCC. Obrigada por

disponibilizar seu tempo e por todo o suporte. Tenho um carinho e uma admiração muito grande por você e seu trabalho.

Agradeço à Thabata e à Renata por me acalmarem com boas palavras em meio ao trabalho. Agradeço muito ao meu chefe Valter Marques por ter ocupado seu tempo me auxiliando. Obrigada por toda paciência e por ter me explicado tantas coisas em meio a sua correria. Um dia quero ser como você.

Ao meu orientador Marco Cetale, obrigada pelo carinho e confiança. Obrigada por todo o ensinamento e inspiração que levarei para a minha vida. Obrigada ao meu orientador André Wiermann, por todo o aprendizado e por me acolher totalmente crua no meio acadêmico. Minha iniciação científica foi muito importante para o meu crescimento.

Finalmente agradeço a ION Geophysical pela permissão de uso dos dados e do software. Foi muito grandioso pro meu aprendizado poder utilizar toda a ferramenta disponibilizada por vocês.

RESUMO

Nas últimas décadas, o método sísmico tem sido muito empregado na prospecção de óleo e gás com o objetivo de estudar e caracterizar rochas e estruturas em subsuperfície. A sísmica de reflexão consiste, principalmente, em três etapas, sendo elas aquisição, processamento e interpretação. Sendo assim, este estudo tem ênfase no processamento sísmico cujo intuito é melhorar o imageamento das estruturas geológicas, apurando toda a informação útil proveniente da aquisição sísmica e removendo os diversos fatores que influenciam negativamente nos resultados. Esta monografia consiste em apresentar a importância da atenuação de um desses fatores negativos, conhecido como *Ghost,* que interfere no sinal primário, levando a *notches* de frequência que, por sua vez, diminuem a resolução do dado. Demonstrou-se a funcionalidade de um operador derivado a partir do filtro de Wiener, bem como resultados a partir de um operador aplicado pela indústria, chamado de Wiband. O desenvolvimento do trabalho ocorreu através dos dados disponibilizados pela empresa ION Geophysical, onde os resultados foram apresentados no domínio do tiro (*shot*), do canal (*near, mid, far*), *stack*, bem como seus espectros de amplitude, FX e FK. A partir da análise de ambos os operadores, foi possível observar ganho de conteúdo de baixa e alta frequência e ganho da resolução dos dados sísmicos, havendo consequentemente uma representação de melhor qualidade das imagens geológicas em subsuperfície. Notou-se também uma maior eficácia pelo operador Wiband, pois este considera a variação angular, e um maior conteúdo de ruídos levantados pelo operador derivado.

Palavras-chave: Sísmica de reflexão, processamento *sísmico*, ghost.

ABSTRACT

In recent decades, the seismic method has been widely used in oil and gas prospecting in order to study and characterize rocks and subsurface structures. The seismic reflection method consists mainly in three stages, which are acquisition, processing and interpretation. Thus, this study has emphasis on seismic processing whose purpose is to improve the image of geological structures, investigating all useful information from seismic acquisition and removing the various factors that negatively influence the results. This monograph consists of presenting the importance of attenuating one of these negative factors, known as Ghost, which interferes with the primary signal, leading to frequency notches that decreases the seismic data resolution. The functionality of an operator derived from the Wiener filter was demonstrated, as well as results from an operator applied by the industry, called Wiband. The development of the work occurred through the data provided by the ION Geophysical, where the results were presented in the shot and channel (near, mid, far) domains, stack, as well as amplitude, FX and FK spectra. From the analysis of both operators, it was possible to observe a gain in low and high frequency content and a gain in the resolution of seismic data, with consequently a better quality representation of geological images in the subsurface. It was also noted a greater efficiency by the operator Wiband, as it considers the angular variation, and a greater content of noises raised by the derived operator.

Keywords: *Seismic reflection*, *seismic processing*, *ghost*.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO 10

CAPÍTULO 2: ÁREA DE ESTUDO 12

CAPÍTULO 3: MÉTODO SÍSMICO 14

3.1 SÍSMICA DE REFLEXÃO 14
3.2 MODELO CONVOLUCIONAL 15
3.3 ASSINATURA DA FONTE 17
3.4 DECONVOLUÇÃO 18
3.4.1 Filtro de Wiener-Levinson 19
3.5 TRANSFORMADAS 21
3.5.1 Transformada de Fourier 21
3.5.2 Transformada no domínio FX 22
3.5.3 Transformada no domínio FK 23
3.6 FLUXO DO PROCESSAMENTO SÍSMICO 23
3.6.1 Conversão de formato do arquivo do dado sísmico 24
3.6.2 Geometria de aquisição 25
3.6.3 Edição dos arquivos dos traços sísmicos 25
3.6.4 Atenuação de ruído (Denoise) 25
3.6.5 Atenuação do ruído de bolha (Debubble) 26
3.6.6 Correção da amplitude do tiro e do canal 27
3.6.7 Correção do arraste do cabo 27
3.6.8 Atenuação do ruído ghost (Deghost) 28
3.6.9 Conversão do traço sísmico para fase zero 28
3.6.10 Correção estática da coluna d'água 29
3.6.11 Atenuação da múltipla 30
3.6.12 Regularização do mapa de cobertura do dado 31
3.6.13 Compensação do fator Q 31
3.6.14 Construção do modelo de velocidade 32
3.6.15 Migrações finais 32
3.7 *GHOST* 32
3.7.1 Efeito na Amplitude 35
3.7.2 Efeito na Fase 37
3.7.3 Parâmetros do fantasma 37
3.7.3.1 Profundidade da fonte/receptor 37
3.7.3.2 Ângulo de incidência 38
3.7.3.3 Velocidade na água 42
3.7.3.4 Coeficiente de reflexão 43
3.7.4 Modelo do fantasma 43

CAPÍTULO 4: METODOLOGIA DA ATENUAÇÃO DO FANTASMA 44

4.1 ATENUAÇÃO ATRAVÉS DO FILTRO DE WIENER 46
4.2 ATENUAÇÃO ATRAVÉS DO *WIBAND* 47
4.2.1 Correção do parâmetro do raio 48

4.2.2 Aplicação do filtro inverso *48*
4.3 APLICAÇÃO DO FILTRO ZERO FASE E COMPENSAÇÃO DO FATOR Q 48
4.4 MIGRAÇÃO 48

CAPÍTULO 5: RESULTADOS 49

5.1 RESULTADOS A PARTIR DO FILTRO DE WIENER E DO *WIBAND* 50
5.1.1 Dados com filtro zero fase e compensação do fator Q *56*
5.2 RESULTADOS DO *WIBAND* EM DIFERENTES ORDENAMENTO DOS TRAÇOS 63
5.2.1 Resultados no domínio do shot *64*
5.2.2 Resultados no domínio do canal *71*
5.2.2.1 Canal near 71
5.2.2.2 Canal mid 77
5.2.2.3 Canal far 83
5.2.3 Resultados no domínio do stack *88*
5.2.4 Dado Migrado *94*
5.2.4.1 Gather 95
5.2.4.2 Stack 98

CAPÍTULO 6: CONCLUSÃO 103

BIBLIOGRAFIA 104

Capítulo 1: Introdução

Ao longo dos anos, a demanda de bens naturais pela sociedade cresceu de forma significativa, requerendo assim, cada vez mais investimento na exploração das riquezas minerais. No âmbito das indústrias de óleo e gás, o aumento do consumo de seus insumos acarretou grande mobilização pela busca de tecnologias cada vez mais avançadas e eficazes, visando obter grande acurácia de resultados, prezando pelo cuidado com o impacto ambiental e o baixo custo de produção.

Dentre todas as áreas de estudo que auxiliam na maior otimização do processo exploratório, destaca-se a geofísica, que pode ser descrita como a ciência que investiga os fenômenos naturais terrestres, de maneira indireta, baseado em propriedades físicas. Sendo assim, a geofísica conta com a integralização de diversos métodos para compor um estudo com alta acurácia sobre a região de interesse, sendo eles os métodos potenciais, eletromagnéticos, sísmico, entre outros.

Na indústria do petróleo, uma das principais aplicações da geofísica é o imageamento de subsuperfície, tendo como foco a visualização das características físicas, geológicas e geométricas da jazida de interesse. Desta forma, um dos métodos mais eficazes na investigação geofísica do subsolo é o método sísmico, comumente utilizado para estimar as propriedades das rochas reservatório. A premissa básica deste método é gerada a partir da emissão de ondas junto a reflexão e refração na subsuperfície, de forma a gerar um mapa da configuração das estruturas geológicas da região de possível valor econômico (KEAREY, BROOKS e HILL, 2009).

O método sísmico pode ser dividido em três principais processos: aquisição de dados, processamentos do mesmos e, por último, a interpretação. No âmbito deste trabalho, o enfoque encontra-se no processamento. Este método consome um grande volume de dados, com suficiente cobertura para imagear a área de estudo. Entretanto, tem como desvantagem uma resolução vertical limitada. Assim, a busca na melhoria da resolução tem sido objetivo de muitas pesquisas, buscando assim, fazer com que suas investigações geofísicas estejam tangenciando para uma imagem de subsuperfície mais próxima do real possível.

Ao longo do processo de investigação sísmica, existem diversos fatores durante o levantamento dos dados que podem vir a contaminar a informação útil da aquisição, sendo um grande problema na etapa do processamento e da interpretação. Dessa forma, procura-se remover tais eventos, conhecidos como ruídos, de maneira que seja mantida a informação que realmente importa.

O método sísmico opera de maneira que se estuda a resposta do meio físico/geológico à uma onda acústica que pode ter origem natural (tectônica) ou ser gerada artificialmente. Essa onda é conhecida como pulso sísmico. Em aquisições marinhas, um dos fatores que afetam a forma do pulso da onda sísmica é o ghost, ocasionado devido à reflexões na superfície da água, gerando eventos espúrios. Essa reflexão ocorre nas vizinhanças da fonte e, ou nos receptores, se tornando atrasada e com polaridade invertida quando comparamos com a onda direta (ROBINSON e TREITEL, 2000).

O campo de onda do *ghost* interfere no sinal primário desejado, levando a sobreposições destrutivas (*notches*) de frequência e atenuação de frequências que, por sua vez, diminuem a resolução dos dados sísmicos. Para isto, técnicas de atenuação de *ghosts* vêm sendo aprimoradas em busca de um melhor resultado da representação da geologia em subsuperfície.

O presente trabalho tem o objetivo de demonstrar a importância da aplicação técnica de atenuação de ruído conhecida como d*eghost* no dado sísmico, apresentando resultados gerados a partir de um filtro inverso Wiener, bem como resultados gerados a partir de um operador utilizado pela indústria, chamado de Wiband. Podendo, assim, auxiliar na busca por um resultado mais fiel à geologia de interesse a fim de favorecer o processo exploratório dos bens minerais de valor econômico e social.

Capítulo 2: Área de Estudo

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes do programa Picanha da ION, sendo ele um programa de reprocessamento com o objetivo de fornecer um conjunto de dados sísmicos 3D calibrado regionalmente com imagens consistentes e mais nítidas nas bacias de Campos e Santos (Iongeo). Esse programa permite uma melhor compreensão do quadro estrutural regional e da tectônica de sal, permitindo que os exploradores avaliem, arrisquem e classifiquem melhor um portfólio de oportunidades para as necessidades atuais e futuras de exploração.

O dado disponibilizado é pertencente ao Bloco Tupi, que se encontra no Campo de Lula, localizado na Bacia de Santos, a maior bacia sedimentar offshore do país, com uma área total de mais de 350 mil quilômetros quadrados, se estendendo de Cabo Frio (RJ) a Florianópolis (SC), como pode ser visto na figura 1.

Figura 1: Localização do bloco Tupi no Campo de Lula - Bacia de Santos (Diariodopresal).

Em 28 de outubro de 2010, deu-se início o Sistema de Produção Definitiva do Campo de Lula, que está instalado a cerca de 280 quilômetros da costa e em águas com profundidade de lâmina d'água de cerca de 2.200 metros. Este é o primeiro campo supergigante do Brasil, denominação dada a campos com mais de cinco bilhões de barris equivalente de volume recuperável (Petrobras).

O reservatório petrolífero de Tupi está sob dois mil metros de água, dois mil metros de rocha, e dois mil metros de crosta salina em que sua maior dificuldade, do ponto de vista tecnológico, não é a profundidade e sim a espessura e peculiaridades da camada salina. Os desafios que se encontram quanto ao pré-sal são de naturezas diversas: logístico (distância da costa), tecnológico (lâmina d'água elevada, espessa camada de sal a ser perfurada, presença de contaminantes no petróleo) e, por consequência, de custos (custos iniciais de perfuração elevados, custos de completação de poços) – desafios esses que impactam na economicidade dos projetos, principalmente, em um cenário onde a cotação do Brent está inferior a US$ 60/barril (Presalpetroleo).

Capítulo 3: Método Sísmico

3.1 Sísmica de Reflexão

É de suma importância, principalmente na indústria de produção e exploração de hidrocarbonetos, um bom conhecimento das estruturas geológicas de subsuperfície da Terra. Entretanto, sua observação direta é limitada à ocorrência de afloramento geológico e/ou a perfilagem de sedimentos.

A geofísica é a ciência que consegue suprir essa limitação através da medição de parâmetros físicos em superfície ou em subsuperfície. As investigações geofísicas permitem, através de medições indiretas das diferenças entre as propriedades físicas de materiais, o estudo e mapeamento da subsuperfície (ROSA, 2010).

Um dos métodos geofísicos mais empregados é o método sísmico. Esse método é capaz de amostrar grandes áreas, tanto em latitude e longitude, quanto em profundidade. Para entender como as inferências a respeito do interior da Terra são realizadas no método sísmico, é necessário o conhecimento das ondas sísmicas, do modo como elas se propagam e as leis físicas que as governam (KREBES, 2019).

O embasamento físico do método da sísmica de reflexão se dá a partir das ondas mecânicas, geradas por uma fonte controlada, que se propagam em subsuperfície, como pode ser visto na figura 2. Ao longo da profundidade atingida, as ondas irão se refletir ou refratar nos contatos entre meios com diferentes propriedades, sendo registrado os tempos de chegada por sensores estrategicamente posicionados (BILOTI, 2019).

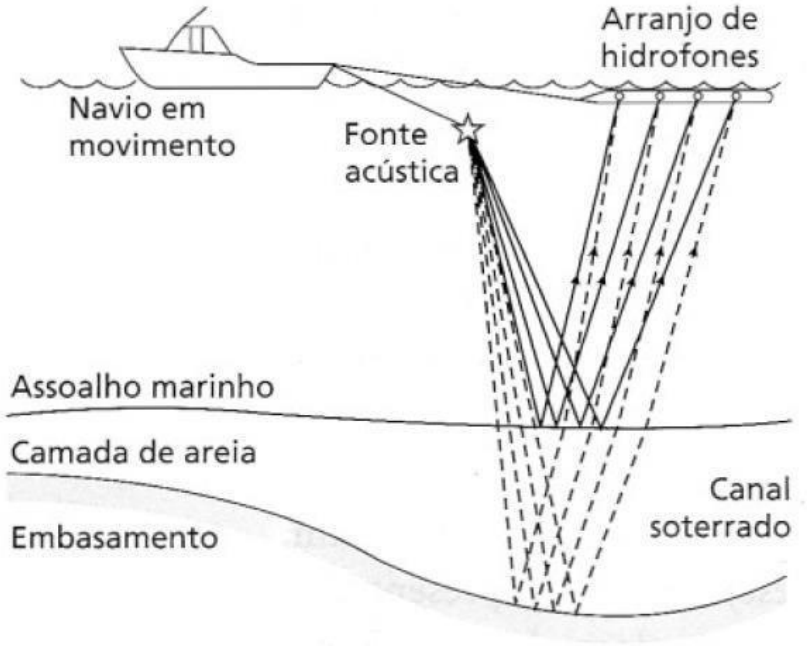

Figura 2: Esquema de uma aquisição marinha de sísmica de reflexão. Modificado de (DOMINGUEZ, FREIRE e SANTOS, 2019).

Na aquisição sísmica, o principal arranjo de campo empregado é o chamado CMP, *Comum Midpoint*, (Ponto Médio Comum). Essa técnica tem como parâmetro mais importante amostrar o mesmo ponto em subsuperfície mais de uma vez, e a quantidade de vezes que este é amostrado, chama-se cobertura (*fold of coverage*). Essa técnica é responsável pela melhoria da seção sísmica final, já que este aumenta a razão sinal/ruído (ROCHA, 2010).

3.2 Modelo Convolucional

A partir do tempo de trânsito das ondas registrados nos sensores na superfície, é possível calcular as profundidades das interfaces geológicas e suas respectivas velocidades e, a partir das vibrações captadas nos sensores é possível calcular a intensidade da reflexão dependente do contraste de impedância (ROBINSON e TREITEL, 2000).

Desta forma, a representação gráfica de todas as amplitudes de vibração ao longo do tempo de registro total compõe o que é conhecido como um sismograma, tendo o eixo Y o tempo de registro e no eixo X as posições dos receptores, onde cada trajetória do sinal emitido e recebido corresponde ao traço sísmico.

Para entender o traço sísmico, é preciso entender a descrição mais básica que dá origem a resposta sísmica, sendo ela o modelo convolucional (YILMAZ, 1993). A resposta sísmica, s(t), pode ser representada pela convolução da assinatura da fonte, w(t), com a série de coeficientes de reflexão ou resposta impulsiva da Terra, r(t), somada ao ruído, n(t), proveniente da aquisição.

$$s(t) = w(t) * r(t) + n(t) \qquad (1)$$

Esse modelo partiu de três premissas: (1) a Terra é plano paralela e com camadas de velocidade constante, (2) a fonte gera uma onda plana compressional que colide com os limites da camada com uma incidência normal; nenhuma onda de cisalhamento é gerada, e (3) A forma da onda da fonte não muda ao longo do trajeto na subsuperfície; i.e., ela é estacionária (YILMAZ, 1993).

Baseado nessas premissas, a série de coeficientes de reflexão indica os contrastes de impedância acústica entre as camadas e os meios vizinhos. Define-se impedância acústica, na equação 2, como o produto da velocidade da onda sísmica e a densidade do meio em que se encontram.

$$I = \rho \times v \qquad (2)$$

Onde *I* é a impedância acústica, ρ é a densidade do meio e *v* é a velocidade da onda sísmica.

$$r = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \qquad (3)$$

Onde *r* é o coeficiente de reflexão, I_1 a impedância da primeira camada e I_2 a impedância da segunda camada.

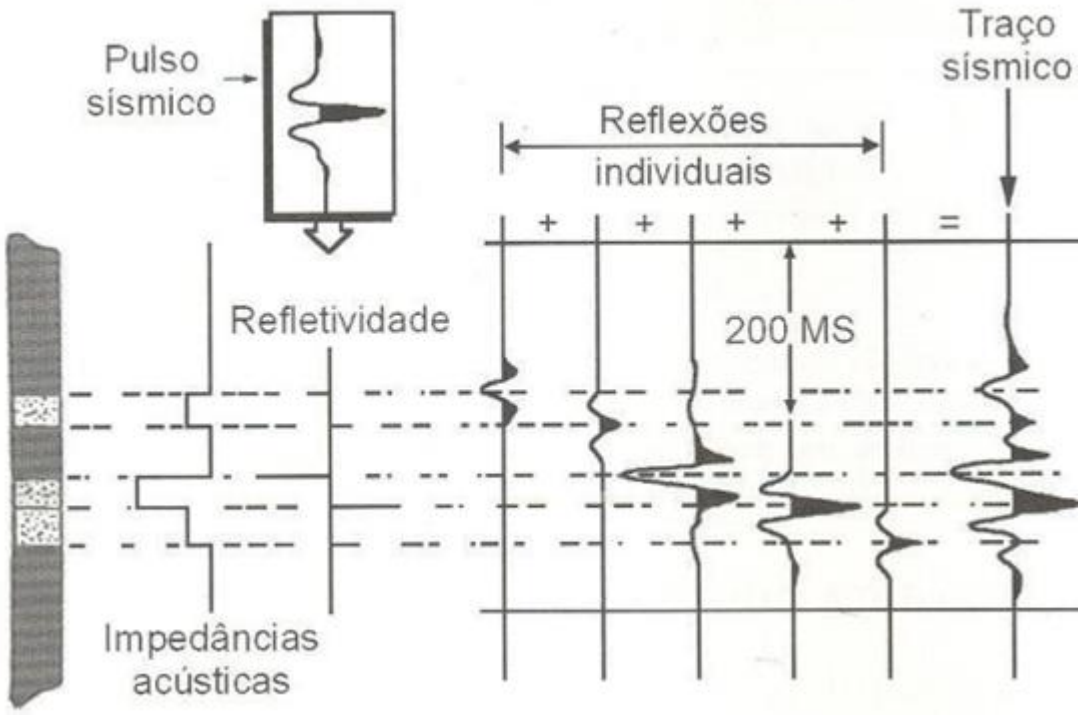

Figura 3: Modelo convolucional do traço sísmico construído a partir de um padrão de camadas planas e paralelas com diferentes contrastes de impedância (KEAREY, BROOKS e HILL, 2009).

3.3 Assinatura da fonte

A assinatura da fonte é o pulso sísmico gerado pela fonte que recebe o nome de wavelet. As wavelets podem apresentar formas variáveis em função do tipo de equipamento que as geram, e podem ser classificadas em função das propriedades de seu espectro de fase. Na sísmica de reflexão são utilizadas, tipicamente, *wavelets* de fase mínima (figura 4).

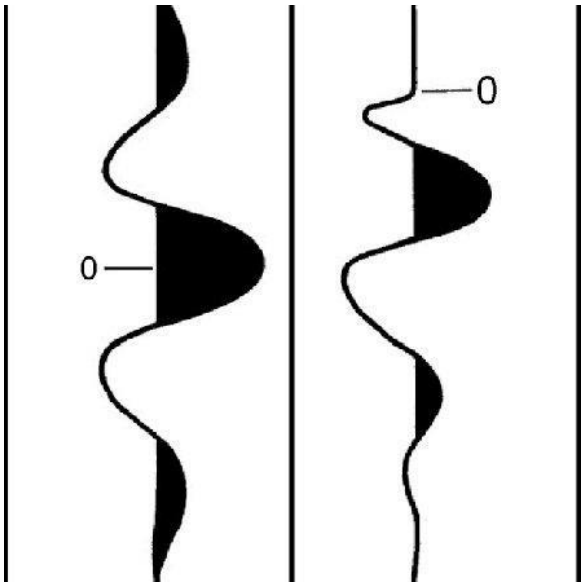

Figura 4: Wavelet de fase zero à esquerda e de fase mínima à direita (Wiki).

Para um pulso sísmico estimado em tempos não negativos, uma wavelet de fase mínima possui seu máximo de amplitude localizado nos tempos iniciais (ROSA, 2010). Idealmente, apenas um pico, proporcional ao contraste de impedância, seria registrado em t0. No entanto, a onda gravada é limitada pela banda e sofre distorções, devido aos efeitos de propagação e ruído.

3.4 Deconvolução

O método da deconvolução é o processo que separa o sinal da wavelet com a refletividade. Uma das etapas que caracterizam esse método tem como característica o aumento da resolução temporal do dado através da compressão do pulso sísmico, definindo melhor as reflexões (SANTOS, 2016). A partir da estimativa de um filtro inverso, a deconvolução opera convolvendo o filtro inverso com o traço sísmico, sendo capaz de recuperar a resposta impulsional da Terra (BILOTI, 2019).

Desde a "revolução digital" na exploração sísmica, entre o início e meados de 1960, a deconvolução provou ser uma maneira eficaz de resolver determinados problemas sísmicos (ROBINSON e TREITEL, 2000).

Existem duas abordagens básicas na sismologia: a determinística e a estatística. A determinística se preocupa com a construção de modelos matemáticos e físicos bem definidos a fim de entender melhor a propagação da onda sísmica. Já a abordagem estatística realiza construções de modelos sísmicos envolvendo componentes aleatórios, funcionando melhor quando ocorre falta de consistência nos parâmetros de aquisição (YILMAZ, 1993).

O modelo requerido para a aplicação da deconvolução preditiva é o modelo estatístico, pois usualmente desconhece-se a assinatura da fonte. Esse modelo parte de duas suposições: (1) a amplitude e o tempo de chegada dos eventos no traço sísmico podem ser representados por uma série de picos aleatórios, e (2) a hipótese determinística que a forma básica da onda associada a cada evento é de atraso mínimo, i.e., que tem maior concentração de energia em sua parte inicial (ROBINSON e TREITEL, 2000).

3.4.1 Filtro de Wiener-Levinson

O tipo de deconvolução mais difundido dentro do processamento sísmico é conhecido como deconvolução de Wiener-Levinson, onde tem-se como objetivo recuperar a função refletividade levando em consideração todas as premissas do modelo convolucional, aumentando assim a resolução temporal dos dados e consecutiva melhora na identificação das litologias presentes na região estudada (SANTOS, 2016). O filtro de Wiener é uma generalização para derivar filtros que convertam o dado de entrada (*input)* em qualquer saída (*output)* desejada. Nessa técnica estão inerentes duas premissas:

I. O pulso é de fase mínima.
II. A refletividade é aleatória.

Sua equação pode ser definida por:

$$\int_{-\infty}^{\infty} a(t)\, f(u-t)dt = g(u) \qquad (4)$$

onde,

a(t) = autocorrelação da função de *input*, onde é feita uma correlação do sinal *input* com ele mesmo e é onde se é contruida a matriz A;

g(u) = correlação cruzada do *output* desejado com o *input*, onde mede-se quão parecidos sao os 2 sinais;

f(t) = filtro que melhor transforma o *input* no *output*, minimizando o erro quadrático entre o *output* real.

Já a matriz de autocorrelação da wavelet de *input*, com o filtro e com a crosscorrelação do output desejado, pode ser definida por:

$$\begin{bmatrix} a_0 & a_1 & \cdots & a_m \\ a_1 & a_0 & \cdots & a_{m-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_m & a_{m-1} & \cdots & a_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \cdots \\ f_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ \cdots \\ g_m \end{bmatrix} \tag{5}$$

Esquematicamente, o filtro de Wiener ocorre da seguinte maneira:

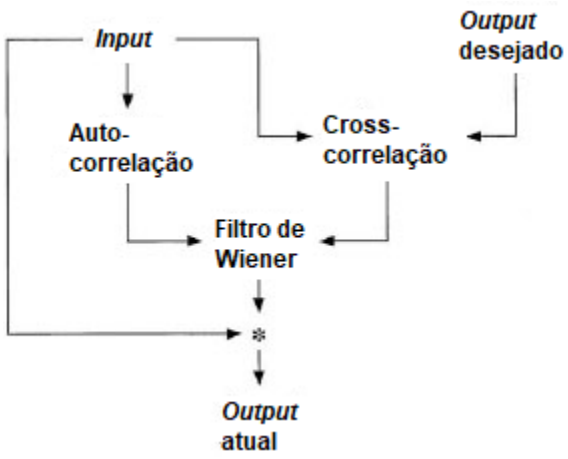

Figura 5: Fluxograma do método de Wiener-Levinson. Modificado de (YILMAZ, 1993).

3.5 Transformadas

Os dados sísmicos são registrados no que é chamado de domínio temporal (*time-domain*). No entanto, é muito comum transformar os dados em um novo domínio onde é possível separar o sinal do ruído de maneira mais fácil (YILMAZ, 1993). Essa operação é conhecida como transformada.

Em tese, após a aplicação da operação inversa, os dados deveriam sair de forma idêntica à entrada, porém isso nem sempre ocorre na prática devido as aproximações feitas nas fases de transformação, o que ocasiona uma perda na precisão ou até mesmo uma criação de artefatos.

3.5.1 Transformada de Fourier

A transformada de Fourier é de longe a mais importante usada na sismologia. A teoria de Fourier afirma que um dado sinal pode ser sintetizado como uma soma de ondas senoidais de várias amplitudes, frequências e fases (YILMAZ, 1993). Quando uma função $f(t): R \rightarrow R$ não é periódica é impossível escrevê-la como combinação linear de uma família de senos e cossenos harmonicamente relacionados. Usando a transformada de Fourier, um sinal no domínio de tempo é transformado para o domínio da frequência onde é equivalente a um espectro de amplitude e um espectro de fase.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \tag{6}$$

$$F(\omega) = \int f(t) e^{-i\omega t} dt \tag{7}$$

$$e^{i\omega t} = cos(\omega t) + isen(\omega t) \tag{8}$$

onde, $f(t)$ é um sinal no domínio do tempo e $F(\omega)$ é sua transformada de Fourier.

A equação 6 é a transformada direta de Fourier, a equação 7 é a transformada inversa de Fourier, e a equação 8 é a fórmula de Euler, que correlaciona as formas retangular e exponencial para representação de números complexos.

A figura 6 representa uma simples onda no domínio do tempo transformada em seus componentes no domínio da frequência, onde 6a representa a onda no domínio do tempo e a 6b a onda transformada para o domínio da frequência.

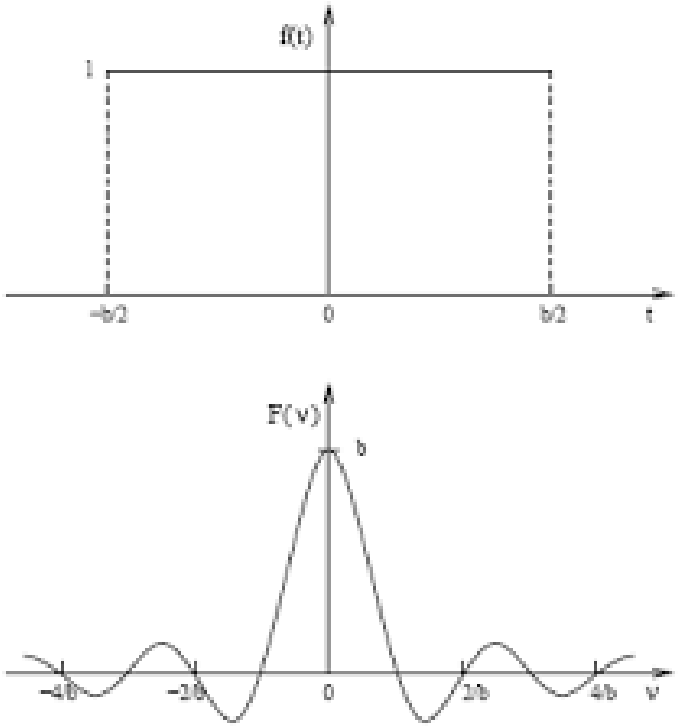

Figura 6: Onda no domínio de tempo transformada para o domínio de frequência (Astro IF UFRGS).

3.5.2 Transformada no domínio FX

O domínio F-X é, uma transformada de Fourier unidimensional ao longo do tempo, em que a dimensão X representa um conjunto de traços. No método F-X, é aplicada uma transformada de Fourier a cada traço, transformando-os no domínio frequência-distância (F-X). Para cada frequência, os dados agora consistem em amostras espaciais complexas (MEEK, LINVILLE e F., 1991).

O gráfico F-X é uma análise de dados com uma ampla gama de aplicações no controle de qualidade de dados. O *plot* fornece um método rápido e conveniente de avaliar o caráter espectral de um grande número de traços sísmicos e isso permite o diagnóstico de problemas de dados que podem não ser aparentes.

3.5.3 Transformada no domínio FK

A transformada F-K é uma transformada de Fourier bidimensional ao longo do tempo e do espaço, onde F representa a frequência (transformada de Fourier ao longo do tempo) e K refere-se ao número de onda (transformada de Fourier ao longo do espaço) (YILMAZ, 1993).

Vários tipos de ruídos, como *Ground Roll* ou interferência sísmica, podem ser mais facilmente separados no domínio F-K do que no domínio do espaço-tempo e isso torna, portanto, mais fácil atenuar o sinal indesejado antes que a transformação inversa seja aplicada (KEAREY, BROOKS e HILL, 2009).

3.6 Fluxo do Processamento Sísmico

O processamento sísmico tem o intuito de imagear estruturas geológicas em subsuperfície, sendo a etapa onde se apura tudo o que é sinal útil e remove-se os fatores que contaminam o conteúdo próximo da realidade. O fluxo do processamento sísmico varia de acordo com a necessidade do dado a ser tratado e, por isso, é importante avaliar quais etapas são necessárias serem aplicadas.

Em diferentes tipos de aquisição, o fluxograma também varia muito. No caso de uma aquisição terrestre, não encontra-se o problema do *Ghost*, visto que não há lâmina d'água para ocorrer a reflexão atrasada no tempo com polaridade invertida, sendo desnecessária essa etapa no fluxo. No caso de uma aquisição com *nodes*, o receptor fica no fundo oceânico, distante da lâmina d´água, diferente da aquisição convencional *streamer*. A resolução do problema do *Ghost* do receptor em *nodes* é mais simples do

que em *streamer*, sendo resolvido por separação de campo de onda com soma/subtração PZ.

De forma geral, algumas etapas de processamento proveniente de um levantamento sísmico marítimo *streamer*, sendo este o caso deste trabalho, foram exemplificadas na figura 7 e explicadas a seguir.

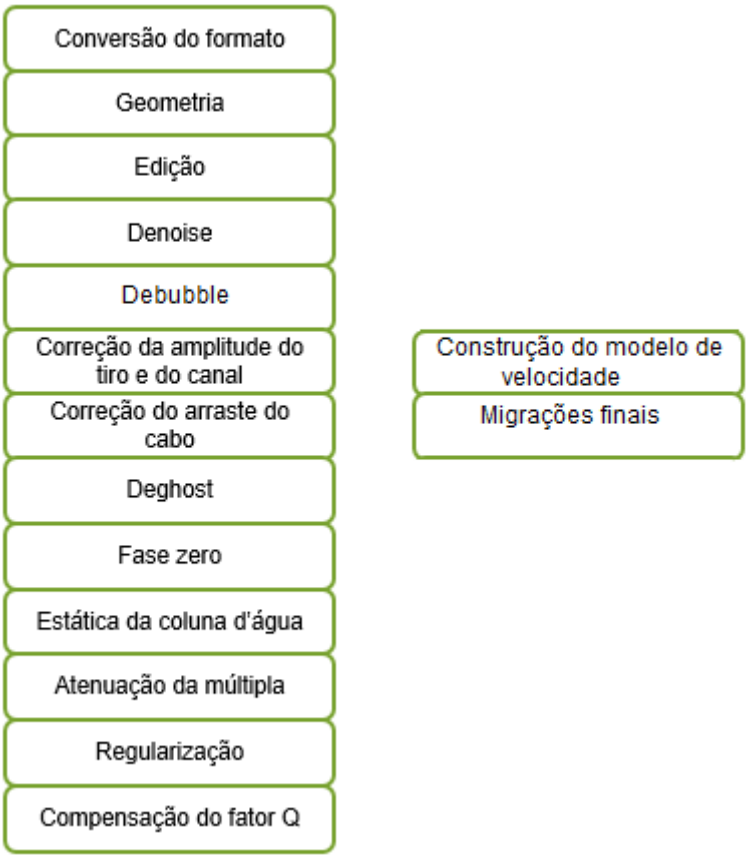

Figura 7: Exemplificação de algumas etapas de processamento.

3.6.1 Conversão de formato do arquivo do dado sísmico

Os dados sísmicos geralmente são registrados no formato SEG-Y, sendo ele um dos padrões de registro de dados desenvolvido pela *Society of Exploration Geophysicists* (SEG). Para realizar o processamento dos dados é necessário convertê-los para o formato interno da empresa responsável pelo processamento.

3.6.2 Geometria de aquisição

A geometria é a etapa onde se determina a localização de cada fonte e receptor através de suas coordenadas. Os dados de navegação são fundidos com os dados sísmicos para assegurar-se de que cada traço esteja nas coordenadas UTM corretas da fonte e do receptor carregadas nos cabeçalhos (*headers*) para dar localizações na superfície da Terra. Esta etapa possibilita a organização dos traços em diferentes domínios (YILMAZ, 1993).

3.6.3 Edição dos arquivos dos traços sísmicos

Na etapa da edição dos traços, informações de cabeçalho incluindo ponto de tiro (*shot point*), identificação da fonte (*gun id*), sequência de navegação e o tempo do tiro são extraídas para permitir um controle de qualidade inicial. As linhas de navegação identificadas a partir dos registros do observador como sendo NTBP (*Not To Be Processed*) são excluídas.

3.6.4 Atenuação de ruído (*Denoise*)

Na prática, os registros sísmicos muitas vezes não fazem jus às expectativas teóricas, isto é, invariavelmente existem muitos ruídos que atrapalham os dados úteis. Em alguns casos o ruído é tão severo que os dados precisam ser descartados.

Os ruídos que se apresentam no registro sísmico podem ser qualificados como coerentes, tendo um motivo físico correlacionado através dos traços, ou aleatórios, sem previsibilidade de ocorrência. Eles podem ser gerados por:

I. Ocasião Externa: maré, ruído de plafaforma, ruído do próprio navio/hélice, interferência sísmica de outro navio/plataforma de aquisição, dentre outros;

II. Ocasião Interna: spike elétrico do equipamento, ruído aleatório, autofires, crossfeed, dentre outros;

III. Interação Interna/Externa: cable tug, swell noise, scattered noise, guided waves, ground/mud roll.

A etapa atenuação do ruído visa melhorar a qualidade do sinal sendo necessária a remoção dos diferentes tipos de ruído ocasionados durante a aquisição (BILOTI, 2019). Essa remoção pode ser feita em diferentes domínios como mencionado na seção de transformadas.

3.6.5 Atenuação do ruído de bolha (D*ebubble*)

A bolha é considerada um ruído coerente que contamina o sinal sísmico. Ela é um ruído coerente de baixa frequência gerada pela variação de pressão ao redor da fonte (*airgun*) após detonação, a energia residual ao redor da fonte colapsa até um certo ponto em que a pressão interna se torna maior que a externa, então a bolha passa a se expandir novamente até o momento em que a pressão externa se torna maior que a interna, o que ocasiona um novo colapso. O processo é periódico e ocorre quantas vezes houver energia remanescente (COURTENAY, BOUDREAU e LEE, 2009).

Para superar os aspectos indesejados da assinatura de uma única fonte sísmica, arranjos de diferentes tamanhos são normalmente agrupados para criar uma composição de fontes onde a característica da assinatura se torne mais desejável possível. O desenho usual tem como objetivo gerar uma onda sísmica onde a assinatura na vertical seja pequena e estreita. Já no espectro, é desejável que a assinatura seja suavizada, ampla sobre a frequência de interesse e preferencialmente em fase mínima (GILES e JOHNSTON, 1973; NOOTEBOOM, 1978).

Atualmente, a bolha é tratada como um ruído aleatório, ou seja, é distribuído um hidrofone para cada fonte, e como cada airgun possui um volume, o “efeito bolha” é diferente para cada airgun. Assim, quando as assinaturas forem somadas, o efeito será eliminado e sobrará somente a assinatura original. Após o somatório, ainda é feito uma deconvolução final para eliminar os últimos efeitos (LOPES, 2010).

É importante que se faça uma boa atenuação da bolha, pois este é um evento predominantemente de baixa frequência. Logo, não queremos que haja quaisquer eventos que possam vir a confundir a atenuação do fantasma, visto que este também é um processo em que há amplificação dos sinais de baixa frequência devido à atenuação do fantasma da fonte.

3.6.6 Correção da amplitude do tiro e do canal

As diferenças na sensibilidade do receptor e na amplitude da fonte durante a aquisição levam ao aparecimento de variações não geológicas na amplitude dos dados registrados. É necessário corrigir essas inconsistências antes de aplicar os processos multicanal aos dados. Sendo assim, o objetivo desta etapa é remover variações de amplitude do tiro-tiro e canal-canal a fim de conservar a amplitude verdadeira (ROBINSON e TREITEL, 2000).

Para conversar a amplitude verdadeira, dentro de uma janela a amplitude média pode ser calculada e os resultados escalares, gerados por filtros gaussianos, balanceiam as amplitudes.

3.6.7 Correção do arraste do cabo

O objetivo desta correção é remover erros de posicionamento devido ao movimento do navio durante a gravação. A correção aplica uma mudança espacial que coloca os dados onde deveriam ter sido posicionados se a aquisição fosse estacionária (BILOTI, 2019).

As correções apropriadas para cada tiro dado são derivadas com base na velocidade do navio no momento de cada tiro. A velocidade do navio é calculada a partir do tempo e da coordenada x e y do cabeçalho.

Como a correção é realizada para explicar os receptores se deslocando em direção ao ponto de tiro durante a gravação, uma mudança de energia para canais mais

próximos pode ser vista ao longo do cabo. Este efeito é mais notável para a parte inferior do registro e para a parte mais distante do cabo (BILOTI, 2019).

Os dados são reposicionados de modo que um traço represente um registro do campo de onda como se fosse gravado em uma posição fixa. Em outras palavras, esta etapa permite que os registros de tiro tenham a exigência geométrica estacionária necessária para o processamento subsequente.

3.6.8 Atenuação do ruído *ghost* (*Deghost*)

O objetivo da atenuação do fantasma é compensar a interferência sísmica destrutiva ocasionada pela reflexão do sinal na lâmina d'agua, fazendo com que haja mudança de polaridade e consequente destruição da informação nas baixas (fantasma da fonte) e altas frequências (fantasmas da fonte e do receptor) (ROBINSON e TREITEL, 2000).

3.6.9 Conversão do traço sísmico para fase zero

Visando assegurar melhor resolução e facilidade de interpretação, é necessário implementar um processo que converta o traço sísmico de fase mínima para fase zero, seguindo a convenção padrão da SEG.

Uma wavelet de fase zero é simétrica em relação a t0. O seu pico de amplitude é centrado em t0, diferentemente da wavelet causal (fase mínima), onde seu pico negativo começa no t0, vide figura 8. É importante destacar que a fase zero não é alcançável por uma rotação de fase única e uma onda aparentemente simétrica não é necessariamente uma fase zero (YILMAZ, 1993).

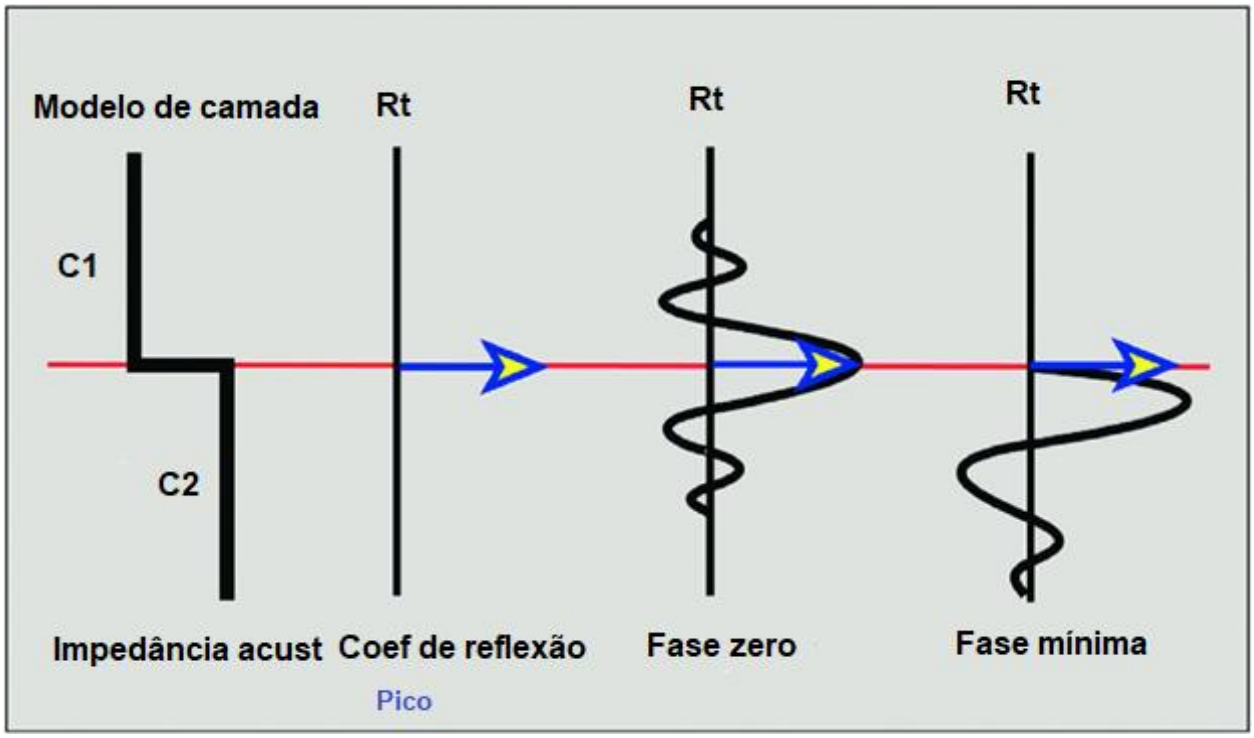

Figura 8: *Wavelet* de fase mínima e de fase zero (VEEKEN e MOERKERKEN, 2013)

Apesar da fase zero ser contra a causalidade do dado sísmico, ela permite o ajuste da impedância ao traço, i.e, o pico de amplitude irá coincidir com a refletividade do evento. Sem a fase zero, o evento pode se relacionar ao pico de forma atrasada (BILOTI, 2019).

Essa conversão ocorre por meio da deconvolução, onde a assinatura da fonte é estimada e convolvida com um filtro projetado para levar a sísmica à sua forma faseada em zero (YILMAZ, 1993).

3.6.10 Correção estática da coluna d'água

Além da diferença das marés ao longo da aquisição, a estática pode ser causada por mudanças na água durante diferentes períodos de aquisição. As variações de temperatura e salinidade podem afetar a velocidade da onda sísmica (YILMAZ, 1993).

Sendo assim, a aplicação de uma correção estática é necessária para eliminar possíveis efeitos das variações da coluna d'água introduzidas pelas mudanças no

estado da água durante a aquisição. Para qualquer área de processamento, o tempo gasto para adquirir uma única linha de navegação determinará a natureza da estática calculada.

3.6.11 Atenuação da múltipla

Por dificultarem a visualização do modelo geológico correto, as reflexões são consideradas um problema no método sísmico. Elas representam reverberações da onda sísmica ocorrendo, na maioria das vezes, devido aos fortes contrastes de impedância entre interfaces (FERREIRA, 2009).

Convencionalmente, as técnicas de atenuação são classificadas de acordo com o critério pelo qual as múltiplas são distinguidas das primárias. Estes critérios são baseados na natureza periódica das múltiplas e na diferença de *moveout* entre primárias e múltiplas (FERREIRA, 2009). Entretanto, na literatura é possível encontrar diversas classificações. Em 1999, Weglein classificou as reflexões múltiplas em duas categorias (WEGLEIN, 1999):

(i) Métodos que buscam explorar as características ou propriedades que diferenciam as múltiplas das primárias (Métodos de Filtragem);

(ii) Métodos que prevêem e subtraem as múltiplas (Métodos de predição baseados na modelagem ou inversão do campo de onda sísmico).

Os métodos de supressão podem ser divididos em três categorias:

(i) Deconvolução

- Preditiva;
- Adaptativa;
- Multicanal.

(ii) Filtragem

- Domínio *tau-p*;
- Domínio *f-k*;
- Domínio *Radon*.

(iii) Predição e Subtração do Campo de Onda.

A atenuação da múltipla é uma etapa importante, pois a não eliminação dessas reflexões influenciam na qualidade do imageamento, visto que as mesmas ‘’mascaram’’ informações da subsuperfície, interferindo nos eventos primários.

3.6.12 Regularização do mapa de cobertura do dado

A aquisição de dados de campo geralmente não é perfeitamente uniforme, uma vez que efeitos como correntes marítimas e/ou obstruções (instalações e plataformas) modificam a posição dos cabos constantemente. Logo, variações do mapa de cobertura estão comumente presentes e, por isto, algum método de compensação é necessário antes da migração sísmica. Se isso não for realizado, artefatos de migração devido a variações do mapa de cobertura de pequena escala podem ser vistos, particularmente em eventos de alta amplitude (YILMAZ, 1993).

3.6.13 Compensação do fator Q

Quando as ondas sísmicas se propagam através da subsuperfície da Terra, a inelasticidade e a não homogeneidade resultam em:

I. Dissipação à medida que a energia das ondas é absorvida pelo meio;
II. Dispersão de velocidade, onde a frente de onda se propaga com velocidade diferente para cada componente de frequência.

Consequentemente, a fase da onda (*wavelet*) geralmente rotaciona com o aumento do tempo de viagem. O filtro inverso Q somente em fase tenta corrigir essa rotação de fase, com o objetivo de gerar uma *wavelet* aproximadamente de fase zero ao longo da seção (BILOTI, 2019).

Antes da migração, os dados têm um filtro inverso Q com apenas fase aplicada, o que gera maior estabilidade de fase com o aumento do tempo. A Amplitude Q é normalmente aplicada durante ou após a migração.

3.6.14 Construção do modelo de velocidade

A construção do modelo de velocidade é muito importante, pois este será utilizado nas migrações finais. Em geral, esta etapa é iterativa e decorre pelo seguinte fluxo:

I. Estimativa de modelo inicial
II. Iterações tomograficas e/ou FWI no sedimento.
III. Determinação dos corpos de sal do modelo.
IV. Iterações tomograficas e/ou FWI nos corpos de sal.
V. Estimativa inicial do modelo de pré-sal.
VI. Iterações tomograficas e/ou FWI no pré-sal.

3.6.15 Migrações finais

Nesta etapa os eventos de mergulho são movidos para sua verdadeira posição em subsuperfície e as difrações são colapsadas usando o modelo de velocidade construído (YILMAZ, 1993). É uma etapa de extrema necessidade quando lida-se com uma geologia de alta complexidade, pois com ela é possível delinear detalhadamente a subsuperfície, como planos de falhas. Sendo assim, a migração pode ser vista como uma forma de deconvolução espacial que aumenta a resolução espacial.

3.7 *Ghost*

De forma análoga ao fantasma da aquisição sísmica, o *ghost* também já foi comum em televisões. O fantasma criava uma imagem duplicada do que estava sendo exibido na tela porque o sinal era recebido mais de uma vez com uma diferença de milissegundos entre um e outro, comprometendo, desta forma, a resolução da imagem transmitida (SOUZA, 2014), como pode ser vista na figura 9.

Figura 9: Analogia ao fantasma da sísmica: imagem duplicada na televisão (SOUZA, 2014).

Nas aquisições sísmicas marinhas convencionais, o *ghost* interfere no sinal primário devido à reflexões na superfície da água, gerando eventos espúrios. Visto que o coeficiente de refletividade na superfície é próximo de -1, o campo de onda possui amplitude similar porém com polaridade oposta do campo de onda (ROBINSON e TREITEL, 2000). O fantasma é, então, considerado uma reflexão atrasada no tempo com polaridade invertida da reflexão primária, gerada na superfície livre. No caso de uma reflexão dupla, a polaridade do sinal é a mesma da primária.

Existem três tipos de eventos de *ghosts* que contribuem no registro sísmico da wavelet, visto na figura 10, sendo eles o *ghost* da fonte, ocasionado por reflexão na superfície próximo à fonte, o *ghost* do receptor, incidente nos detectores a partir de reflexões descendentes de superfície, e o *ghost* composto (*compound*), sendo ele a combinação dos anteriores (ROBINSON e TREITEL, 2000). As reflexões de *ghost* contaminam a imagem com ondas adicionais de fase invertida em 180 graus, de modo que em algumas circustâncias podem interferir construtivamente ou destrutivamente (*notches*) no sinal útil.

Assim, algumas frequências do sinal registrado são atenuadas perto dos *notches* dos fantasmas. Removendo os fantasmas da fonte e do receptor, pode se preencher potencialmente os *notches* e assim obter imagens com maior qualidade em termos de banda de frequência e relação sinal/ruído (S/N) (figura 11).

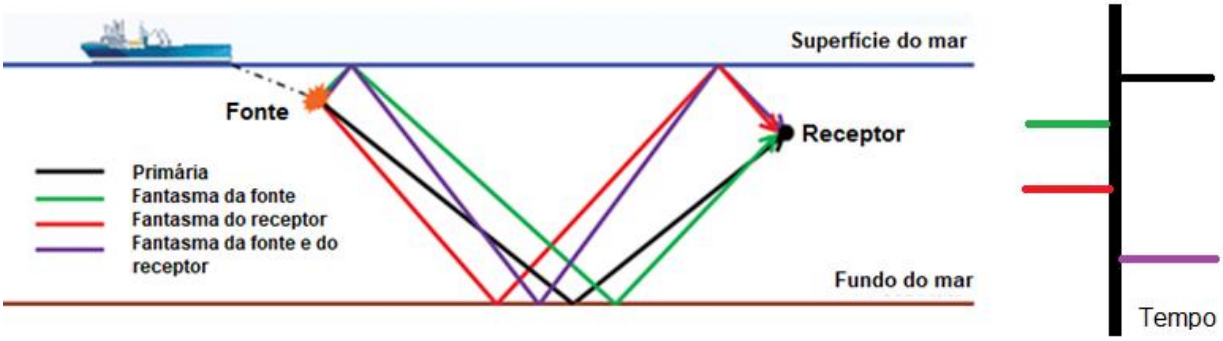

Figura 10: Sinal primário (em preto), fantasma da fonte (em verde), fantasma do receptor (em vermelho), fantasma composto (em roxo). Modificado de (WEGLEIN, 2006).

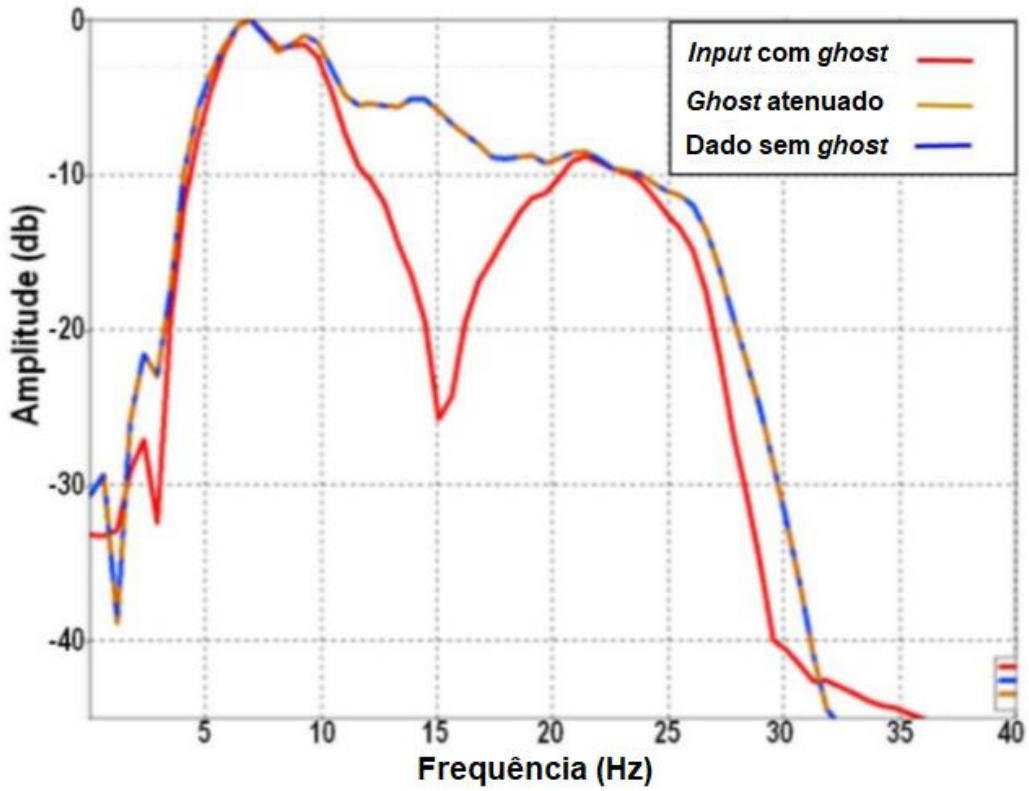

Figura 11: Espectro de amplitude antes, com *notches*, e após o Deghost, com a recuperação dos *notches* **(BEASLEY, COATES e LAPILLI, 2013)**.

3.7.1 Efeito na Amplitude

A interferência destrutiva entre campos de onda produz *notches* no espectro de amplitude em determinadas frequências. O fantasma também produz forte interferência construtiva, impulsionando frequências que estão mais próximas em fase entre campos de onda ascendente e descendente .

Essa interferência construtiva ou destrutiva que ocorre em uma determinada frequência é controlada pelo atraso de tempo do fantasma ou "período do *ghost*" e sua magnitude de efeito é definida pelo coeficiente de reflexão da função fantasma (RC).

As imagens a seguir exemplificam o evento do *ghost.*

Figura 12: Imagem original (Imagem da Lena Söderberg frequentemente utilizada para testar algoritmos de imagem).

Pode-se observar na Figura 12 uma gama ampla de frequências altas e baixas, sem domínio claro de nenhuma das duas frequências.

Figura 13: Imagem com replicação de ‘eventos’ fazendo analogia a uma sísmica com o problema do *ghost* (Imagem da Lena Söderberg frequentemente utilizada para testar algoritmos de imagem).

Na Figura 13 foi adicionado um fantasma replicando os dados, invertendo a polaridade, adicionando um shift estático de 100ms e a cópia deslocada ao original.

É possível ver a perda de grande parte da energia nas baixas frequência da imagem original devido ao *notch* do *ghost*. Em um sentido mais qualitativo, a imagem também está mais confusa, devido à replicação de 'eventos'.

3.7.2 Efeito na Fase

O fantasma também causa uma grande distorção de fase em grande parte da largura de banda. Essa distorção está intrinsecamente ligada aos efeitos de amplitude, pois estes são produzidos pelo fantasma sendo alternadamente fora de fase e em fase com o campo de onda ascendente. As frequências em que ocorrem mudanças rápidas de fase são definidas pelo período fantasma e a magnitude da rotação máxima é definida também pelo coeficiente de reflexão da função fantasma.

3.7.3 Parâmetros do fantasma

Alguns parâmetros devem ser considerados quando tratamos do fantasma, sendo eles: a profundidade da fonte/receptor, o ângulo de incidência, a velocidade do som na água e o coeficiente de reflexão.

3.7.3.1 Profundidade da fonte/receptor

Quando a fonte e o receptor se encontram em uma profundidade rasa, menor a distância entre eles. Neste caso, os fantasmas da fonte e receptor são registrados parcialmente coincidentes devido ao pequeno atraso entre eles. Eles interferem construtivamente para criar um evento com amplitude maior do que a energia primária inicial.

Com uma diferença de profundidade significativa entre a fonte e o receptor, há uma diferença de tempo maior entre a chegada do fantasma na fonte e no receptor, não

sendo possível observar uma interferência construtiva entre a fonte e os fantasmas receptores. A chegada primária ascendente é um pouco mais forte.

À medida que a profundidade do cabo do receptor muda, os tempos de atraso do fantasma também mudam, assim como a forma da onda (figura 14).

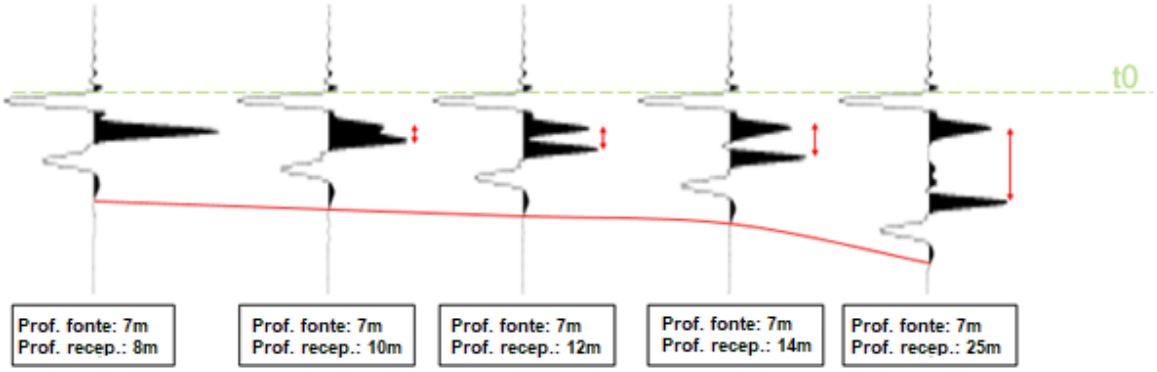

Figura 14: Variação da profundidade fonte/receptor **(ION).**

À medida que a profundidade do receptor aumenta, o tempo de atraso do fantasma do receptor aumentará. Desta forma, a duração total do pulso aumenta, os eventos *ghosts* da fonte e do receptor se separam e o evento dominante (maior amplitude) muda.

3.7.3.2 Ângulo de incidência

A dependência do ângulo de incidência é uma variável que deve ser considerada na atenuação do *ghost* devido à sua variação com o *offset* (figura 15). A variação do ângulo ocasiona mudanças no período do *ghost*, isto é, quanto maior o *offset*, menor o período do *ghost*, de acordo com a equação 9.

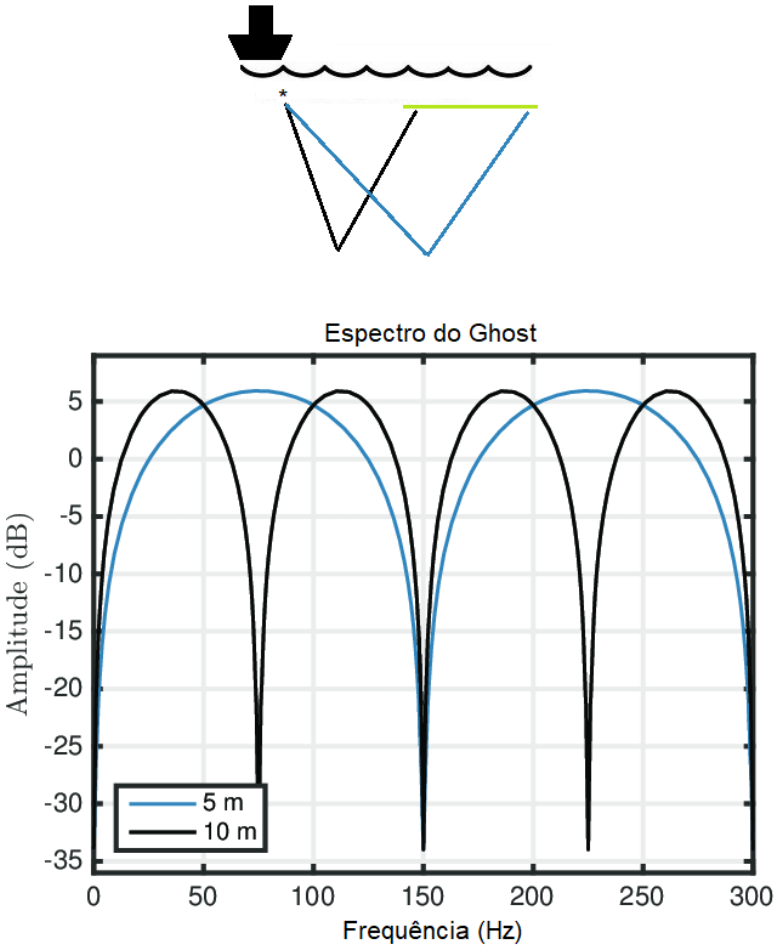

Figura 15: Variação do ângulo ocasionando mudanças no período do *ghost***.**

Considera-se a seguinte relação para explicar a variação do ângulo com o offset, onde pode ser visualizado na figura 16:

$$\Delta t = \frac{2d\cos\theta}{v} \qquad (9)$$

onde, d é a profundidade entre o receptor e a superfície do mar, v é a velocidade da onda na água e t o período do *ghost*.

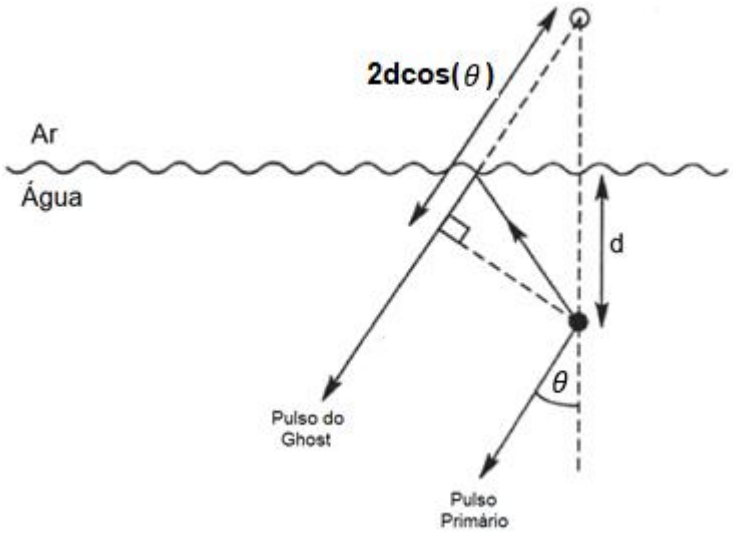

Figura 16: Variação do ângulo de incidência com o offset **(ZHONGYU, WENYING e ET AL., 2017)**.

Se não considerássemos nenhum ângulo de incidência, o período do fantasma para as incidências verticais seria o dobro da distância entre o *streamer* e a superfície do mar, dividido pela velocidade da água próxima da superfície (figura 17).

$$\Delta t = \frac{2d}{v} \qquad (10)$$

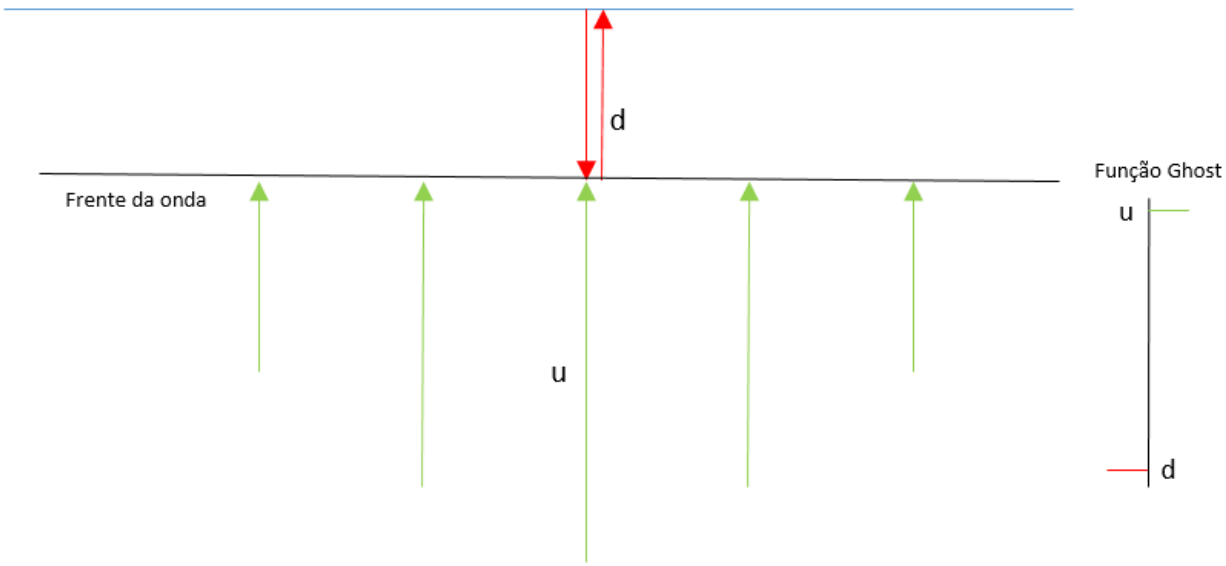

Figura 17: O caminho do raio em vermelho representa a distância adicional percorrida pelo fantasma em relação ao reflexo primário.

Entretanto, com o aumento do ângulo de incidência, o período do *ghost* é reduzido, como ilustrado na figura 18.

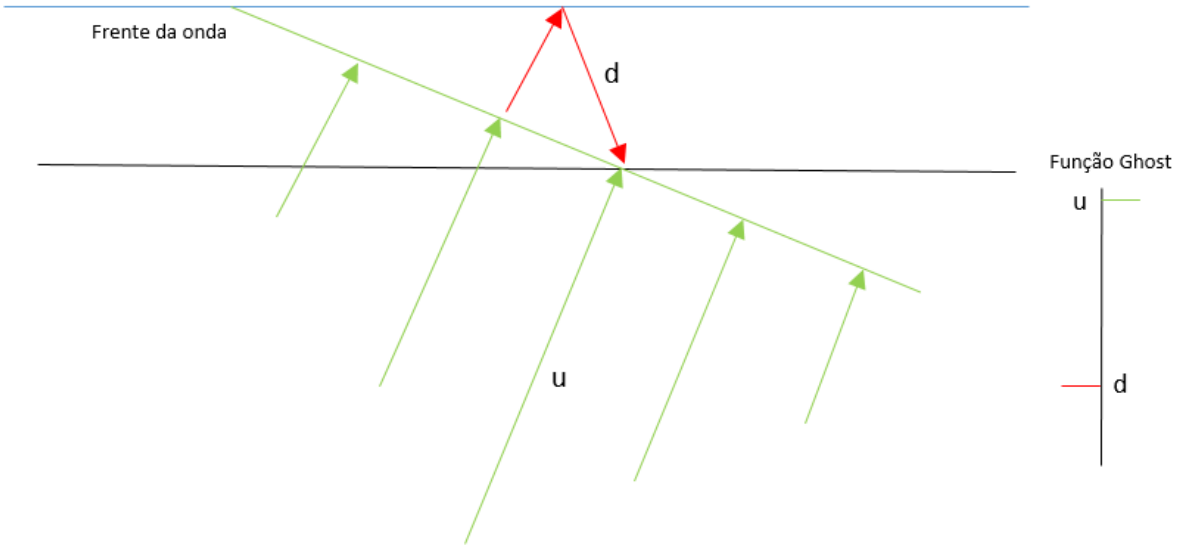

Figura 18: Variação do ângulo no período do ghost – O caminho do raio em vermelho representa a distância adicional percorrida pelo fantasma em relação ao reflexo primário.

3.7.3.3 Velocidade na água

A velocidade da onda na água varia de região para região e depende de uma série de fatores, tais como temperatura e salinidade. Além disso, pode ser mais rápida próxima dos trópicos (até cerca de 1540 m/s) e mais lenta em direção aos polos (até 1465m/s).

A variação da velocidade da onda na água ocasiona mudanças no período do *ghost* assim como o ângulo de incidência, conforme a equação 9. Desta forma uma velocidade apropriada deve ser sempre usada - normalmente é disponilizada em modelagens da fonte ou no relatório de aquisição.

3.7.3.4 Coeficiente de reflexão

Quando uma onda sísmica incide numa interface, parte da energia é transmitida para o outro meio (onda refratada ou transmitida) e parte é refletida de volta para o meio de onde a onda veio (onda refletida). A razão entre a energia refletida e a energia incidente é chamada coeficiente de reflexão (YILMAZ, 1993).

Se a superfície do mar fosse perfeitamente horizontal, o coeficiente de reflexão seria igual à -1. Porém isso não é observado nos dados registrados devido aos ruídos e à rugosidade existente no fundo do mar.

3.7.4 Modelo do fantasma

Os dados sísmicos marinhos são registrados como variações de pressão dentro da água numa certa profundidade, onde o principal interesse são as ondas ascendentes. No entanto, a superfície do mar atua como um refletor quase perfeito, fazendo com que as ondas ascendentes sejam refletidas com um coeficiente de reflexão de aproximadamente -1.

Assim, uma onda ascendente registrada no instante t, será refletida no contato água-ar e registrada novamente como uma onda de atraso descendente e de polaridade inversa no tempo t + Δt.

O fantasma registrado pode ser descrito por um modelo que inclui aspectos de propagação de ondas e relações geométricas, conhecido como modelo do fantasma. Ele pode ser escrito em sua forma 1D como funções delta com polaridade oposta e separadas por um atraso Δt.

$$g(t) = \delta(t) - \delta(t - \Delta t), \Delta t \in R \geq 0 \qquad (11)$$

Onde $g(t)$ é a função *ghost*, $\delta(t)$ é a função delta de Dirac. A subtração nessa equação indica que o coeficiente de reflexão na superfície do mar é negativo, e Δt restrito aos números reais positivos exige causalidade, isto é, a onda ascendente é causal em relação à descendente.

A propriedade da convolução de uma transformada de Fourier afirma que uma convolução no tempo corresponde a uma multiplicação no domínio de Fourier. Por dualidade, a operação inversa também funciona da mesma forma, onde P é o campo de onda primário:

$$\mathcal{F}(g(t) * p) \leftrightarrow G(f).P(f) \tag{12}$$

$$g(t) * p \leftrightarrow \mathcal{F}^{-1}\{G(f).P(f)\} \tag{13}$$

A expressão do domínio da frequência para o campo de onda do P(f) pode ser escrita a partir das equações 12 e 13:

$$P(f) = \left(1 - e^{-i2\pi f\,\Delta t}\right) * U(f) \tag{14}$$

O atraso Δt depende de parâmetros como a profundidade do receptor, ângulo de incidência e velocidade do som na água, como visto na equação 9.

Capítulo 4: Metodologia da Atenuação do Fantasma

O objetivo da atenuação do fantasma é compensar a interferência sísmica destrutiva ocasionada pela reflexão do sinal na lâmina d'água. Essa mudança de polaridade no sinal acarreta a interferência destrutiva da informação nas baixas (fantasma da fonte) e altas frequências (fantasmas da fonte e do receptor) diminuindo a resolução do dado.

Desta forma, o presente trabalho tem o intuito de apresentar operadores que são capazes de atenuar o *ghost* da informação útil, sendo eles um operador derivado criado utilizando filtro de Wiener e outro utilizando o operador proprietário da ION Geophysical. Dada a geometria da aquisição e, a partir da equação 9, considerando a velocidade da água 1535m/s, são esperados os seguintes *notches*:

Profundidade do receptor: 8.5m → 1ª ordem *notch* @90.3Hz

Profundidade da fonte: 7m → 2ª ordem *notch* @110Hz

O dado foi disponibilizado em 4ms e, de acordo o teorema de *Nyquist,* onde a taxa de amostragem deve ser maior que duas vezes a frequência que desejamos analisar do sinal, foi possível observar que a rampa de corte do dado decai próximo a 125Hz (figura 19) . Sendo assim, não será possível analisar o *notch* de segunda ordem da fonte. Se o dado estivesse em 2ms, sua rampa de corte seria próximo a 250Hz, possibilitando a visualização deste *notch*.

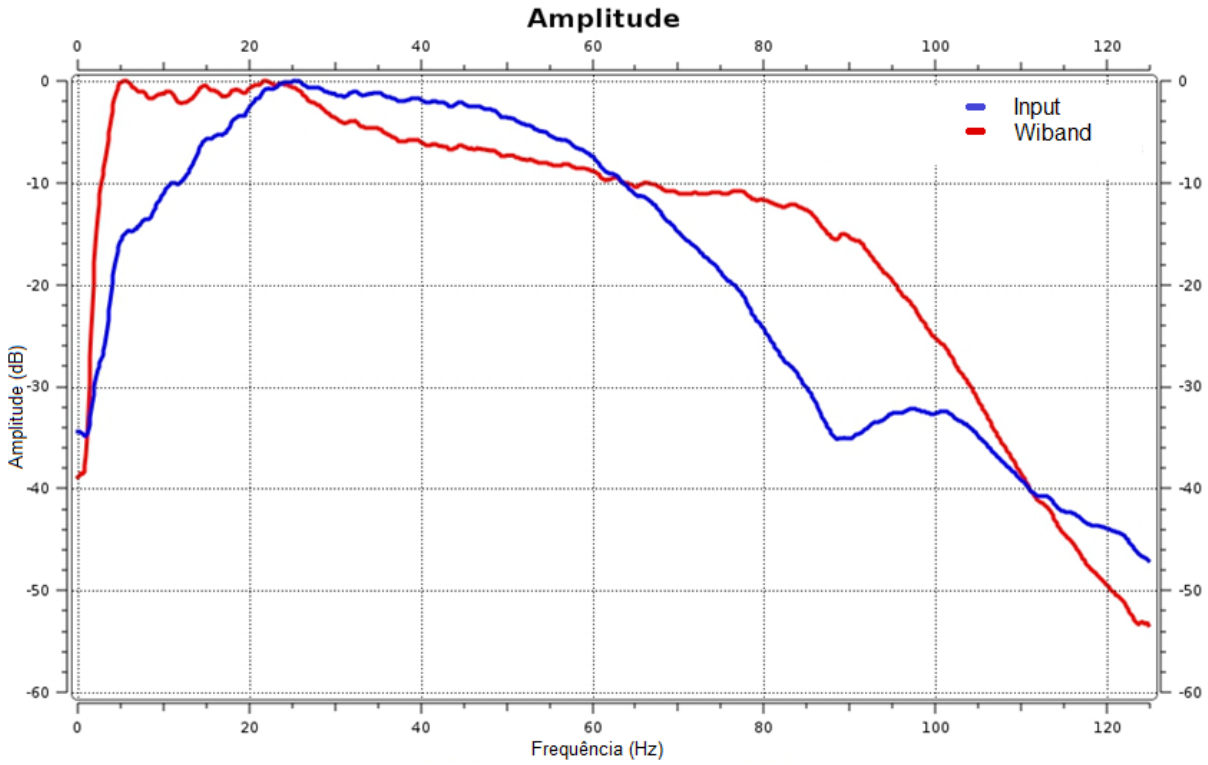

Figura 19: Espectro de amplitude do dado utilizado a fim de demonstrar a rampa de corte próximo a 125Hz.

A linha sísmica utilizada foi a 81 e o dispositivo de aquisição era composto por 2 fontes, 14 cabos e 9072 canais. Nesse estudo apenas os cabos 7 e 13 serão apresentados.

Antes de chegar à etapa do de*ghost*, o dado precisou passar por alguns processos, como: conversão do formato SEG-Y para o formato interno da empresa, carregamento das coordenadas UTM corretas da fonte e do receptor (geometria), edição dos traços, denoise e debubble.

4.1 Atenuação através do filtro de Wiener

Com o intuito de demostrar a aplicação da teoria na atenuação do fantasma, um operador foi derivado a partir de um pulso criado com os parâmetros de importância para o *Ghost*, isto é, profundidade da fonte e do receptor, velocidade da água e coeficiente de reflexão. O operador foi aplicado em um único canal, portanto não houve variação ângular a ser considerada.

Apesar da estimativa da profundidade da fonte e do receptor, optou-se por seguir uma abordagem estatística quanto a profundidade dos mesmos, visando descartar as possíveis flutuações que causam inconsistência nos parâmetros de aquisição. Desta forma, a partir da análise do dado de entrada, onde foi possível observar um *notch* em 89Hz e, a partir da equação 9, foi determinada a profundidade de 8,6m para o receptor. Em consequência da perda das baixas frequências, não foi possível determinar o *notch* de primeira ordem da fonte, portanto essa profundidade não foi determinada para uso na criação do filtro.

Em seguida, para criar o operador inverso foi utilizado o filtro de Wiener, onde foi possível converter o pulso criado com o evento do *ghost* em um pulso primário. O filtro calculado foi, então, convolvido com o dado de entrada, com o objetivo de atenuar o *Ghost*, como ilustrado no esquema da figura 20.

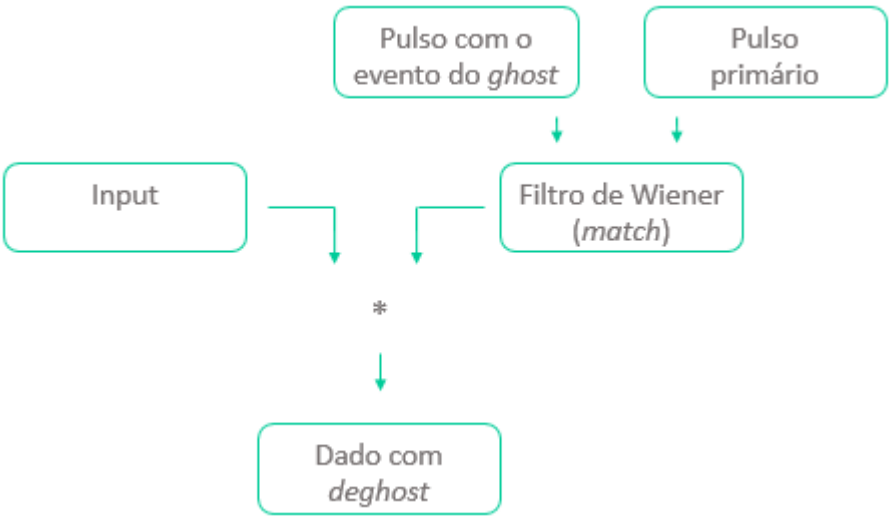

Figura 20: Fluxo de criação e aplicação do filtro de Wiener

4.2 Atenuação através do *Wiband*

Para meio de comparação, o *Ghost* também foi atenuado a partir de uma tecnologia mais elaborada, utilizada pela empresa ION Geophysical. Sendo assim, o método do d*eghost* para um dado em larga escala ocorreu em duas etapas. Primeiramente foi feita uma correção da variação ângular (parâmetro do raio), onde se teve o intuito de retirar a dependência ângular, já que este método foi aplicado em mais de um canal. Em seguida, foi criado um filtro inverso que também foi convolvido com o dado a fim de atenuar o *Ghost*, como ilustrado na figura 21.

Figura 21: Fluxo de deghost pela ION.

4.2.1 Correção do parâmetro do raio

A dependência do ângulo de incidência é uma variável que deve ser considerada na atenuação do *ghost* devido à sua variação com o *offset*. A variação do ângulo ocasiona mudanças no período do *ghost* e é predominantemente em função da geometria da aquisição, vide figuras 17 e 18, para o caso de um levantamento marítimo convencional. Desta forma, uma correção foi aplicada usando algoritmos baseados em migração Stolt e/ou variantes da correção NMO.

4.2.2 Aplicação do filtro inverso

Após a correção do parâmetro do raio, um operador inverso foi aplicado no dado, onde sua parametrização levou em consideração a variação da profundidade da fonte e do receptor e o coeficiente de reflexão. O algoritmo do filtro construído foi resultado de uma busca em janelas pelos parâmetros ótimos de sinal/ruído e coeficiente de reflexão, de modo a atenuar os notches presentes no dado.

4.3 Aplicação do filtro zero fase e compensação do fator Q

Para uma melhor interpretação dos eventos e melhor comparação entre os resultados, foi aplicado um filtro zero fase e um filtro inverso Q somente em fase. O filtro zero fase converteu o traço sísmico de fase mínima para fase zero, geralmente através do filtro de Wiener, permitindo o ajuste da amplitude com a refletividade do evento. Já o filtro inverso Q corrigiu a fase que rotacionou com o aumento do tempo de viagem da onda sísmica, gerando maior estabilidade de fase.

4.4 Migração

A fim de se verificar o efeito do *deghost* na migração, foi aplicada a etapa da migração após aplicação do filtro zero fase e do filtro inverso Q. Nesta etapa, os eventos foram realocados para sua verdadeira posição em subsuperfície, evitando uma

interpretação errônea dos eventos. Para isto, foi realizada uma migração *Kirchhoff* em profundidade com abertura de 6km.

Capítulo 5: Resultados

Com o intuito de demonstrar a importância do d*eghost* no dado sísmico, o presente trabalho apresentou resultados gerados a partir do filtro de Wiener e, para meio de comparação, também gerou-se resultados a partir de tecnologias mais elaboradas utilizada pela ION Geophysical. As imagens foram analisadas no domínio do canal, bem como seus espectros, para a linha 81, vide figura 22.

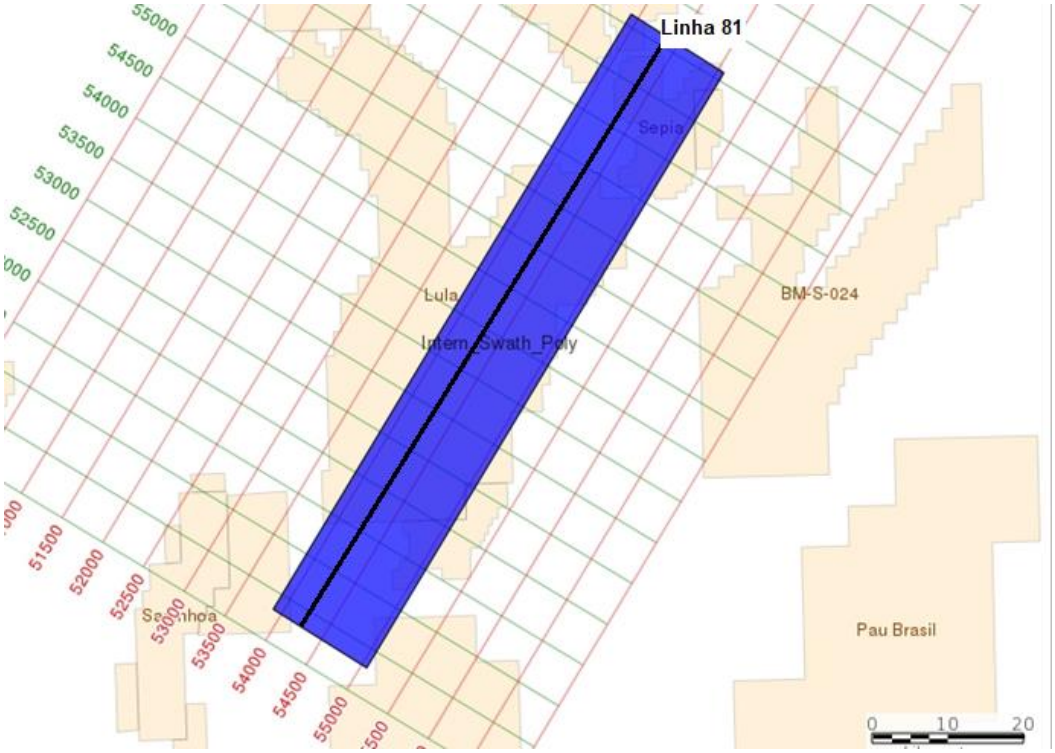

Figura 22: Linha 81 no polígono do projeto.

5.1 Resultados a partir do filtro de Wiener e do *Wiband*

Nas figuras 23, 24 e 25 pode-se visualizar o *input*, o *deghost* a partir do filtro de Wiener e o *deghost* a partir do Wiband para a linha 81, canal 3901, 762m distante da fonte.

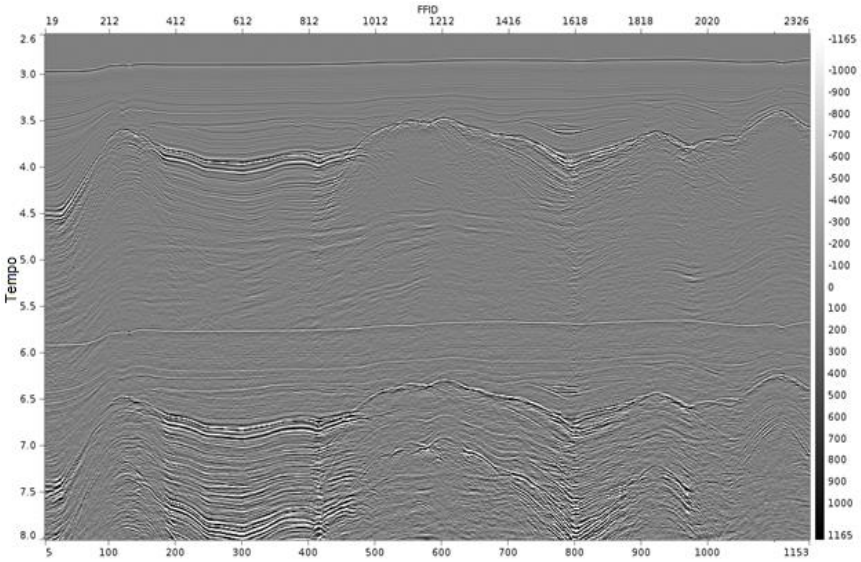

Figura 23: Dado de entrada sem *deghost* aplicado da linha 81 - Canal 3901 - 762m distante da fonte.

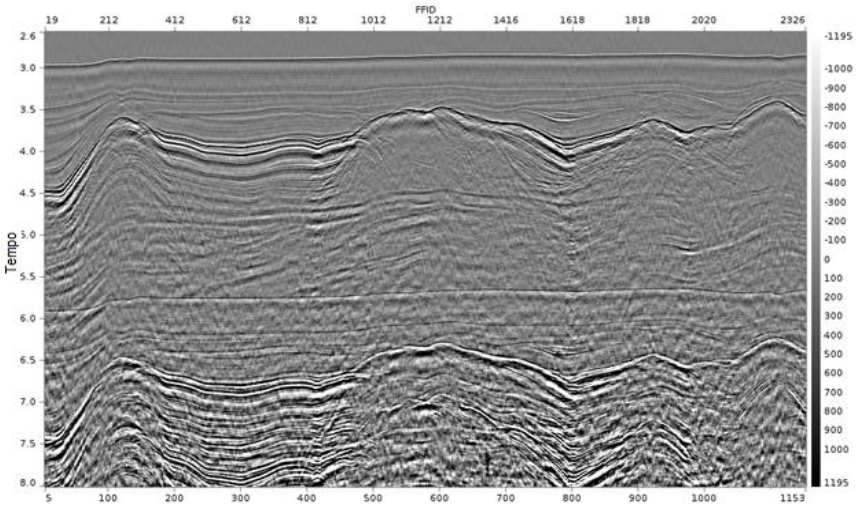

Figura 24: Dado com *deghost* aplicado a partir do filtro de Wiener na linha 81 - Canal 3901 - 762m distante da fonte.

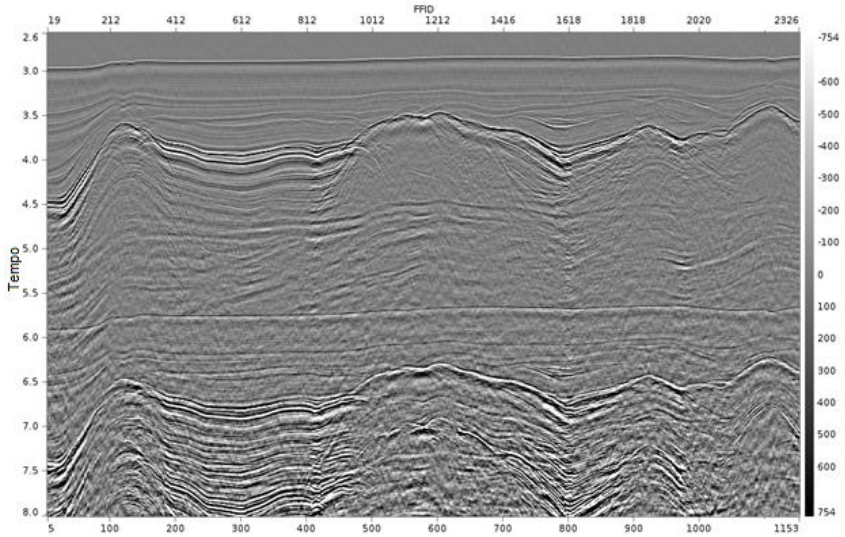

Figura 25: Dado com *deghost* aplicado a partir do *Wiband* na linha 81 - Canal 3901 - 762m distante da fonte.

Um zoom foi aplicado no dado, vide figura 26, com o intuito de facilitar a visualização dos eventos.

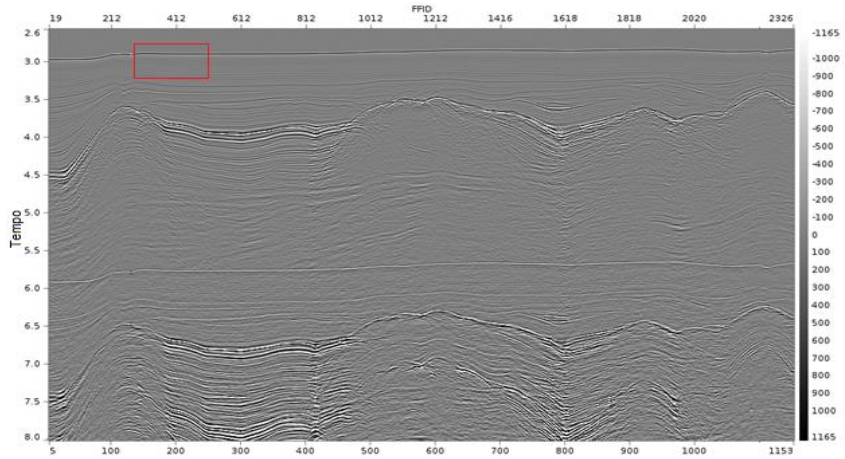

Figura 26: *Zoom* no dado com o intuito de facilitar a visualização dos eventos - linha 81 - Canal 3901 - 762m distante da fonte.

Na figura 27 foi possível observar o *ghost* sendo atenuado. O *ghost* pode ser visualizado no pico preto abaixo do pico do fundo do mar.

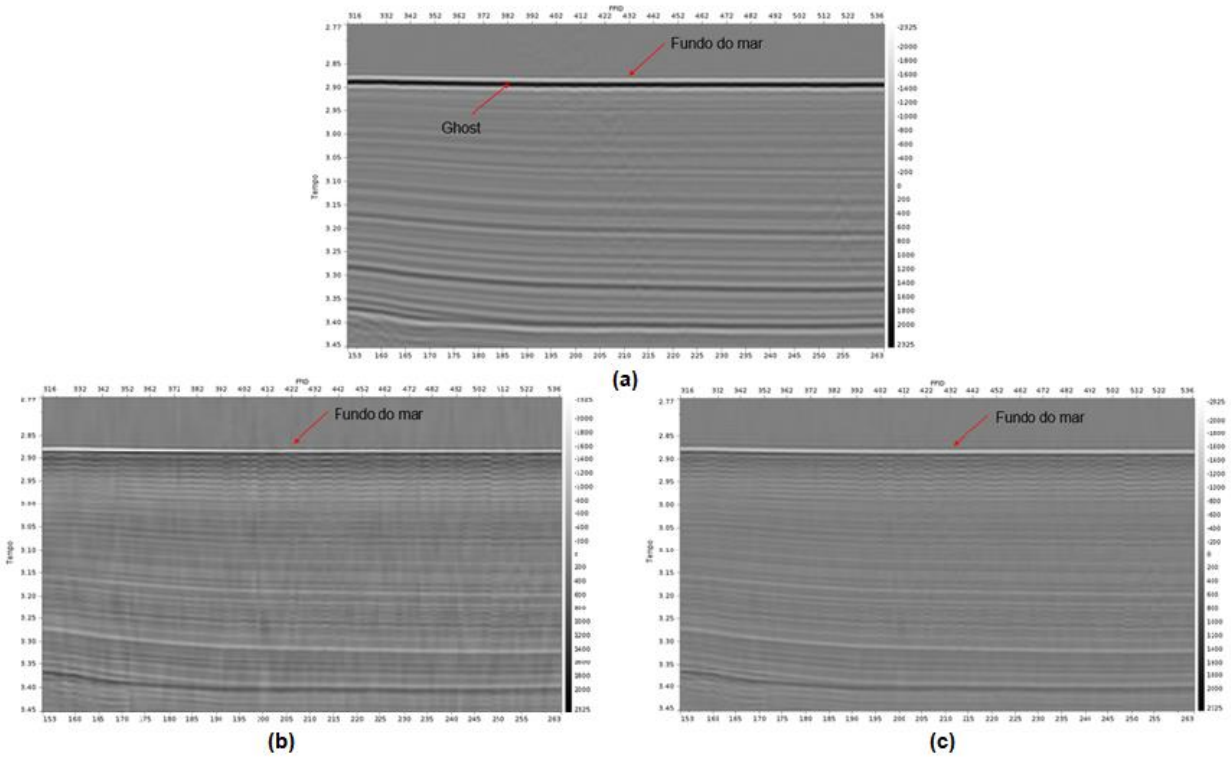

Figura 27: Dado com *zoom* com o intuito de facilitar a visualização dos eventos – Linha 81 - Canal 3901 - 762m distante da fonte. Em (a) dado de entrada sem a aplicação do *deghost*, em (b) dado com *deghost* aplicado a partir do filtro de Wiener, em (c) dado com *deghost* aplicado a partir do *Wiband.*

Para melhor análise do resultado gerado nos traços, observou-se o dado em *wiggle* na figura 28, onde foi possível avaliar o *deghost* realizado através do filtro de Wiener e pelo *Wiband*, sendo notória a sua eficiência na sísmica, onde o sinal primário sofre menos influência do fundo do mar e o *ghost* é atenuado.

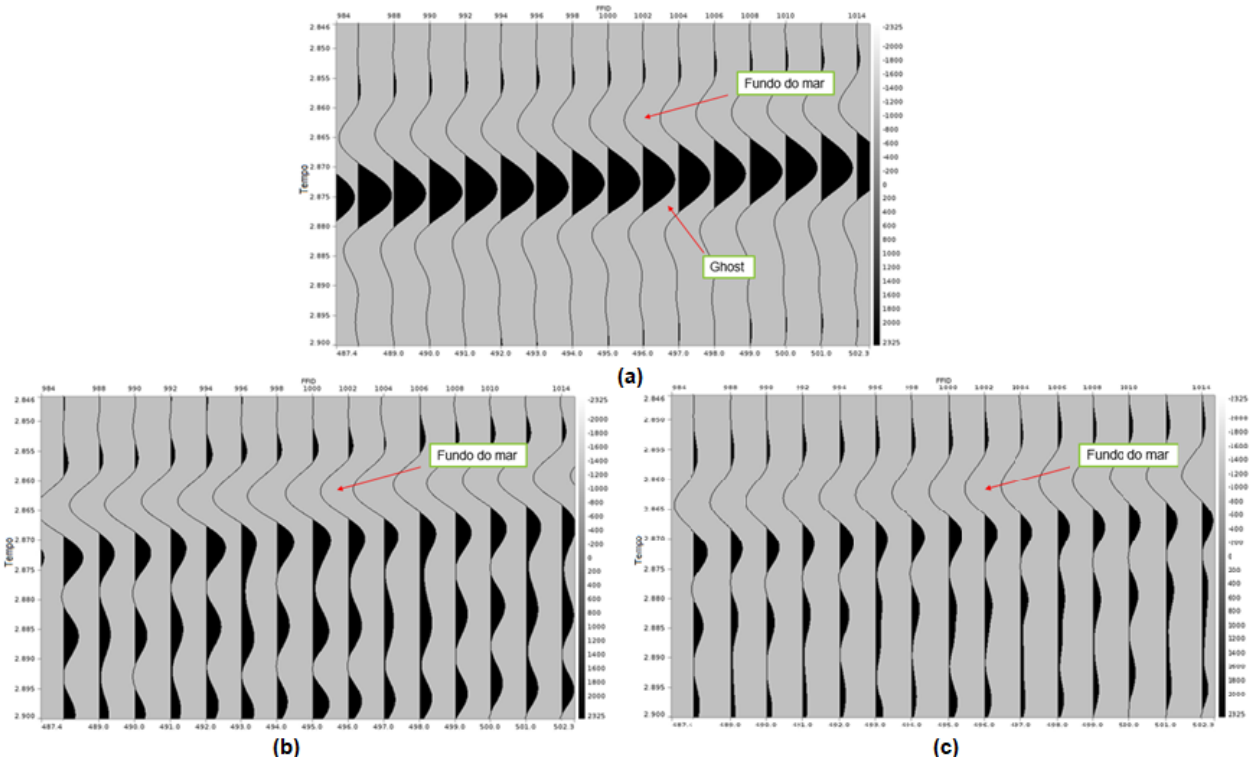

Figura 28: Para melhor análise do resultado gerado nos traços da linha 81 – canal 3901 – 763m distante da fonte, em (a) o dado de entrada sem aplicação do deghost, em (b) o dado com deghost aplicado a partir do filtro de Wiener e em (c) o dado com deghost aplicado a partir do Wiband.

Foi criada uma janela para a construção do espectro de amplitude, FX e FK, vide figura 29.

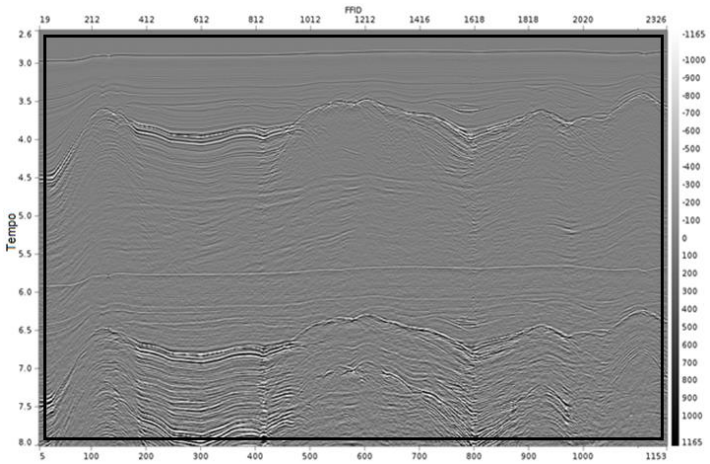

Figura 29: Janela do espectro de amplitude, FX e FK do *input*, do *deghost* a partir do filtro do Wiener e do *Wiband*.

Com o espectro de amplitude, na figura 30, foi possível observar a recuperação do notch em 89Hz, bem como as baixas frequências sendo recuperadas. Notou-se uma melhor atenuação pelo operador *Wiband* e um maior conteúdo de ruídos levantados pelo operador derivado a partir do filtro de Wiener.

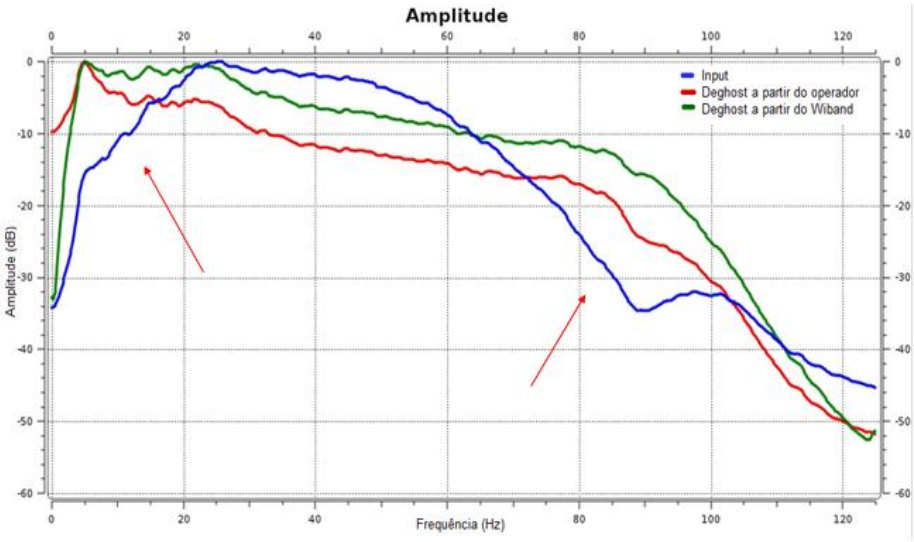

Figura 30: Espectro de amplitude do dado de entrada, do *deghost* a partir do filtro do Wiener e do *Wiband*.

Nos espectros FX, figura 31, foi possível observar um resultado satisfatório de ambos os *deghosts*, onde foi perceptível o preenchimento dos buracos ocasionados pela interferência destrutiva do fantasma.

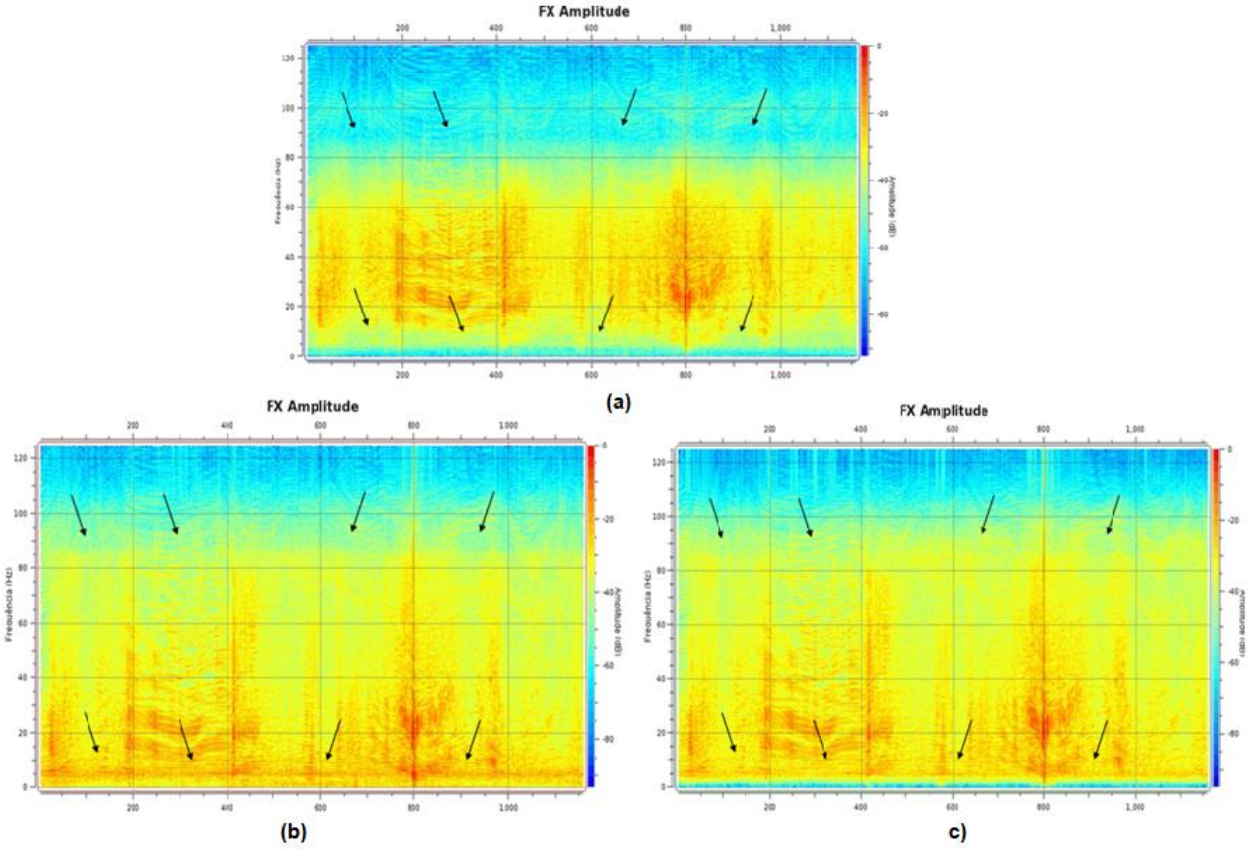

Figura 31: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número de traços. Em (a) o espectro FX do dado de entrada sem o deghost aplicado, em (b) o espectro FX do dado com *deghost* aplicado a partir do filtro de Wiener e em (c) o espectro FX do dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband. Setas pretas: buracos ocasionados pelo *ghost* sendo recuperados.

Nos espectros FK, figura 32, foi possível observar além do preenchimento dos buracos ocasionados pelo *ghost*, os ruídos de baixa frequência sendo mais levantados pelo operador derivado.

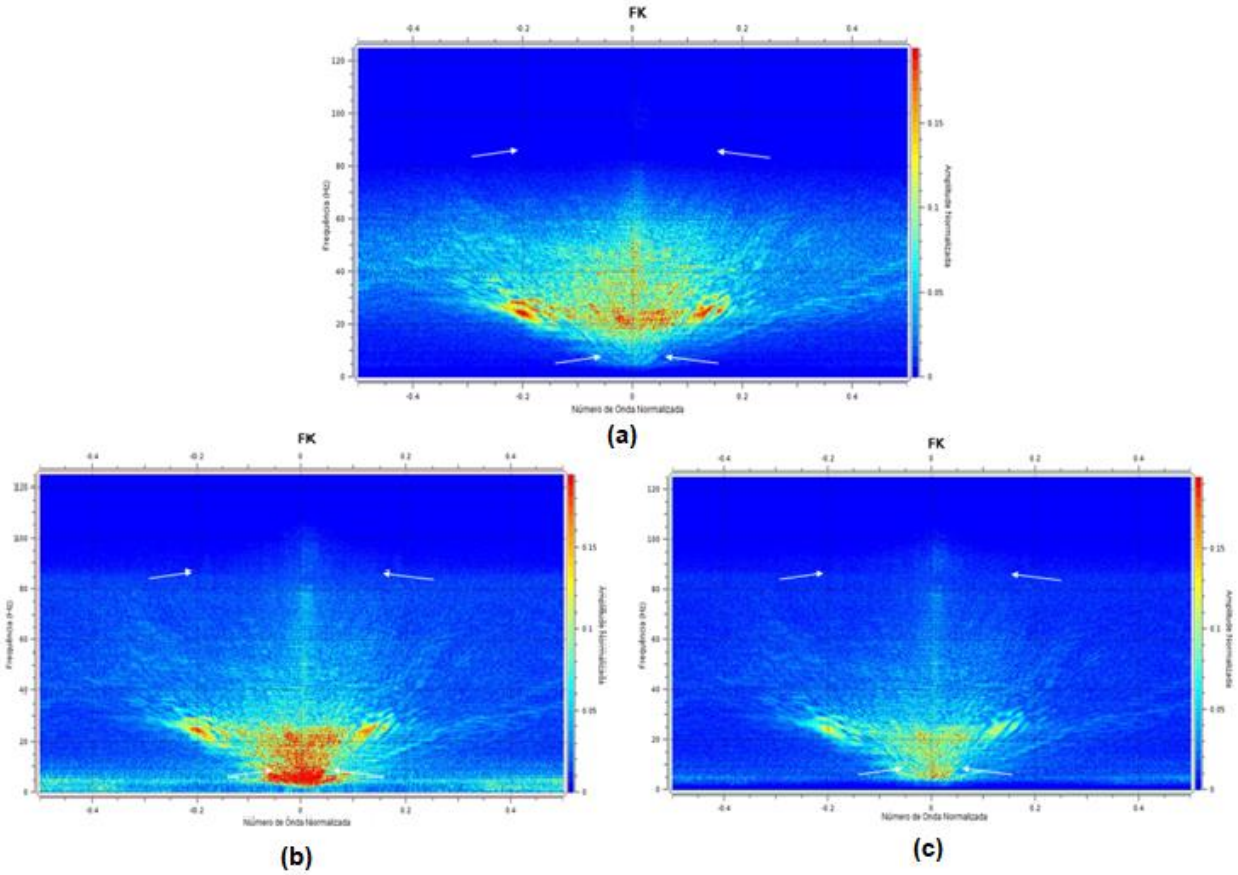

Figura 32: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número da onda normalizada. Em (a) o espectro FK do dado de entrada sem o deghost aplicado, em (b) o espectro FK do dado com *deghost* aplicado a partir do filtro de Wiener e em (c) o espectro FK do dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband. Setas brancas: buracos ocasionados pelo *ghost* sendo recuperados.

5.1.1 Dados com filtro zero fase e compensação do fator Q

O *ghost* gera interferência nos eventos sísmicos, desta forma, em busca de um melhor pré-condicionamento a fim de se colocar a onda na convenção de que a refletividade é o pico e, a fim de corrigir distorções de fase, foi aplicado um filtro zero fase e um filtro inverso Q somente em fase nos dados, vide figuras 36, 37 e 38.

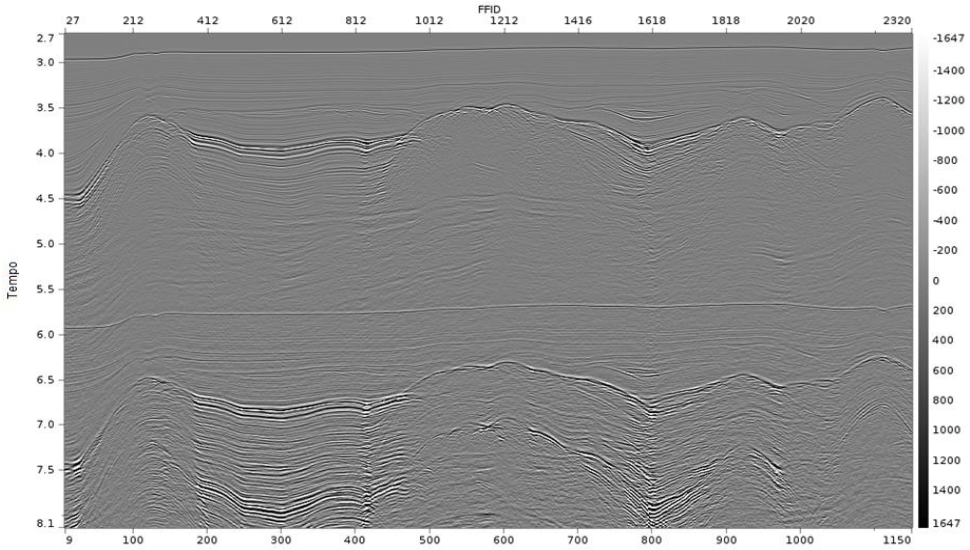

Figura 33: Dado de entrada da linha 81 com filtro zero fase e compensação do fator Q aplicados - Canal 3901 - 762m distante da fonte.

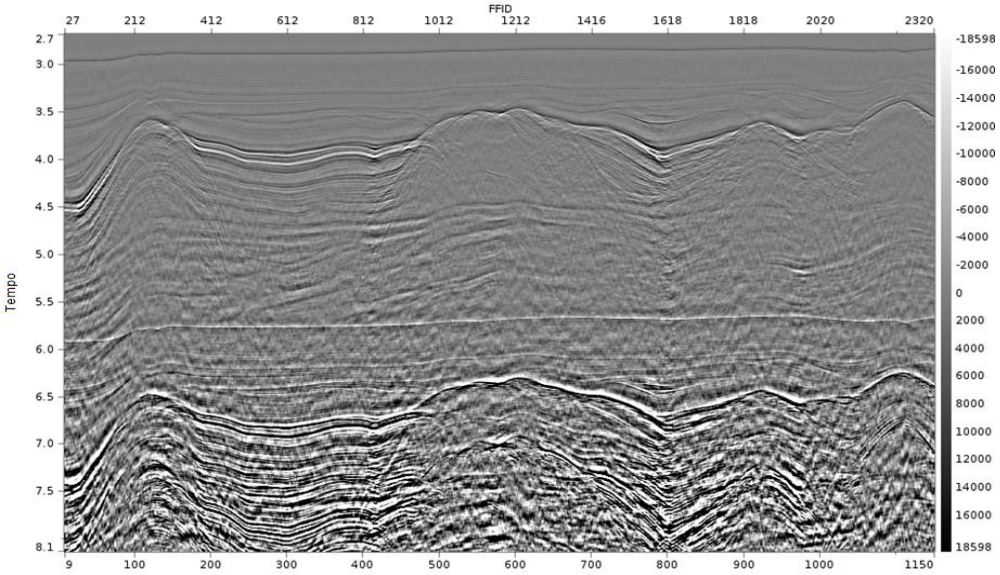

Figura 34: Dado com *deghost* a partir do filtro de Wiener da linha 81 com filtro zero fase e compensação do fator Q aplicados - Canal 3901 - 762m distante da fonte.

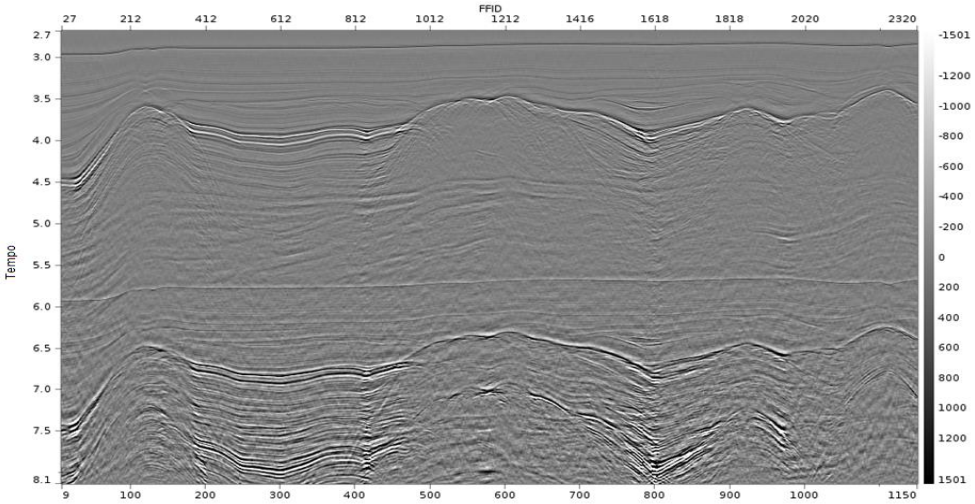

Figura 35: Dado com d*eghost* a partir do Wiband da linha 81 com filtro zero fase e compensação do fator Q aplicados - Canal 3901 - 762m distante da fonte.

Um zoom foi aplicado no dado, vide figura 39, com o intuito de facilitar a visualização dos eventos.

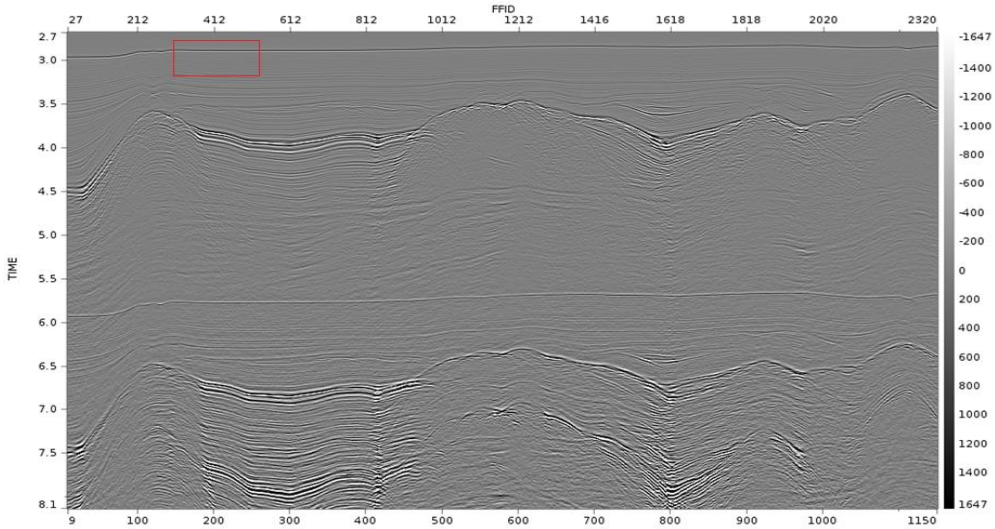

Figura 36: *Zoom* no dado com o intuito de facilitar a visualização dos eventos - linha 81 - Canal 3901 - 762m distante da fonte.

Na figura 40 foi possível observar uma boa eficiência do *deghost* aplicado, como demonstrado pelas setas.

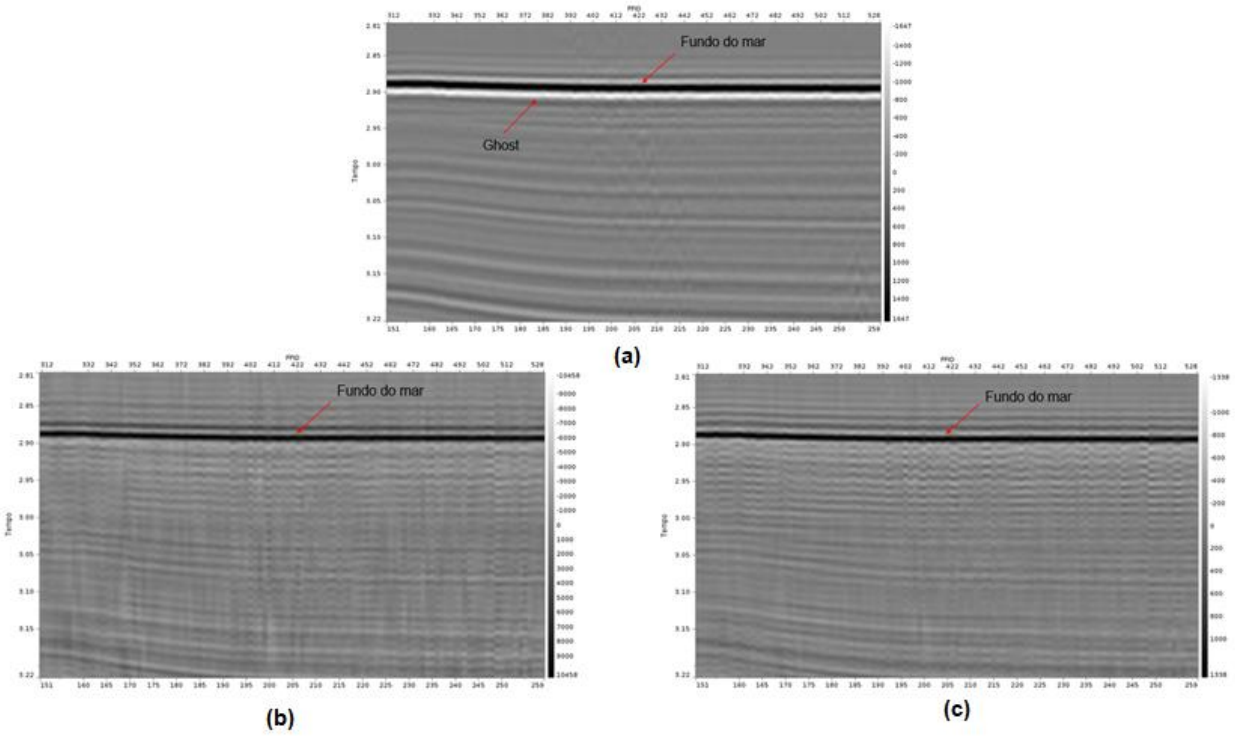

Figura 37: Dado com *zoom* com o intuito de facilitar a visualização dos eventos com filtro zero fase e compensação do fator Q aplicados - Canal 3901 - 762m distante da fonte. Em (a) dado de entrada sem a aplicação do *deghost*, em (b) dado com *deghost* aplicado a partir do filtro de Wiener, em (c) dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband.

Na Janela em *wiggle,* nas figura 38, foi possível notar melhor a mudança na polaridade e a atenuação do *ghost* realizado pelo filtro de Wiener e pelo *Wiband*.

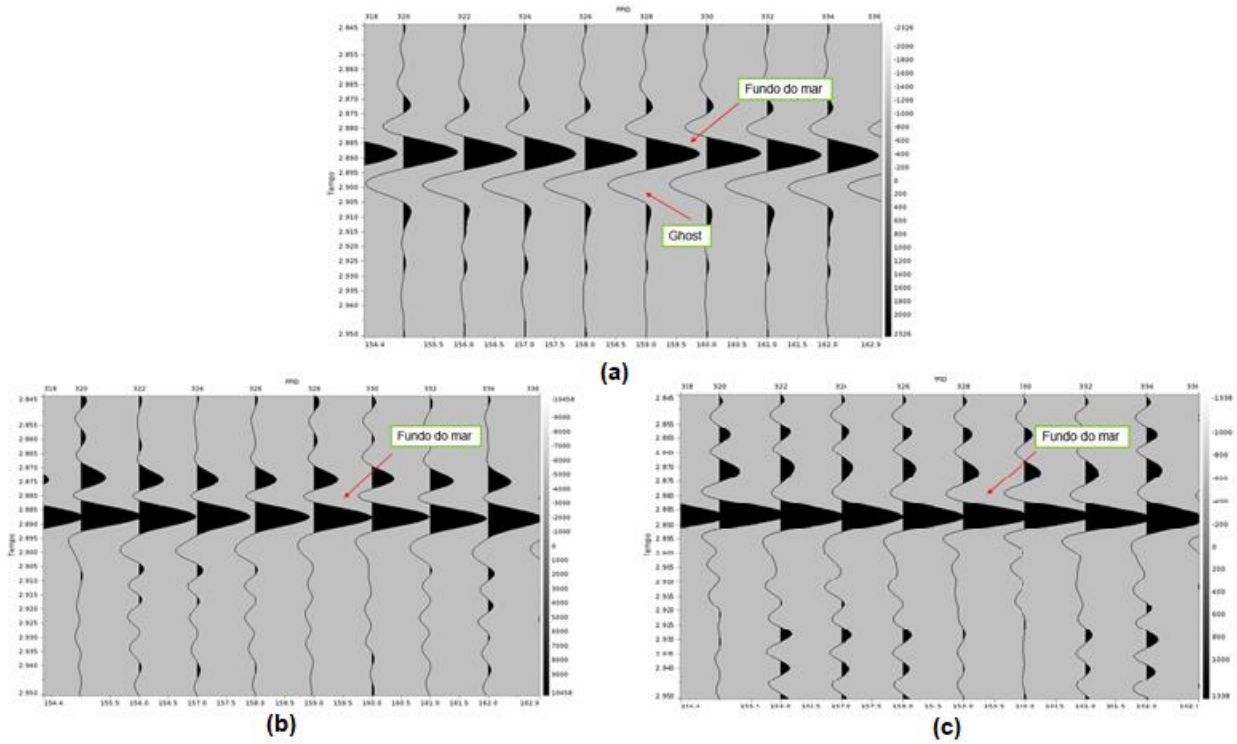

Figura 38: Para melhor análise do resultado gerado nos traços da linha 81 com filtro zero fase e compensação do fator Q aplicados - Canal 3901 - 762m distante da fonte, em (a) o dado de entrada sem aplicação do *deghost*, em (b) o dado com *deghost* aplicado a partir do filtro de Wiener e em (c) o dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband.

Foi criada uma janela para a construção do espectro de amplitude, FX e FK, vide figura 39.

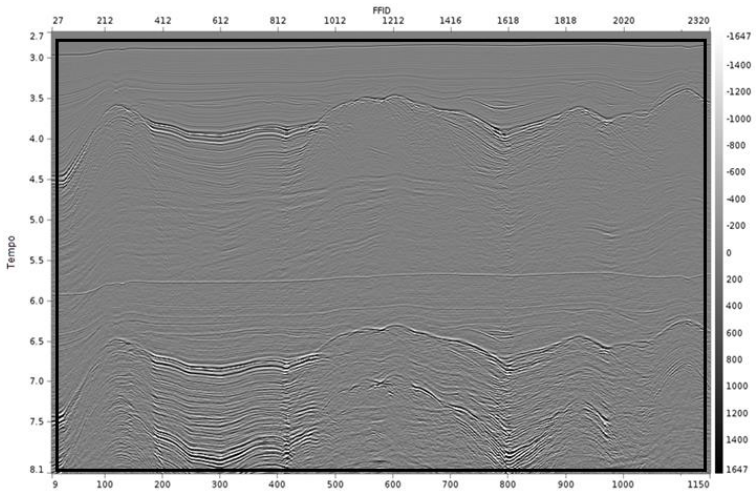

Figura 39: Janela do espectro de amplitude, FX e FK do *input*, do *deghost* a partir do filtro do Wiener e do Wiband com filtro zero fase e compensação do fator Q aplicados.

No espectro de amplitude, na figura 40, foi possível observar o preenchimento dos notches, uma melhor atenuação pelo operador *Wiband* e os ruídos de baixa frequência sendo mais levantados pelo operador derivado através do filtro de Wiener.

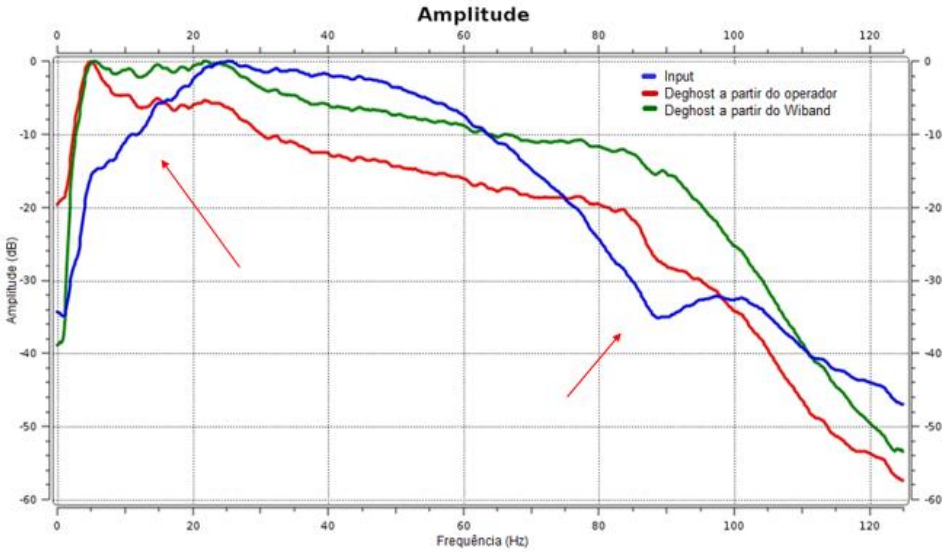

Figura 40: Espectro de amplitude do dado de entrada, do *deghost* a partir do filtro de Wiener e do Wiband com filtro zero fase e compensação do fator Q aplicados.

Nos espectros FX, figura 41, foi possível observar o preenchimento dos buracos ocasionados pela interferência destrutiva do fantasma.

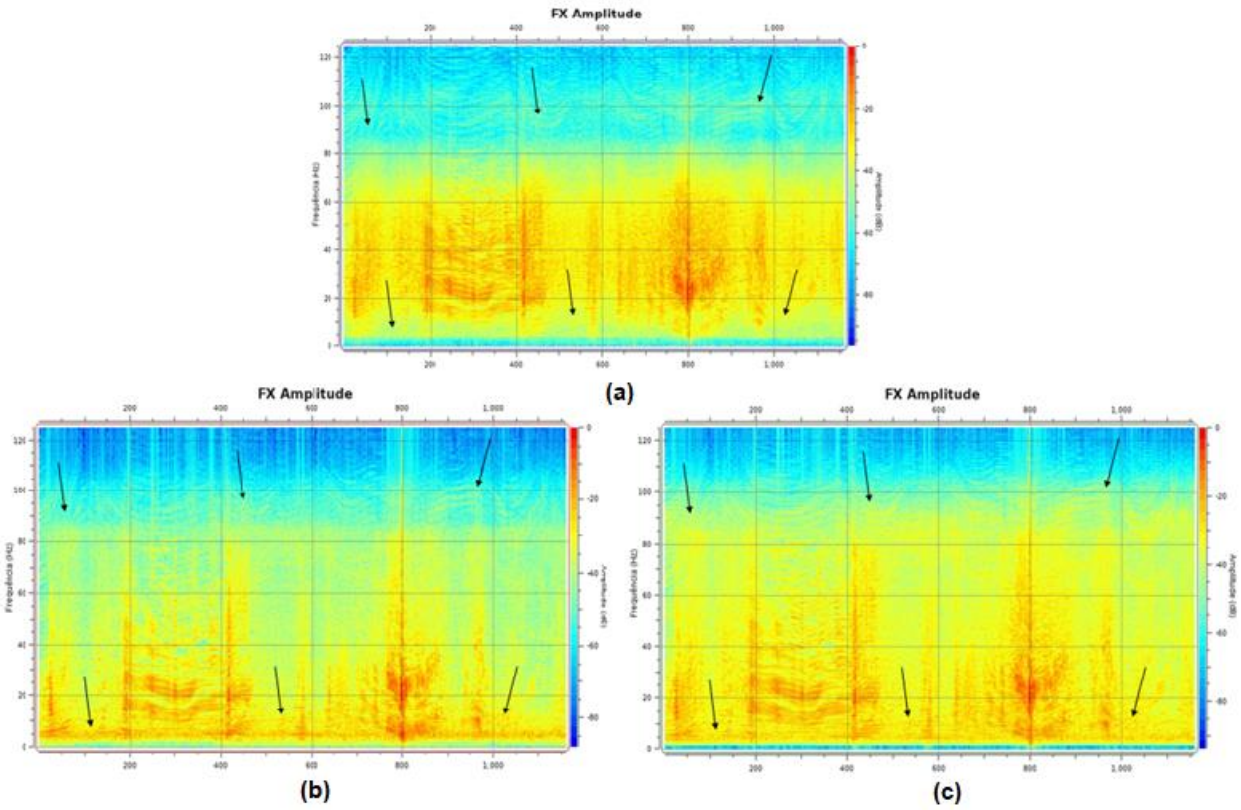

Figura 41: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número de traços. Dado com filtro zero fase e compensação do fator Q aplicados. Em (a) o espectro FX do dado de entrada sem o *deghost* aplicado, em (b) o espectro FX do dado com *deghost* aplicado a partir do filtro de Wiener e em (c) o espectro FX do dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband. Setas pretas: buracos ocasionados pelo *ghost* sendo recuperados.

Nos espectros FK, figura 42, foi possível observar o preenchimento dos buracos ocasionados pelo *ghost.* Em k0 observa-se a energia das frequências mais altas serem preenchidas com energia superior a do operador derivado a partir do filtro de Wiener.

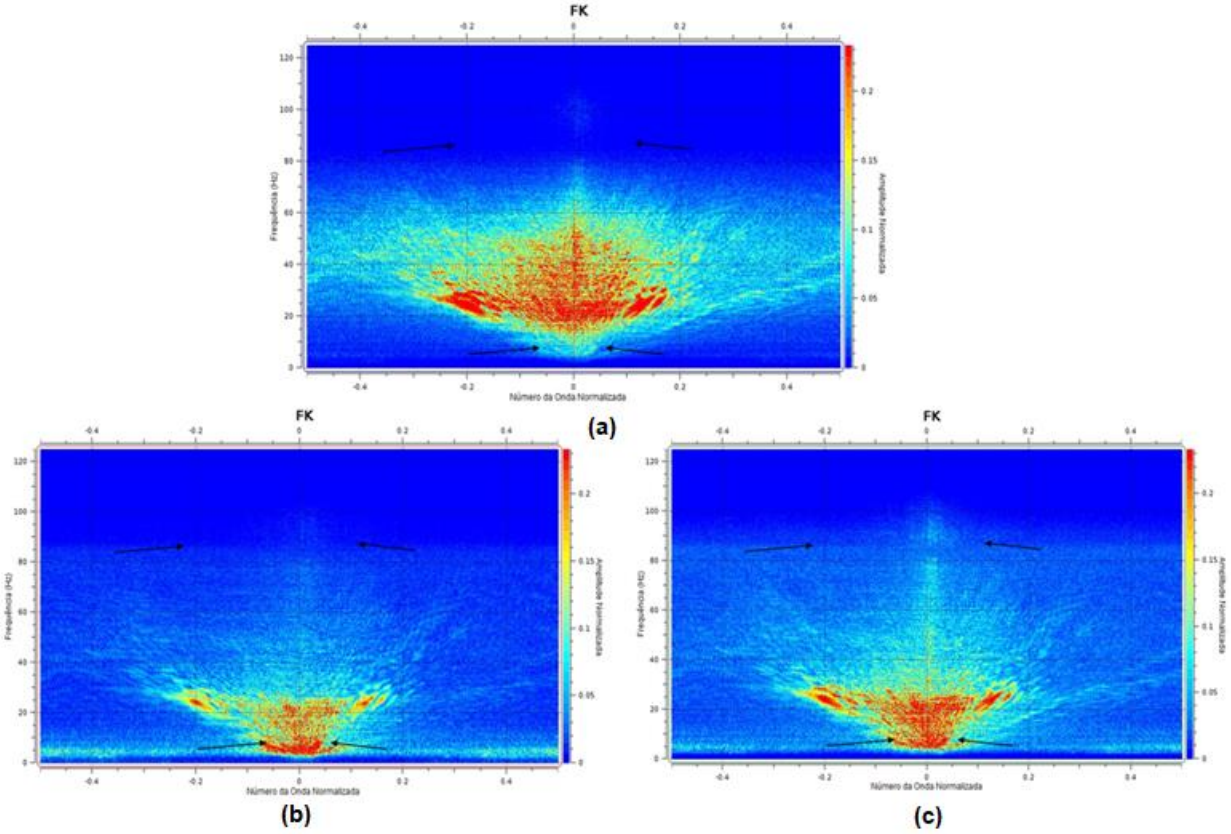

Figura 42: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número da onda normalizada. Dado com filtro zero fase e compensação do fator Q aplicados. Em (a) o espectro FK do dado de entrada sem o *deghost* aplicado, em (b) o espectro FK do dado com *deghost* aplicado a partir do filtro de Wiener e em (c) o espectro FK do dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband. Setas pretas: buracos ocasionados pelo *ghost* sendo recuperados.

5.2 Resultados do *Wiband* em diferentes ordenamento dos traços

Como visto anteriormente, o operador *Wiband* atenuou melhor o *ghost* do que o operador derivado a partir do filtro de Wiener devido à sua tecnologia industrial mais elaborada. Vale destacar que o operador foi derivado para aplicação em apenas um canal, já o método utilizado pela ION Geophysical é utilizado em larga escala, resolvendo o problema da variação angular de diversos canais através de algoritmos baseados em migração Stolt e/ou variantes da correção NMO.

Desta forma, outros resultados foram analisados a partir da ferramenta de visualização da ION com o objetivo de demonstrar a importância do d*eghost* no dado

sísmico em maior volume. As imagens a seguir foram apresentadas após aplicação do zero fase e do filtro inverso Q no domínio do tiro (*shot*), canal (*near, mid, far*) e *stack* para a linha 81, além dos seus espectros e do dado migrado, sendo possível constatar novamente a eficiência do *deghost* pelo *wiband*.

5.2.1 Resultados no domínio do *shot*

As imagens 43 e 44 foram apresentadas no domínio do tiro (*shot*).

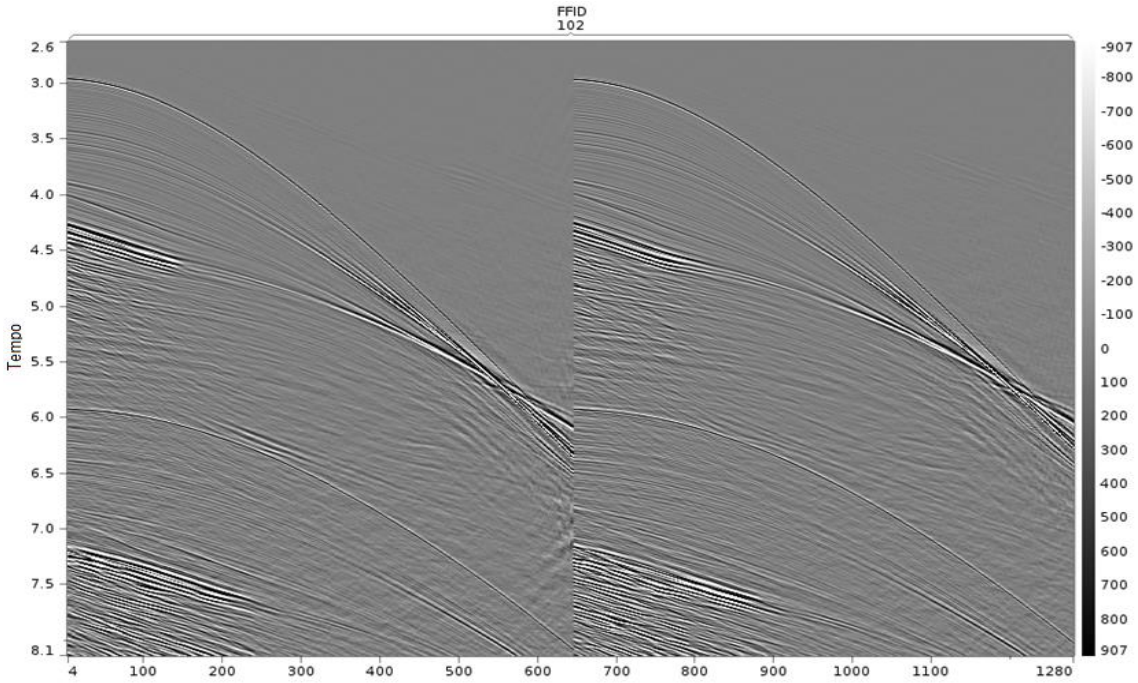

Figura 43: Dado de entrada sem *deghost* aplicado – FFID 1102.

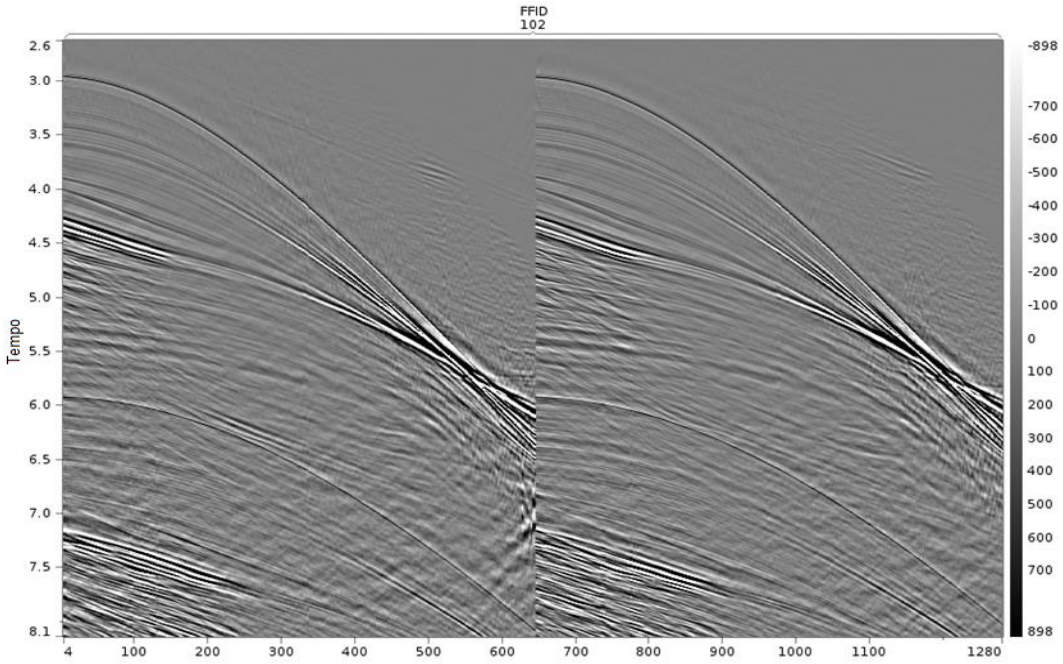

Figura 44: Dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband - FFID 1102.

Um zoom foi aplicado no dado, vide figura 45, com o intuito de facilitar a visualização dos eventos.

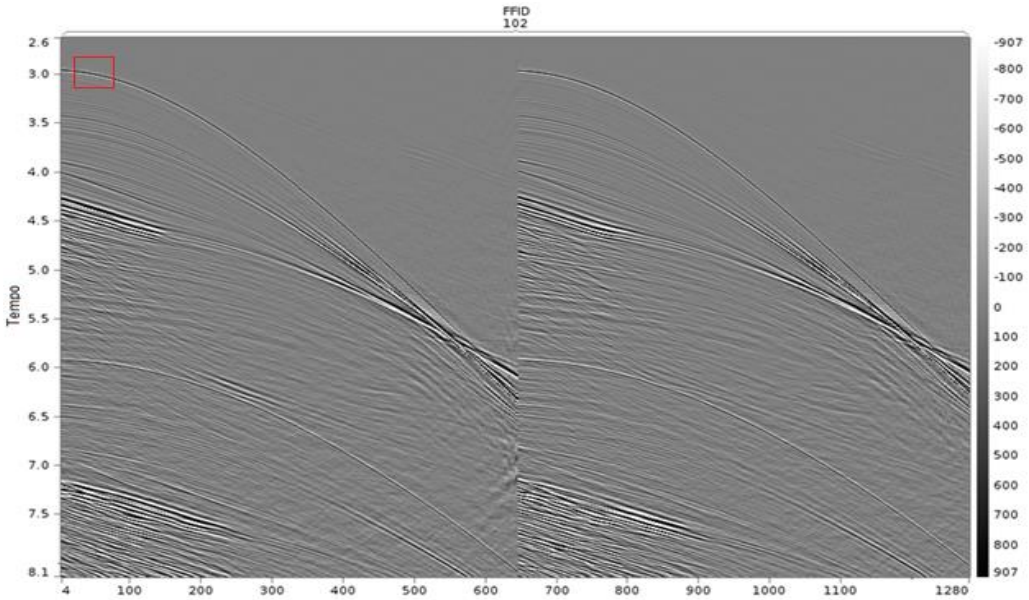

Figura 45: *Zoom* no dado com o intuito de facilitar a visualização dos eventos – FFID 1102.

Na figura 46 foi possível observar o *ghost* sendo atenuado, como demonstrado pelas setas na figura.

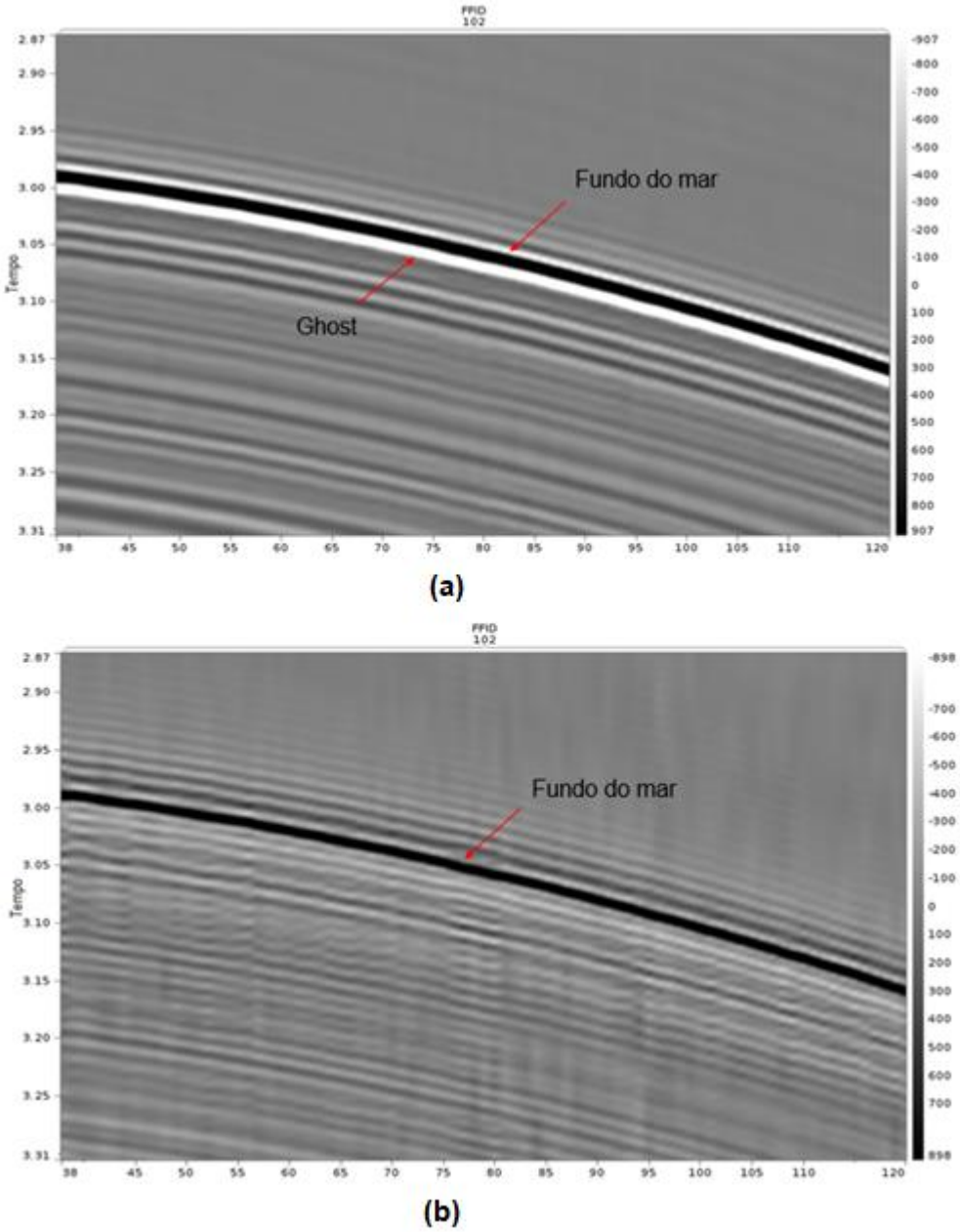

Figura 46: Dado com *zoom* com o intuito de facilitar a visualização dos eventos – FFID 1102. Em (a) dado de entrada sem a aplicação do *deghost*, em (b) dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband, onde o pico do *ghost* esta sendo atenuado.

Com o objetivo de analisar a sísmica em diferentes bandas de frequência, um painel de oitavas foi plotado de 0 a 2Hz, de 2 a 4Hz, de 4 a 8Hz, de 8 a 16Hz e de 16 a 32Hz, sendo possível observar, nas figuras 47 e 48, a eficiência do *deghost* no dado principalmente nos ranges de maiores frequências.

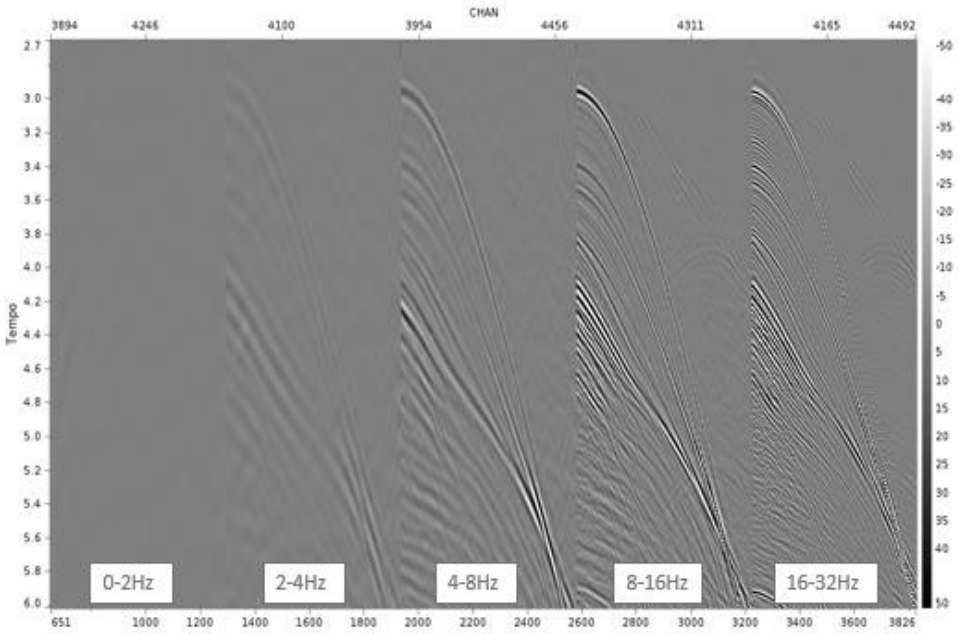

Figura 47: Painel de oitavas do dado de entrada.

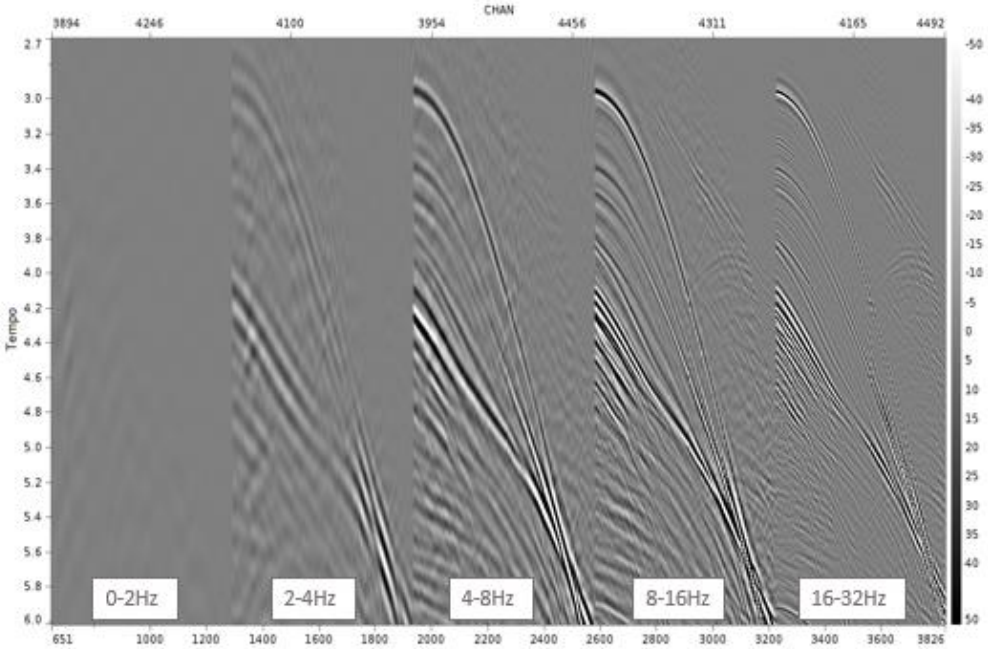

Figura 48: Painel de oitavas do dado após aplicação do *deghost* a partir do Wiband.

Foi criada uma janela para a construção do espectro de amplitude, FX e FK, vide figura 49.

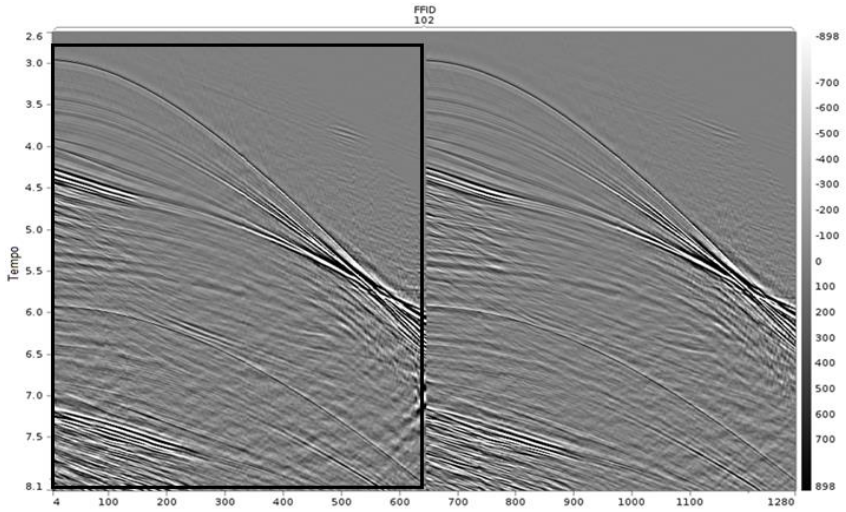

Figura 49: Janela do espectro de amplitude, FX e FK do *input* e do *deghost* a partir do Wiband – FFID 1102.

No espectro de amplitude, figura 50, foi possível observar o preenchimento dos notches, principalmente no notch de primeira ordem (baixa frequência).

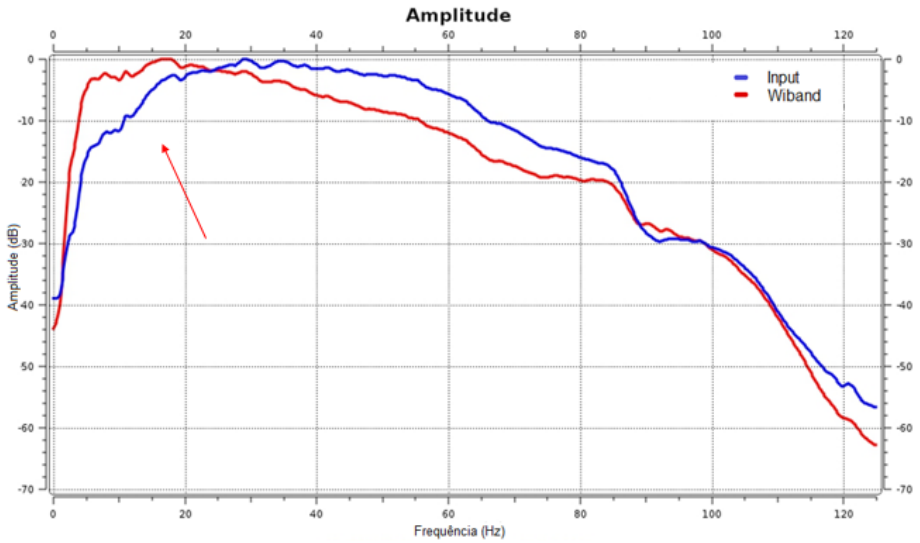

Figura 50: Espectro de amplitude do dado de entrada e do *deghost* a partir do Wiband – FFID 1102.

Nos espectros FX, figura 51, foi possível observar o preenchimento dos buracos ocasionados pela interferência destrutiva do fantasma.

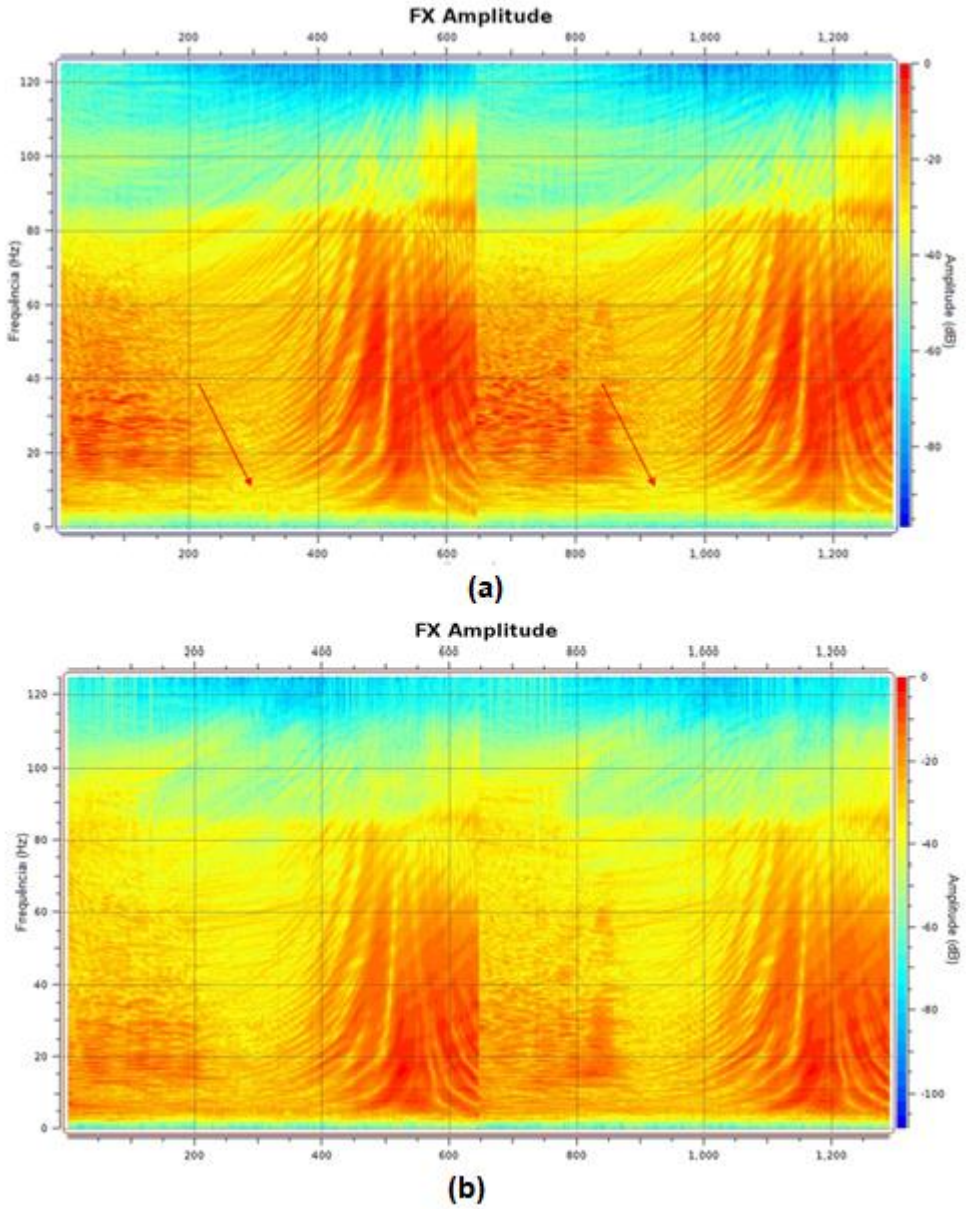

Figura 51: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número de traços. Em (a) o espectro FX do dado de entrada sem o *deghost* aplicado e em (b) o espectro FX do dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband. Seta vermelha: buracos ocasionados pelo ghost – FFID 1102.

Nos espectros FK, figura 52, também foi possível observar o preenchimento dos buracos ocasionados pelo *ghost.*

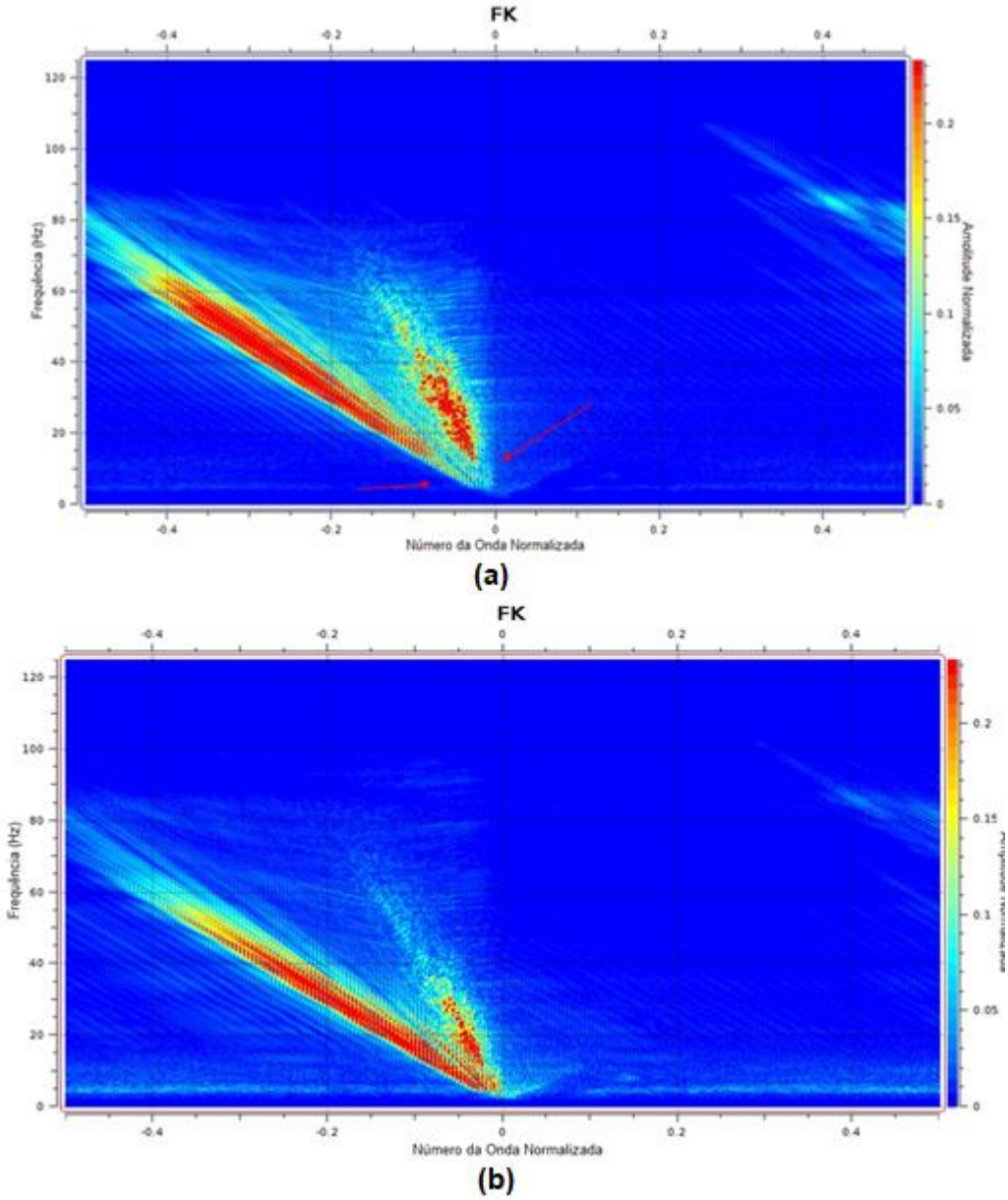

Figura 52: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número da onda normalizada. Em (a) o espectro FK do dado de entrada sem o *deghost* aplicado e em (b) o espectro FK do dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband. Seta vermelha: buracos ocasionados pelo ghost – FFID 1102

5.2.2 Resultados no domínio do canal

Foram ilustrados os canais *near* (canal 3901 – 792 metros distante da fonte), *mid* (canal 4201 – 4512 metros distante da fonte) e *far* (canal 4301 – 5762 metros distante da fonte) a seguir.

Pode-se observar que quanto maior ângulo de incidência, isto é, maior a distância entre o canal e a fonte, mais limitada se torna a atenuação do *ghost*. Isto ocorreu devido ao método ter uma maior dificuldade em sanar o problema da diretividade, principalmente em distâncias maiores, vide canal mid e far. No entanto ainda pode-se perceber um resultado satisfatório na baixa frequência e no espectro central, onde os notches foram atenuados conforme a energia diminui.

5.2.2.1 Canal *near*

Nas figuras 53 e 54 constam o *input* e a atenuação do *ghost* no canal *near* (canal 3901 – 792 metros distante da fonte).

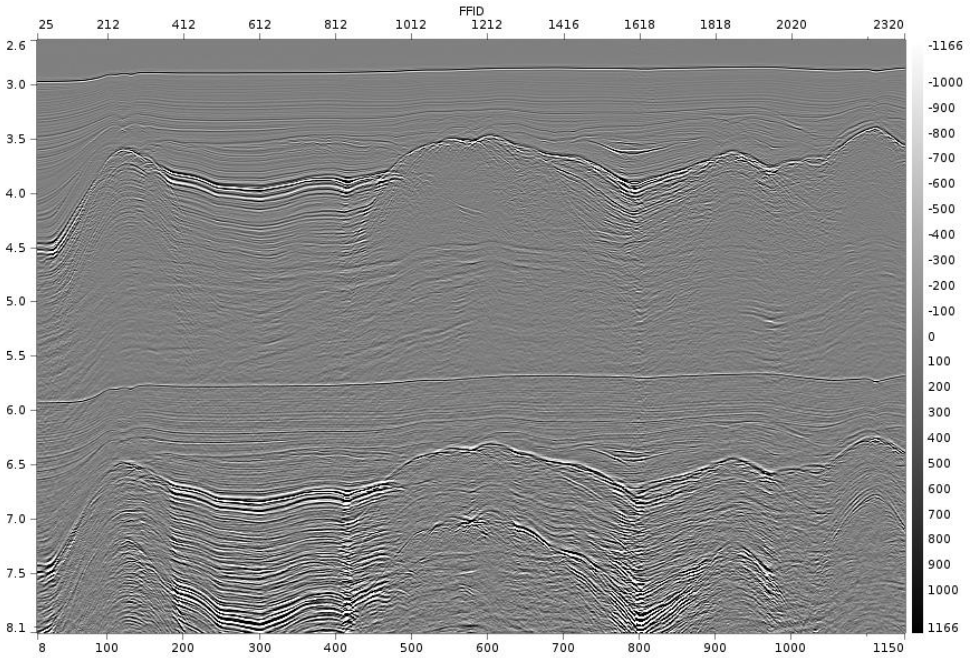

Figura 53: Dado de entrada sem *deghost* aplicado - Canal 3901 – 762m distante da fonte.

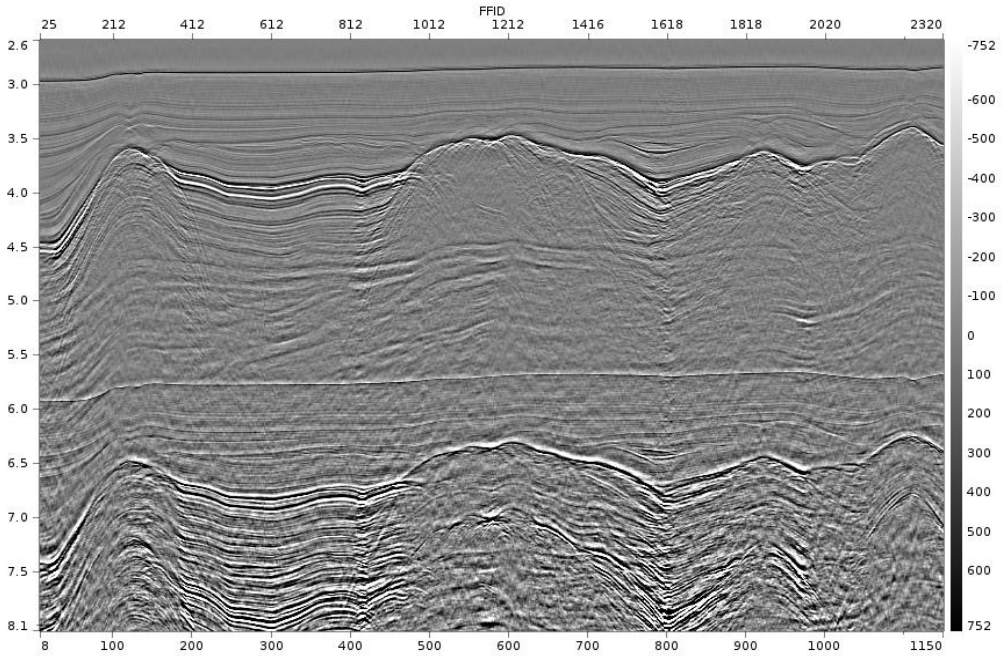

Figura 54: Dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband - Canal 3901 – 762m distante da fonte.

Um zoom foi aplicado no dado, vide figura 55, com o intuito de facilitar a visualização dos eventos.

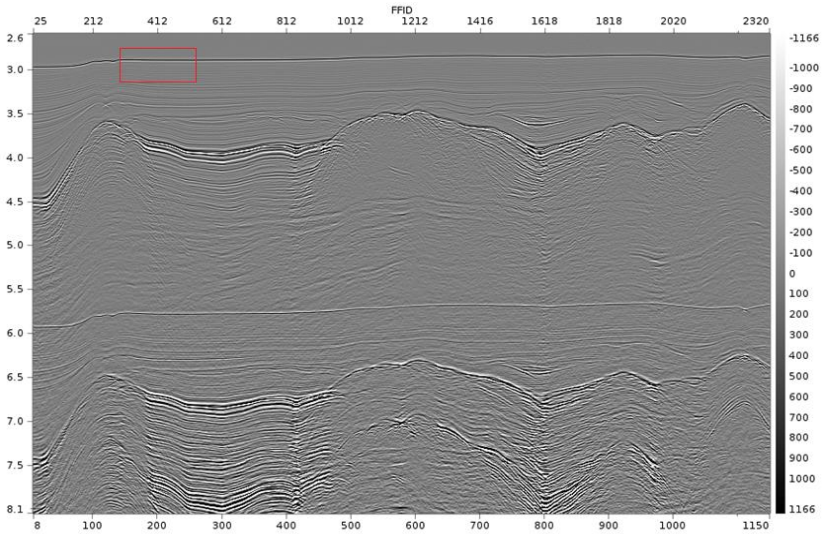

Figura 55: *Zoom* no dado com o intuito de facilitar a visualização dos eventos - Canal 3901 – 762m distante da fonte.

Na figura 56 foi possível observar o *ghost* sendo atenuado.

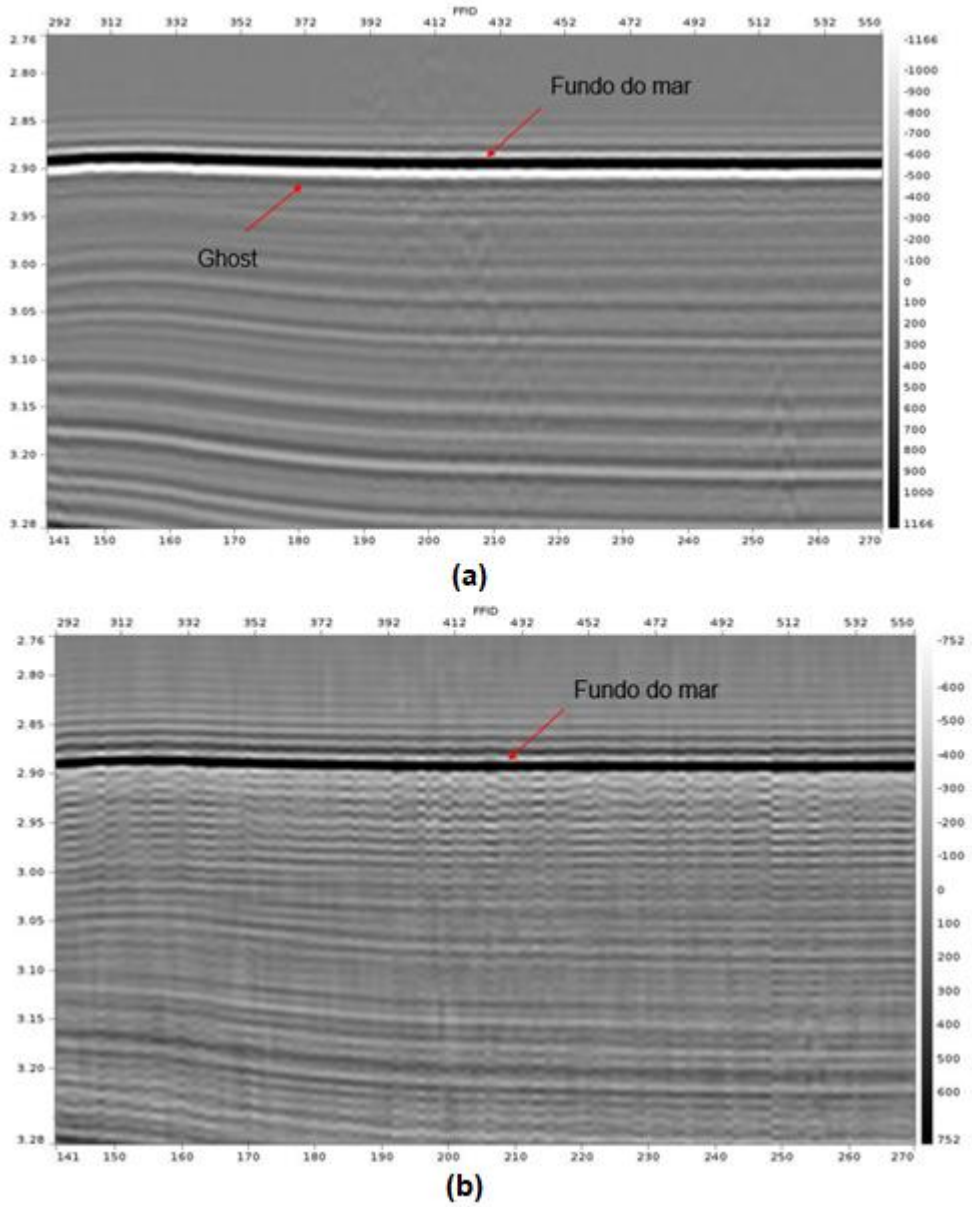

Figura 56: Dado com *zoom* com o intuito de facilitar a visualização dos eventos – Canal 3901 – 762m distante da fonte. Em (a) dado de entrada sem a aplicação do *deghost e* em (b) dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband.

Foi criada uma janela para a construção do espectro de amplitude, FX e FK, vide figura 57.

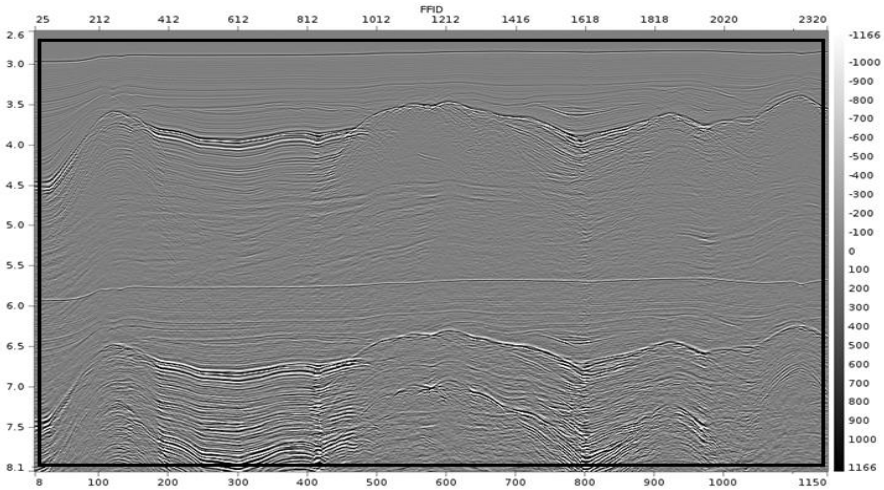

Figura 57: Janela do espectro de amplitude do dado de entrada e do *deghost* a partir do Wiband - Canal 3901 – 762m distante da fonte.

No espectro de amplitude, figura 58, foi possível observar o preenchimento dos notches, obtendo um resultado de *deghost* bem eficiente.

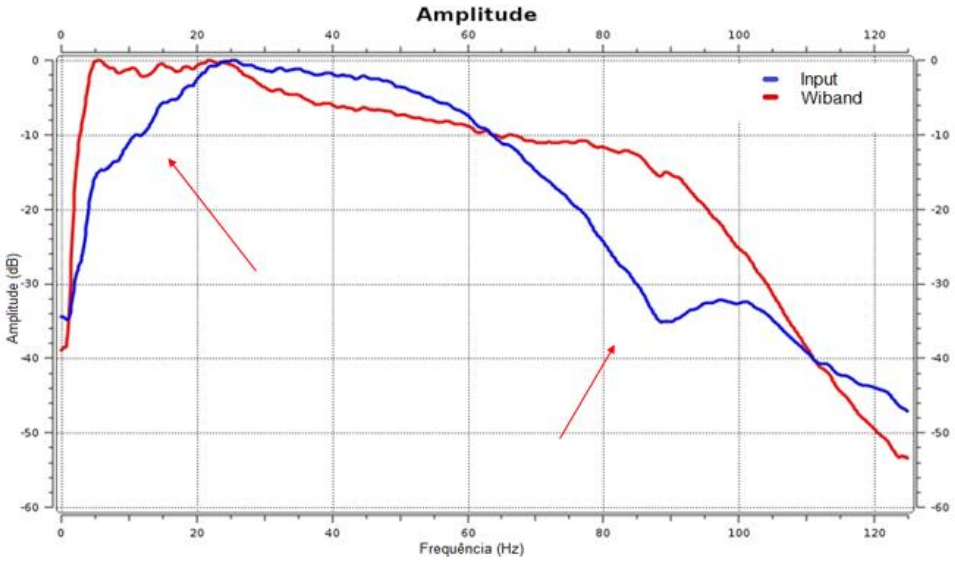

Figura 58: Espectro de amplitude do dado de entrada e do *deghost* a partir do Wiband - Canal 3901 – 762m distante da fonte.

Nos espectros de FX, na figura 59, foi possível observar o preenchimento dos buracos ocasionados pela interferência destrutiva do fantasma.

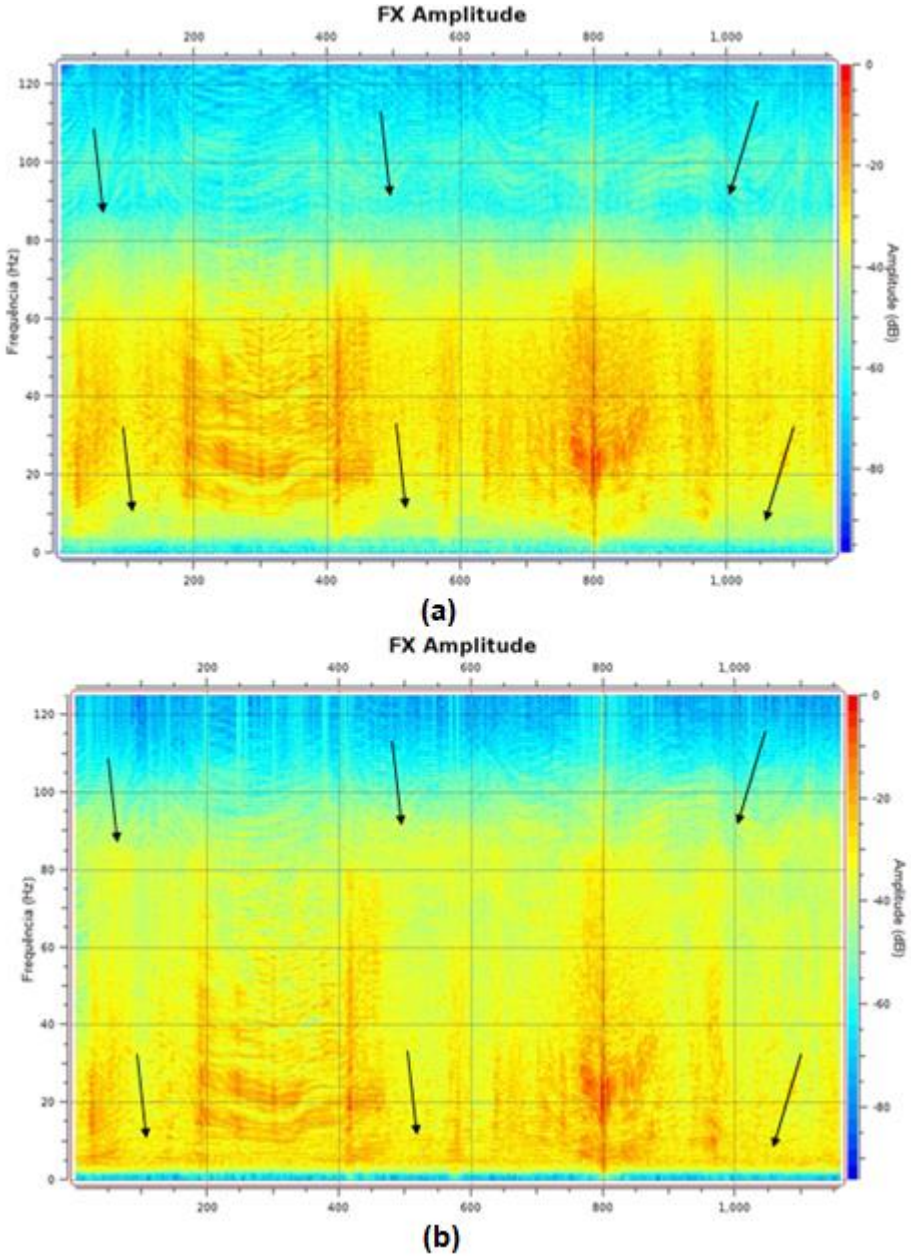

Figura 59: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número de traços. Em (a) o espectro FX do dado de entrada sem o *deghost* aplicado e em (b) o espectro FX do dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband. Setas pretas: buracos ocasionados pelo *ghost* sendo recuperados - Canal 3901 – 762m distante da fonte.

Nos espectros FK, figura 60, também foi possível observar o preenchimento dos buracos ocasionados pelo *ghost.*

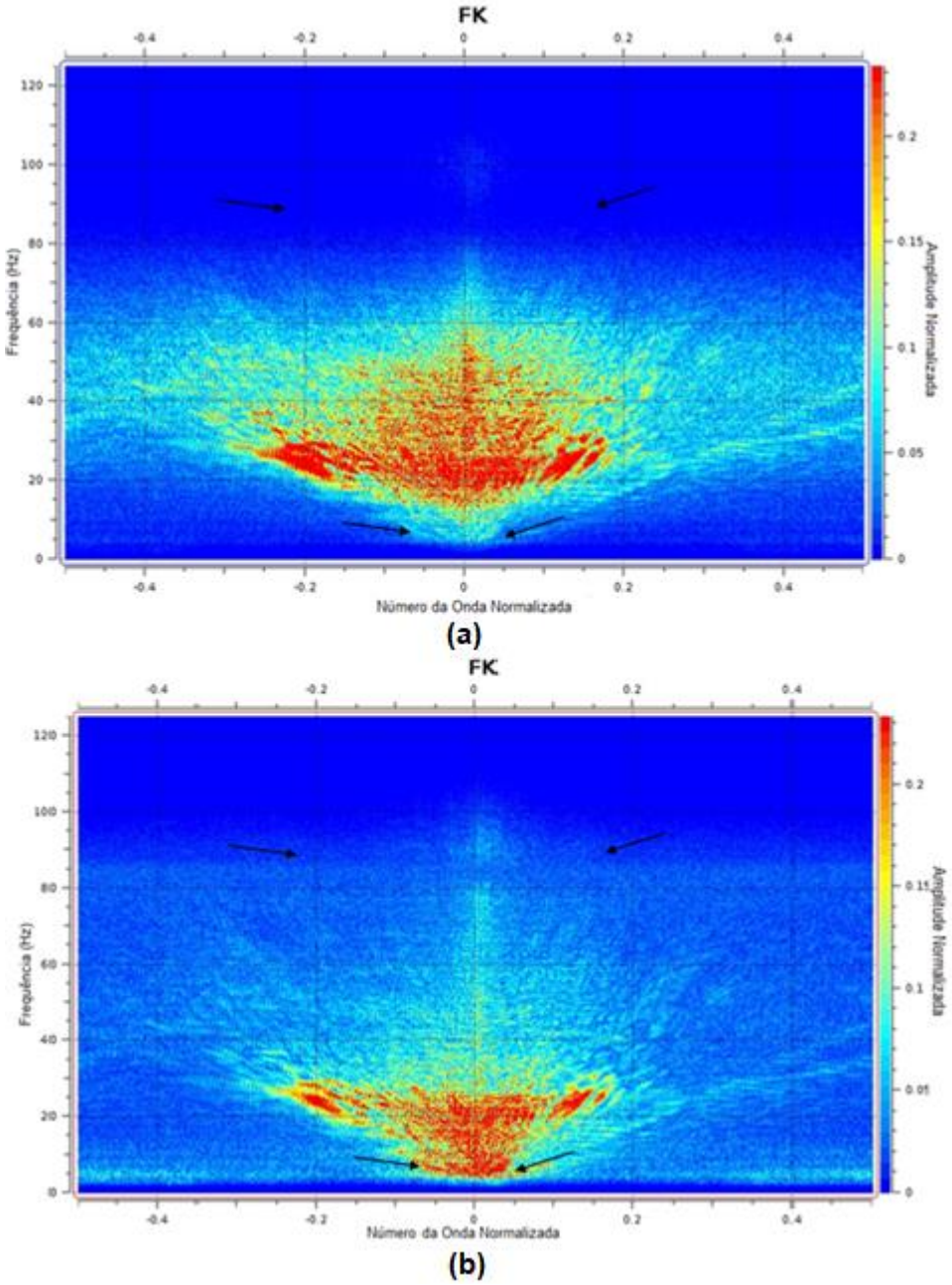

Figura 60: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número da onda normalizada. Em (a) o espectro FK do dado de entrada sem o *deghost* aplicado e em (b) o espectro FK do dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband. Setas pretas: buracos ocasionados pelo *ghost* sendo recuperados - Canal 3901 – 762m distante da fonte

5.2.2.2 Canal *mid*

Nas figuras 61 e 62 constam o *input* e a atenuação do *ghost* no canal *mid* (canal 4201 – 4512 metros distante da fonte).

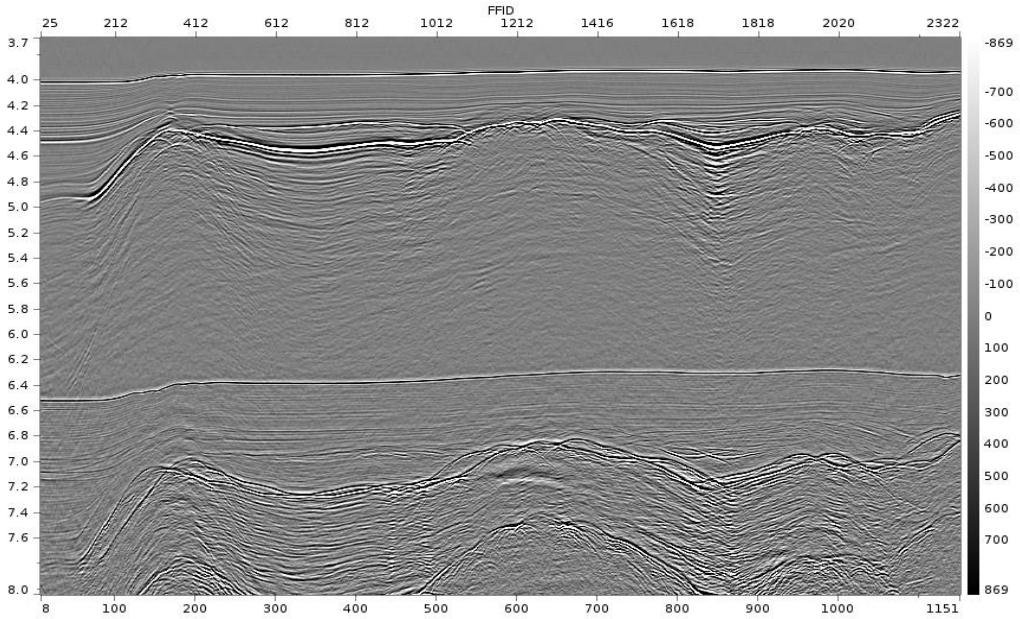

Figura 61: Dado de entrada sem *deghost* aplicado - Canal 4201 – 4512m distante da fonte.

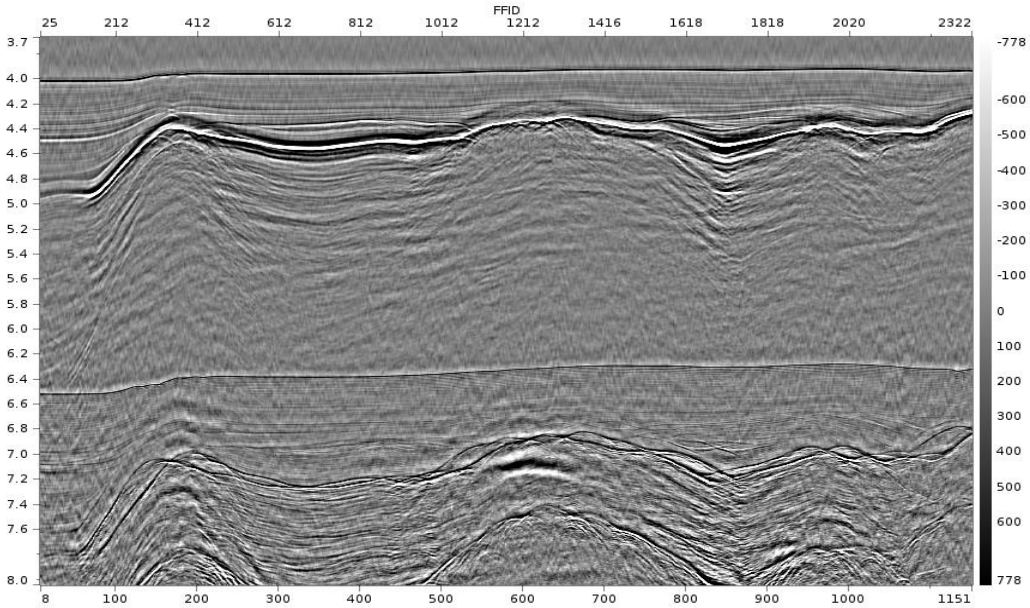

Figura 62: Dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband - Canal 4201 – 4512m distante da fonte.

Um zoom foi aplicado no dado, vide figura 63, com o intuito de facilitar a visualização dos eventos.

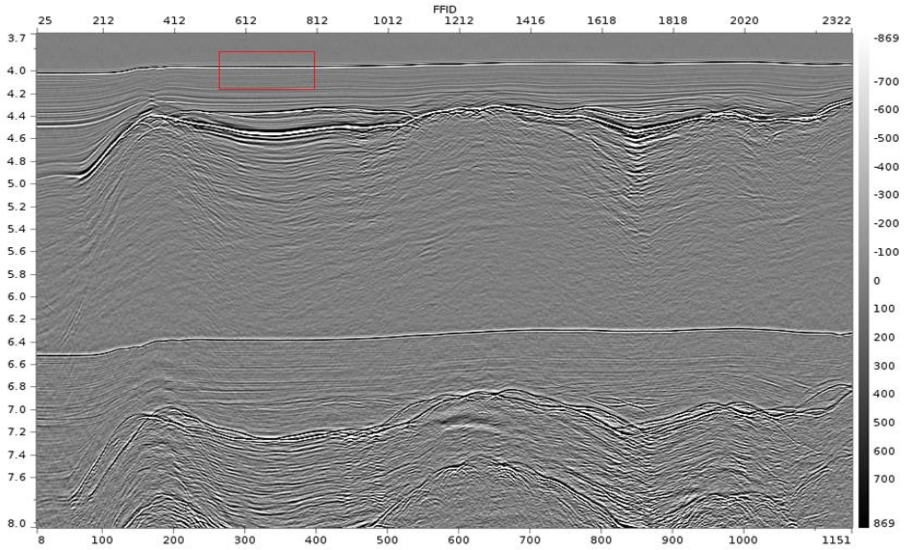

Figura 63: *Zoom* no dado com o intuito de facilitar a visualização dos eventos - Canal 4201 – 4512m distante da fonte.

Na figura 64 foi possível observar o *ghost* sendo atenuado, como demonstrado pelas setas nas figuras.

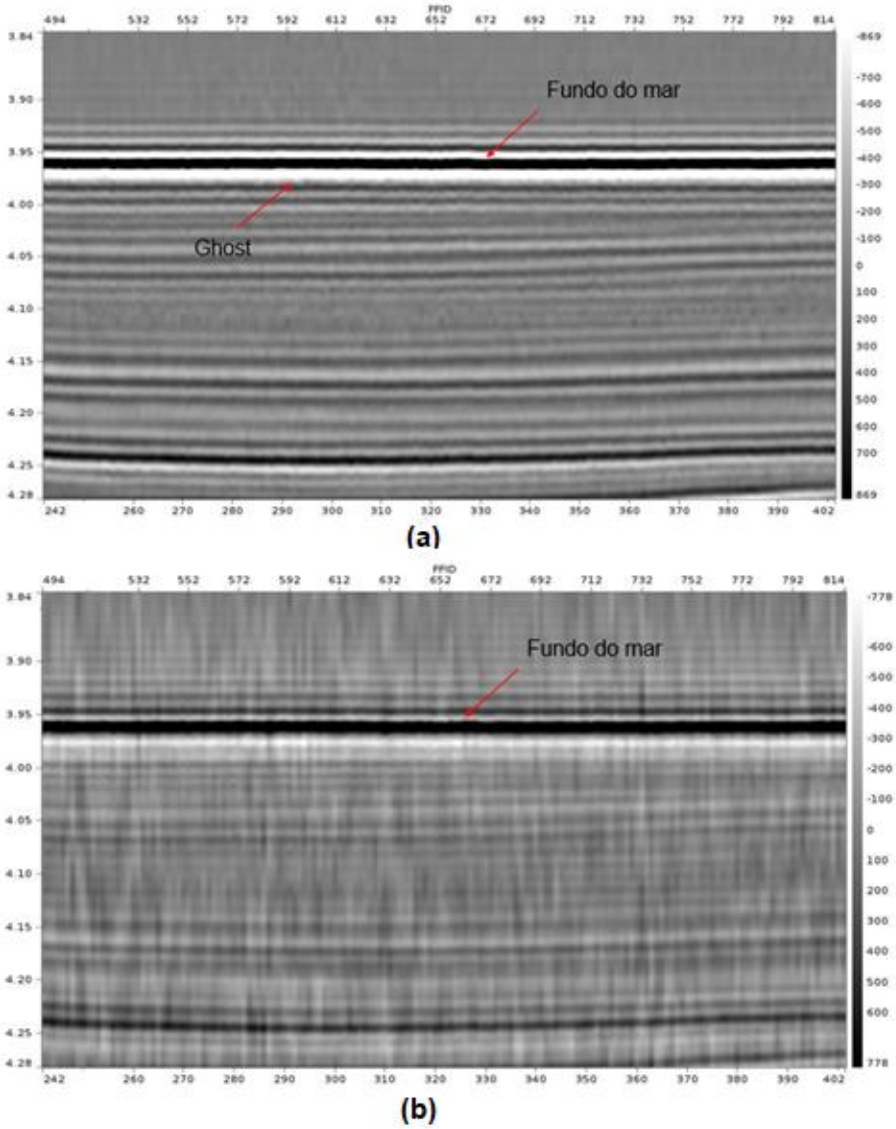

Figura 64: Dado com *zoom* com o intuito de facilitar a visualização dos eventos – Canal 4201 – 4512m distante da fonte. Em (a) dado de entrada sem a aplicação do *deghost* e em (b) dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband.

Foi criada uma janela para a construção do espectro de amplitude, FX e FK, vide figura 65.

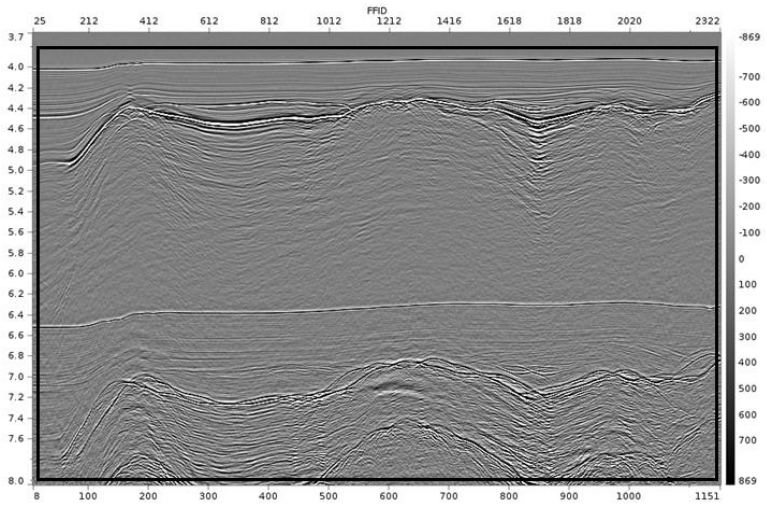

Figura 65: Janela do espectro de amplitude, FX e FK do *input* e do *deghost* a partir do Wiband - Canal 4201 – 4512m distante da fonte.

No espectro de amplitude, figura 66, foi possível observar, principalmente, o preenchimento do *notch* de primeira ordem da fonte (baixa frequência), além do dado ter se tornado mais horizontalizado, cumprindo com o esperado do método do *deghost*. No canal mid já se tornou visível a limitação da técnica Wiband quanto a diretividade do dado, como explicado anteriormente, não havendo uma atenuação tão boa no notch do receptor. No entanto, o resultado continua tendo uma boa eficiência.

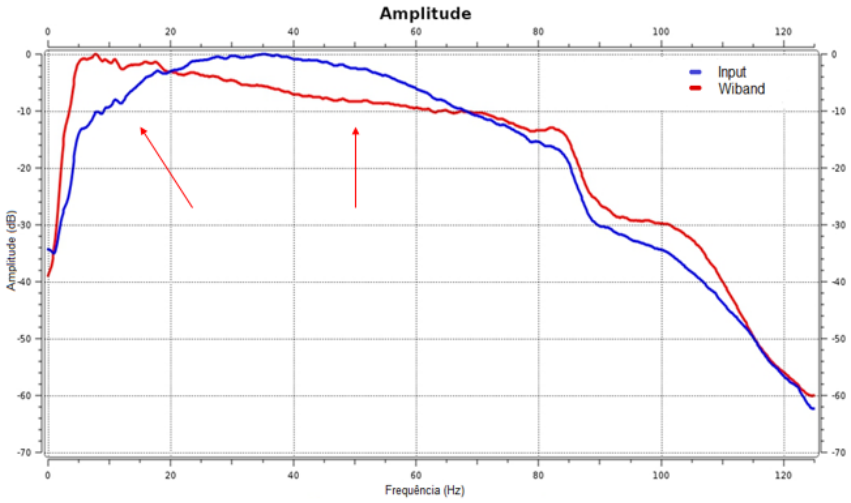

Figura 66: Espectro de amplitude do dado de entrada e do *deghost* a partir do Wiband - Canal 4201 – 4512m distante da fonte.

Nos espectros de FX, na figura 67, foi possível observar o preenchimento dos buracos ocasionados pela interferência destrutiva do fantasma.

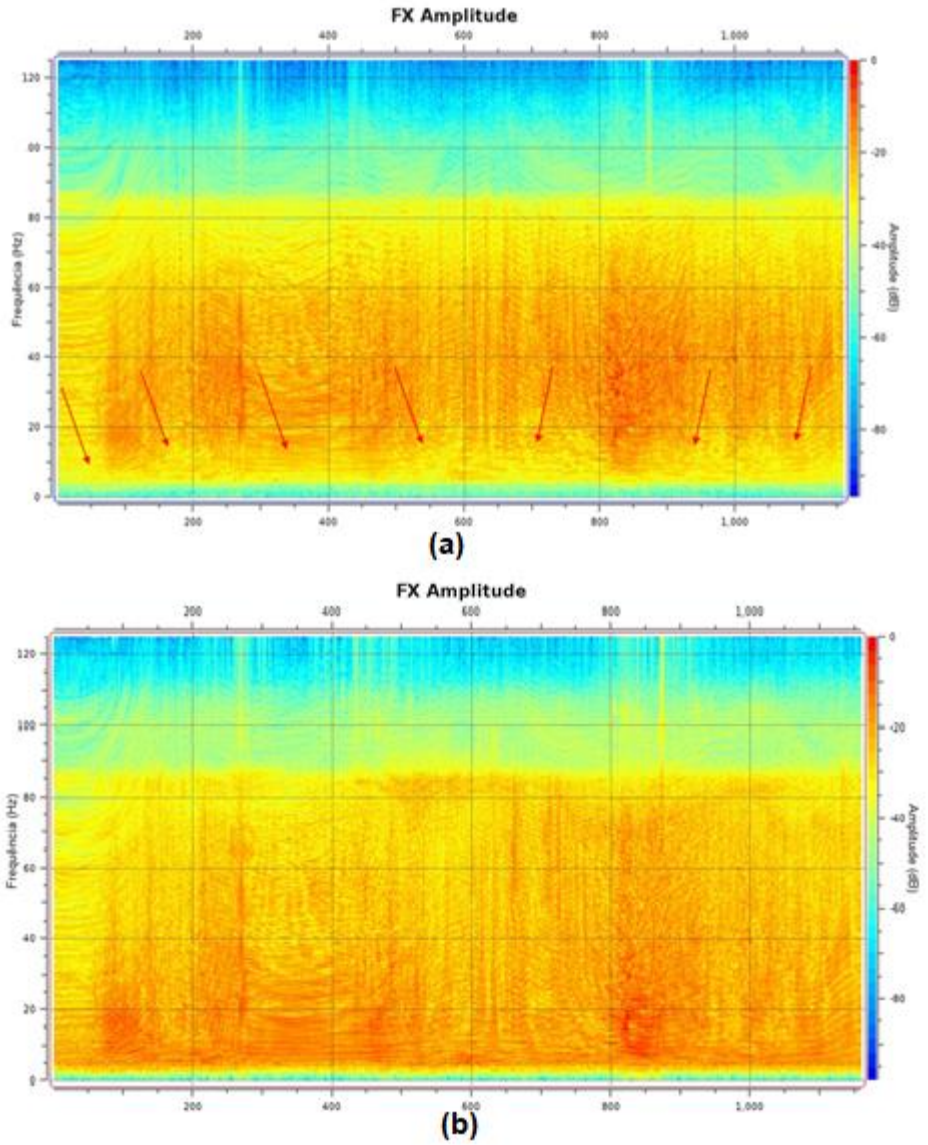

Figura 67: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número de traços. Em (a) o espectro FX do dado de entrada sem o deghost aplicado e em (b) o espectro FX do dado com deghost aplicado a partir do Wiband**.** Setas vermelhas: buracos ocasionados pelo *ghost* **-** Canal 4201 – 4512m distante da fonte.

Nos espectros FK, figura 68, também foi possível observar o preenchimento dos buracos ocasionados pelo *ghost.*

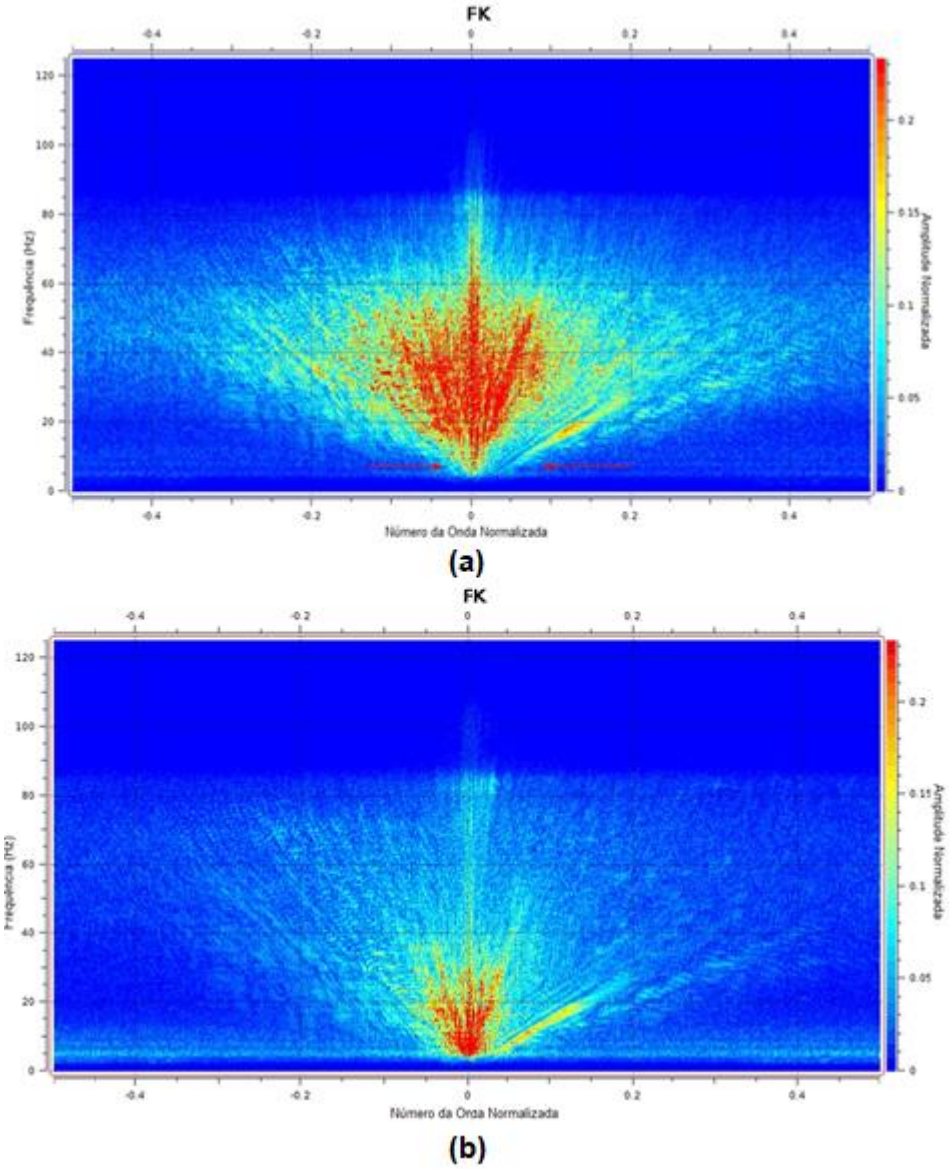

Figura 68: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número da onda normalizada. Em (a) o espectro FK do dado de entrada sem o deghost aplicado e em (b) o espectro FK do dado com deghost aplicado a partir do Wiband. Setas vermelhas: buracos ocasionados pelo ghost - Canal 4201 – 4512m distante da fonte.

5.2.2.3 Canal *far*

Nas figuras 69 e 70 constam o *input* e a atenuação do *ghost* no canal *far* (canal 4301 – 5762 metros distante da fonte).

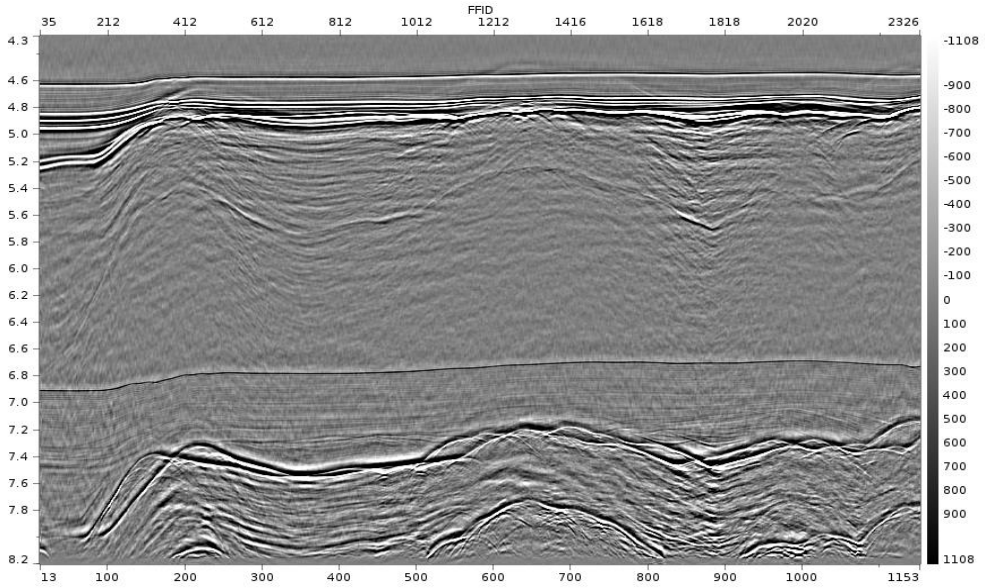

Figura 69: Dado de entrada sem *deghost* aplicado - Canal 4301 – 5762m distante da fonte.

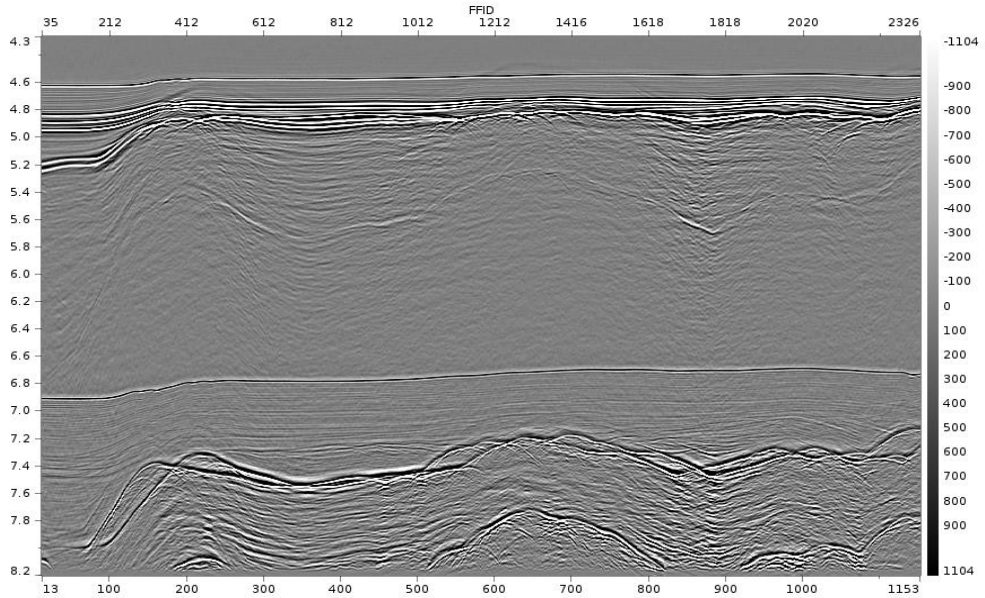

Figura 70: Dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband - Canal 4301 – 5762m distante da fonte.

Um zoom foi aplicado no dado, vide figura 71, com o intuito de facilitar a visualização dos eventos.

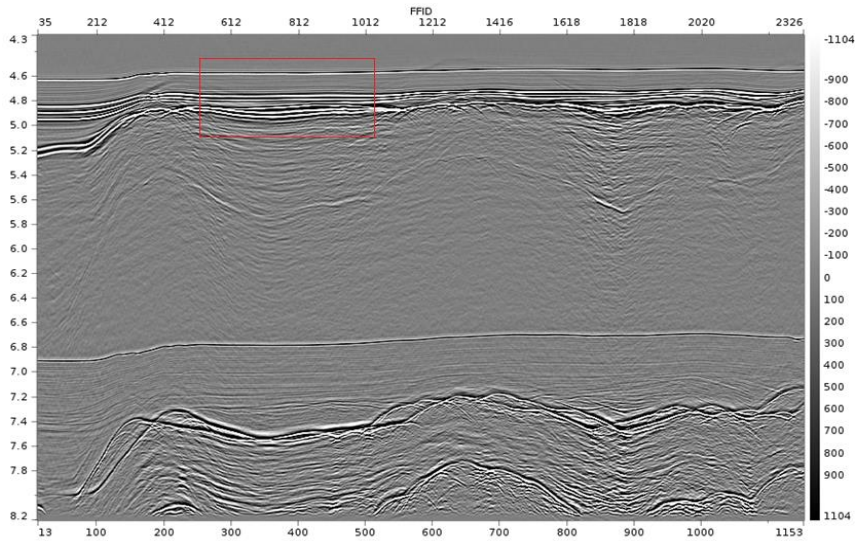

Figura 71: *Zoom* no dado com o intuito de facilitar a visualização dos eventos - Canal 4301 – 5762m distante da fonte.

Na figura 72 se tornou mais evidente a limitação da técnica Wiband quanto a diretividade, visto que no canal far há uma distância maior entre a fonte e o receptor, não havendo, portanto, uma atenuação tão boa do *ghost*.

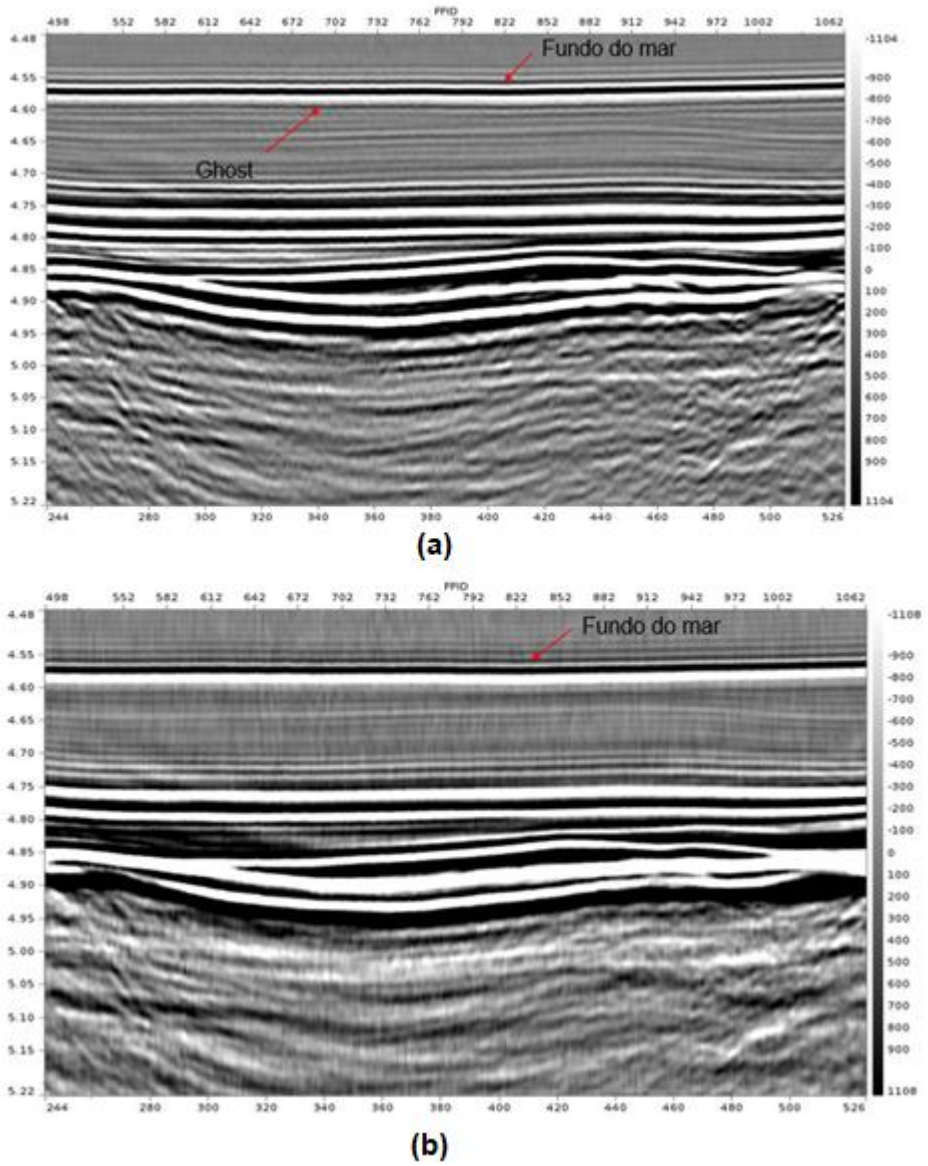

Figura 72: Dado com zoom com o intuito de facilitar a visualização dos eventos - Canal 4301 – 5762m distante da fonte. Em (a) dado de entrada sem a aplicação do *deghost* e em (b) dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband.

Foi criada uma janela para a construção do espectro de amplitude, FX e FK, vide figura 73.

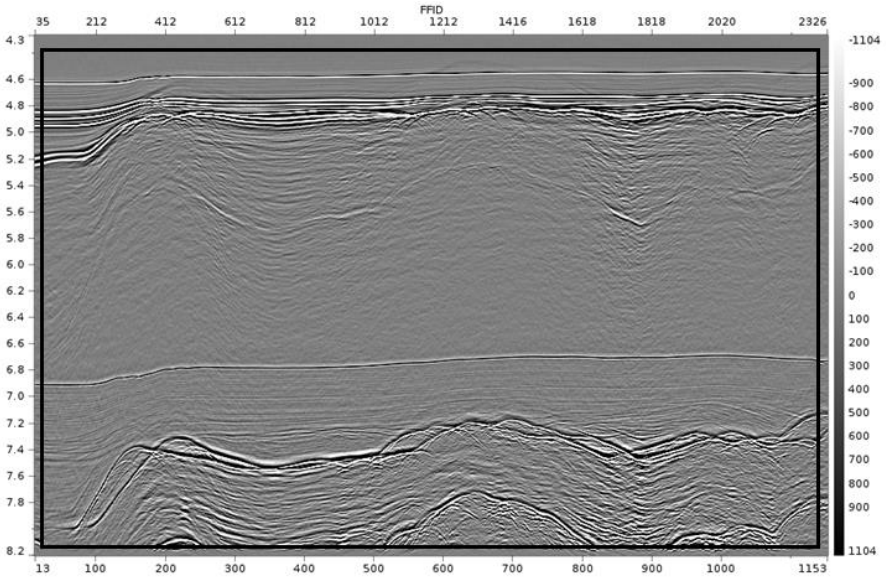

Figura 73: Janela do espectro de amplitude, FX e FK do *input* e do *deghost* a partir do Wiband - Canal 4301 – 5762m distante da fonte.

No espectro de amplitude, na figura 74, foi possível observar a maior dificuldade do método em atenuar o *notch* do receptor. No entanto, o resultado continua tendo uma boa eficiência, principalmente nas baixas frequências.

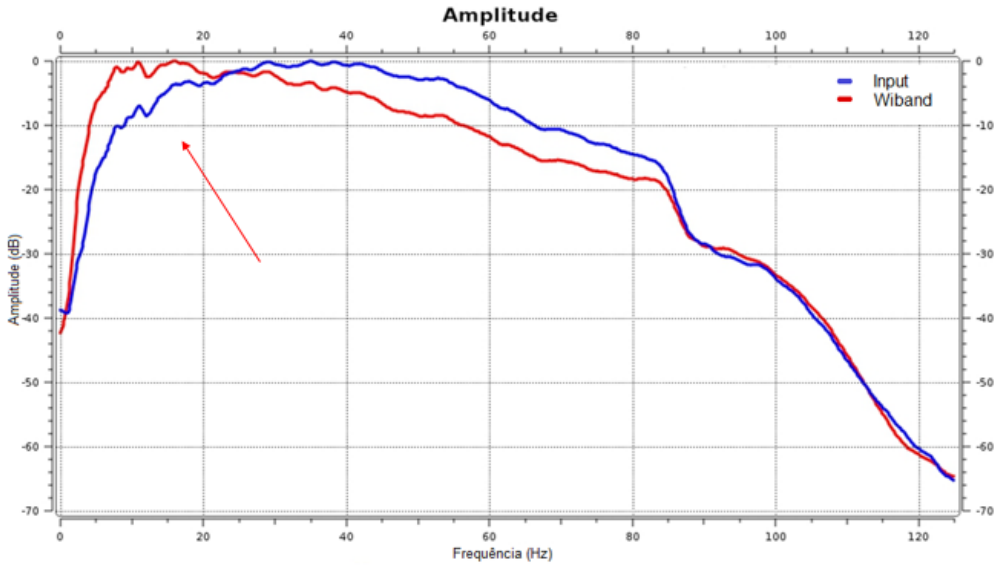

Figura 74: Espectro de amplitude do dado de entrada e do *deghost* a partir do Wiband - Canal 4301 – 5762m distante da fonte.

Nos espectros de FX, na figura 75, foi possível observar o preenchimento dos buracos ocasionados pela interferência destrutiva do fantasma.

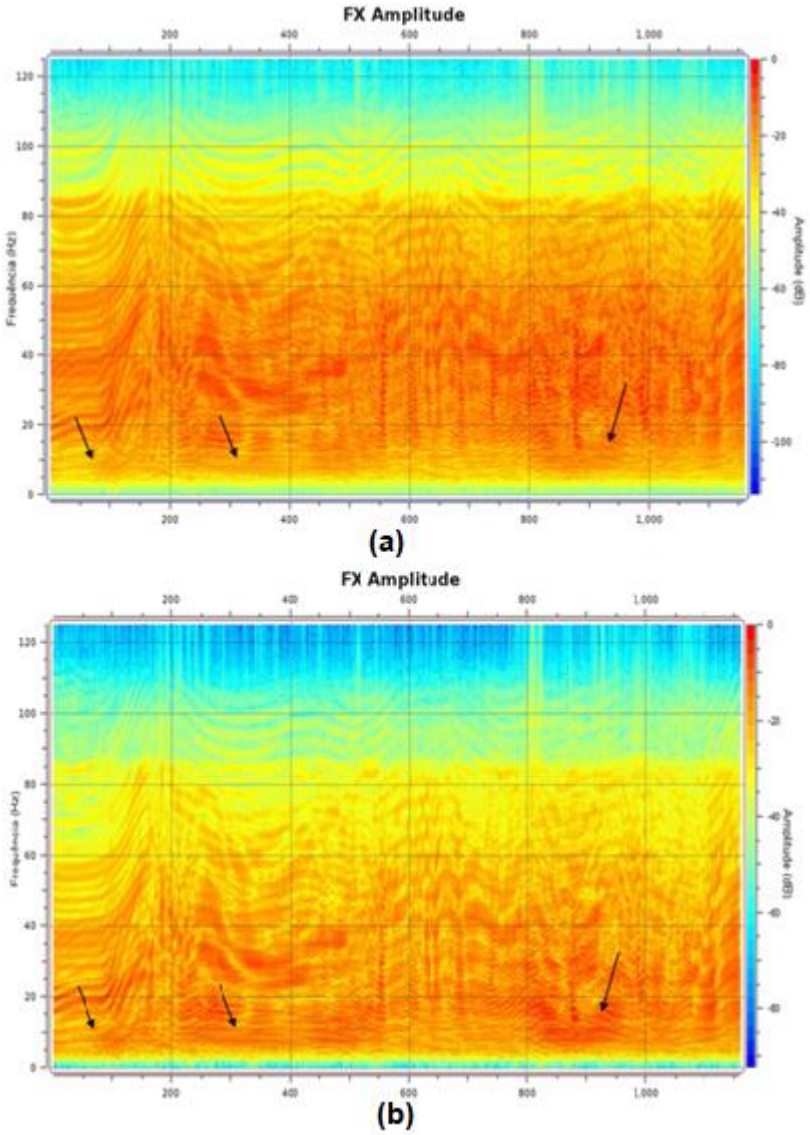

Figura 75: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número de traços. Em (a) o espectro FX do dado de entrada sem o *deghost* aplicado e em (b) o espectro FX do dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband. Setas pretas: buracos ocasionados pelo *ghost* sendo recuperados - Canal 4301 – 5762m distante da fonte.

Nos espectros FK, figura 76, também foi possível observar o preenchimento dos buracos ocasionados pelo *ghost.*

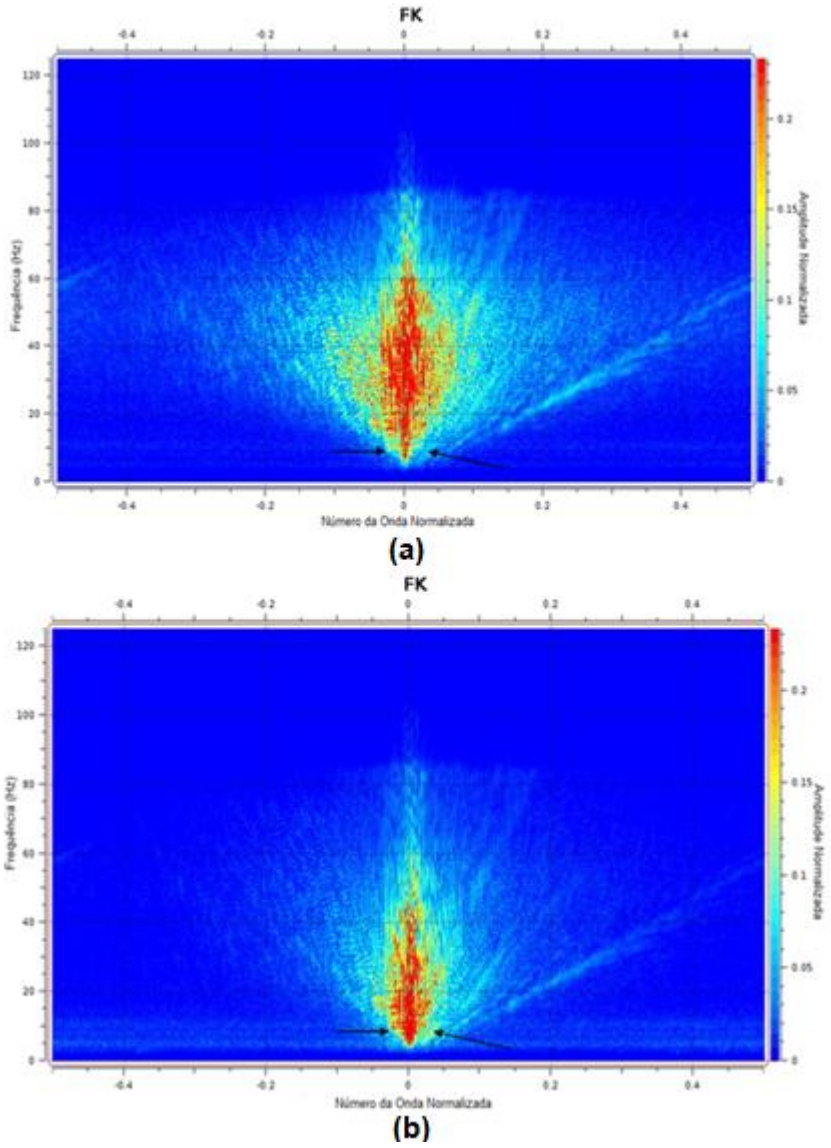

Figura 76: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número da onda normalizada. Em (a) o espectro FK do dado de entrada sem o *deghost* aplicado e em (b) o espectro FK do dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband. Setas pretas: buracos ocasionados pelo *ghost* sendo recuperados - Canal 4301 – 5762m distante da fonte.

5.2.3 Resultados no domínio do *stack*

As imagens 77 e 78 a seguir foram apresentadas no domínio do *stack*.

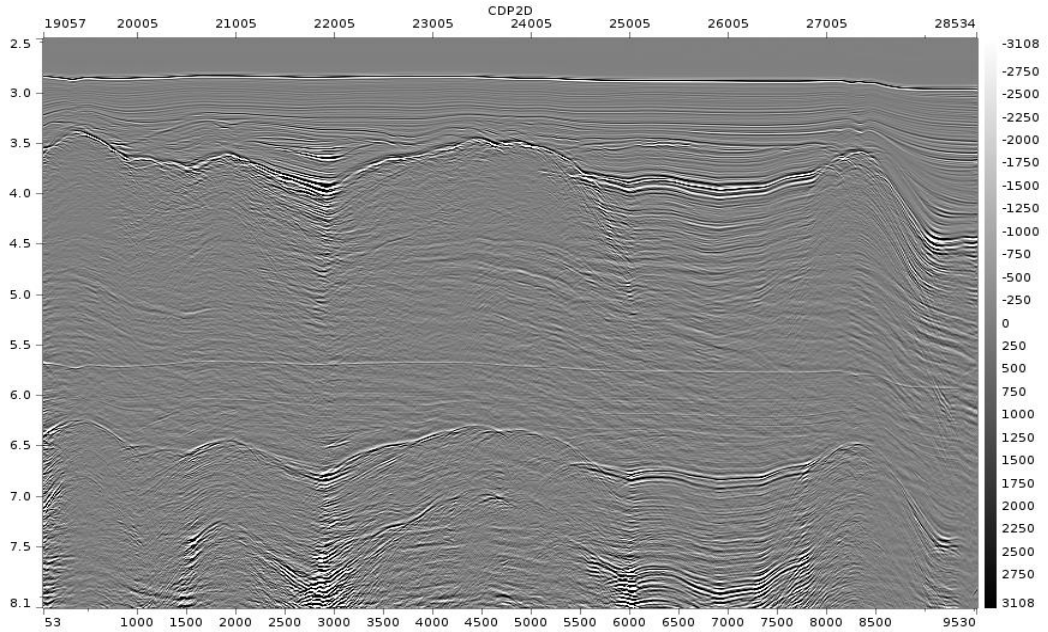

Figura 77: Dado de entrada sem *deghost* aplicado - Cabo 13.

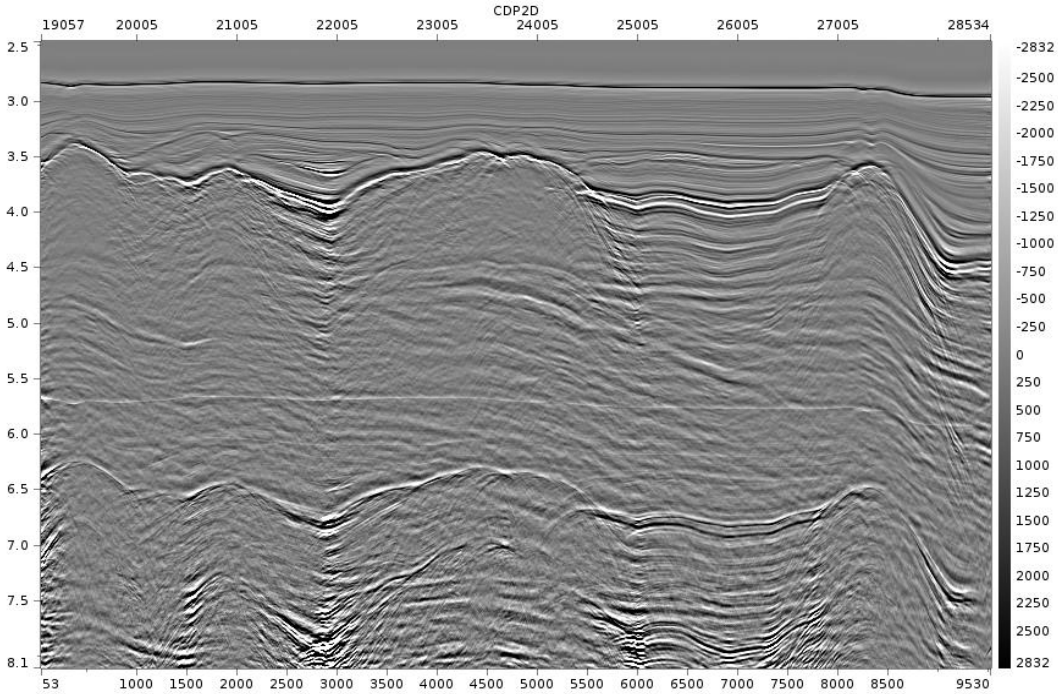

Figura 78: Dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband – Cabo 13.

Um zoom foi aplicado no dado, vide figura 79, com o intuito de facilitar a visualização dos eventos.

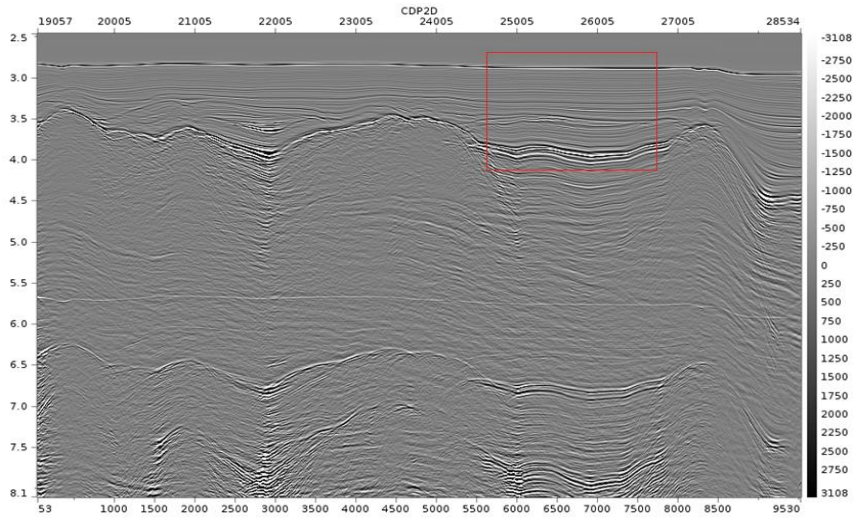

Figura 79: *Zoom* no dado com o intuito de facilitar a visualização dos eventos – Cabo 13.

Na figura 80 foi possível observar o *ghost* sendo atenuado.

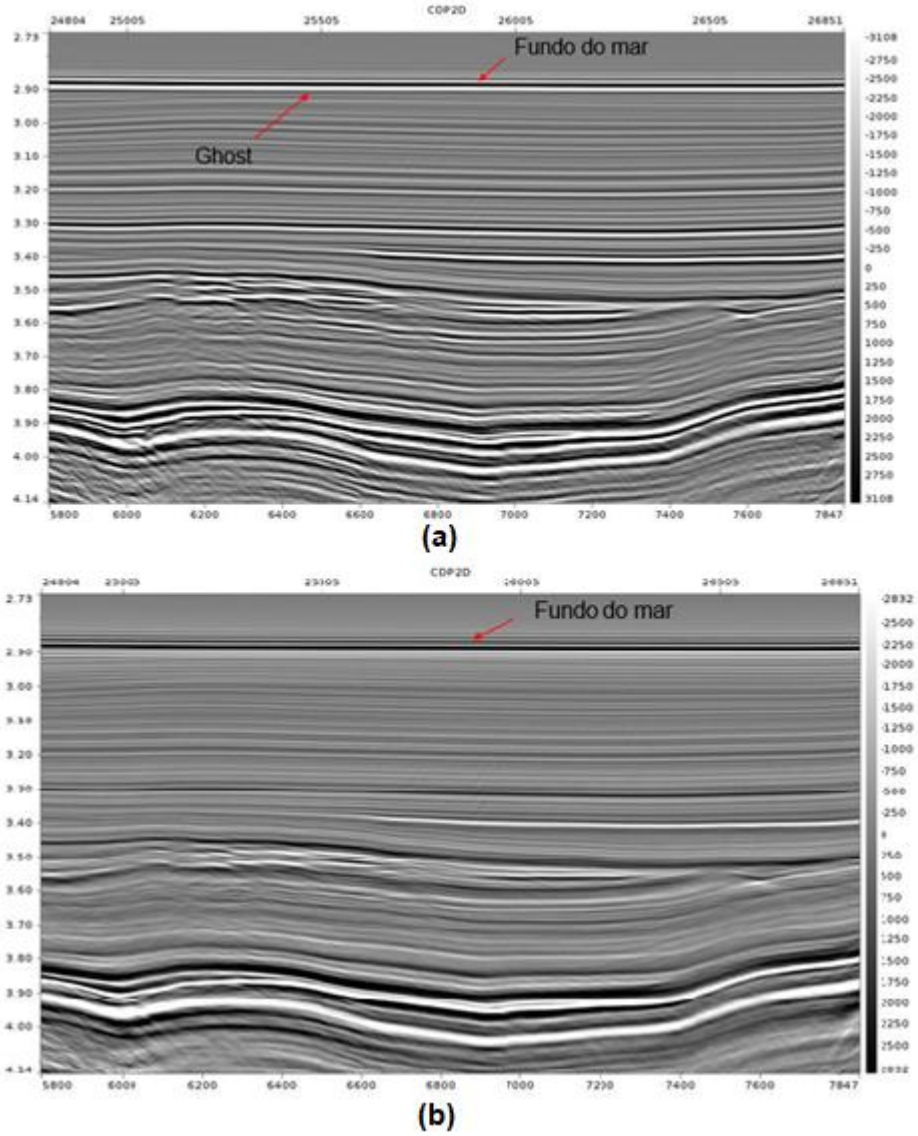

Figura 80: Dado com *zoom* com o intuito de facilitar a visualização dos eventos – Cabo 13. Em (a) dado de entrada sem a aplicação do *deghost* e em (b) dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband.

Foi criada uma janela para a construção do espectro de amplitude, FX e FK, vide figura 81.

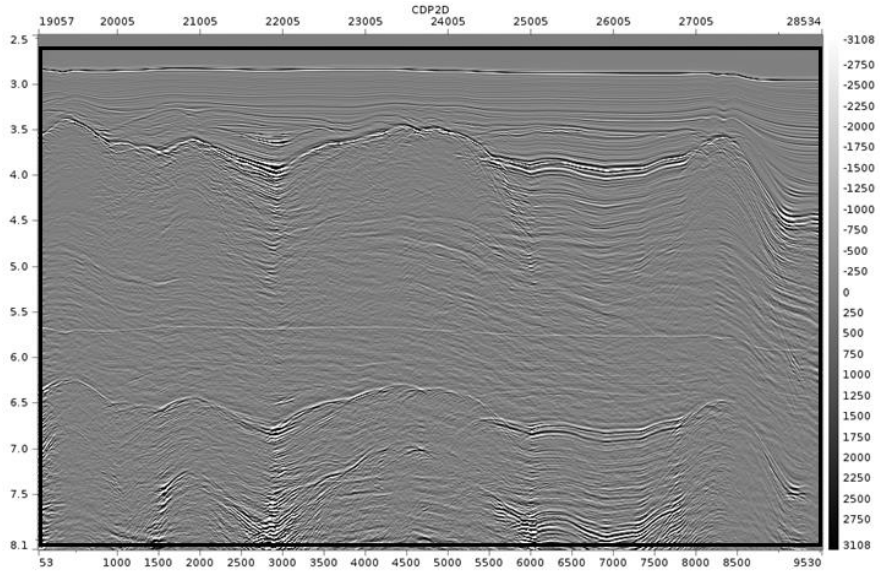

Figura 81: Janela do espectro de amplitude, FX e FK do *input* e do *deghost* a partir do Wiband - Cabo 13.

No espectro de amplitude, figura 82, foi possível observar o mesmo que anteriormente, isto é, o preenchimento dos notches principalmente nas baixas frequências.

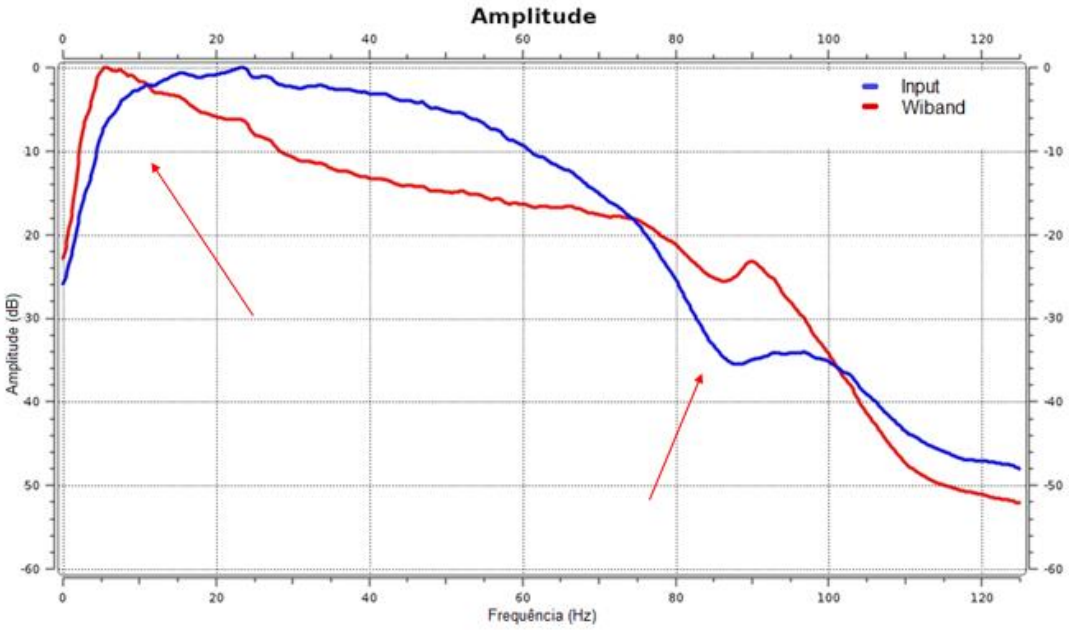

Figura 82: Espectro de amplitude do dado de entrada e do *deghost* a partir do Wiband – Cabo 13.

Nos espectros de FX, na figura 83, foi possível observar o preenchimento dos buracos ocasionados pela interferência destrutiva do fantasma.

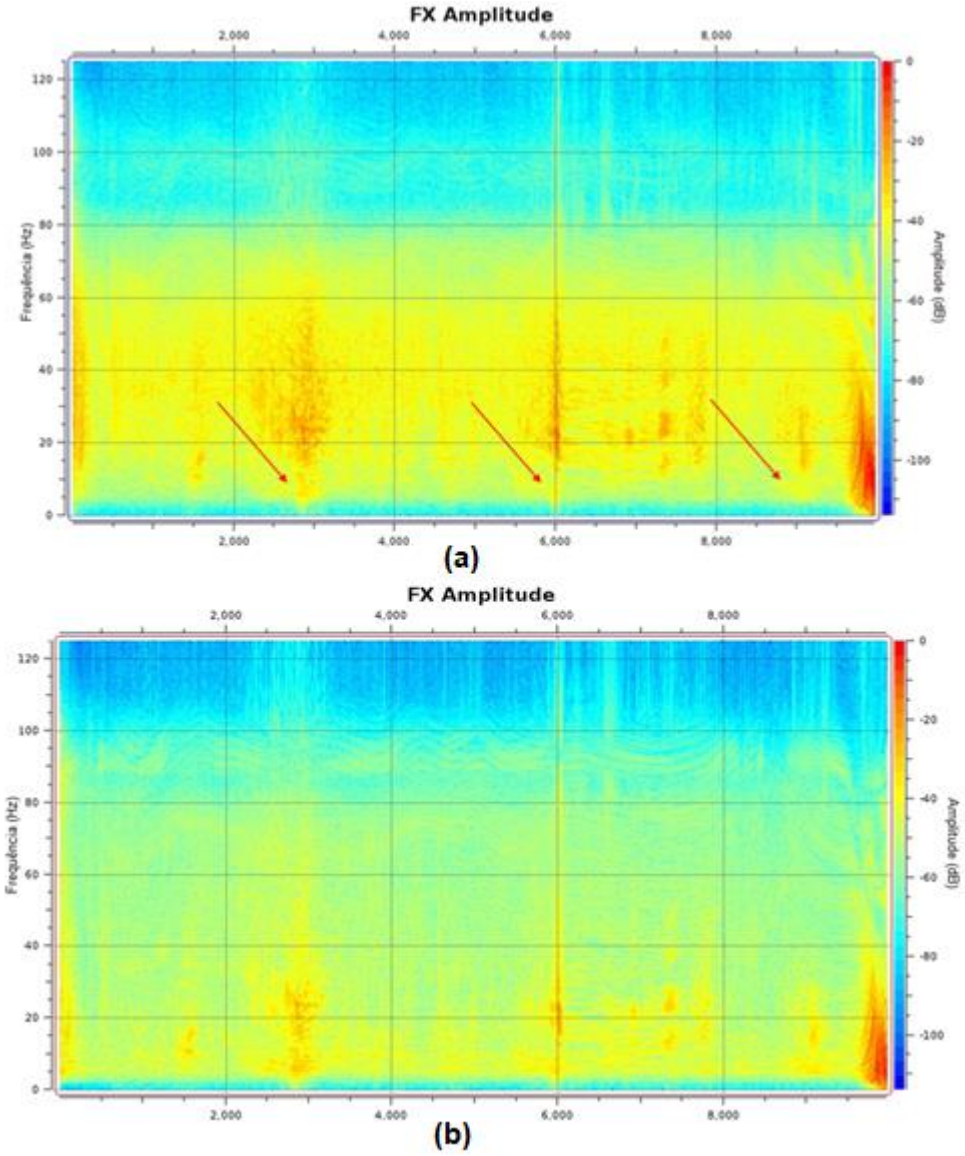

Figura 83: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número de traços. Em (a) o espectro FX do dado de entrada sem o *deghost* aplicado e em (b) o espectro FX do dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband. Setas vermelhas: buracos ocasionados pelo *ghost* sendo recuperados – Cabo 13.

Nos espectros FK, figura 84, também foi possível observar o preenchimento dos buracos ocasionados pelo *ghost.*

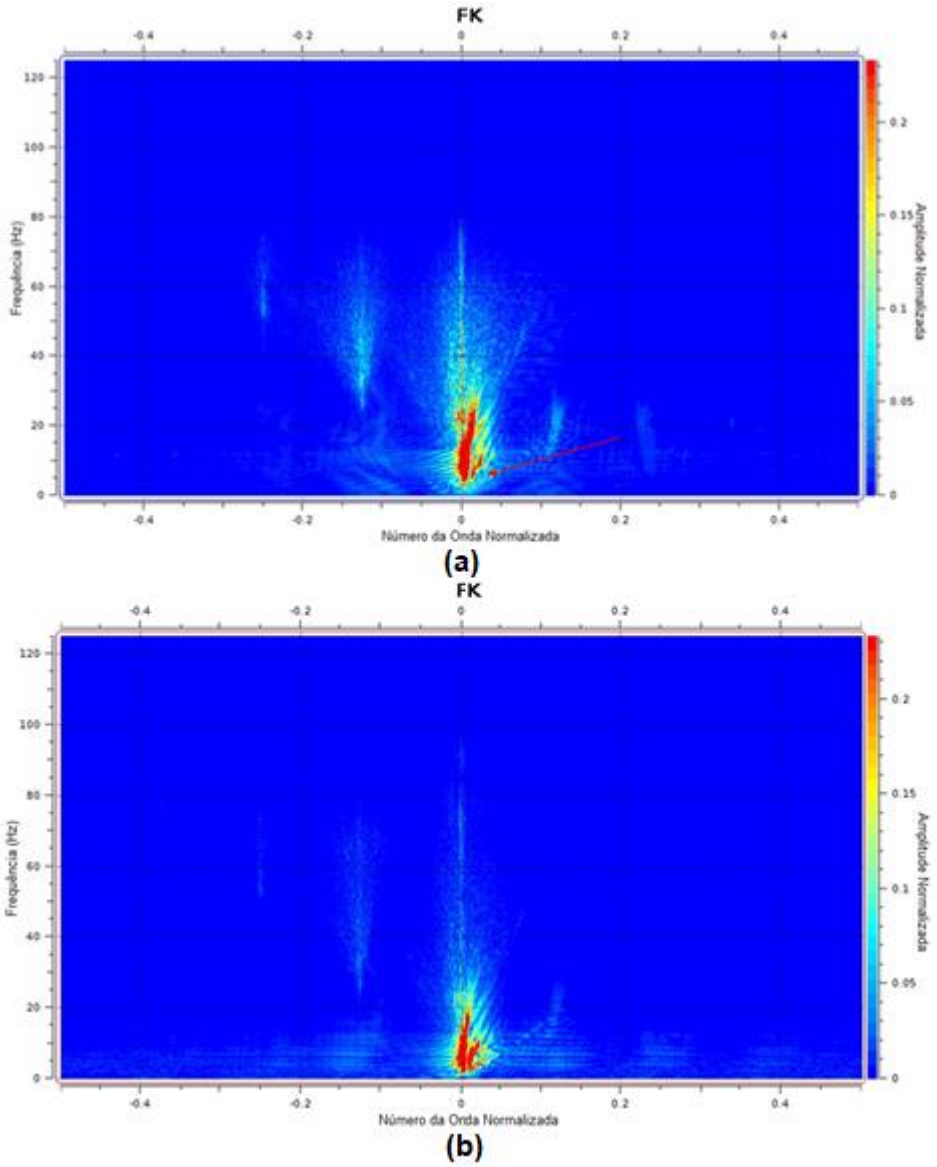

Figura 84: Eixo y = amplitude (dB), eixo x = número da onda normalizada. Em (a) o espectro FK do dado de entrada sem o *deghost* aplicado e em (b) o espectro FK do dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband. Seta vermelha: buracos ocasionados pelo *ghost* – Cabo 13.

5.2.4 Dado Migrado

Com o objetivo de avaliar o efeito do *ghost* no dado migrado, uma migração *Kirchhoff* em profundidade com abertura de 6km foi realizada e os resultados foram

ilustrados a seguir. As imagens foram ilustradas e analisadas em *gather* e *stack*, para a inline 54450, bem como seus espectros de amplitude.

5.2.4.1 *Gather*

Nas figuras 85 e 86 foram apresentados os dados em gather, onde foi possível observar a melhoria da resolução no dado, além do recuperação das baixas frequências.

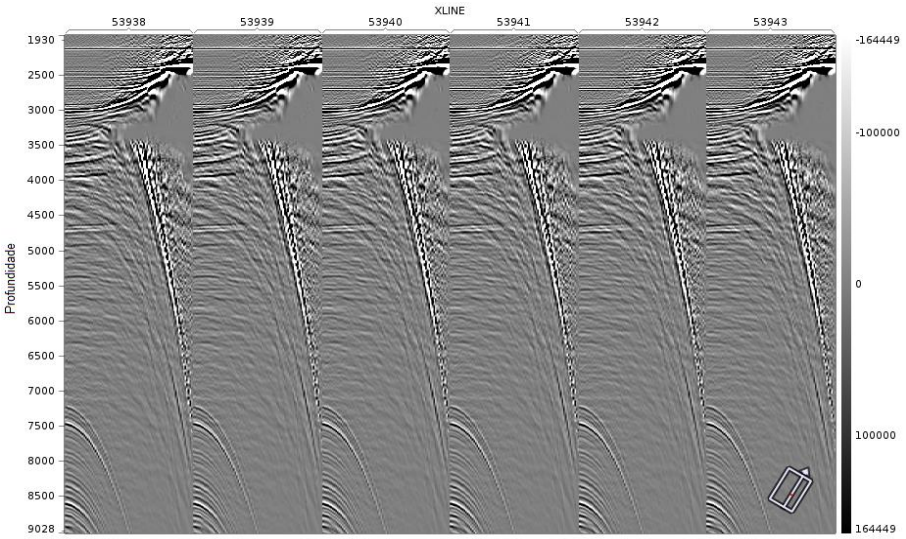

Figura 85: *Gather* do dado de entrada migrado sem *deghost* aplicado – *Inline* 54450.

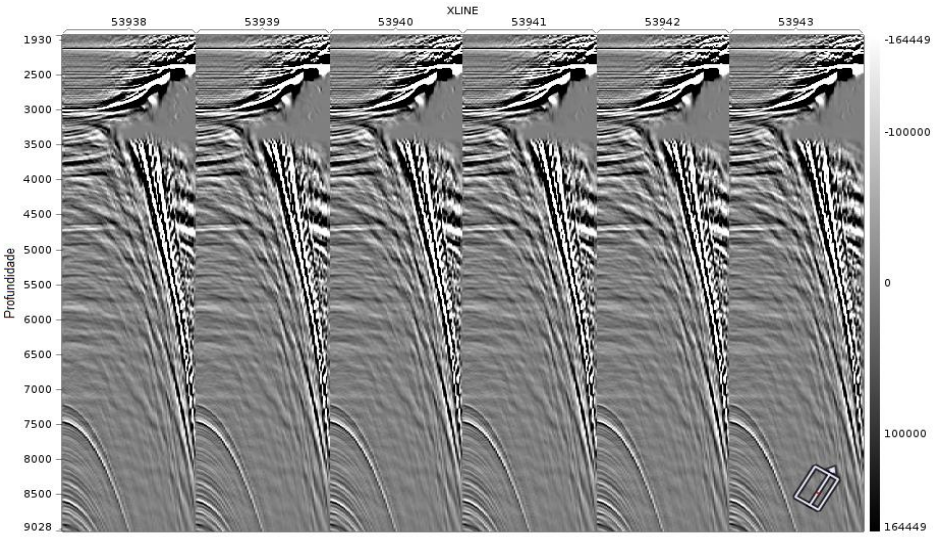

Figura 86: *Gather* do *Wiband* migrado com *deghost* aplicado - *Inline* 54450.

Nas figuras 118 e 119 foi possível observar em *wiggle* os lóbulos laterais diminuindo ao redor do pico do fundo do mar, bem como a interferência do *ghost* sendo atenuada.

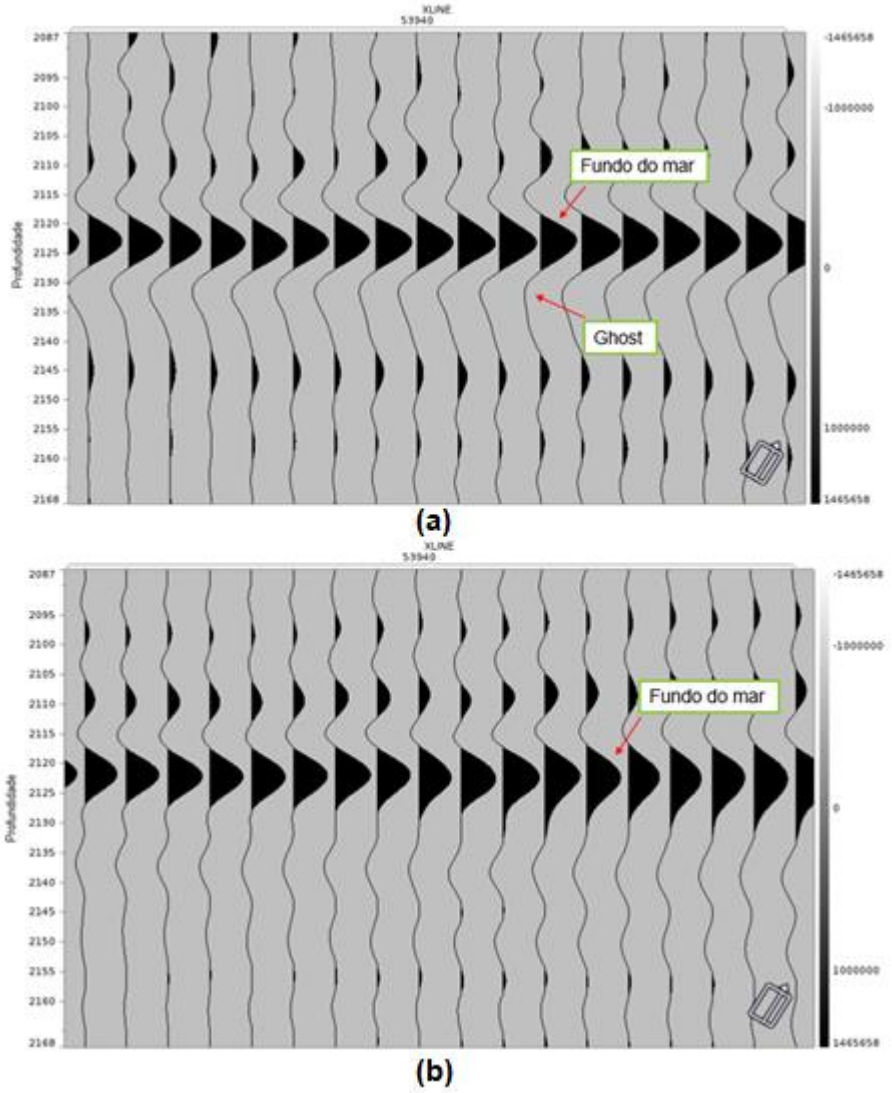

Figura 87: Para melhor análise do resultado gerado nos traços do g*ather* migrado–*Inline* 54450, em (a) o dado de entrada sem aplicação do *deghost* e em (b) o dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband.

Foi criada uma janela para a construção do espectro de amplitude, FX e FK, vide figura 88.

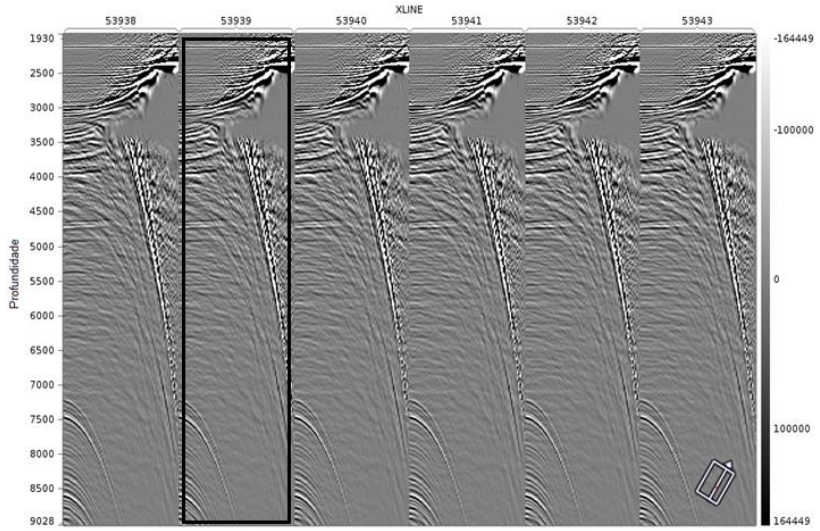

Figura 88: Janela do espectro de amplitude, FX e FK do *input* e do *deghost* a partir do Wiband, após migração (*gather*) – *Inline* 54450.

No espectro de amplitude, figura 89, foi possível observar a eficiência do *deghost*, onde método *wiband* levanta as baixas frequências, além de observar um aspecto mais horizontal do dado. Para se obter o espectro de amplitude, foi necessário converter o dado em profundidade (dado migrado) em tempo, sendo possível um análise correta dos eventos.

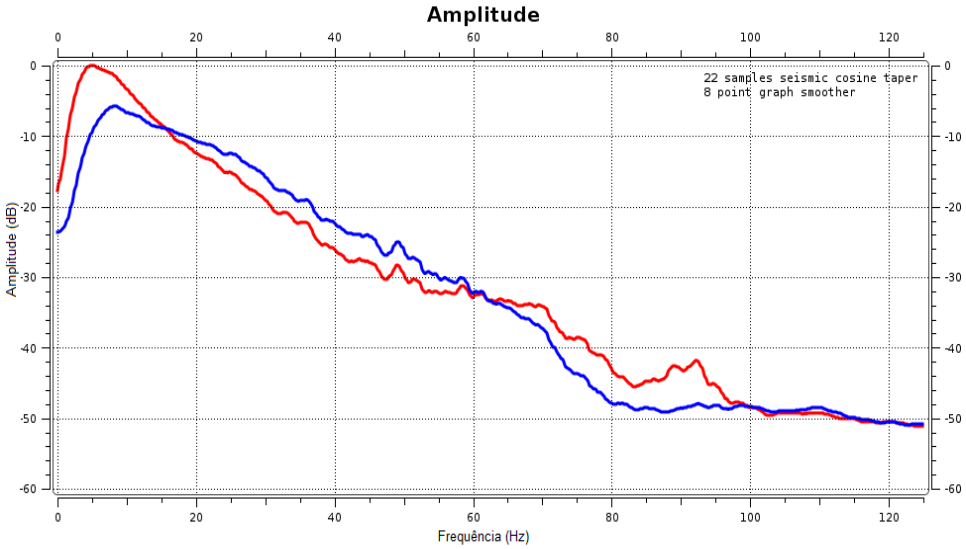

Figura 89: Espectro de amplitude do dado de entrada, em azul, e *do deghost* a partir do Wiband, em vermelho, após migração (*gather*) – *Inline* 54450.

5.2.4.2 *Stack*

As imagens 90 e 91 a seguir foram apresentadas no domínio do *stack* após migração.

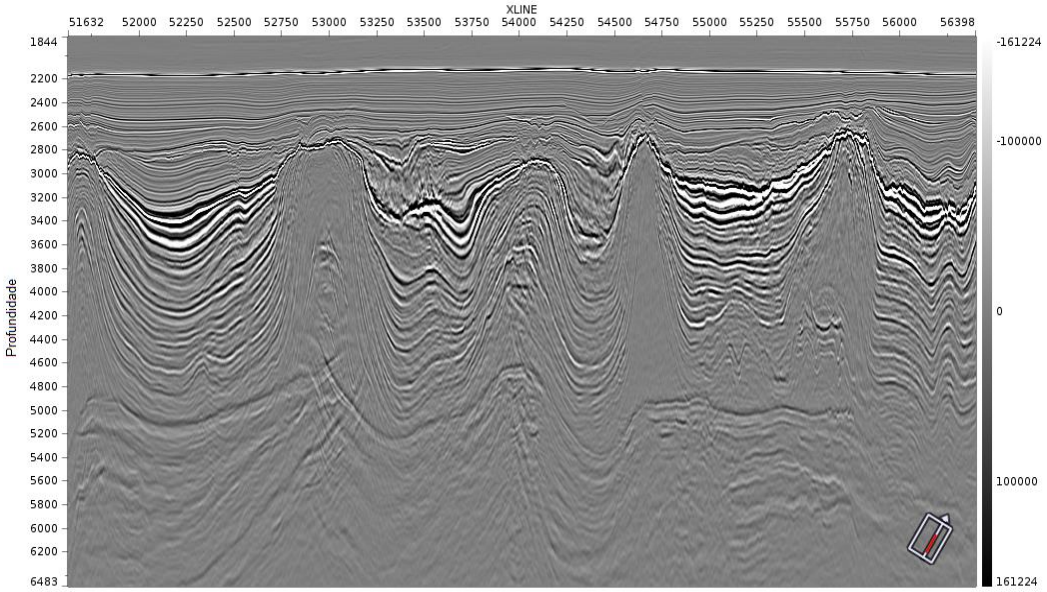

Figura 90: *Stack* do dado de entrada sem *deghost* aplicado – Inline 54450.

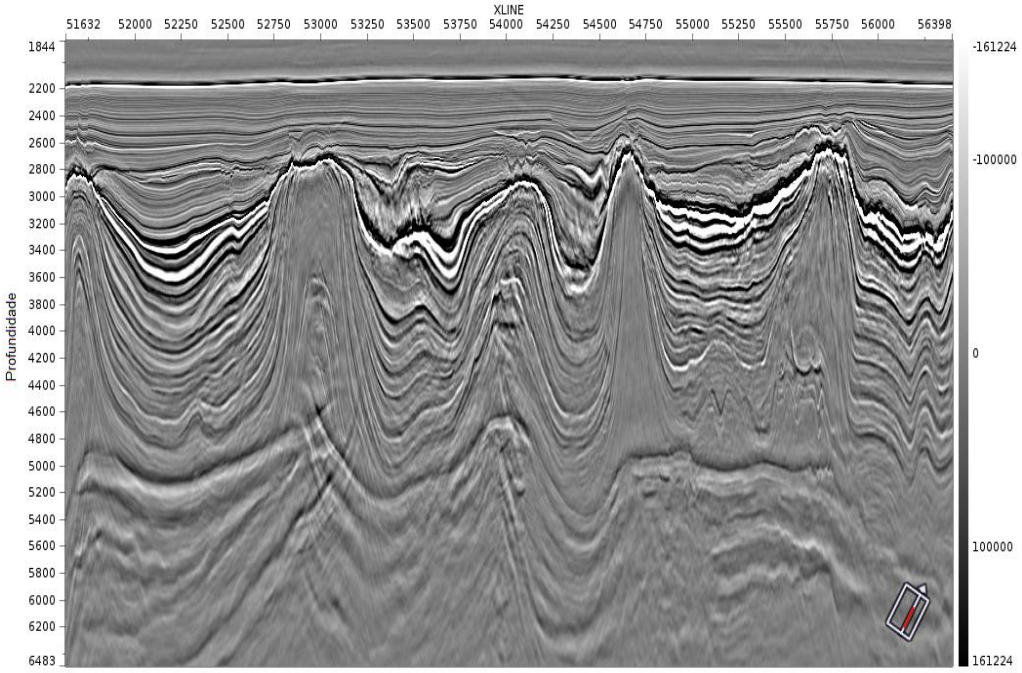

Figura 91: *Stack* do *Wiband* migrado com *deghost* aplicado – Inline 54450.

Um zoom foi aplicado no dado, vide figura 92, com o intuito de facilitar a visualização dos eventos.

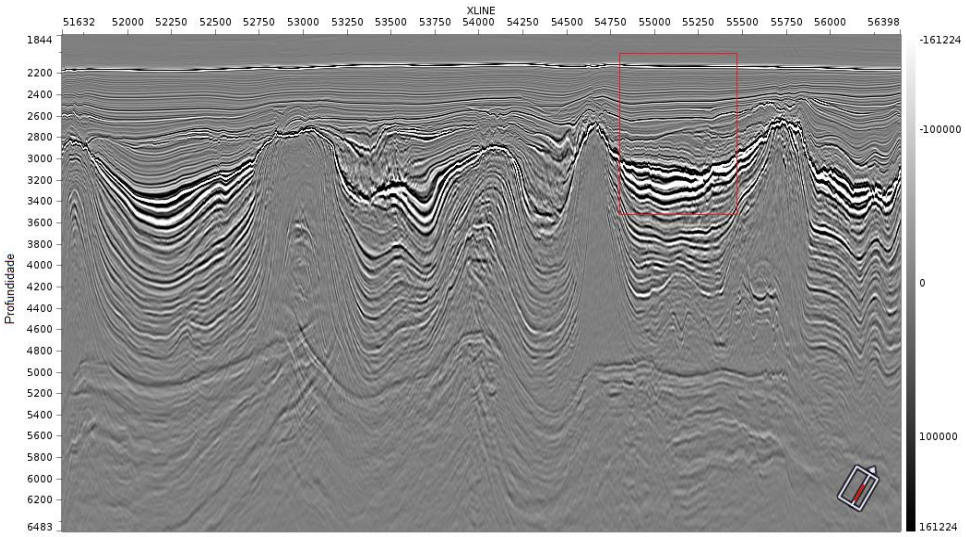

Figura 92: *Zoom* no *stack* do dado migrado com o intuito de facilitar a visualização dos eventos - Inline 54450.

Na figura 93 foi possível observar o pico do *ghost*, sendo atenuado, além do levantamento das baixas frequências. Também possível perceber a resolução do dado melhorando.

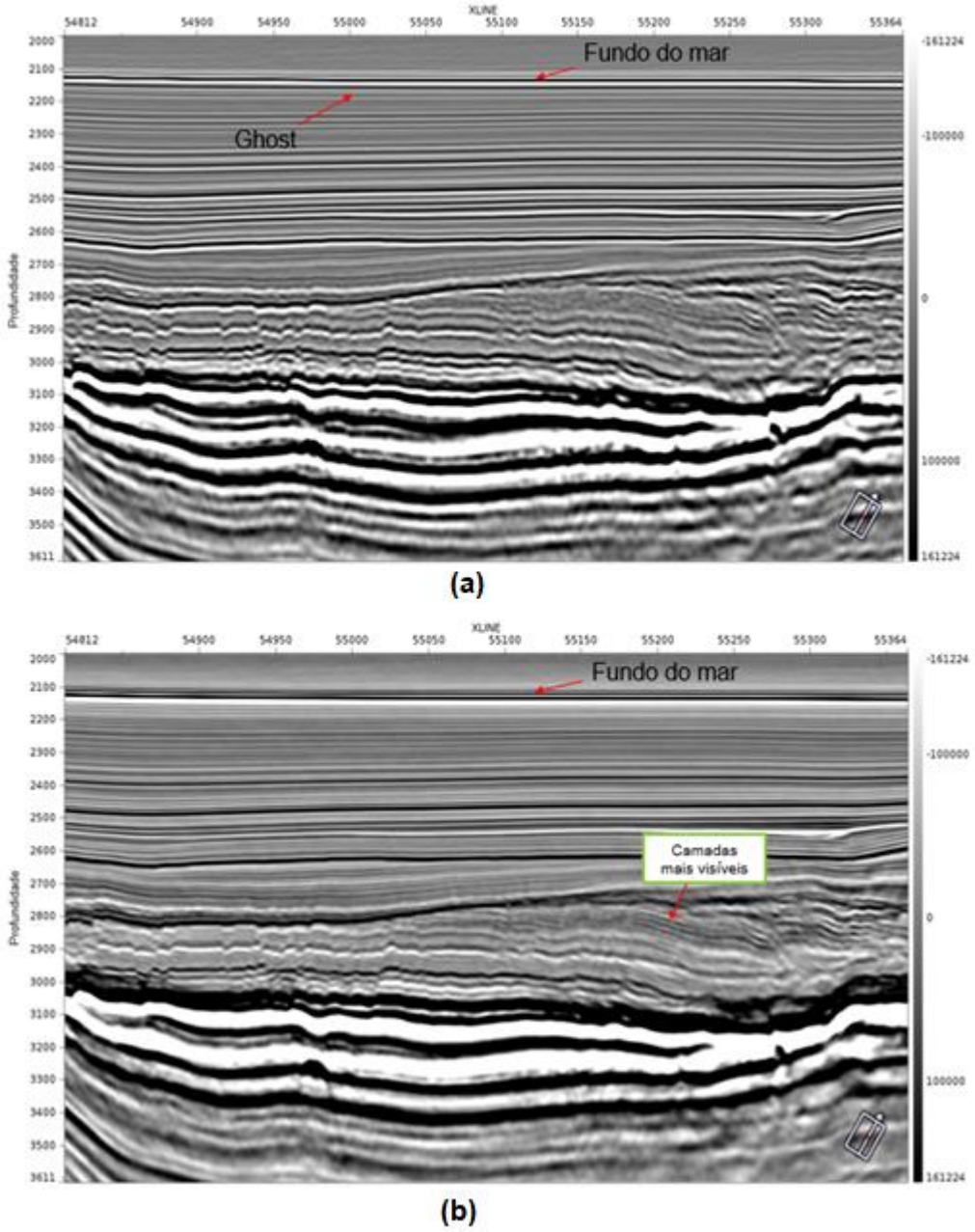

Figura 93: Dado com *zoom* com o intuito de facilitar a visualização dos eventos – *Stack* migrado – Inline 54450. Em (a) dado de entrada sem a aplicação do *deghost* e em (b) dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband.

Na figura 94 foi possível observar em *wiggle* os lóbulos laterais diminuindo ao redor do pico do fundo do mar, bem como a interferência do *ghost* sendo atenuada.

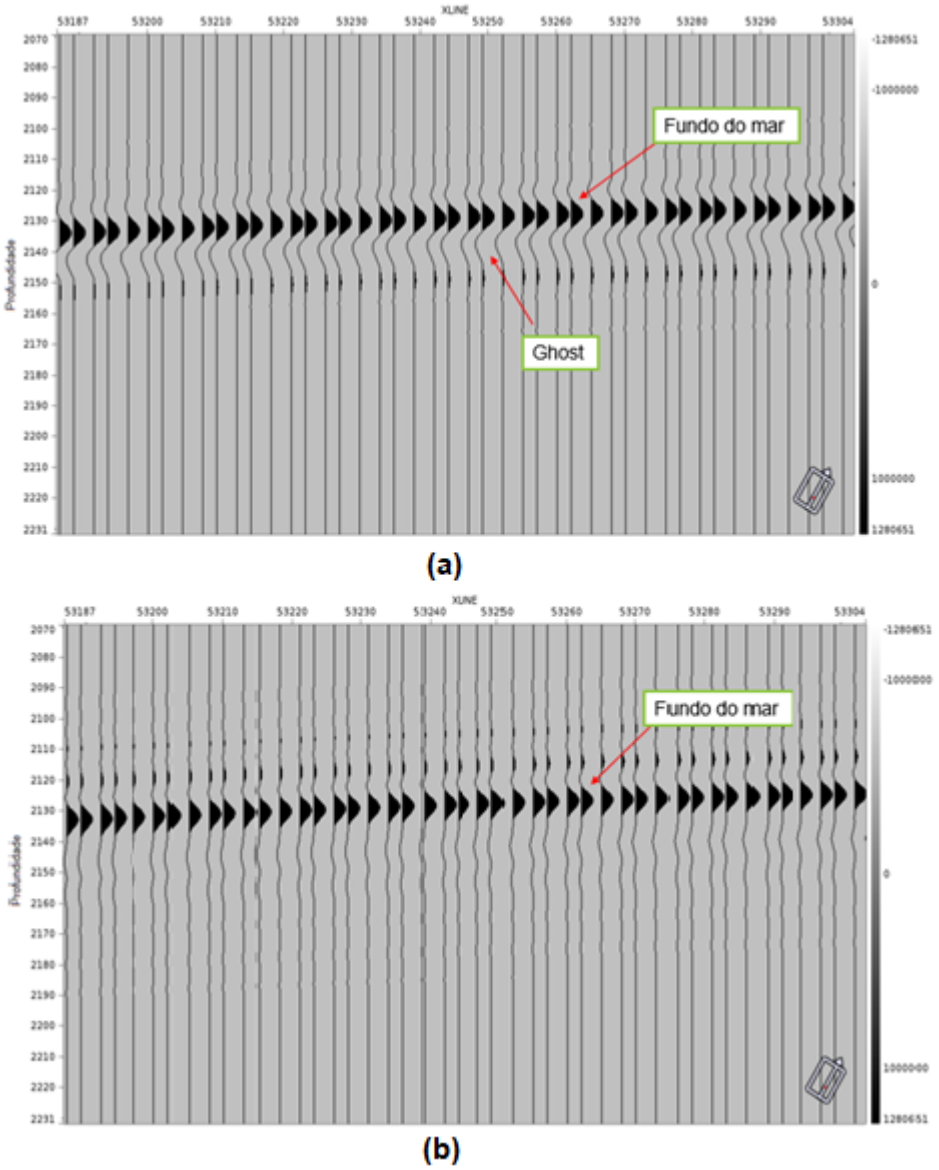

Figura 94: Para melhor análise do resultado gerado nos traços do *stack* migrado– *Inline* 54450, em (a) o dado de entrada sem aplicação do *deghost*, em (b) o dado com *deghost* aplicado a partir do Wiband.

Foi criada uma janela para a construção do espectro de amplitude, FX e FK, vide figura 95.

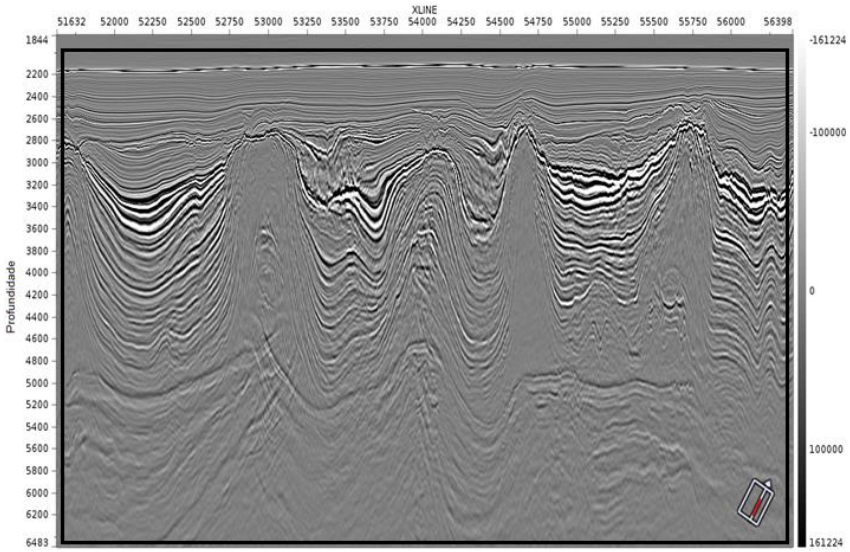

Figura 95: Janela do espectro de amplitude, FX e FK do *input* e do *deghost* a partir do Wiband, após migração (*stack*) – *Inline* 54450.

No espectro de amplitude, figura 95, foi possível observar a eficiência do *deghost*, onde o *wiband* levanta as baixas frequências e horizontaliza o espectro de amplitude do dado. Para se obter o espectro de amplitude, foi necessário converter o dado de profundidade (dado migrado) para tempo, sendo possível um análise correta dos eventos.

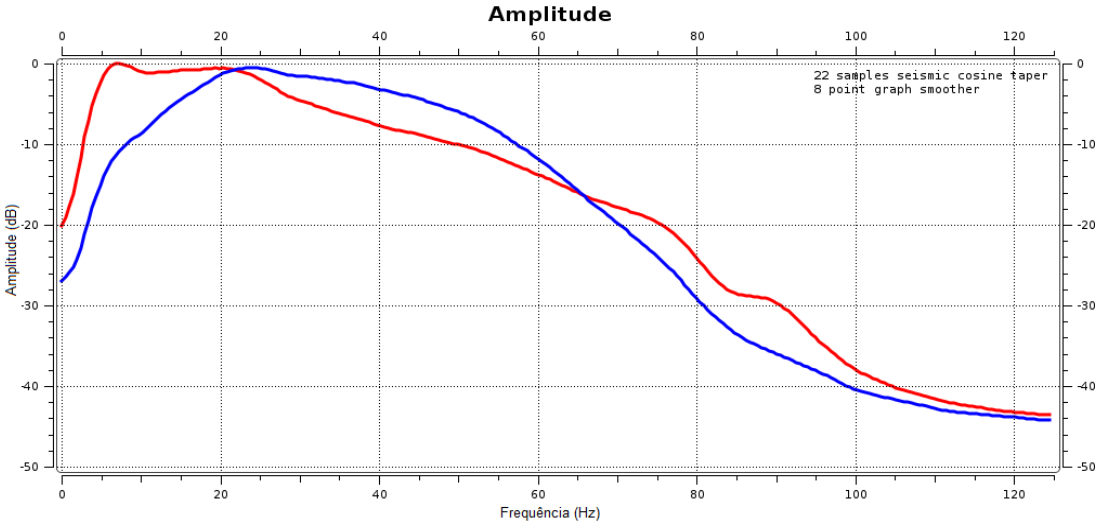

Figura 96: Espectro de amplitude do dado de entrada, em azul, e *do deghost* a partir do Wiband, em vermelho, após migração (*stack*) – *Inline* 54450.

Capítulo 6: Conclusão

O presente trabalho demonstrou a importância do *deghost* no dado sísmico através de resultados gerados a partir de um operador inverso criado utilizando filtro de Wiener, bem como resultados gerados a partir do operador Wiband utilizado pela ION Geophysical.

A partir dos operadores, foi possível observar no espectro de amplitude a recuperação do notch em 89Hz, bem como as baixas frequências sendo levantadas. Observou-se o preenchimento dos buracos ocasionados pelo *ghost* nos espectros FX e FK, uma boa atenuação do fantasma na sísmica, bem como a melhoria da resolução de camadas que antes estavam menos visíveis, constatando-se um resultado satisfatório para ambos os operadores. No entanto, notou-se uma maior eficácia pelo operador Wiband, pois considera a variação angular, e um maior conteúdo de ruídos levantados pelo operador derivado.

Bibliografia

ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2015. Disponivel em: <http://www.anp.gov.br/images/planos_desenvolvimento/Lula.pdf>.

ANP, A. N. D. P. G. N. E. B. **Boletim de produção de petróleo e gás natural**. [S.l.]. 2018.

ASTRO IF UFRGS. Disponivel em: <http://astro.if.ufrgs.br/med/imagens/node64.htm>.

BEASLEY, C. J.; COATES, R.; LAPILLI,. Wave Equation Receiver Deghosting. **5th Internacional Workshop on Computacional Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP)**, 2013.

BILOTI, R. **Processamento Sísmico**. [S.l.]: [s.n.], 2019.

COURTENAY, S. C.; BOUDREAU, M.; LEE, K. Potential Impacts of Seismic Energy on Snow. **Environmental Studies Research Funds**, 2009.

DIARIODOPRESAL. Disponivel em: <https://diariodopresal.wordpress.com/o-que-e-o-pre-sal/petrobras_pre-sal_agenciabrasil-2/>.

DICIONARIO do Petróleo. Disponivel em: <http://dicionariodopetroleo.com.br/dictionary/numero-de-onda-de-nyquist>.

DOMINGUEZ, A. C. F.; FREIRE, F.; SANTOS, L. A. **Interpretação de dados sísmicos monocanal do anticlinal Umitaka Spur na bacia de Joetsu - mar do japão**. [S.l.]. 2019.

FERREIRA, P. P. **Características da atenuação das reflexões múltiplas da superfície livre utilizando a extrapolação do campo de onda**. [S.l.]. 2009.

FERREIRA, P. P. **Características da atenuação das reflexões múltiplas da superfície livre utilizando a extrapolação do campo de onda**. Rio de Janeiro. 2009.

GILES, B. F.; JOHNSTON, R. C. **System approach to air-gun array design. Geophysical Prospecting, v. 21, n. 1, p. 77-101**. [S.l.]: [s.n.], 1973.

IONGEO. Disponivel em: <https://www.iongeo.com/data-library/latin-america/brazil/picanha-3d/>.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2009.

KREBES, E. S. **Seismic Wave Theory**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2019.

LOPES, P. M. V. **Análise do fluxo de processamento sísmico na bacia de Potiguar**. Niterói. 2010.

MEEK, R. A.; LINVILLE, J.; F., A. 5,067,112, 1991.

NOOTEBOOM, J. J. **Signature and amplitude of linear airgun arrays. Geophysical Prospecting, v. 26, n. 1, p. 194-201**. [S.l.]: [s.n.], 1978.

OLIVEIRA, M. S. D. **Análise Sísmica Usando Transformada Curvelet**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. [S.l.]. 2011.

PEDROSA, L. **Atenuação de Múltiplas utilizando a Filtragem F-K e Deconvolução Preditiva Multicanal em Dados Sísmicos registrados na Bacia do Jequitinhonha**. Bahia. 2016.

PETROBRAS. **Petrobras**. Disponivel em: <https://petrobras.com.br/pt/nossasatividades/principais-operacoes/bacias/bacia-de-santos.htm>.

PRESALPETROLEO. Disponivel em: <https://www.presalpetroleo.gov.br/ppsa/o-pre-sal/bacia-de-santos>.

ROBINSON, E. A.; TREITEL, S. **Geophysical signal analysis**. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2000.

ROCHA, M. **Técnicas para supressão de múltiplas na Foz do Amazonas utilizando o software focus**. Niterói. 2010.

ROSA, A. L. R. **Análise do sinal sísmico**. Rio de Janeiro, Brasil: SBGF-Sociedade Brasileira de Geofísica, 2010.

SANTOS, M. F. X. D. **Aplicação da deconvolução adaptativa wiener-levinson e filtragem SVD em dados sísmicos da Bacia de Tacutu**. Salvador. 2016.

SOUZA, D. Tech Tudi, 23 dez. 2014. Disponivel em: <https://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2014/12/burn-in-ghosting-e-tearingaprenda-a-solucionar-problemas-da-sua-smart-tv.html>.

VEEKEN, P. C.; MOERKERKEN, B. V. **Seismic stratigraphy and depositional facies models**. [S.l.]: EAGE Publications bv, 2013.

WEGLEIN, A. B. Multiple attenuation: an overview of recent advances and the road ahead. **The Leading Edge, v. 18, n. 1**, 1999. p. 40-44.

WEGLEIN, A. B. **Responding to processing seismic E&P challenges**. [S.l.]. 2006.

WIKI. **seg.org**. Disponivel em: <https://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Fig_P-6>.

XSGEO , 29 Jan 1999. Disponivel em: <http://www.xsgeo.com/course/basic.htm>.

YILMAZ, O. **Seismic data analysis**. [S.l.]: Society of exploration geophysicists, 1993.

ZHONGYU, H.; WENYING; ET AL. Complex sea-surface condition deghosting technology of towed streamer data. **Journal of Geophysics and Engineering**, 2017.