

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE



TÉCNICAS PARA SUPRESSÃO DE MÚLTIPLAS NA FOZ DO AMAZONAS
UTILIZANDO O SOFTWARE FOCUS

-Projeto Final II-

Natacha Medeiros Rocha

Orientador: Prof. Marco Antonio Cetale Santos

Niterói, Novembro de 2010

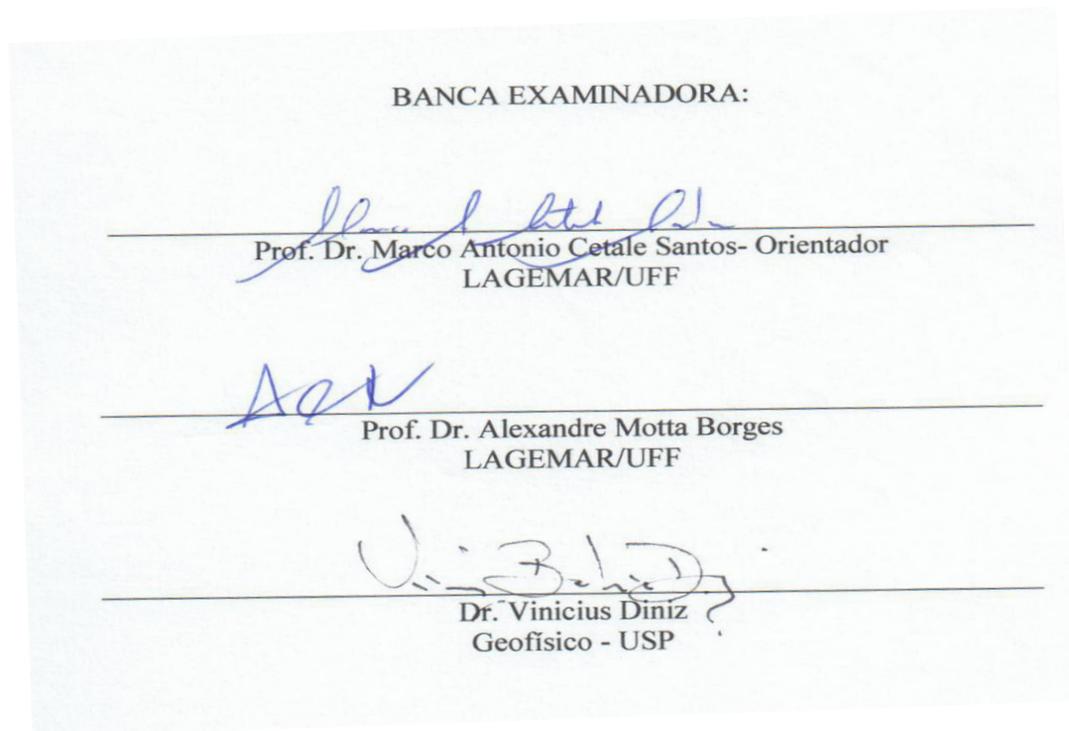
NATACHA MEDEIROS ROCHA

TÉCNICAS PARA SUPRESSÃO DE MÚLTIPLAS NA FOZ DO AMAZONAS
UTILIZANDO O SOFTWARE FOCUS

-Projeto Final II-

Dissertação apresentada ao Programa de
Graduação em Geofísica da Universidade
Federal Fluminense, como requisito para
obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Aprovada em 08 de DEZEMBRO de 2010



SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Área de Estudo	4
2.1 - Localização	4
2.2 - Geologia da foz do Amazonas	6
2.3 - Arcabouço Tectônico.....	9
2.4 - Bacia da Foz do Amazonas	10
2.5 - Sedimentação.....	11
3. Teoria	13
3.1 - Sísmica de Reflexão	13
3.2 - Aquisição, Processamento Sísmico e interpretação	14
3.3 - Múltiplas.....	19
3.4 - Classificação das múltiplas	20
3.5 - Atenuação de Múltiplas	22
4. Metodologia	24
5. Resultados obtidos	76
6. Conclusões.....	78
7. Bibliografia	79
8. Lista de Figuras	82

RESUMO

As múltiplas em um dado sísmico são prejudiciais, podem ocasionar diversos erros interpretativos, por isso seus efeitos devem ser removidos do dado. O presente trabalho tem como objetivo a utilização de diferentes técnicas para atenuação das múltiplas.

Na maioria dos casos, são necessárias mais de uma técnica para atenuação de múltiplas, pois nenhuma técnica é capaz de suprimir todas as múltiplas de um dado sísmico. Nesse trabalho final de curso pretende-se trabalhar com três técnicas diferentes. O SRME (Surface Related Multiple Elimination), o Radon – High Resolution e a deconvolução preditiva.

O SRME é método amplamente baseado na equação da onda e é eficaz para supressão de múltiplas de afastamento fonte-receptor curto. O Radon por sua vez, tem como princípio fundamental básico, a diferença de velocidade entre os eventos primários e secundários, conseqüentemente, não é eficaz para afastamento fonte-receptor curto, onde o moveout entre esses eventos é pequeno. Enquanto a deconvolução preditiva é um método amplamente depende da periodicidade das múltiplas.

Palavras chaves: **SRME, RADON, DECONVOLUÇÃO PREDITIVA**

1. INTRODUÇÃO

Impulsionados por uma crescente demanda no consumo de hidrocarbonetos, e pela necessidade de encontrar e explorar melhor os campos petrolíferos, a geofísica vem se tornando uma das mais importantes ferramentas utilizadas na exploração e produção petrolífera.

Tendo em vista que os campos de petróleo estão situados em subsuperfície, e que a grande parte não chega à superfície naturalmente, é necessário o uso dos Métodos Geofísicos para que essas jazidas sejam encontradas.

O método Geofísico mais utilizado na exploração de hidrocarbonetos é o Sísmico, pois esse método consegue detectar feições geológicas, tais como falhas, estruturas de dobramentos, possíveis acumulações de hidrocarbonetos, e outras importantes estruturas com boa precisão.

O método sísmico foi criado na década de 20 e, desde então, essa tecnologia vem sendo aprimorando constantemente. Segundo *Yilmaz (1987)*, esse método é dividido em três etapas principais: Aquisição, Processamento e a Interpretação.

Na aquisição sísmica, a técnica mais utilizada é a do CMP, *Comum Midpoint*, (Ponto Médio Comum), idealizada por Mayne, em 1962. 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*). Isto é responsável pela melhoria da seção sísmica final, já que este aumenta a razão sinal/ruído.

Na etapa do processamento (*Yilmaz, 1987*), o analista sísmico tem como tarefas selecionar a etapas apropriadas de acordo com o dado, escolher os parâmetros ideais para cada

etapa do processamento e avaliar os resultados a cada etapa, e diagnosticar qualquer problema causado pelo uso inapropriado dos parâmetros.

É na etapa referente ao processamento sísmico que o dado é analisado e tratado, sabe-se que toda gravação sísmica, por melhor que seja, é composta por sinal e por ruído. Este último é definido como qualquer energia que interfira no sinal desejado. Sendo assim, retirá-los torna-se imprescindível para a qualidade das seções sísmicas.

Devido há uma grande diversidade de tipo de ruídos, a atenuação destes corresponde a um dos maiores desafios da etapa do processamento. Dentre as diversas classificações, as múltiplas representam um dos piores tipos de ruídos, pois interferem no processamento sísmico e afeta também a qualidade interpretação, podendo levar o intérprete a cometer erros. Com isso, a atenuação de reflexões múltiplas representa uma das etapas mais importantes e difíceis do processamento de dados sísmicos (*Souza et al, 2008*).

Na etapa referente à interpretação sísmica, os intérpretes são capazes de delimitar diferentes camadas sedimentares, podem definir estruturas e até mesmo criar modelos geológicos das bacias sedimentares em análise. Para auxiliar nessa etapa, pode-se ainda utilizar os atributos sísmicos.

Nesta monografia, pretende-se utilizar uma linha sísmica marinha, localizada na Bacia da Foz do Amazonas. A aquisição desta linha foi realizada em julho de 1987, pela empresa “GEOSOURCE”, com navio sísmico M/V GEOMAR III para a Petrobras. Posteriormente, a linha sísmica foi comprada pela STRATAGEO e cedida para realização deste trabalho de conclusão de curso de Graduação.

Esta monografia consiste em processar essa linha sísmica, objetivando desenhar o fluxo de processamento, da melhor maneira possível. Vale ressaltar que foco principal do

processamento refere-se às técnicas para atenuação de múltiplas, tais como o SRME e o RADON. Para o processamento, será utilizando o Software FOCUS da PARADIGM.

Nessa linha sísmica, o problema em relação à presença de múltiplas, torna-se ainda pior. Pois, na Bacia da Foz do Amazonas, as camadas são intercaladas por sedimentos de diferentes impedâncias acústicas (densidade e velocidade da onda no meio), gerando assim, múltiplas de peg-leg, que aparecem, principalmente no offset curto.

O objetivo do processamento é obter os Gathers (famílias de CMP) sem múltiplas e o mais limpo possível, com o intuito de aplicar uma técnica, chamada de AVO (Amplitude versus Offset), sendo assim, possível realizar análises de atributos sísmicos. De forma que, através esta técnica seja possível explicar a presença de uma anomalia de amplitude, bastante evidente nesta linha sísmica.

O presente trabalho encontra-se dividido em etapas. A primeira consiste no estudo da área, sendo dividida em: Localização, Geologia da Foz do Amazonas, Arcabouço Tectônico e na Bacia da Foz do Amazonas. Na segunda etapa será estudada a Teoria que fornece o embasamento do trabalho, isto é, o método sísmico, e as múltiplas. A quarta refere-se à Metodologia que será desenvolvida; na quinta etapa, encontra-se o estudo sobre AVO. A sexta etapa corresponde aos Resultados Finais e a sétima e última consiste nas referências bibliográficas que foi utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1 - Localização

A margem continental Brasileira é uma das mais extensas do mundo. De acordo com a evolução Tectônica, essa margem é dividida em três segmentos: Segmento Transformante (Margem Norte), Segmento Transversal (Margem Nordeste) e Segmento Divergente (Leste, Sudeste e Sul).

No segmento transformante da Margem continental brasileira estão localizadas as bacias da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Barreirinhas, Ceará e Potiguar.

O presente trabalho localiza-se a noroeste do segmento Transformante, mais precisamente na Bacia da Foz do Amazonas, tem como limite noroeste o Platô de Demerara, a sudeste a bacia Pará-Maranhão e no oceano, a elevação do Ceará e planície abissal de Demerara, como mostra a fig. 1.

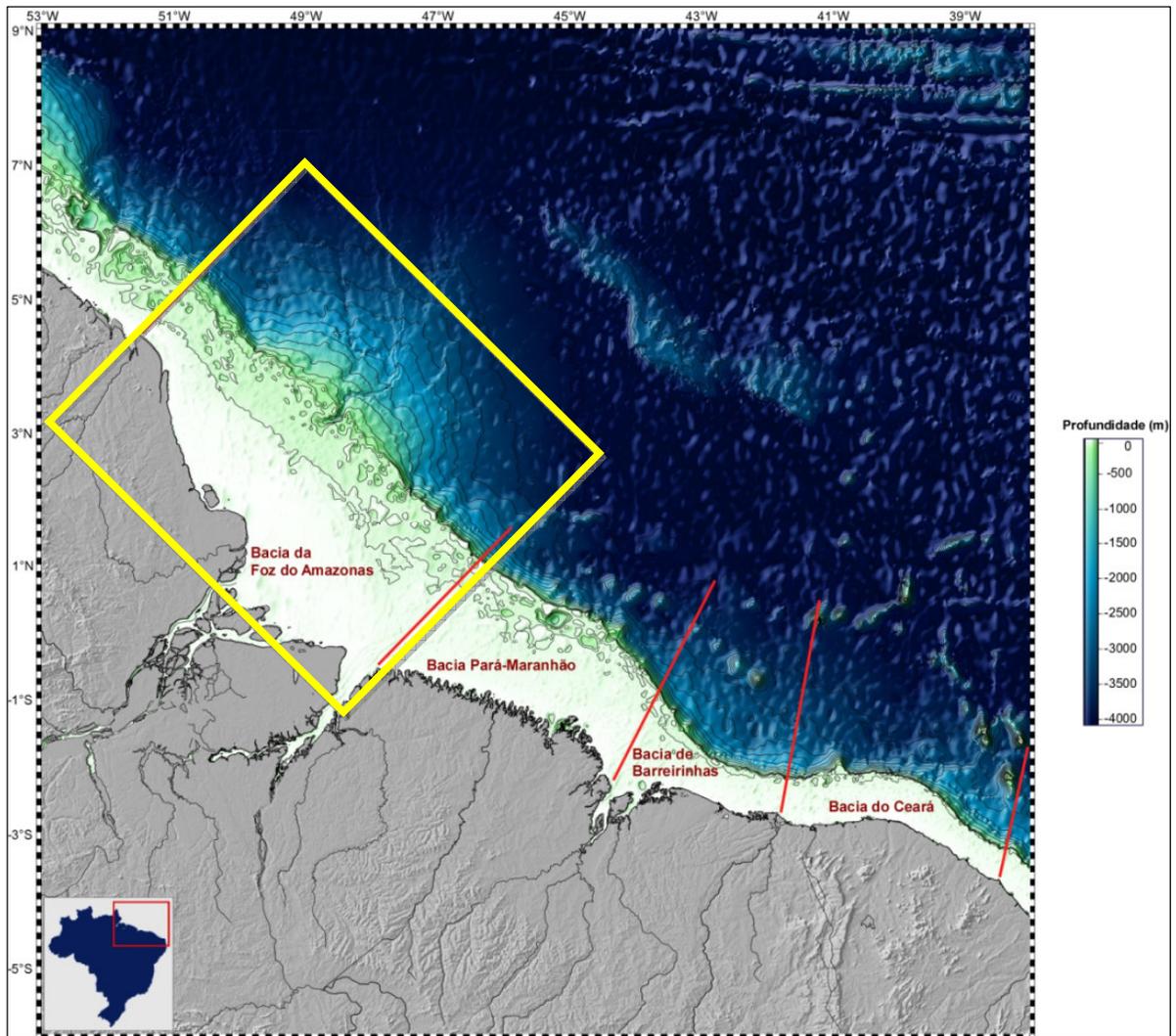


Fig. 1 – Mapa da área de Estudo, localizado na Bacia da Foz do Amazonas, destacado em amarelo. Base de dados batimétricos extraídos do GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans)

2.2 - Geologia da foz do Amazonas

A arquitetura convencional das bacias *rift*, onde a subsidência é controlada por uma importante falha normal de borda, não é um padrão facilmente identificado nas bacias da margem equatorial (Matos e Waick, 1998 *apud* Matos, 2000). Isto ocorre pelo fato da margem equatorial brasileira ter tido sua evolução sob um regime tectônico transformante, como é possível identificar na fig. 2.

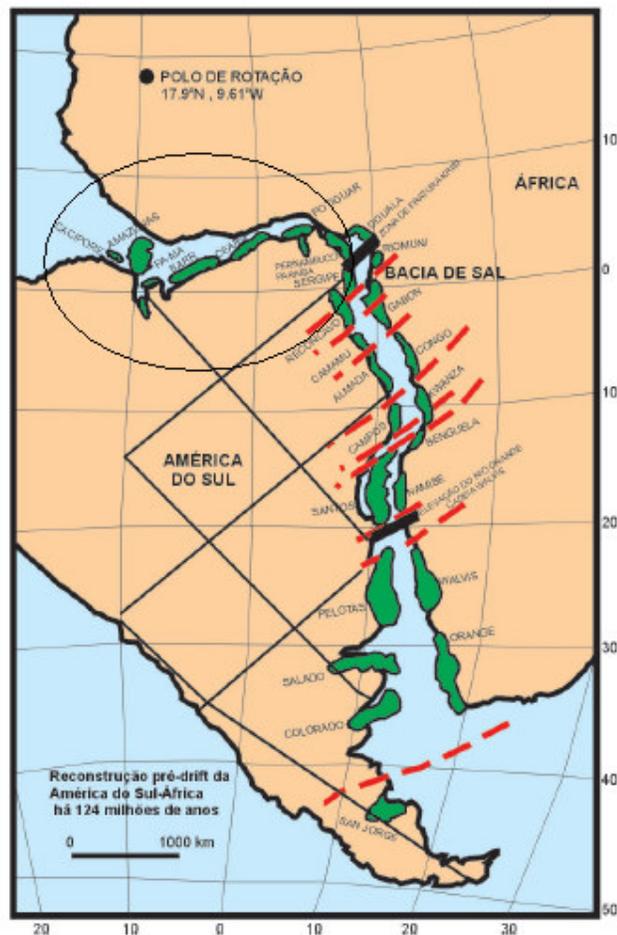


Fig. 2 – Reconstrução pré-drift da América e da África. Em destaque a evolução Transformante da Margem Equatorial brasileira. (Editado de Mohriak, 2003)

A evolução tectônica, da margem transformante do Atlântico Sul, caracteriza-se por três principais estágios: pré-transformante, sin-transformante e pós-transformante (Masle e Blarez, 1987), como mostrado na fig. 3.

O estágio Pré-Transformante é dividido em dois ciclos; o primeiro pré-transtensão e o segundo sin-transtensão. O ciclo de pré-transtensão é marcado pela deposição sedimentar das Bacias do Marajó, e na parte *onshore* da Bacia Potiguar, durante o Barremiano. Enquanto que no ciclo de sin-transtensão, é marcado pelo início dos esforços de transtensão, criando uma série de depocentros com direção NW-SE, dispostos *en echelón* (Matos, 1999). (figura 3-A)

A fase sin-transformante (fig. 3-B e C) inclui a movimentação entre os dois blocos (América do Sul e África) ao longo da falha transformante. Apesar deste domínio, surgiram também eventos de transtensão com cisalhamento puro, limitado por zonas cisalhantes discretas.

Posteriormente, o evento de transpressão originou um cinturão transpressivo (Bacias Piauí – Acaraú), como resultado do encurtamento geral e o soergimento de uma borda restrita do Atlântico Equatorial (Oliveira, 2005).

A fase pós-transformante (Cenomaniano ao Recente) é caracterizada pelo início da margem passiva transformante, ocorrendo contato entre a crosta oceânica e a crosta continental, ao longo da falha ativa, como mostra a fig. 3- (C). A transição entre as crostas é dada por falhas tipo *strike-slip*; observa-se uma diferença topográfica bastante evidente entre a porção rasa da margem e a bacia mais profunda. Segundo Matos (1999), essa fase é marcada por uma contínua subsidência e sedimentação na margem continental, como resultado do resfriamento e contração térmica.

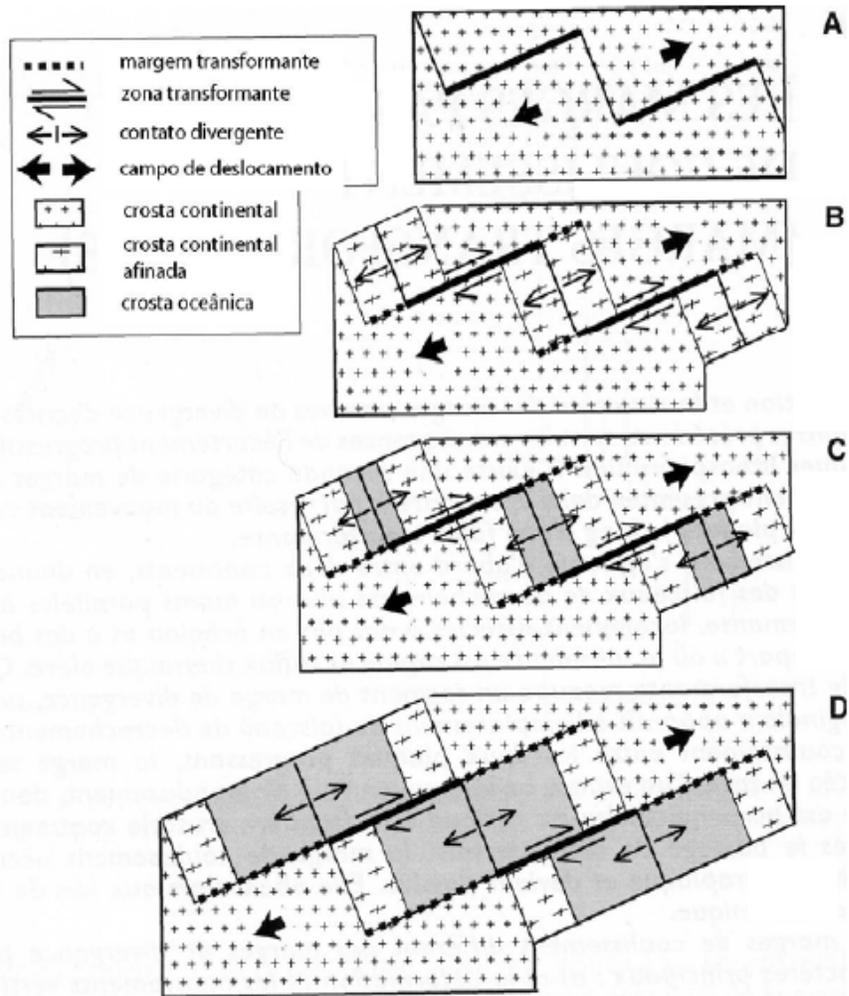


Fig. 3 – Estágios da evolução da Margem Equatorial Transformante (Masle e Blarez, 1987)

2.3 - Arcabouço Tectônico

Segundo *Russo* (1999), a profundidade do embasamento da Foz do Amazonas atinge mais de 18 km de profundidade.

O Arcabouço tectônico, sobre a qual a Bacia da Foz do Amazonas está localizada, é composto pelos sistemas de plataformas Fanerozóica do Pará-Maranhão e do Amapá, e por um sistema de *grabens*, o de Limoeiro (NW-SE) e Mexicana (NE-SW).

Segundo *Silva et. al.* (1999), na região do cone do Amazonas observa-se uma estruturação associada à tectônica gravitacional provocada pela pressão exercida pela espessa coluna sedimentar e pela própria morfologia regional que induz uma tectônica tensional próximo à borda da plataforma e talude superior, onde dominam estruturas lístricas, e feições compressoriais próximo à base do sopé continental onde dominam falhas e empurrões, como mostra a fig. 4.

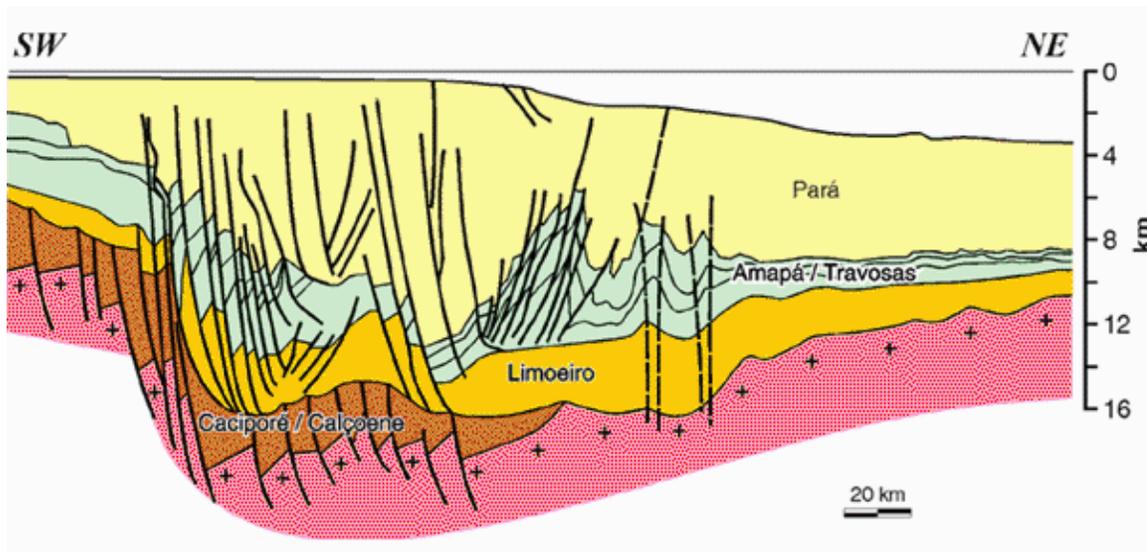


Fig. 4 – Perfil SW-NE da Bacia da Foz da Amazonas (Agência Nacional do Petróleo –ANP)

2.4 - Bacia da Foz do Amazonas

A Bacia da Foz do Amazonas ocupa uma área de aproximadamente 360.000 km², localizada entre as coordenadas 51° e 47° oeste, 0° e 6° norte (Brandão e Feijó, 1994), sendo o limite noroeste, pelo platô de Demerara; a nordeste, pela Bacia Pará-Maranhão; e no oceano, pela planície abissal de Demerara e elevação do Ceará.

Essa Bacia é dividida em Plataforma Continental e no Cone do Amazonas. A plataforma continental da Bacia da Foz do Amazonas tem aproximadamente 133 km no extremo norte e 330 km em frente à foz do Amazonas (Palma, 1979), atingindo cerca de 200 metros de profundidade. Entretanto, o Cone do Amazonas ocupa 160.000 km, que atinge uma profundidade de até 4500 metros (fig.5).

A evolução sedimentar dessa bacia foi alterada pelo soerguimento dos Andes, que inverteu o curso do rio Amazonas de E-W para W-E, durante o Mioceno. Isto fez com que os sedimentos depositados pelo rio alargassem a plataforma continental. Tornando esta bacia, diferente das bacias de margem transformantes, que apresentam plataformas continentais estreitas.

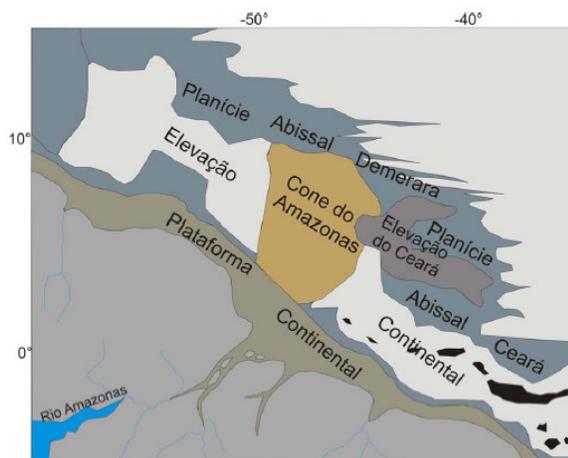


Fig. 5 – Limites e Divisão da Bacia da Foz do Amazonas (Modificado de Damuth et. al.,1988)

2.5 - Sedimentação

A bacia sedimentar da Bacia da Foz do Amazonas é caracterizada por um espesso prisma progradante de sedimentos siliciclásticos. Esse prisma é composto principalmente por sedimentos do Neomioceno ao recente, que recobre a toda plataforma carbonática do Eo-Terciário. (*Oliveira, 2005*)

Brandão e Feijó em 1994 propuseram uma nova carta estratigráfica para essa Bacia (vide anexo 1). Baseado em dados mais recentes, eles dividiram os dois sedimentos em duas seqüências: a de *rift* e a de Margem passiva.

A seqüência rift é encontrada nos *grabens* da área do Caciporé e é resultado de duas fases tafrogênicas distintas: uma vulcano-sedimentar, no Triássico, e outra siliciclástica, durante o Aptiano-Albiano. (*Tanaka, 2003*)

A seqüência de Margem passiva é representada por clásticos finos albo-cenomanianos, transgressivos marinhos, e por arenitos e folhelhos, progradantes neríticos e batiais que constituem a Formação Limoeiro. O sistema de plataforma-talude-bacia é composto pelos clásticos das Formações Marajó e Travosas, e pelos carbonatos da Formação Amapá. (*Oliveira, 2005*), como mostra a carta estratigráfica abaixo (fig. 6).



CARTA ESTRATIGRAFICA DA BACIA DA FÓZ DO AMAZONAS

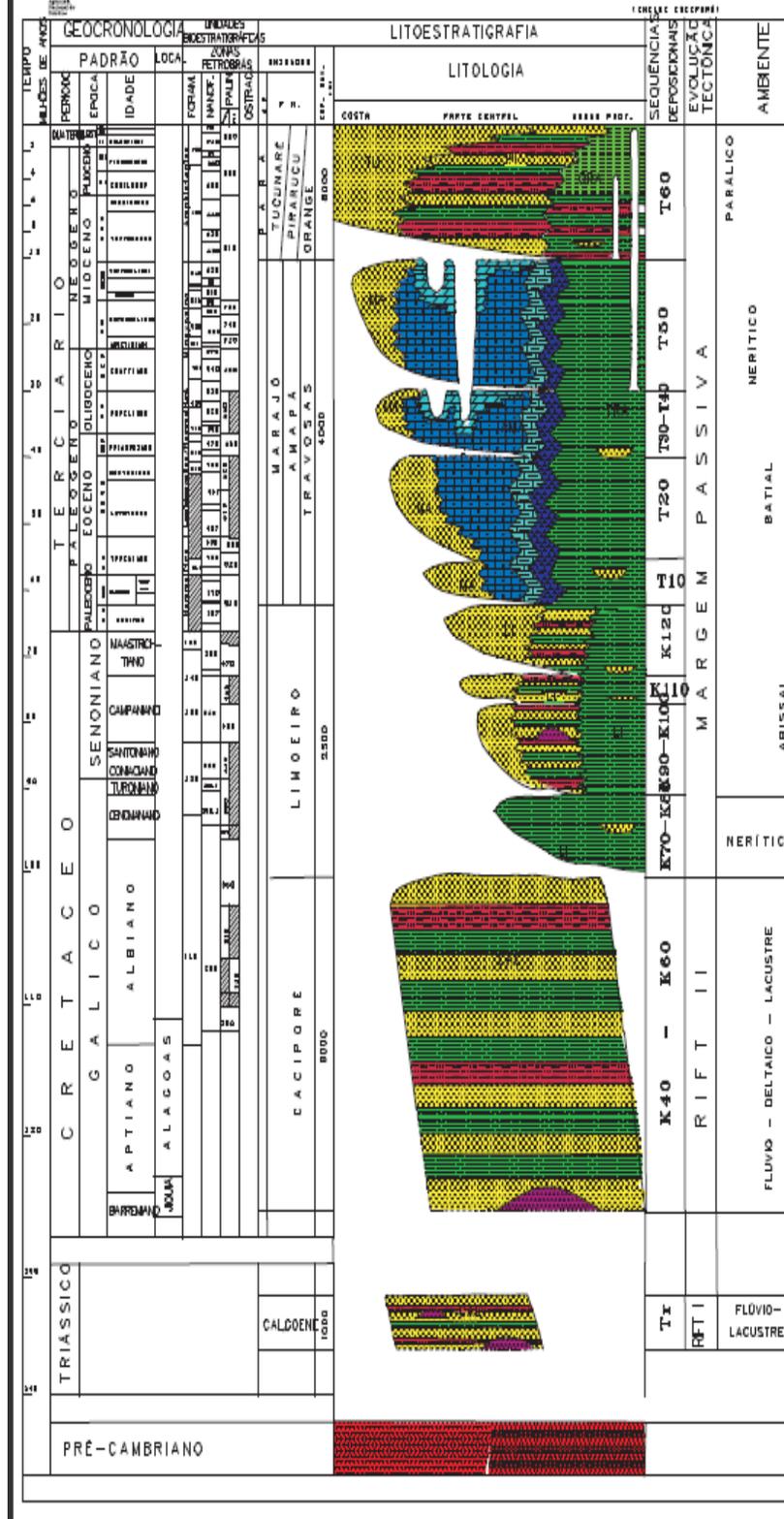


Fig. 6 – carta Estratigráfica da Bacia da Foz do Amazonas

3. TEORIA

3.1 - Sísmica de Reflexão

O método sísmico tem como princípio fundamental a propagação de energia no espaço e no tempo, através das ondas mecânicas em subsuperfície. Essa propagação ocorre através de movimentos vibratórios das partículas das rochas, devido à liberação súbita de energia, a partir de uma fonte geradora.

Quando essa energia é liberada, parte se propaga em direção ao interior da Terra, e são as classificadas como ondas de corpo (*body waves*); e outra parte se desloca na superficialmente, conhecidas como ondas superficiais (*surface waves*). Por esse motivo, apenas as ondas de corpo são utilizadas para a sísmica de reflexão.

O método sísmico é baseado na Lei de Snell-Descartes, isto é, quando uma frente de onda sísmica, gerada através de uma fonte, encontra uma interface geológica com propriedades elásticas diferentes, parte dessa energia é refletida e outra parte é refratada. Dessa maneira, as ondas sísmicas que penetram no interior da Terra, são posteriormente refletidas e voltam à superfície, onde são captadas por receptores (hidrofone – mar ou geofone – terra).

3.2 - Aquisição, Processamento Sísmico e interpretação

A aquisição sísmica pode ser marítima ou terrestre. O método mais utilizado, tanto para dados terrestres e marinhos, é a técnica do CMP (Commum Mid Point) que foi idealizada por *Mayne*, em 1962. Essa técnica permite que sejam gravados diversos traços de um mesmo ponto em subsuperfície, com diferentes distâncias entre fonte e receptores (offsets). O número de vezes que cada ponto é amostrado é conhecido como cobertura (*fold*).

O tempo de registro depende distância entre a fonte e o receptor mais distante (offset máximo), isto significa que quanto maior essa distância, maior será o tempo de registro do sinal. A taxa de amostragem (sample rate) é o intervalo de tempo que cada amostra é gravada, no qual, fornece a frequência máxima do sinal, através da equação da frequência de Nyquist.

A técnica do CMP fornece o aumento da razão sinal/ruído, através de múltiplas amostragens de um mesmo ponto. Entretanto, cada traço de um mesmo CMP tem um tempo de viagem diferente, devido as diferentes trajetórias. Por isso, é necessário corrigir essa diferença de tempo, colocando todos os traços dos CMP como a aquisição tivesse sido realizada com a distância entre fonte e receptor nula (zero offset).

Essa correção aplicada no CMP chama-se Normal Moveout (NMO). A fig. 7 mostra os refletores não corridos, representados pela linha tracejada e a correção ideal de NMO para o dado, representado na pela linha em vermelho.

Segundo Yilmaz (1987), o tempo de viagem, como função da distância entre fonte-receptor, para uma série de camadas planas horizontais, é aproximadamente uma hipérbole, e considerando, apenas, offsets curtos a velocidade para correção de NMO e de empilhamento é aproximadamente à mesma. Porém, para efeito de praticidade, a velocidade de empilhamento é utilizada também para correção de NMO.

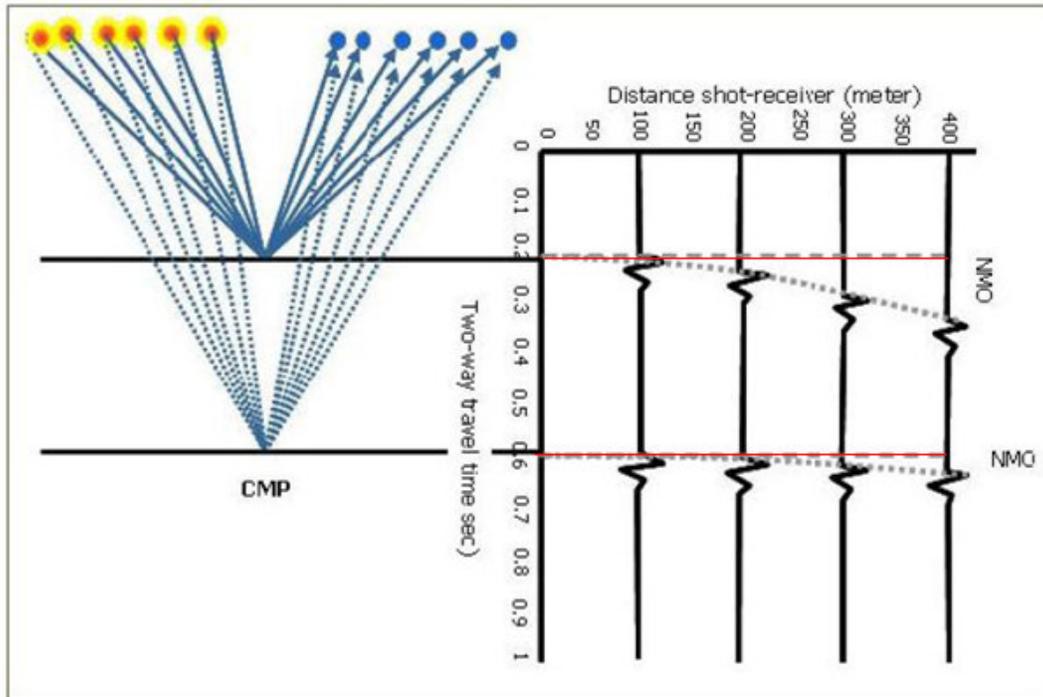


Fig. 7 – Efeito hiperbólico e pontilhado a correção de NMO. (Modificada de EAGE)

O processamento sísmico tem como objetivo produzir imagens, com a máxima fidelidade possível da subsuperfície, que serão posteriormente interpretadas pelo geofísico ou pelo geólogo.

O sinal que chega aos receptores é contínuo (análogos) em função do tempo, mas trabalhar com sinais contínuos demanda muito tempo e muita memória computacional. Para efeito de simplificação e redução de tempo e custo, os dados são digitalizados.

Digitalizar um dado significa que, uma função contínua no tempo, pode ser escrita através de amostragens com um intervalo de tempo fixo entre elas, na qual são gravados os valores da função em cada ponto de amostragem.

A taxa de amostragem (sample rate) de uma função deve ser tal que a frequência de amostragem seja maior que o dobro do conteúdo de frequência do sinal (a frequência máxima

do sinal é chamada frequência de Nyquist) para que esta função possa ser reproduzida sem *aliasing* (falseamento). Como é possível analisar na equação abaixo.

$$F_a > 2 \times F_n$$

$$\text{Como: } F_a = 1 / T_a$$

$$1 / T_a > 2 \times F_n \rightarrow T_a > 1 / 2 \times F_n$$

Sendo: F_a – Frequência de Amostragem; T_a – Taxa de amostragem; e F_n – Frequência de Nyquist

Na fig. 8 (A) é possível verificar a que a taxa de amostragem (pontos pretos) consegue recuperar a forma da onda, enquanto na fig. 8 (B) a forma da onda não é recuperada, ocorrendo o fenômeno de falseamento.

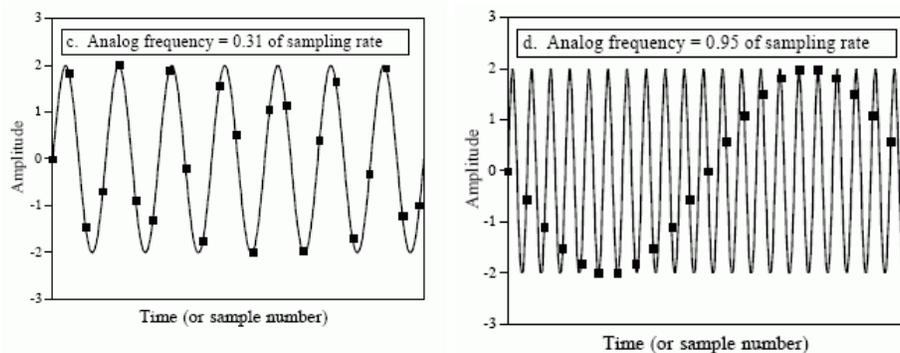


Fig. 8 – Os pontos indicam onde foram feitas as amostragens. (fonte: Smith, S.)

O processamento sísmico é uma etapa de suma importância na Sísmica de Reflexão, pois consiste em melhorar o dado ao máximo para que este possa ser interpretado com grande precisão e acurácia.

A qualidade de uma seção sísmica final depende em grande parte do processamento. Contudo, essa etapa não é capaz de fazer o dado um dado ruim se transformar em um dado bom (Knapp, 1986, apud Brunetta, 2005). O fluxo para o processamento sísmico convencional é mostrado abaixo, porém o fluxo pode e deve ser modificado de acordo com a necessidade

deste.

O processamento sísmico convencional é dividido nas seguintes etapas:

Geometria



Correções estáticas (dado terrestre)



Edição de traços



Análise de Velocidade Preliminar



Limpeza de Ruídos (coerente e aleatório)



Deconvolução



Análise de Velocidade → Empilhamento → Migração Pós-Stack → Filtros Finais



Migração Pré-Stack



Empilhamento



Filtros Finais

Durante o processamento sísmico, um dos maiores objetivos é eliminar os ruídos existentes nos dados. Os ruídos sísmicos podem ser classificados em duas categorias: os ruídos coerentes e os aleatórios.

Os ruídos aleatórios ocorrem na direção temporal e espacial e não são correlacionados traço a traço; os ruídos aleatórios temporal afetam, principalmente, o tempo de registros tardio (late time). Filtros de passa-banda variantes no tempo podem ser eficazes para retirá-lo e por não serem correlacionados entre traços, podem ser atenuados também, através do empilhamento no domínio do CMP.

Já os ruídos coerentes são aqueles que se repetem em algum domínio específico, na maioria dos casos, no domínio do tiro. São classificados em lineares, de reverberação e de múltiplas. Esta última será estudada com mais detalhe no próximo capítulo.

Após processadas, as seções sísmicas migradas na escala do tempo ou em profundidade são enviadas aos intérpretes, para que estes possam inferir sobre as possíveis estruturas, tais como domos de sal, falha, dobramento, grabens, horst, entre outras. A localização dessas estruturas é de fundamental importância, pois pode permitir a criação de um modelo geológico da área em estudo. E conseqüentemente, essas feições geológicas são importantíssimas no processo de geração dos hidrocarbonetos.

3.3 - Múltiplas

A presença de múltiplas em um dado sísmico apresenta efeitos negativos nas etapas do processamento e da interpretação. No processamento, a presença destas induz o erro na análise de velocidade, pois necessitam de uma velocidade de NMO menor que as primárias para serem corrigidas. Na interpretação, as múltiplas podem dificultar a identificação de alvos sísmicos e/ou provocar possíveis erros interpretativos.

Sendo assim, a atenuação (ou supressão) de múltiplas torna-se extremamente necessário no dado sísmico. Segundo *Souza et. al.* (2008), esta etapa representa um dos problemas mais importantes e difíceis do processamento de dados sísmicos.

As múltiplas são eventos que são submetidos à reflexão mais de uma vez. Isso significa que parte da energia fica reverberando entre camadas, nas quais a diferença de velocidade é grande. Como a amplitude é proporcional ao coeficiente de reflexão, somente um grande contraste de impedância é capaz de gerar múltiplas extremamente fortes.

3.4 - Classificação das múltiplas

Há diversas maneiras de classificar as múltiplas. Neste trabalho serão consideradas apenas duas. A primeira classificação leva em consideração se primeiro refletor que originou as múltiplas, ou não. E a outra, o tempo de transito da múltipla.

Na primeira classificação, dividem-se as múltiplas em dois grupos: as relacionadas com a superfície e aquelas não relacionadas. As múltiplas relacionadas com a superfície são aquelas que apresentam ao menos uma reflexão na superfície, como mostra a fig. 9. É possível perceber que se o primeiro refletor (superfície da água) fosse acusticamente transparente, esse tipo de múltipla não existiria.

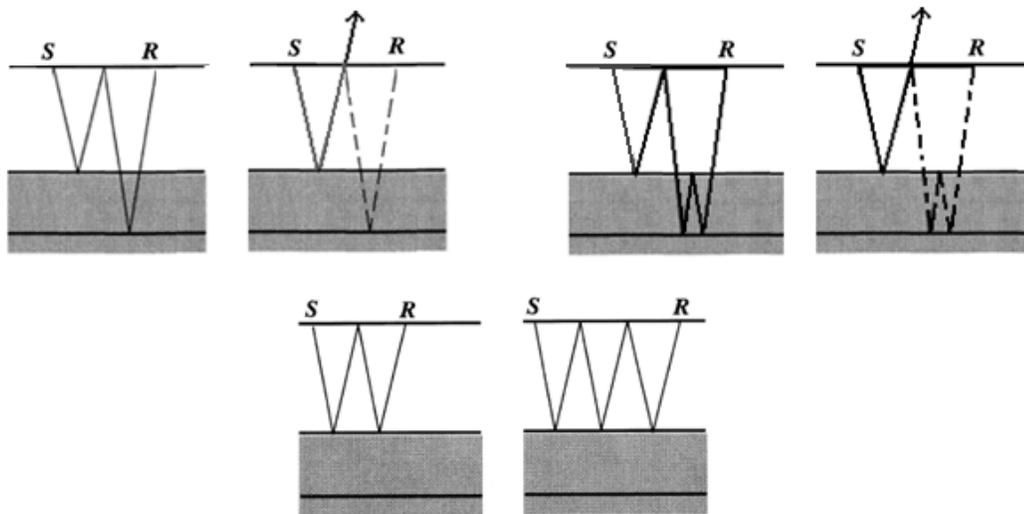


Fig. 9 – Múltiplas Relacionadas com a Superfície (Modificado Yilmaz, 1987)

A segunda classificação considera o tempo de trânsito da múltipla, sendo dividida em *short path* (curto período) e *long path* (longo período). As múltiplas de longo período são aquelas, cujo caminho percorrido é longo quando comparado com a onda primária, sendo assim, essa múltipla aparece no dado separado dos eventos. Enquanto que, as múltiplas de *short path*, são aquelas que a trajetória é curta, conseqüentemente são registradas logo após as primárias.

Um tipo de múltipla de *short path* de grande importância neste trabalho são as múltiplas de *peg-leg*. Essas são formadas a partir de sucessivas reflexões entre a base e o topo de camadas pouco espessas, por isso, a energia chega com atraso nos receptores e a forma da onda se alonga. Dois exemplos de múltiplas de *peg leg* podem ser vistas na figura 10 (A), representa uma *peg leg* de primeira ordem e a figura 10. (B) uma *peg leg* de segunda ordem.

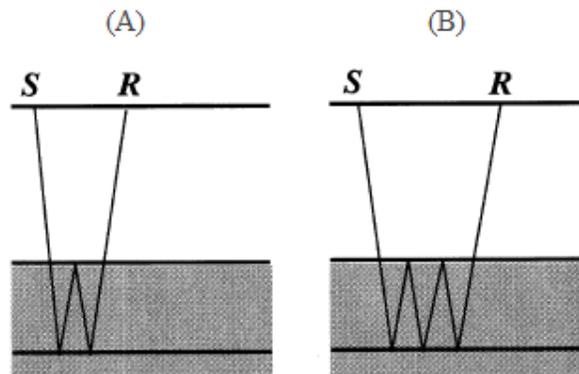


Figura 10 – Múltiplas de *peg-leg* (Yilmaz, 1987)

As múltiplas são feições comuns em levantamentos terrestres e marinhos. Porém em dados marinhos, estas são mais frequentes e apresentam maiores problemas devido aos grandes contrastes de impedância entre o contato lâmina de água e ar e o contato entre a lâmina de água e o fundo marinho.

3.5 - Atenuação de Múltiplas

Atualmente, diversas técnicas são bastante utilizadas para supressão de múltiplas, três destas são consideradas as mais importantes. A primeira é baseada nas técnicas de discriminação de velocidade entre as ondas primárias e as múltiplas; a segunda baseia-se na equação da onda; e a terceira destas técnicas, na periodicidade das múltiplas.

Todos os métodos, citados acima, apresentam teorias bem desenvolvidas e boas concepções, mas, na maioria das vezes, sozinhos podem obter resultados abaixo do esperado. Isso ocorre porque alguns métodos são eficazes para distância de fonte-receptor curta e outros para distâncias longas, e outros dependem da velocidade.

A técnica baseada na discriminação de velocidade não apresenta resultados eficazes para distâncias entre fonte-receptor pequena (offset curto). Isso ocorre porque a velocidade de moveout da primária e da múltipla deve ser razoavelmente distinta para que este método obtenha bons resultados, fato este, que não ocorre na distância fonte-receptor curta, nos quais as curvaturas entre ambas são bem semelhantes. O Radon é um dos métodos baseado na discriminação da velocidade entre primárias e múltiplas.

Técnicas que utilizam a equação da onda são baseadas na teoria que as múltiplas podem ser preditas através da extrapolação do campo de onda e depois removidas com um filtro de subtração adaptativa. A extrapolação do campo de onda é feita através de uma série de convoluções e integrais do campo de onda com ele mesmo. Um bom exemplo desse tipo de técnica é o SRME.

Os métodos baseados na periodicidade das múltiplas têm como princípio fundamental que a múltiplas apresentam periodicidade perfeita, o que não ocorre para distâncias entre

fonte-receptor longas (offset longo). Comprovada pelo fato de que a periodicidade “perfeita” só pode ser possível se o meio for horizontal e a aquisição for zero offset. Um exemplo desse tipo de técnica para atenuação de múltiplas é a deconvolução preditiva.

É de suma importância ressaltar que na maioria dos casos, para dados reais, são utilizadas mais de uma técnica para remoção de múltipla. Isso ocorre porque algumas técnicas são eficientes para remoção de múltiplas no offset curto, como o método de SRME. Outros métodos, como o Radon conseguem eliminar a múltipla no offset longo. Por esse motivo, é importante que o dado seja analisado e que as técnicas de supressão de múltiplas sejam escolhidas de acordo com a necessidade do dado sísmico.

Um grande problema para atenuação das múltiplas é a aplicação da correção de espalhamento geométrico, pois essa correção resulta no aumento da amplitude das múltiplas e por isso, só deve ser aplicado após a etapa de supressão destas.

4. METODOLOGIA

Neste presente trabalho irá utilizar a linha sísmica marinha, 0222-0736, localizada na Foz do Amazonas, tendo com objetivo descrever todas as etapas do método sísmico que levaram à seção sísmica final.

4.1 - Aquisição da Linha 0222-0726

A aquisição desse dado sísmico foi realizada pela empresa “GEOSOURCE”, com navio sísmico M/V GEOMAR III para a Petrobras, em 1987.

Esta aquisição tem um tempo de registro de 12 segundos, taxa de amostragem de 4 ms, isto é, frequência de Nyquist de 125 Hz; offset mínimo de 202 metros e o máximo de 4390 metros; e 240 canais. A distância do Ponto de Tiro (PT ou do inglês Shot Point – SP) é de 50 metros. Realizaram-se 415 tiros, para cada tiro é associado um número de registro, que é chamado de FFID (Field File identification).

Nesse arranjo, o canal mais próximo da fonte é 240, com uma distância da fonte (offset mínimo) de 202 metros. Os primeiros 143 canais (240 até o 97) distam 12,5 metros entre si, (totalizando 1787,5 metros), enquanto os canais 97 ao 1, distam 25 metros um dos outros, (totalizando 2400 metros).

$$\text{DISTÂNCIA FONTE-RECEPTOR MÁXIMA} = 202 + 1787,5 + 2400 = 4389,5$$

4.2 - – Processamento da Linha 0222-0736

O processamento sísmico dessa linha foi realizado utilizando o software FOCUS. O fluxo desenhado para este processamento será diferenciado do convencional, analisando as características desta linha, chegou-se a conclusão que o melhor fluxo para esse dado é o seguinte:

- Leitura do dado (sgy) e conversão para o formato interno do FOCUS (pds)
- Geometria & Empilhamento do traço mais próximo como Controle de Qualidade
- Correção de *Source firing delay*
- Edição de traços
- Limpeza no Domínio do tiro
- Velocidade Bruta (cada 1 km) → Empilhamento Preliminar
- SRME
- Velocidade 1 - (cada 0.5 km) → Empilhamento
- Radon Parabólico HR (High Resolution)
- Velocidade 2 - (cada 0.5 km) → Empilhamento
- Deconvolução → Empilhamento
- Migração Pós-Empilhamento – como Controle de Qualidade
- Migração Pré Empilhamento
- Empilhamento
- Filtros finais

4.3 - Geometria

A geometria é uma etapa de suma importância no processamento, pois determina a localização do tiro e dos receptores. Qualquer erro na geometria impossibilita ordenar o dado de acordo com famílias (domínios), sejam elas de tiro, CMP, offset, estações receptoras, etc. Conseqüentemente, erros na geometria põem em risco todo o trabalho do analista sísmico.

Para montagem da geometria, utilizou-se o arquivo de UKOOA, que possui apenas as coordenadas do Tiro (a cada 50 metros); e o arquivo de TOC file, que relaciona o Ponto de Tiro (PT) e os registros de campo (FFID).

Na geometria desse dado, encontrou-se certa dificuldade devido às mudanças entre as distâncias dos receptores. Para que todas as estações receptoras existissem, foi necessário criar estações interpoladas a cada 12,5 metros a partir da coordenada do tiro. Os primeiros 143 canais, exceto pelo offset mínimo, localizam-se em estações consecutivas, em relação ao ponto de tiro. Enquanto os últimos 97 canais estão a duas estações entre si, pois a distância entre eles é de 25 metros. Outro problema para montagem da geometria foi a distância mínima entre fonte e receptor de 202 metros.

Por isso, utilizou-se um módulo do FOCUS chamado de MARINE, que a partir dos parâmetros especificados pelo usuário, cria a geometria do dado com coordenadas fictícias. Dessa forma foram especificados: a quantidade de tiros, quantidade de estações, canal mais próximo e mais distante e a distância entre receptores.

No FOCUS, a montagem da geometria dá-se a partir do preenchimento de tabelas. Dessa forma, na tabela do tiro, coloca-se a quantidade destes, suas coordenadas e estação, relaciona-se também o tiro e o FFID. Para o caso de utilização do módulo MARINE, é

extremamente recomendável que as coordenadas dos pontos de tiro e das estações sejam salvas em coluna da tabela, para que possam ser incorporadas ao dado posteriormente.

Os CMP são criados automaticamente pelo programa, bem como suas coordenadas, para isso são utilizadas como base as coordenadas presente na tabela dos receptores.

Como controle de qualidade, o Focus oferece diversas ferramentas. Uma delas é o Basemap, que permite que as coordenadas da tabela do Tiro, Receptor e CMP sejam plotadas em um mapa. As coordenadas do CMP fictícias do CMP foram plotadas nesse basemap.

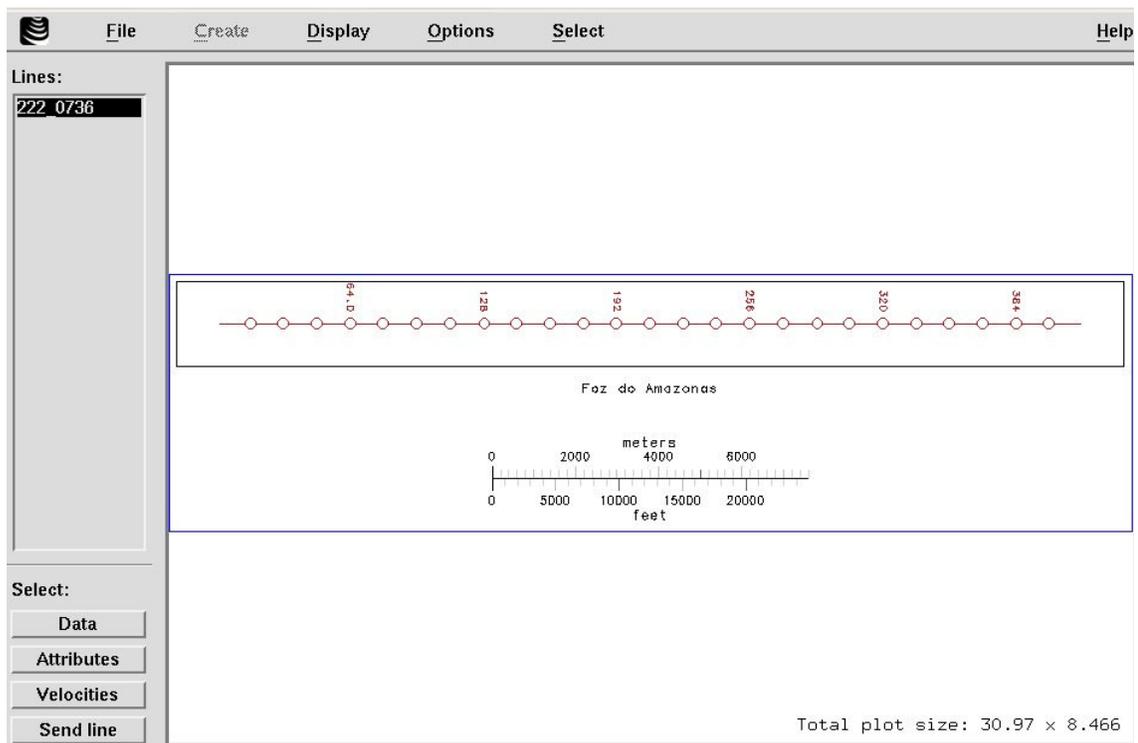


Fig. 11 - Basemap do Focus com as coordenadas do CMP

O cálculo do fold, para esta linha, foi comprometido devido à diferença de distância entre as estações, fazendo com que o fold varie entre 42 e 18 traços por CDP, como mostra a tabela da fig. 12, que corresponde ao spreadsheet do FOCUS. Nessa tabela Já foi inserida as coordenadas reais dos CMP.

	Cdp	Cdp X	Cdp Y	FOLD
1362	1363	752575.31	383590.25	42.0
1363	1364	752579.94	383594.44	18.0
1364	1365	752584.56	383598.59	42.0
1365	1366	752589.19	383602.75	18.0
1366	1367	752593.81	383606.91	42.0
1367	1368	752598.44	383611.06	18.0
1368	1369	752603.06	383615.25	42.0
1369	1370	752607.69	383619.41	18.0
1370	1371	752612.25	383623.62	42.0
1371	1372	752616.88	383627.84	18.0
1372	1373	752621.44	383632.06	42.0
1373	1374	752626.00	383636.31	18.0
1374	1375	752630.56	383640.53	42.0
1375	1376	752635.12	383644.75	18.0
1376	1377	752639.75	383648.97	42.0
1377	1378	752644.31	383653.19	18.0
1378	1379	752649.00	383657.34	42.0
1379	1380	752653.62	383661.50	18.0
1380	1381	752658.31	383665.69	42.0
1381	1382	752663.00	383669.84	18.0
1382	1383	752667.62	383674.00	42.0
1383	1384	752672.31	383678.19	18.0
1384	1385	752677.00	383682.34	42.0
1385	1386	752681.62	383686.50	18.0
1386	1387	752685.56	383691.34	39.0
1387	1388	752689.50	383696.19	21.0
1388	1389	752693.38	383701.06	41.0
1389	1390	752697.31	383705.91	19.0
1390	1391	752701.25	383710.75	41.0

Fig.12 - Tabela com os CMP's com máximo fold.

Outra ferramenta para controle de qualidade da geometria no FOCUS é a ferramenta “Interactive Geometry”, que consiste em um único mapa com as linhas referentes aos receptores, os cabos, CDP e estações, como mostra a fig. 13. É possível identificar em vermelho a posição relativa as estações, em verde a posição dos CMP, em cinza a localização do cabo para cada ponto de tiro e em azul a posição dos pontos de tiro.

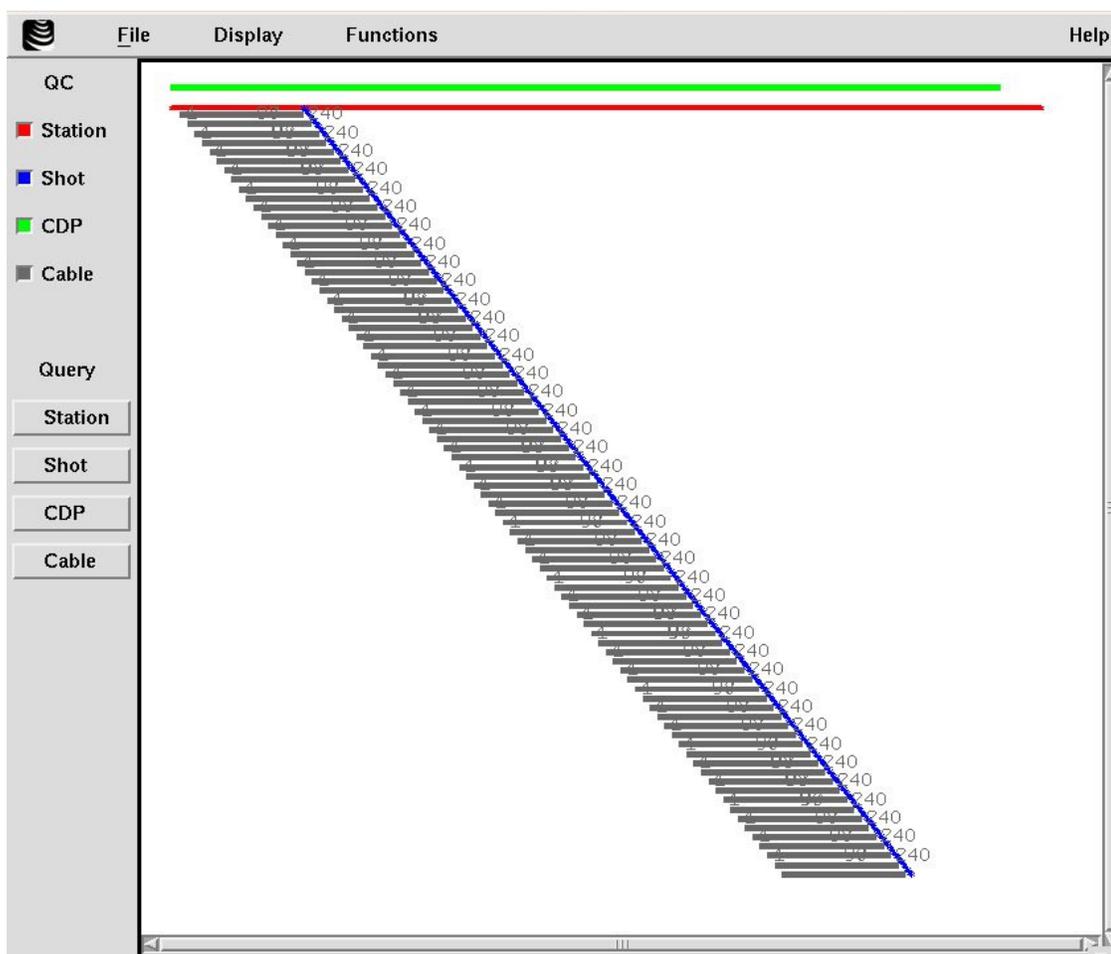


Fig.13 – Interactive Geometry

Outro controle de qualidade da geometria, pode também ser feito no domínio do tiro, no qual é possível inserir na parte superior da imagem um gráfico com a distância do offset mínimo e máximo. Para este dado o offset mínimo é de 202 metros e máximo de 4390, como pode ser visto na figura 14.

Ao analisar a imagem, percebe-se uma diferença na inclinação da reta, isso ocorre devido à diferença na distância entre os receptores. Quando a distância entre os receptores é

menor (os canais mais próximos da fonte), a inclinação da reta no gráfico (x,t) é menor do que a inclinação da reta quando a distância aumenta.

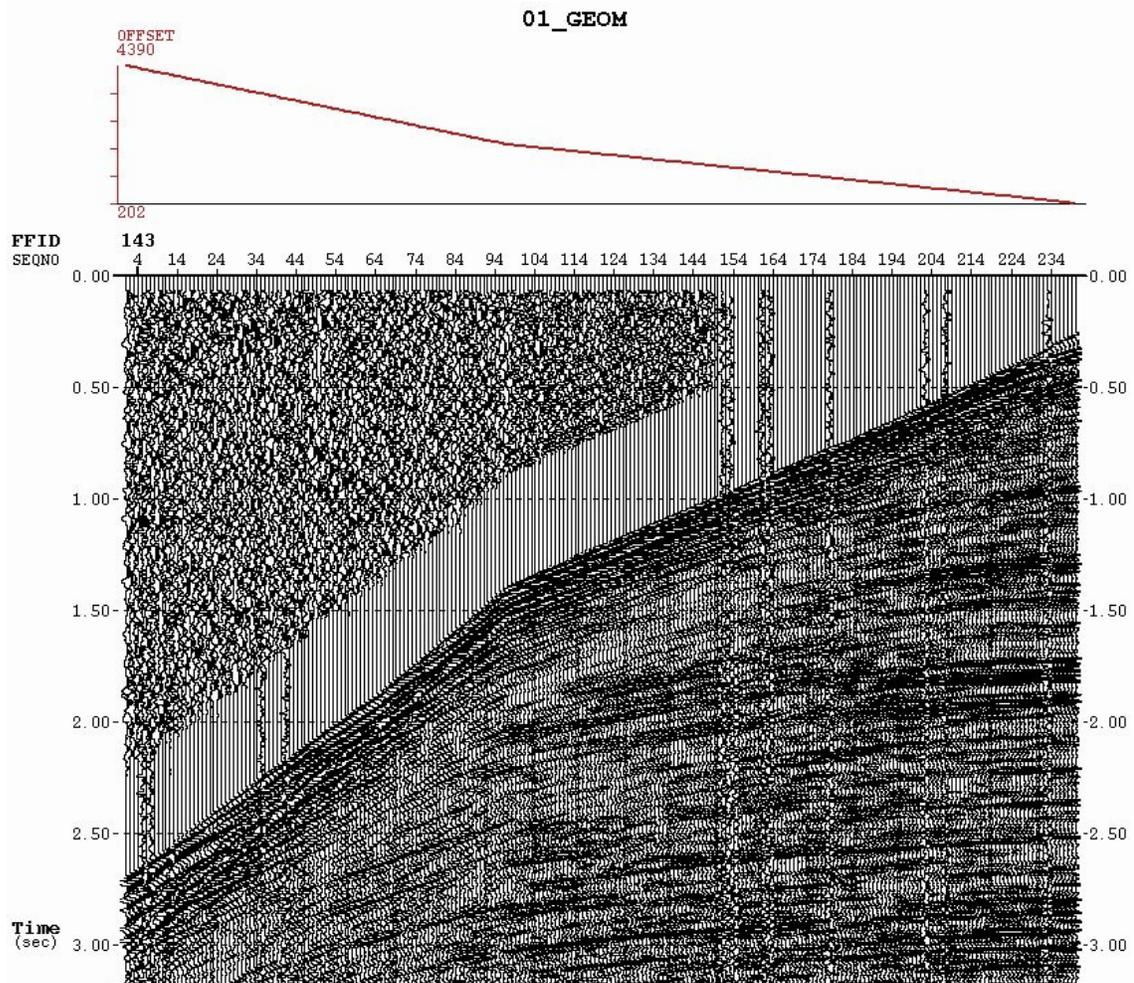


Fig.14 - Controle de qualidade da Geometria. Na parte superior está o afastamento fonte-receptor mínimo (202 metros) e máximo (4390 metros) do FFID 143, que corresponde ao tiro 143.

A imagem abaixo mostra uma análise do conteúdo de frequência dos traços destacados em verde, onde é possível perceber que a frequência máxima do sinal é de 125 Hz (Frequência de Nyquist) e a frequência dominante está na faixa dos 20 a 40 Hz.

Ao analisar o espectro de frequência conclui-se também que as frequências mais altas estão localizadas na parte mais rasa do dado, e esse conteúdo de frequência vai diminuindo à medida que o tempo aumenta. Isso ocorre porque a Terra funciona como um filtro de altas frequências.

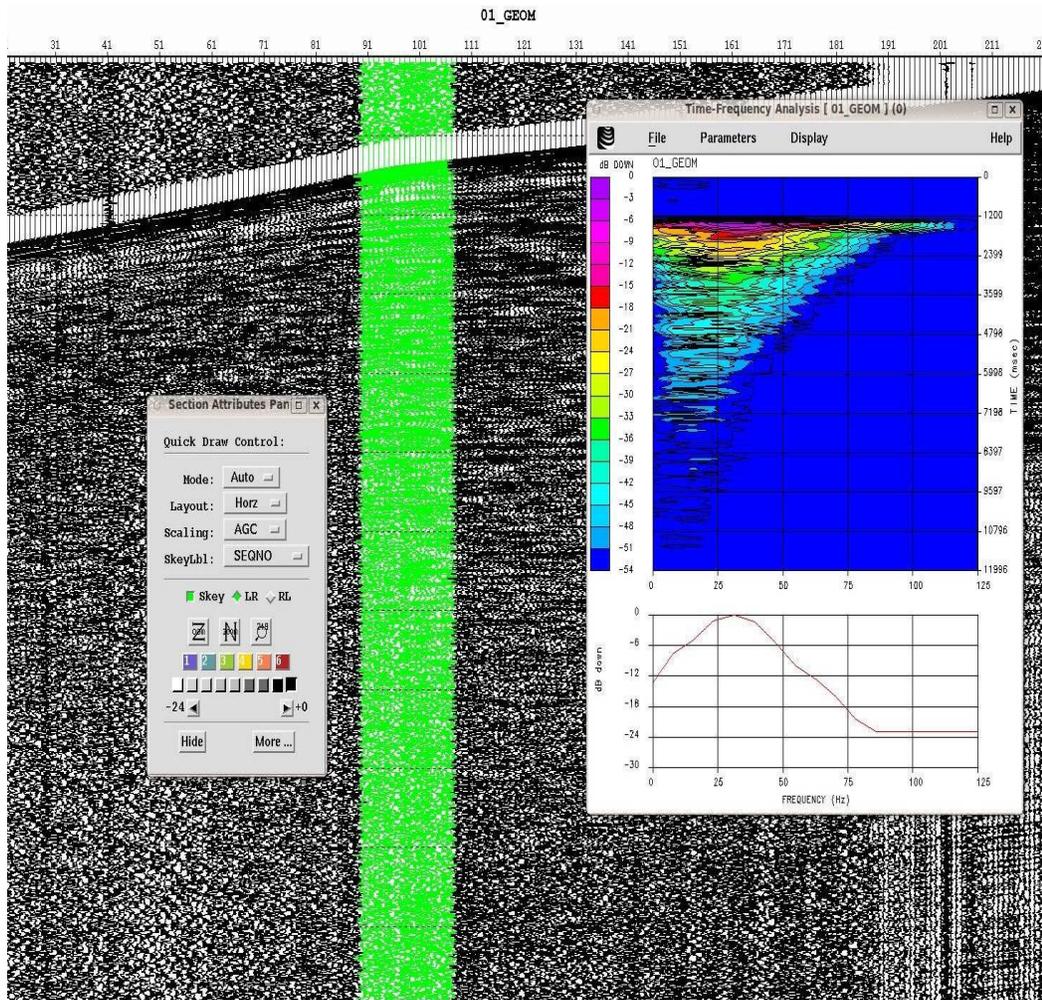


Fig. 15 – Análise de frequência dos traços destacados em verde.

4.4 - Traço mais próximo – Como Controle de Qualidade

A figura abaixo (fig. 16) mostra o traço com o menor afastamento fonte-receptor no display lado a lado. Na parte superior do “empilhamento” há um gráfico com o número de tiro e com a distância fonte-receptor. O afastamento é constante durante toda a seção, comprovando que são os traços com a menor distância e em azul o gráfico com o número de tiros.

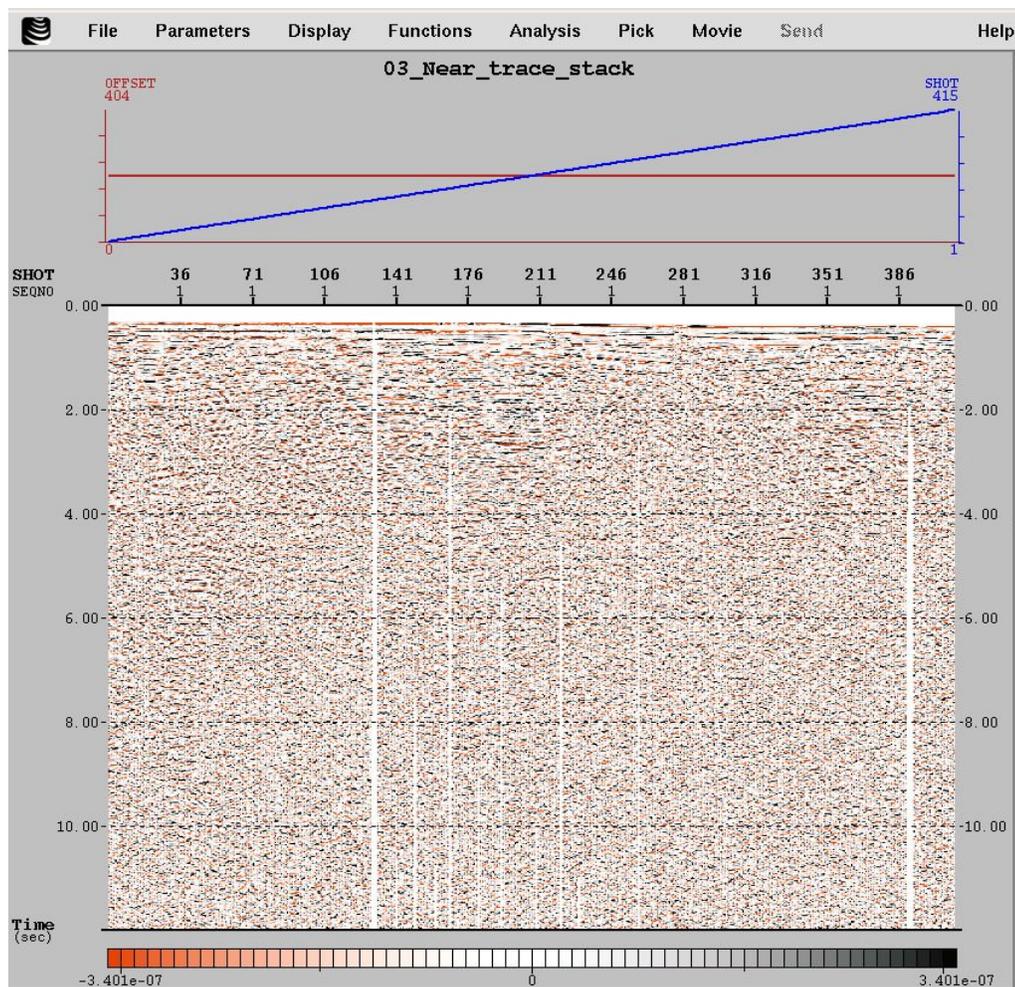


Fig. 16 – Traço mais próximo.

4.5 - Correção de *Source firing delay*

A correção do *Source firing delay* corresponde à diferença de tempo no qual a fonte emite o sinal e os receptores começam a gravá-lo. Esse atraso no tempo é feito propositalmente, em dados marinhos, para evitar que os receptores gravem todo o tempo de registro referente à propagação da onda sísmica na lamina de água.

Neste dado, os receptores só começaram a gravar o sinal sísmico 64 ms após o tiro. Para corrigir esse efeito, é necessário adicionar um tempo de 64 ms na parte superior do dado, como visto na fig. 17. Caso essa correção não fosse realizada, o dado apresentaria um tempo menor de propagação na água e, conseqüentemente, a profundidade real seria maior do que aquela mostrada na seção sísmica.

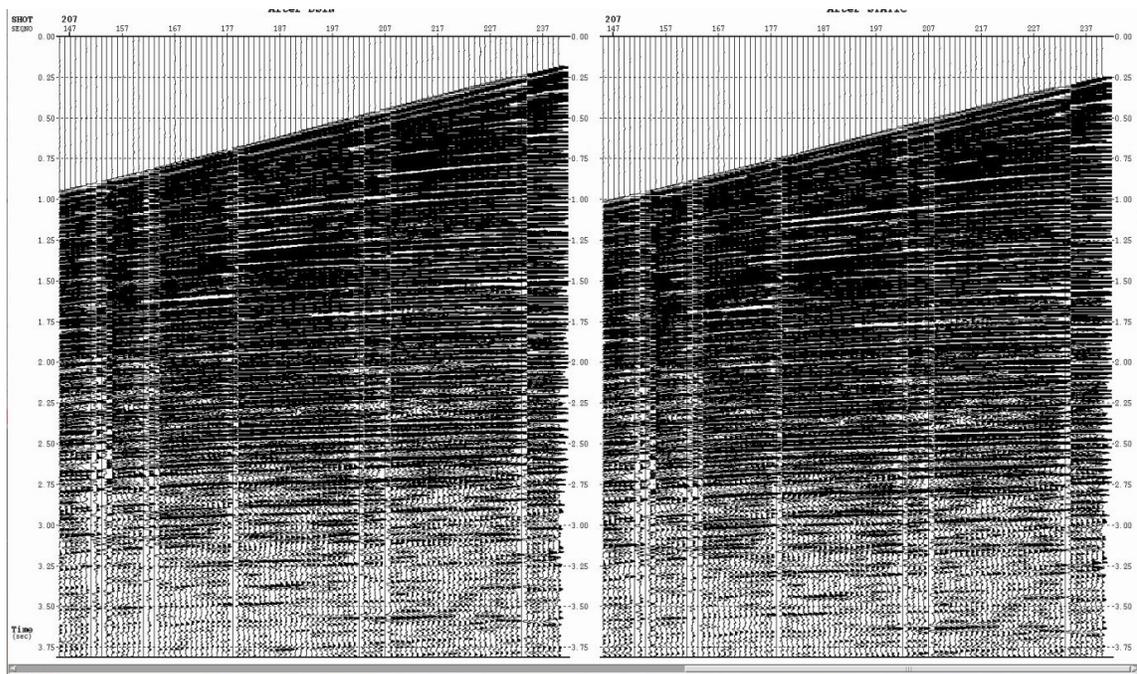


Fig. 17 – *Source Delay time*

4.6 - Edição de Traço

A edição de traços é uma etapa do processamento que elimina os traços mortos e os ruídos excessivos, para que estes não prejudiquem a seção sísmica final. Nesta etapa, os 415 tiros são visualizados, analisados e os devidos traços editados.

Os traços ruidosos e mortos prejudicam a etapa referente à limpeza do dado sísmico, supressão de ruídos, pois podem superestimar ou subestimar o cálculo do traço piloto utilizado em algumas etapas da limpeza do sinal. Além disso, ruídos em excesso marcam a seção sísmica e atrapalha etapas, tais como a deconvolução, o SRME e a migração.

A fig. 18 mostra a análise espectral, conteúdo de frequência e fase de um traço sísmico “normal”. O primeiro gráfico da figura mostra o tempo e amplitude do traço, percebe-se que na primeira reflexão, em 1200 ms, a amplitude do traço é máxima e está decaído exponencialmente em função do tempo, devido a atenuação do sinal relacionada a expansão da frente de onda (decai em função de $1/r^2$), onde r é o raio da frente de onda. Essa é a razão pela qual, torna-se necessário a aplicação da correção de divergência esférica. Entretanto, para evitar que a amplitude das múltiplas sejam ressaltadas, essa correção só será aplicada após as etapas de supressão das múltiplas.

O segundo gráfico da figura 18 representa análise Amplitude x Frequência (Power Spectrum). Esse gráfico corrobora o que foi dito na figura 15, ou seja, a frequência máxima do sinal é de 125 Hz e a frequência dominante está na faixa de 20-40 Hz. Enquanto o último gráfico representa a fase do dado sísmico.

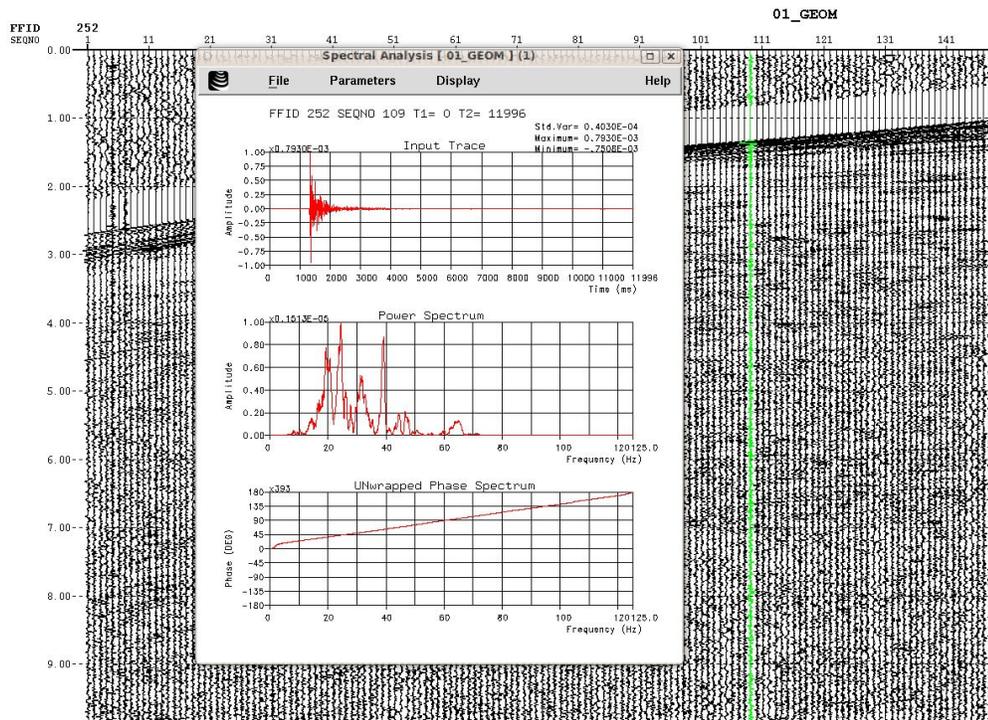


Fig.18 - Análise espectral de um traço

O mesmo foi feito para um traço ruidoso, o resultado é mostrado na figura ao lado. Nesta análise, pode-se perceber que a amplitude do traço ruidoso é alta e praticamente constante durante todo o tempo (12 segundos), essas amplitudes não tem nenhuma relação em os eventos geológicos, são causados por alguma interferência externa e por isso devem ser retirados do dado sísmico. A análise de frequência (Power Spectrum) mostra esta é anômala.

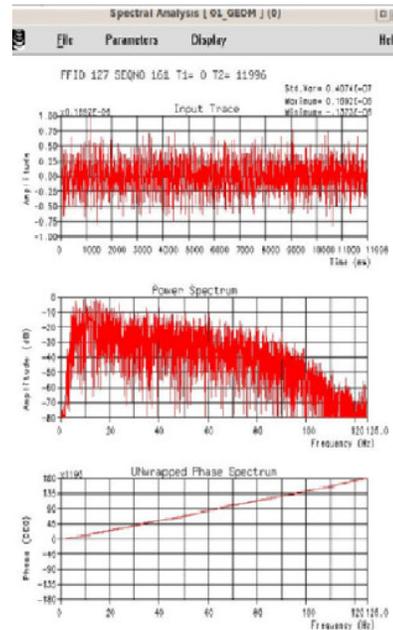


Fig.19 - Análise espectral de um traço ruidoso

4.7 - Limpeza no domínio do tiro

Nesta etapa do processamento será realizada a supressão de ruídos no domínio do tiro, esta fase é importantíssima, pois tem como objetivo eliminar ruídos para aumentar a razão sinal/ruído, e conseqüentemente, melhorar os resultados finais.

Esta limpeza eliminará os ruídos coerentes e aleatórios, que inclui os spikes e o ruído de swell. Para isto, serão aplicados filtros no domínio do espaço-tempo (x-t), e também no domínio da frequência.

A sequência utilizada, no software Focus, será especificada abaixo, com alguns módulos mais detalhados.

1 AMPSCAL – Noise Suppression by Amplitude Scaling

O AMPSCAL é o módulo do focus que desenhado para eliminar os *Spikes* e ruídos aleatórios no domínio x-t, através da comparação da amplitude entre o traço analisado e o traço piloto. O traço piloto é calculado através de uma média de N traços, nos quais N é escolhido pelo usuário, e para cada janela de tempo e de N traços, o programa calcula um traço piloto, que é utilizado para a comparação.

O usuário escolhe qual valor será considerado como anômalo, ou seja, quantas vezes mais a média de N traços tal amplitude será considerada ruído. Para esta etapa foi utilizado os seguintes parâmetros, como mostra a fig. 20.

15	NTR	-	Number of traces for median calculation		
RMS	AMPMETH	-	Amplitude method (RMS/AVM)		
NONE	EXTEND	-	Scaling extension options outside the gate (NONE/FRONT/BACK/BOTH)		
SHOT	MUTEPKN	-	Primary interpolation header name for DSNMUTF or DSNMUTB		
OFFSET	MUTESKN	-	Secondary interpolation header name for DSNMUTF or DSNMUTB		
GATES - Define Time Windows					
	FROM	TO	SIZE	FACTOR	TARGAMP
[0]	600	2000	100	2.4	2
[1]	2000	5000	100	2.3	2
[2]	5000	9000	100	2	1.6
[3]	9000	12000	100	2	1.6

Fig. 20 – Parâmetros utilizados no AMPSCALE

Onde:

NTR - Número de traços para o Cálculo da média = 15

(Valor mínimo aceito pelo programa = 3; Default = 51)

FROM – TO - Janela em tempo em milissegundos para qual os parâmetros serão validos.

SIZE – Tamanho de cada janela, em milissegundos.

FACTOR – Quantas vezes, na janela especificada, o valor da Média pode ser maior do que a amplitude que está sendo analisada.

TARGAMP – Especifica para quanto o valor da amplitude deverá ser reduzido caso seja maior que NTR.

A fig. 21 mostra o resultado obtido com o AMPSCALE. A imagem localizada na parte esquerda mostra o tiro 151 antes, a imagem central mostra o tiro 151 após o AMPSCALE e a imagem a esquerda mostra o que o AMPSCALE conseguiu retirar do dado com os parâmetros citados acima.

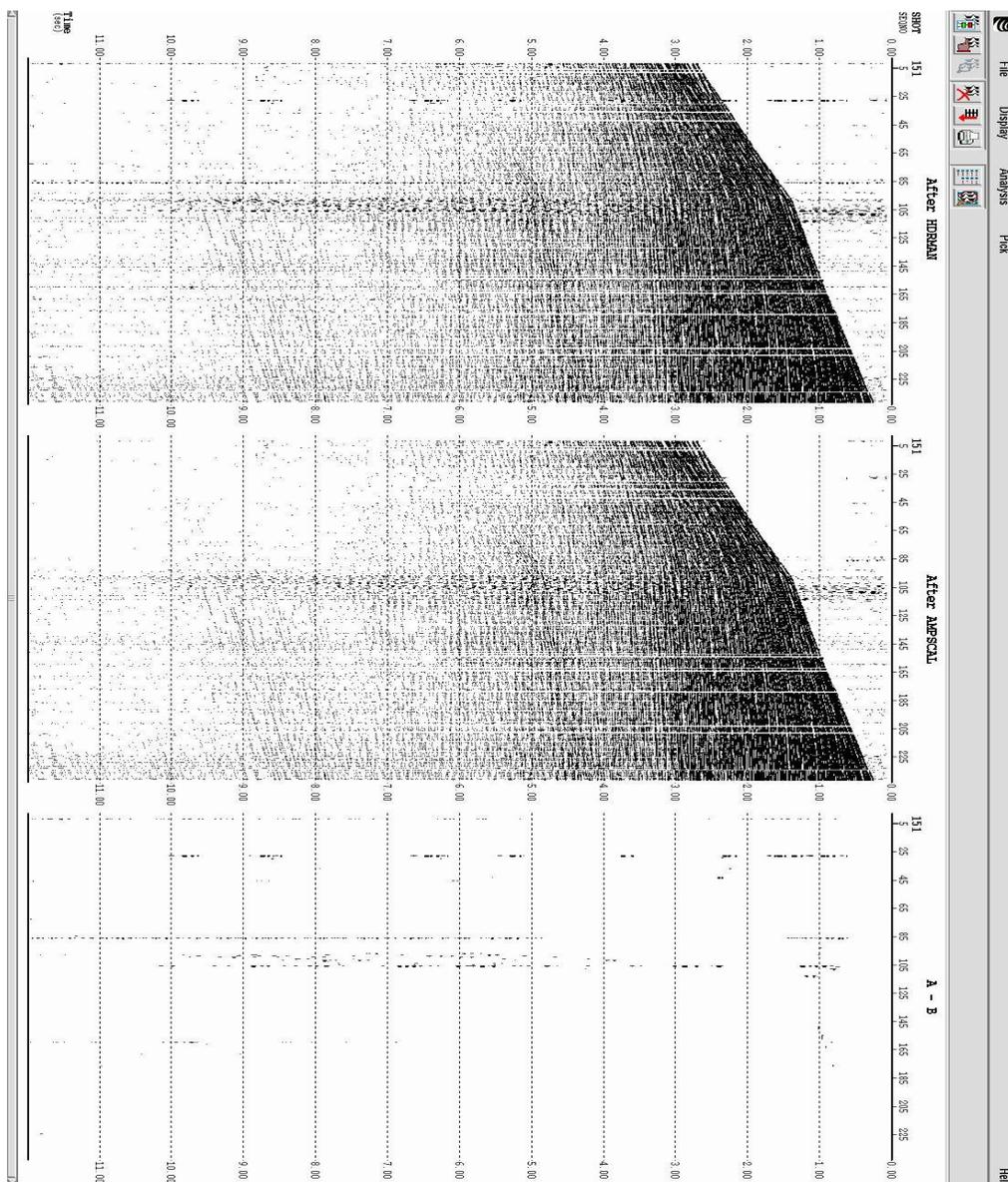


Fig. 21 – Resultado do AMPSCALE

2 TFCLEAN – Noise suppression via time- frequency transform

Esse módulo do Focus é responsável pela eliminação de *noise bursts* e realiza também um balanceamento espectral.

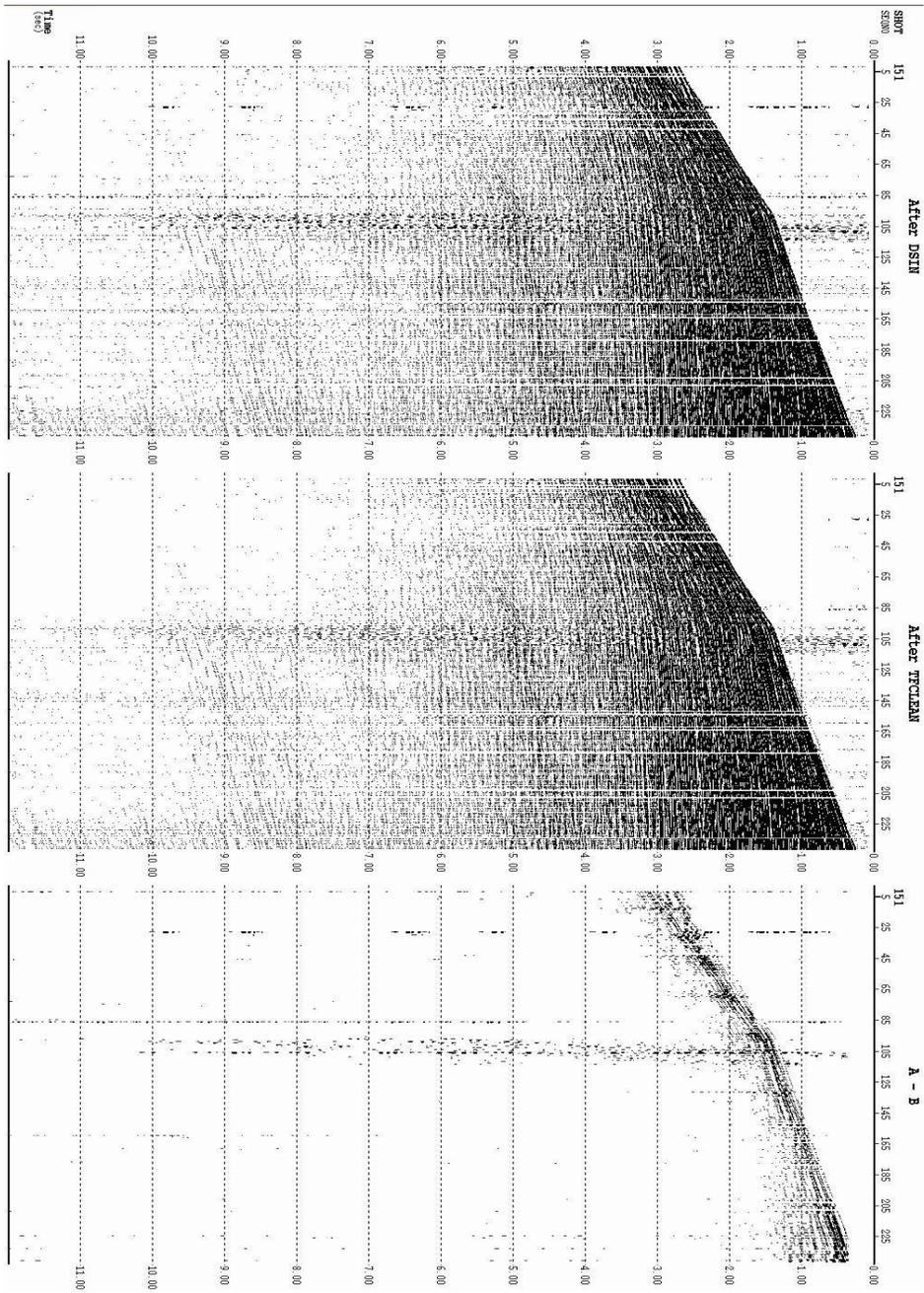


Fig. 22 – Resultado do TFCLEAN

3 F-K FILTER

A necessidade de aplicação do filtro FK foi devido à presença do ruído de *strum* (ruído de cabo), que é causado pela tração entre a boia que sustenta o cabo e o movimento do navio. Foi feita uma análise FK, exatamente em uma região que continha esse ruído (como mostra a figura 20) e foi desenhado um polígono delimitando os parâmetros de Frequência (F) e Número de ondas (K), nos quais seriam eficazes para eliminação desse tipo de ruído.

A desvantagem do filtro FK é que este amplifica os ruídos em todas as faixas de frequência, por isso, será aplicado novamente, o AMPSCALE e o TFCLEAN.

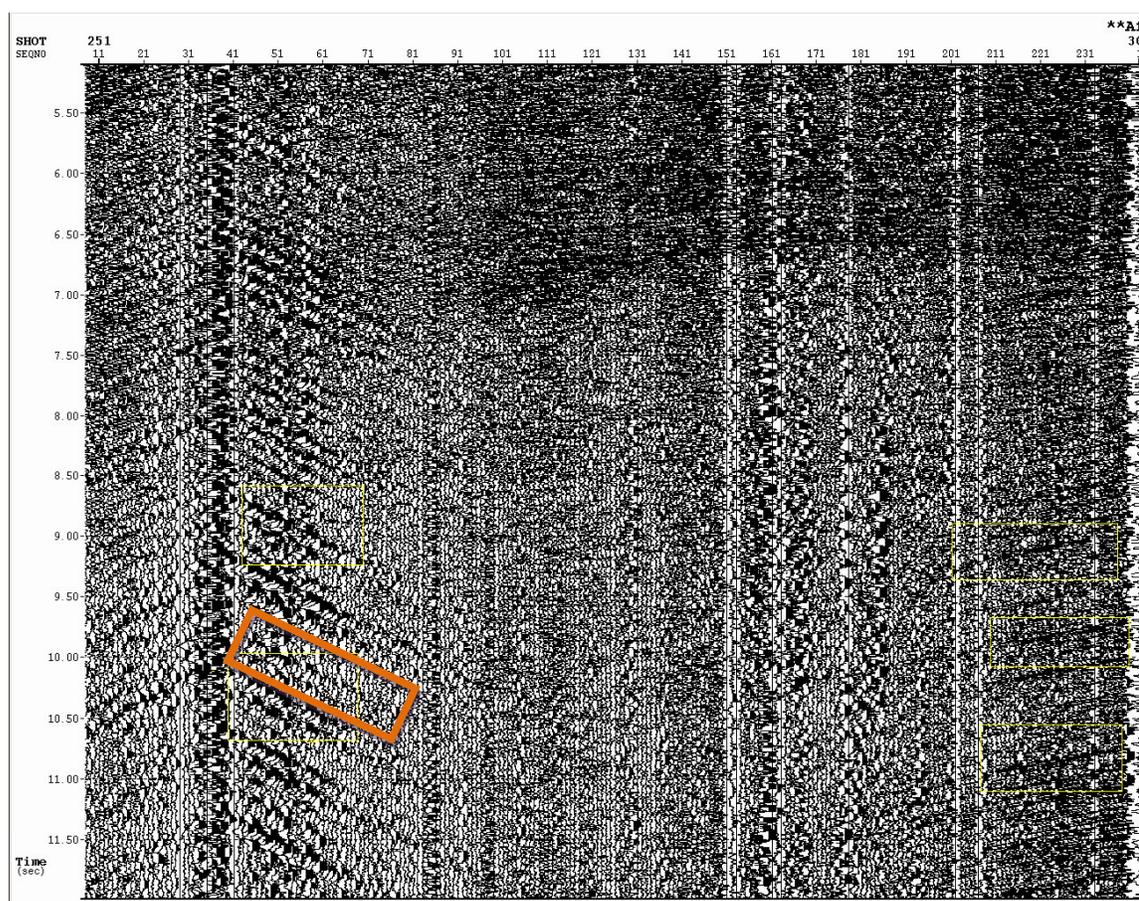


Fig. 23 – Identificação do Ruído de *strum* noise em amarelo e em marrom o local no qual do foi feito o análise *fk*

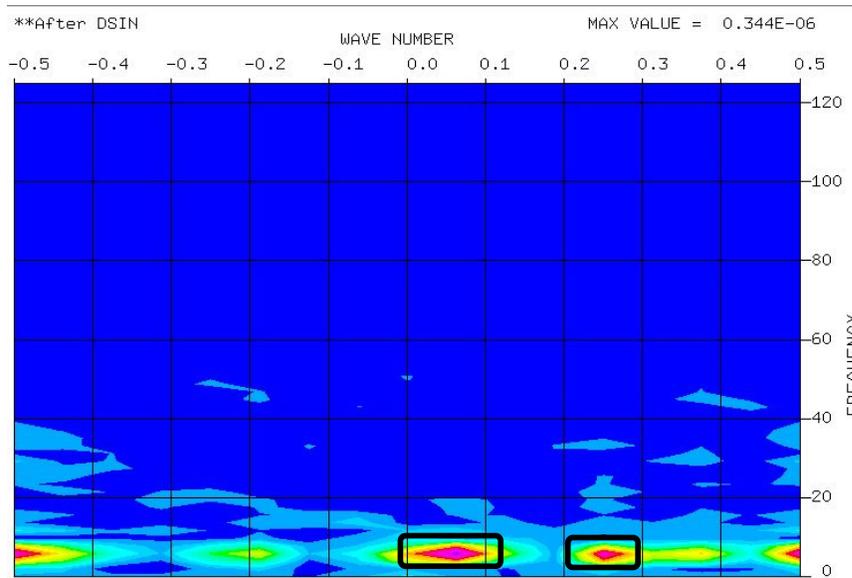


Fig. 24 – Análise *fk* e o polígono que foi utilizado para atenuação do ruído de *strum*

- 4 AMPSCAL – Noise Suppression by Amplitude Scaling
- 5 TFCLEAN – Noise suppression via time- frequency transform
- 6 NMO → Aplicação
- 7 COHERE - Two Dimensional Dip Filtering
- 8 LFAF – Low Frequency Array Filtering

O LFAF é um filtro utilizado para supressão de ruídos de baixa frequência. Neste módulo, o usuário escolhe a faixa de frequência e uma velocidade para qual o programa deve ser eficaz. Para este trabalho foi utilizado uma faixa de frequência de 0 – 12 HZ, com uma velocidade de 1500 m/s. Um dos principais ruídos que LFAF atua sobre é o de *swell*.

O ruído de *swell* é um ruído coerente que parece na sísmica na forma de listras verticais apresenta alta amplitude e, normalmente, o conteúdo de frequência varia entre 1 – 10 ou 15 Hz. Fig. 25 mostra apresenta um dado com ruído de *swell* forte e uma *vertical stripes* em destaque.

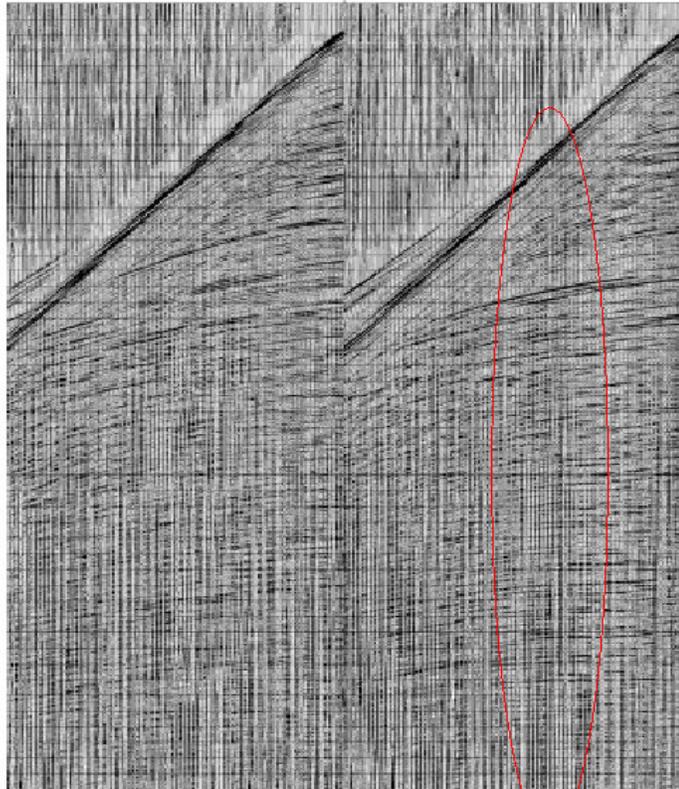


Fig. 25 - Tiro com ruído de *swell* destacado. (Modificado de Yilmaz, 1987)

Há dois mecanismos para criação do ruído do *swell*. Um deles é por meio do movimento do fluido dos streamers, que segundo *Peacock et al.* (1983), *Bjellando* (1993) e *Dowling* (1998), induzem o surgimento de ondas transversais, chamadas de *Bulge waves*, com alta amplitude e frequência de no máximo 10 Hz. O segundo mecanismo de geração do ruído de *swell* é através das correntes oceânicas, que induzem a criação do fluxo dentro do *streamer* (do inglês, *cross flow*).

Apesar do ruído de *swell* ser apenas de baixa frequência, este não pode ser removido com um filtro de corta-baixa, sem retirar, também, sinal. A alternativa para atenuação deste é um filtro tempo - frequência.

Este filtro consiste na escolha de janelas de frequência, em que cada janela, calcula-se um traço piloto. Cada traço, dentro da janela, é comparado com o traço piloto, caso a amplitude do traço analisado não for análogo a do traço piloto, a amplitude deste é atenuada ao nível do piloto. Para obter um bom resultado com esse filtro, a janela deve ser pequena, pois o ruído de *swell* contamina também os traços vizinhos.

9 NMO – Remoção

O resultado final da limpeza no domínio do tiro pode ser vista na figura abaixo. Na esquerda os tiros de entrada, utilizados como exemplo, na parte central os resultado da limpeza.

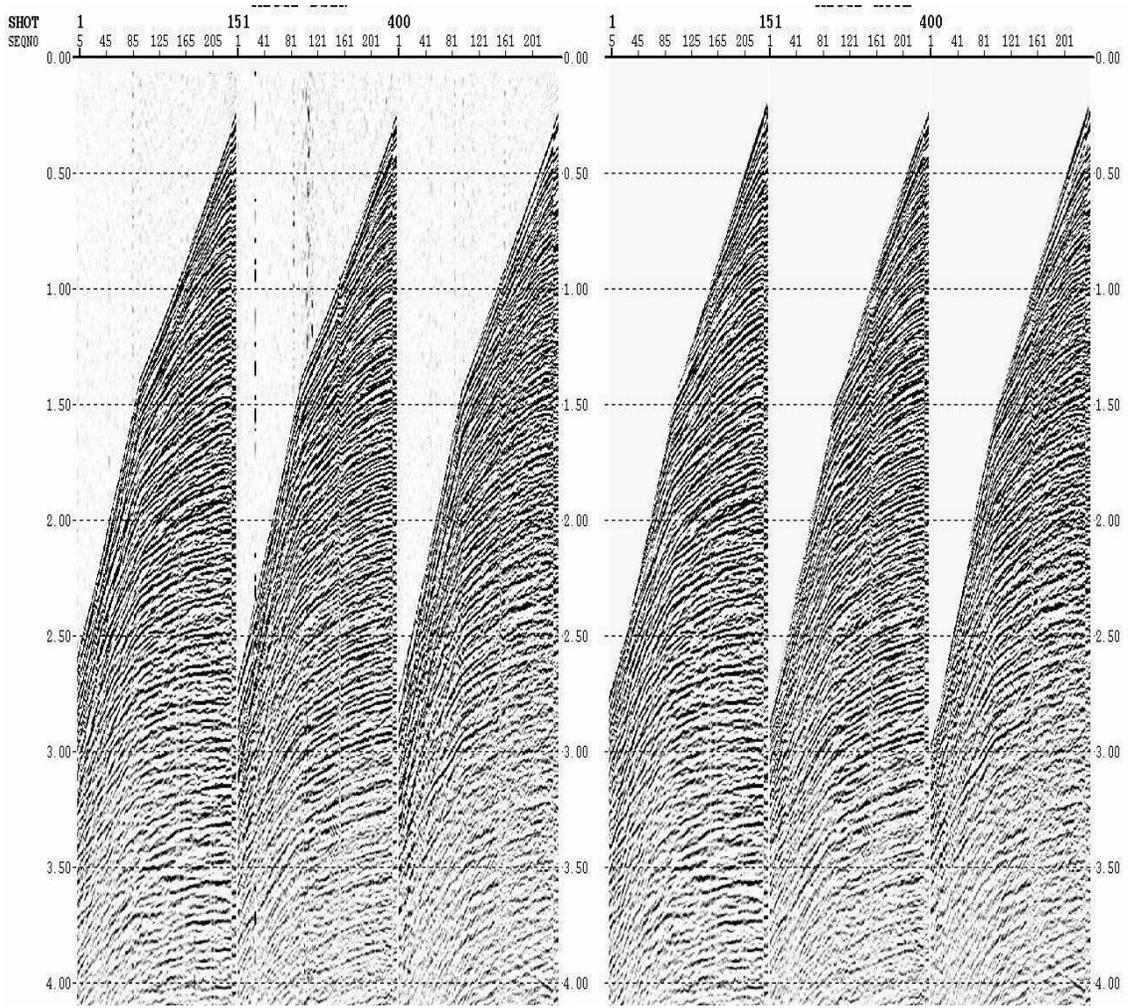


Fig. 26 – Resultado da Limpeza no domínio do tiro

4.8 - SRME – Surface Related Multiple Elimination

A técnica do método de eliminação de múltiplas, chamado de SRME, é baseada no trabalho de Verschuur em 1992, na Universidade de Delft. Esse método prediz e atenua todas as múltiplas relacionadas com a superfície, sem nenhum tipo de conhecimento a respeito do meio, tais como velocidade e horizontes (*data driven*). Por esse motivo, esta deve ser a primeira técnica para supressão de múltiplas utilizada no dado sísmico.

Múltiplas relacionadas com a superfície são geradas a partir da grande diferença de impedância entre o contato lâmina de água e ar, que segundo *Verschuur* (1992) funciona como um “espelho perfeito”, fazendo com que grande parte do campo de onda ascendente sofra reflexão nessa interface. Dessa forma, toda reflexão primária pode gerar um trem de ondas múltiplas relacionadas com a superfície.

O SRME tem como conceito básico de que o campo de onda pode ser extrapolado por mais uma trajetória de ida e de volta na lâmina de água, e assim cada evento é transformado em um evento de múltiplas relacionadas com a superfície de uma ordem maior. Se a múltipla apresentar apenas uma reflexão na interface água-ar é dita como de primeira ordem, e assim sucessivamente de forma que a ordem N é referente a quantas vezes a onda refletiu nessa interface.

A aplicação do SRME é dividido em três etapas. A primeira etapa é refere ao pré-condicionamento do dado, pois envolve as fases de remoção dos ruídos e da onda direta, e também a fase de interpolação do dado sísmico. A interpolação do dado sísmico consiste em criar um grid constante de fontes e receptores, isso significa que cada estação receptora deve estar associada a um ponto de tiro. Deve-se também interpolar as estações próximas da fonte,

de forma que o afastamento fonte-receptor deva ser zero, os traços perdidos e também aqueles omitidos durante a etapa referente à edição de traços, devem ser criados, a partir da interpolação entre traços vizinhos. Como o SRME é um método que não dependem de nenhuma informação do meio, a qualidade do dado de entrada é de extrema importância para obtenção de um resultado satisfatório.

A segunda etapa do SRME é a predição das múltiplas. Segundo *Berkhout* (1982), a predição das múltiplas é baseada na observação que qualquer múltipla relacionada com a superfície pode ser predita através de convoluções espaciais e temporais do campo de onda com ele mesmo.

Isso significa que para o cálculo da predição de múltiplas é utilizado o conceito de que uma múltipla de primeira ordem é o resultado de duas primárias (como pode ser visto na fig. 27), na qual o ponto de reflexão na superfície é considerado uma nova fonte. O problema para essa concepção é que o ponto de reflexão não é conhecido. Por esse motivo, a combinação de todos os pontos possíveis de reflexão na superfície torna-se o ponto sobre o qual se pode estar localizada a “nova fonte”.

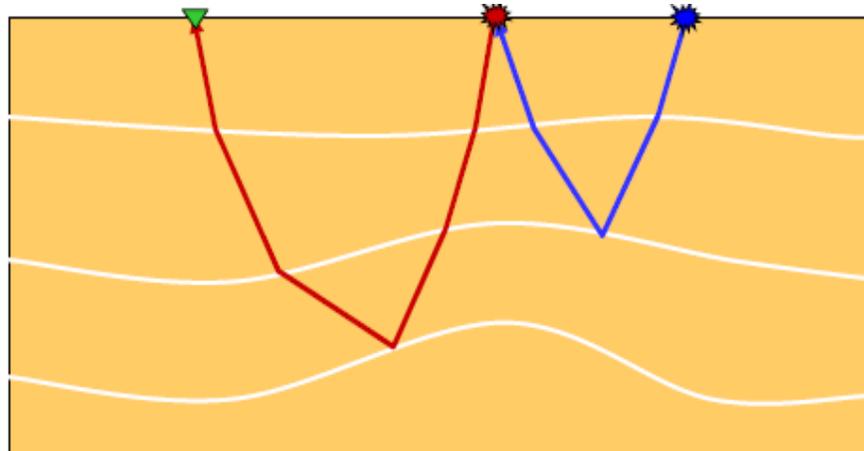


Fig. 27 – Múltipla de primeira ordem podem ser considerada uma unificação de duas reflexões primárias, na qual o ponto de reflexão é considerado a “nova fonte” (Verschuur, SURFACE-RELATED MULTIPLE REMOVAL IN SEISMIC DATA BY A DATA-DRIVEN METHODOLOGY)

A quantificação e localização todos os pontos possíveis de reflexão na superfície é realizado uma série de convoluções laterais de pontos de tiros comuns (um tiro, vários receptores) com receptores comuns (um receptor, diversos pontos de tiro) que posteriormente são somados. O resultado da convolução e da soma para o exemplo da fig. 27 pode ser visto na fig. 28.

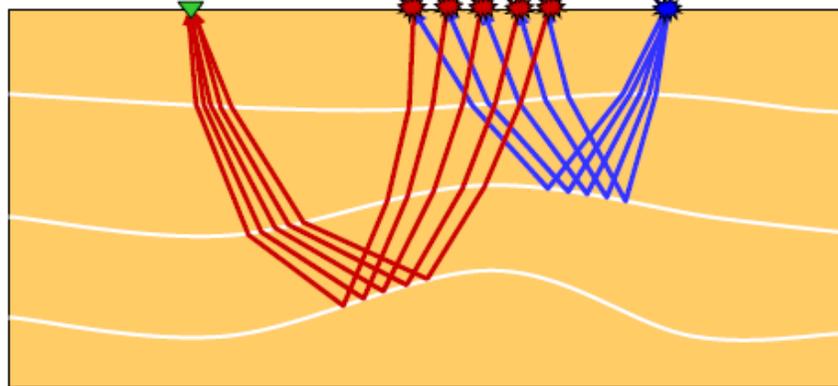


Fig. 28 – Resultado de todas as combinações possíveis em superfície, para uma múltipla de primeira ordem. (Verschuur, SURFACE-RELATED MULTIPLE REMOVAL IN SEISMIC DATA BY A DATA-DRIVEN METHODOLOGY)

Para a construção do modelo de predição de múltiplas de ordem N é considerado a mesma situação acima. Múltiplas de ordem N são baseadas no conceito que esta é a junção de N primárias, na qual cada ponto de reflexão em superfície é uma nova fonte.

A terceira e última etapa para aplicação do SRME é referente à subtração adaptativa das múltiplas preditas, na etapa anterior, do dado sísmico.

Na teoria, o método SRME é eficiente para todas as distâncias fonte-receptor. Entretanto, o método é amplamente utilizado apenas para retirada de múltiplas de afastamento curto, tais como as peg-leg. Esse método não obtém bons resultados para offset longos, esse fato dá-se por razões práticas, tais como:

Falseamento espacial: Principalmente, em águas profundas, as extremidades das hipérbolas são frequentemente falseadas, ou seja, ocorre o falseamento em afastamento de fonte e receptor longo. O falseamento altera a etapa de modelagem.

Efeitos diretivos da fonte e do receptor: Tanto a fonte, quanto o receptor apresentam padrões de anisotropia. Isso resulta que os ângulos de incidência dependem da wavelet, o que reduz a eficiência da etapa subtração adaptativa em offsets longos. Nesses offsets, os eventos com diferentes ângulos de incidência são superpostos.

Abertura finita: A modelagem das múltiplas nos offsets longos requer dados registrados além do cabo, principalmente, para estruturas complexas.

Deriva do Cabo: Nos offsets longos, os receptores podem desviar do plano de aquisição, violando uma das regras do método.

Os problemas citados acima possuem soluções, tais como interpolação do shot, utilização de filtros adaptativos, azimuth moveout; mas essas técnicas requerem o uso de ferramentas complexas. Uma alternativa para retirar múltiplas de offsets longos é utilizar a técnica do Radon

4.9 - Aplicação do SRME

O SRME é uma técnica utilizada para remover todas as múltiplas relacionadas com a superfície, não é necessária nenhuma informação sobre o meio.

Considerando uma linha sísmica 2-D com arranjo fixo de N receptores, com o tiro localizado no primeiro receptor (zero offset), os receptores com mesmo espaçamento dos tiros têm-se como resultado N tiros com N amostras. Esses tiros são transformados, a partir da Transformada de Fourier para o domínio da frequência e separados por frequência, resultando em N tiros com N amostras monocromáticas. (Verschuur, 1992)

Esses tiros “monocromáticos” são gravados na coluna de uma matriz, de forma que cada matriz de uma frequência tem dimensão N, apresenta o zero offset na diagonal principal e o CMP na diagonal secundária. Com essa notação discretizada, a convolução espacial pode ser feita através da multiplicação entre matrizes. O campo de onda na superfície livre (Z_0) no domínio da frequência é descrito pela equação:

$$\overline{\mathbf{P}}_0(z_0) = \overline{\mathbf{P}}(z_0) - A(\omega)\{\overline{\mathbf{P}}(z_0)\}^2 + A^2(\omega)\{\overline{\mathbf{P}}(z_0)\}^3 - \dots \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: $\overline{\mathbf{P}}_0(z_0)$ representa matriz após da eliminação das múltiplas

$\overline{\mathbf{P}}(z_0)$ representa a matriz com as múltiplas

$A(\omega)$ – Operador de superfície. Onde o valor do expoente indica a ordem da múltipla.

Simplificando a equação acima, obtêm-se que a matriz sem múltiplas é igual à matriz de entrada (com múltiplas) menos as múltiplas de primeira, segunda, terceira ordem e assim sucessivamente.

4.10 - Aplicação do SRME em um Dado Real – Como Controle de Qualidade

Como controle de qualidade da funcionalidade do método SRME no software Focus será mostrada abaixo uma aplicação em um dado real, na qual foi obtido um bom resultado.

A figura 29 A mostra um dado de entrada utilizado para o SRME. A imagem B mostra as múltiplas que conseguiram ser preditas através do módulo SRMCTRM do software Focus, no capítulo 4.11 esse módulo será estudado com mais detalhe. Enquanto a figura 29 C mostra o dado após a subtração das múltiplas, ou seja, a imagem A menos a B, é possível perceber a eficácia do SRME, principalmente para offsets curtos.

É importante ressaltar na figura 29 A que o dado utilizado como entrada foi o no domínio do tiro. Nesse dado, observa-se a grande quantidade de múltiplas, principalmente, nos offsets curtos. Foi realizada a auto-correlação do dado e o resultado evidência a presença de múltiplas periódicas. A auto-correlação é uma operação na qual o traço sísmico é convolvido com ele mesmo, sendo bastante útil na identificação de feições periódicas, tais como as múltiplas.

Na auto-correlação da Figura 29 A (a primeira auto-correlação na parte inferior da imagem), o primeiro evento forte refere-se ao primeiro refletor (fundo marinho) e os outros eventos fortes indicam a presença de múltiplas. Pode-se ainda analisar e perceber que essas múltiplas são múltiplas relacionadas com a superfície, pois estão localizadas em tempos com valores múltiplos da lâmina de água.

A figura 29 B mostra apenas a predição das múltiplas utilizando o módulo (SRMCTRM). Foi realizada também uma auto-correlação nessas múltiplas, comprovando o que foi anteriormente. Ou seja, a auto-correlação das múltiplas preditas indicam que estas estão periódicas e em valores múltiplos aos do tempo da lâmina de água, sendo caracterizadas como múltiplas relacionadas com a superfície.

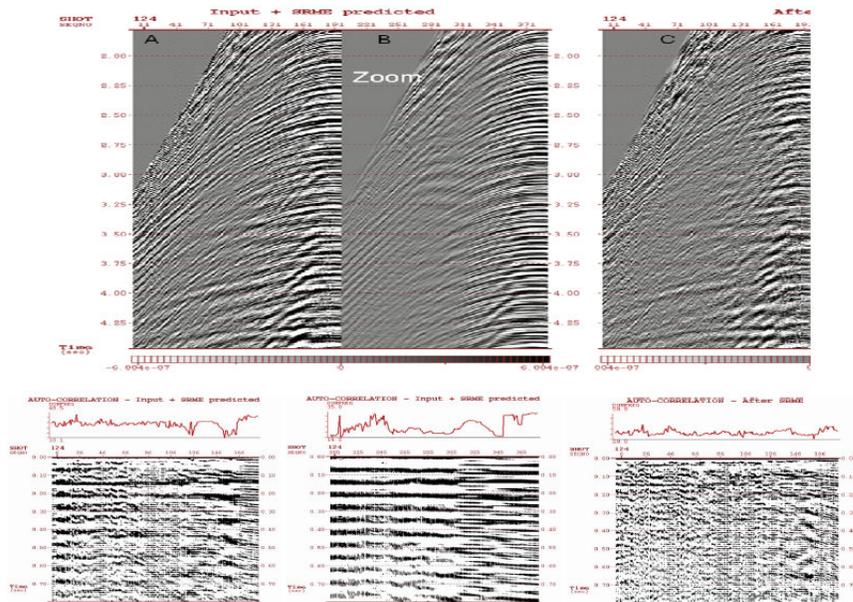


Fig. 29. a) Dado original. b) Predição das múltiplas. c) Resultado da aplicação do SRME.

Abaixo as correlações do dado sísmico, consecutivamente.

A figura 30 mostra a entrada do dado (domínio do tiro), o dado após o SRME e a diferença entre ambos. As setas indicam as múltiplas mais evidentes antes da aplicação do SRME e que estas foram atenuadas do dado após a aplicação do SRME.

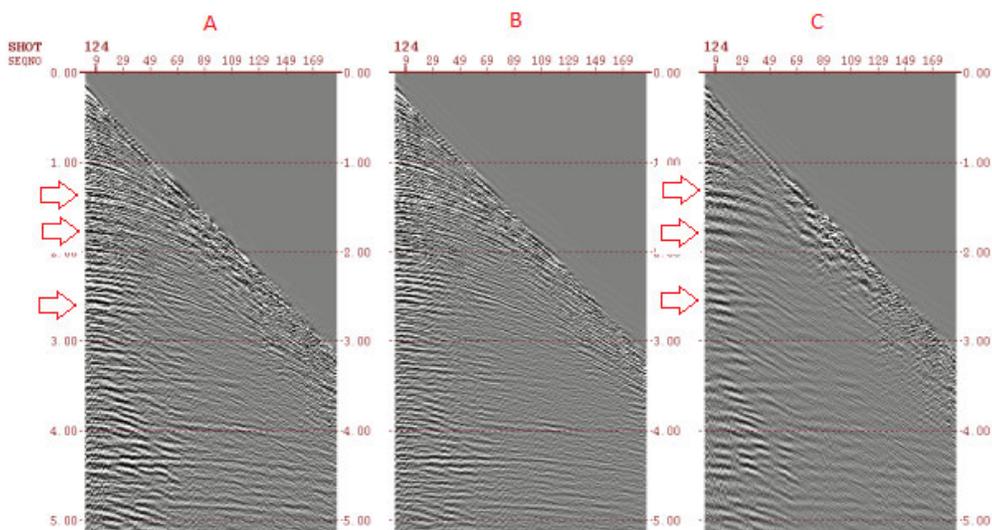


Fig. 30. A) Dado de entrada, antes do SRME. B) Após do SRME C) Diferença entre ambos, ou seja, o que o SRME conseguiu retirar do dado de entrada.

4.11 - Aplicação do SRME na linha 0222-0736

A primeira etapa para a aplicação do SRME, como foi dito anteriormente, é a remoção de ruídos e interpolação do dado de entrada. Como a remoção de ruídos e da onda direta foi realizada na etapa referente à limpeza no domínio do tiro (ver 4.7), falta apenas interpolar o dado de entrada, como etapa referente ao pré-condicionamento.

Para a etapa de interpolação utilizou-se o módulo do Focus chamado de REGLO. Primeiro foi realizada uma interpolação no domínio do tiro, são 415 pontos de tiro que distam 50 metros entre si. Para criar um grid regular de tiros e estações foi necessário criar pontos de tiro a cada 12,5 metros, menor distância entre as estações receptoras.

Inicialmente, o valor de cada ponto de tiro foi multiplicado por quatro. Dessa forma, o tiro número um passou a ser o tiro quatro, o número dois passou a ser o oito e assim sucessivamente. Isso foi feito para que o programa utilizasse dois tiros reais consecutivos, por

exemplo, os tiros 4 e o 8, para interpolar e criar os tiros entre eles, como no exemplo, os tiros 5, 6 e 7.

O módulo utilizado para a interpolação, REGLO, cria uma palavra no header, chamada de IT-FLAG-1. O valor do IT-FLAG-1 para tiros extrapolados assume valor 2, para interpolado tem valor 1 e para tiro real assume valor 0. Como é possível verificar na fig. 31.

Após a interpolação no tiro foi necessário ainda, interpolar os offsets (afastamento fonte-receptor). Criaram-se então traços até o afastamento zero e nos locais onde a distância entre estações era de 25 metros, foram interpolados e criados traços a cada 12,5 metros. Foi criado novamente uma palavra no header, chamada de IT-FLAG-2 que assume os mesmo valores do IT-FLAG, 2 para extrapolado, 1 para interpolado e 0 para real. A interpolação dos offsets pode ser vista na fig. 32.

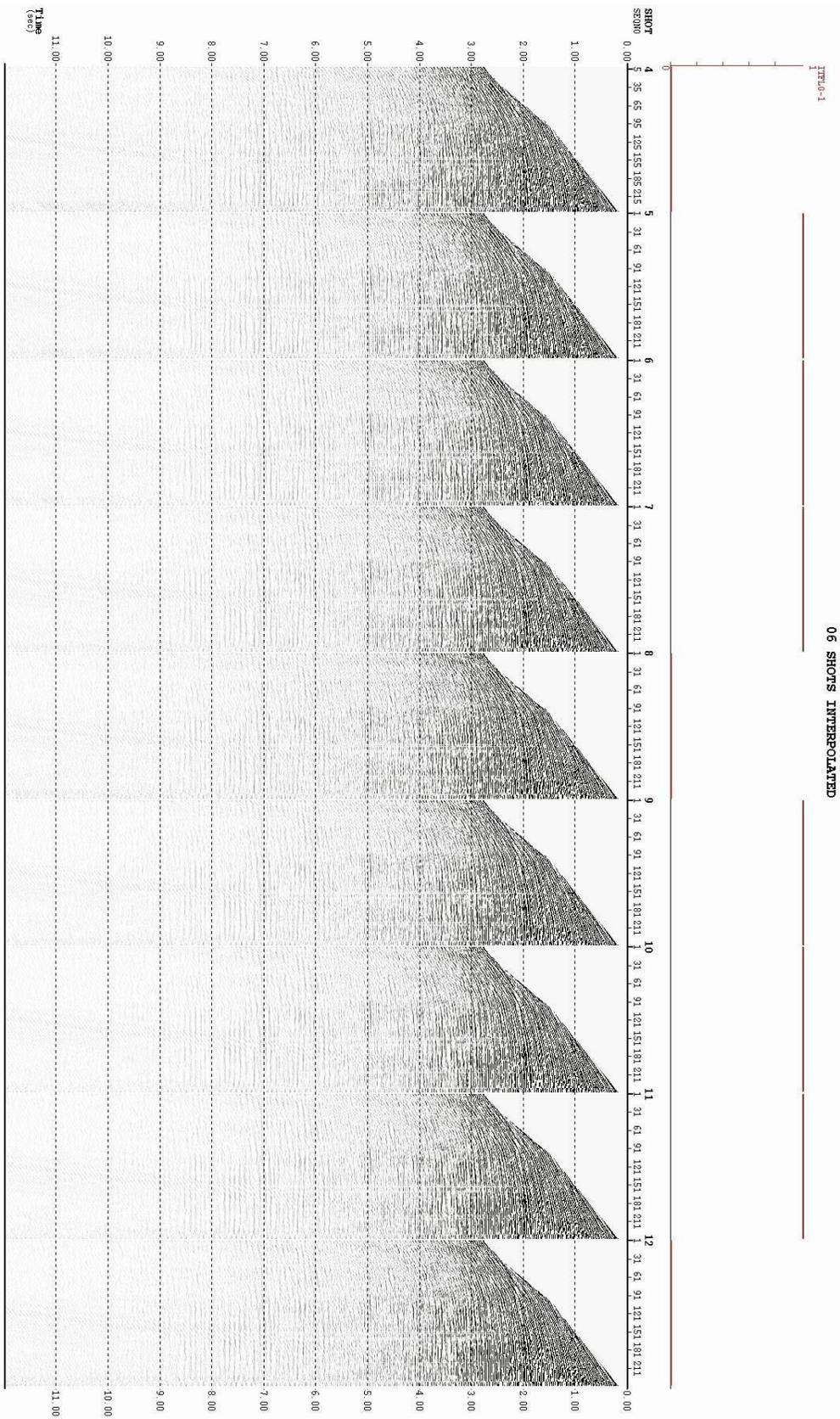


Fig. 31 – Interpolação no domínio do tiro.

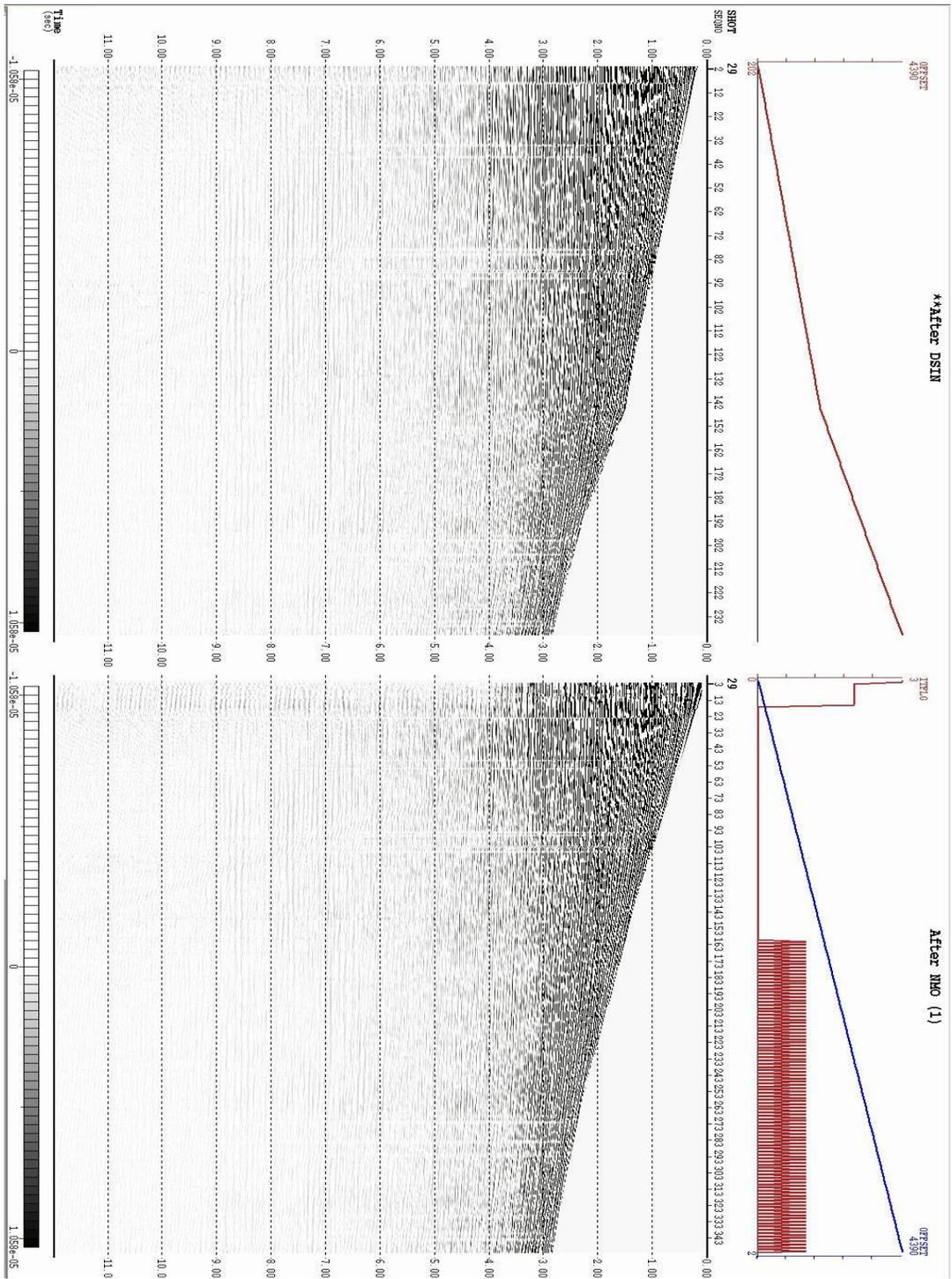


Fig. 31 - Na parte superior da imagem pode-se visualizar o valor do IT-FLAG-2 e é possível conferir que o afastamento máximo da fonte-receptor não foi alterado.

A segunda etapa da aplicação do SRME é o cálculo da predição das múltiplas. Nessa etapa utiliza-se um módulo do Focus chamado de SMACTRM. Utiliza-se como entrada o dado no domínio do tiro, como entrada secundária o offset. As únicas informações necessárias para o cálculo da modelagem das múltiplas pelo programa são: afastamento máximo (4390 metros) e a faixa de frequência, na qual se deseja trabalhar (0-125 HZ). Para o cálculo das múltiplas o SMACTRM utiliza a equação 1 (página 53) e calcula a predição das múltiplas através da expansão de Taylor.

Como o SMACTRM necessita de muita memória para a modelagem das múltiplas, o Focus permite que o usuário faça o cálculo através de bandas de frequência. Como a quantidade de tiros para essa linha é de 1660 ($415 \times 4 = 1660$), foi especificado que o cálculo seria feito em apenas três bandas de frequência. Após a modelagem das múltiplas, é feita a subtração do dado real.

A fig. 32 mostra o dado antes do SRME, o dado após o SRME e a diferença entre os dois, no offset curto, onde sua atuação obtém melhores resultados. Percebe-se que a atuação do SRME só tem início quando tempo é duas vezes o tempo da lâmina de água.

A fig. 33 mostra alguns tiros antes e depois do SRME. É possível identificar múltiplas que foram retiradas do dado, principalmente em offsets curtos.

Após o SRME é necessário retirar todos os tiros e canais interpolados, para isso utiliza-se um módulo do Focus chamado de *EDIT*. Especifica-se que os IT-FLAG-1 E IT-FLAG-2 com valores de 1 e 2 devem ser eliminado do dado. Então se divide o valor do tiro por 4 para obter o restaurar o valor original.

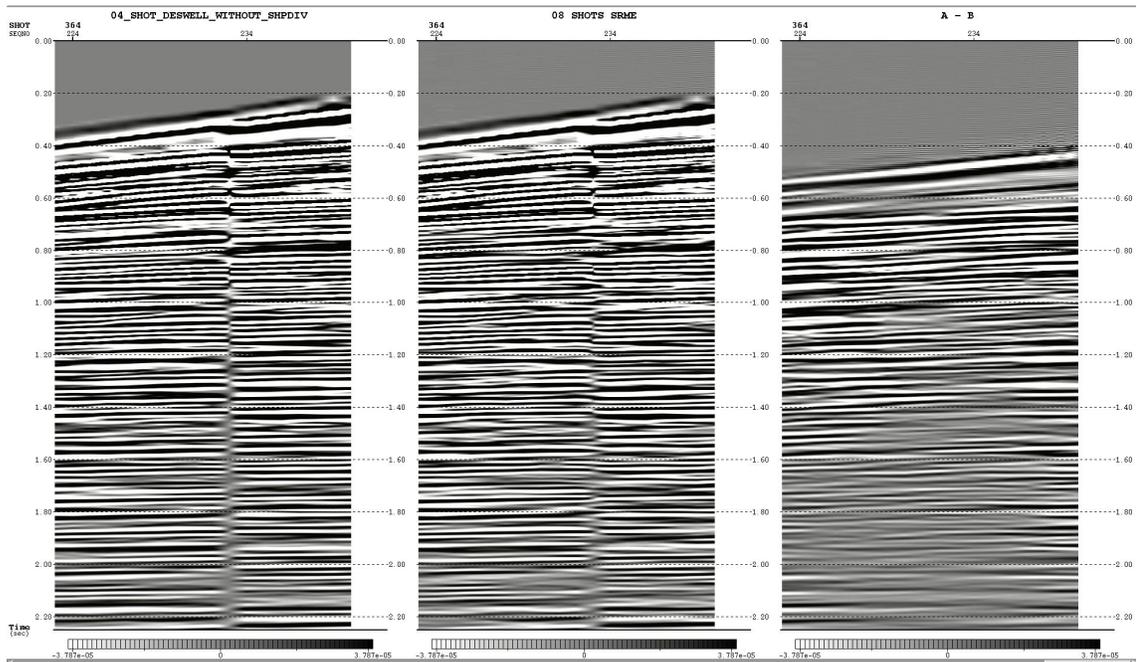


Fig. 32 – Dado antes, Após o SRME e a diferença entre ambos, respectivamente.

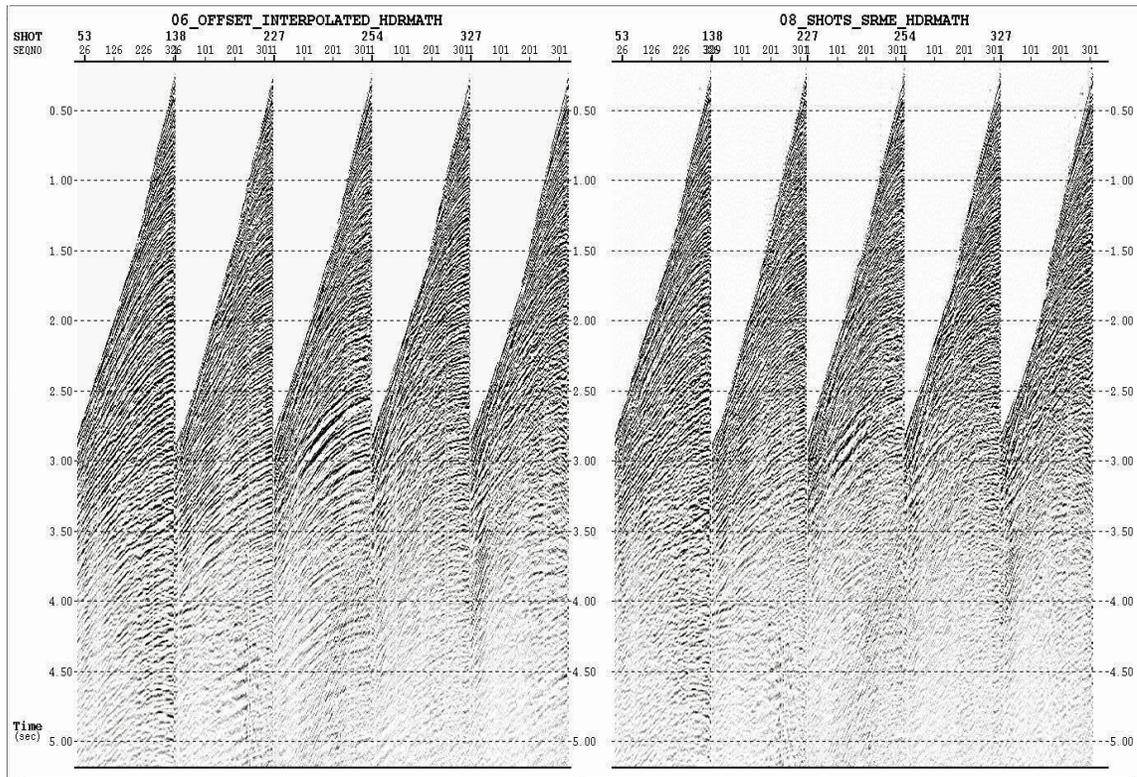


Fig. 33 mostra o dado antes do SRME e o dado após o SRME.

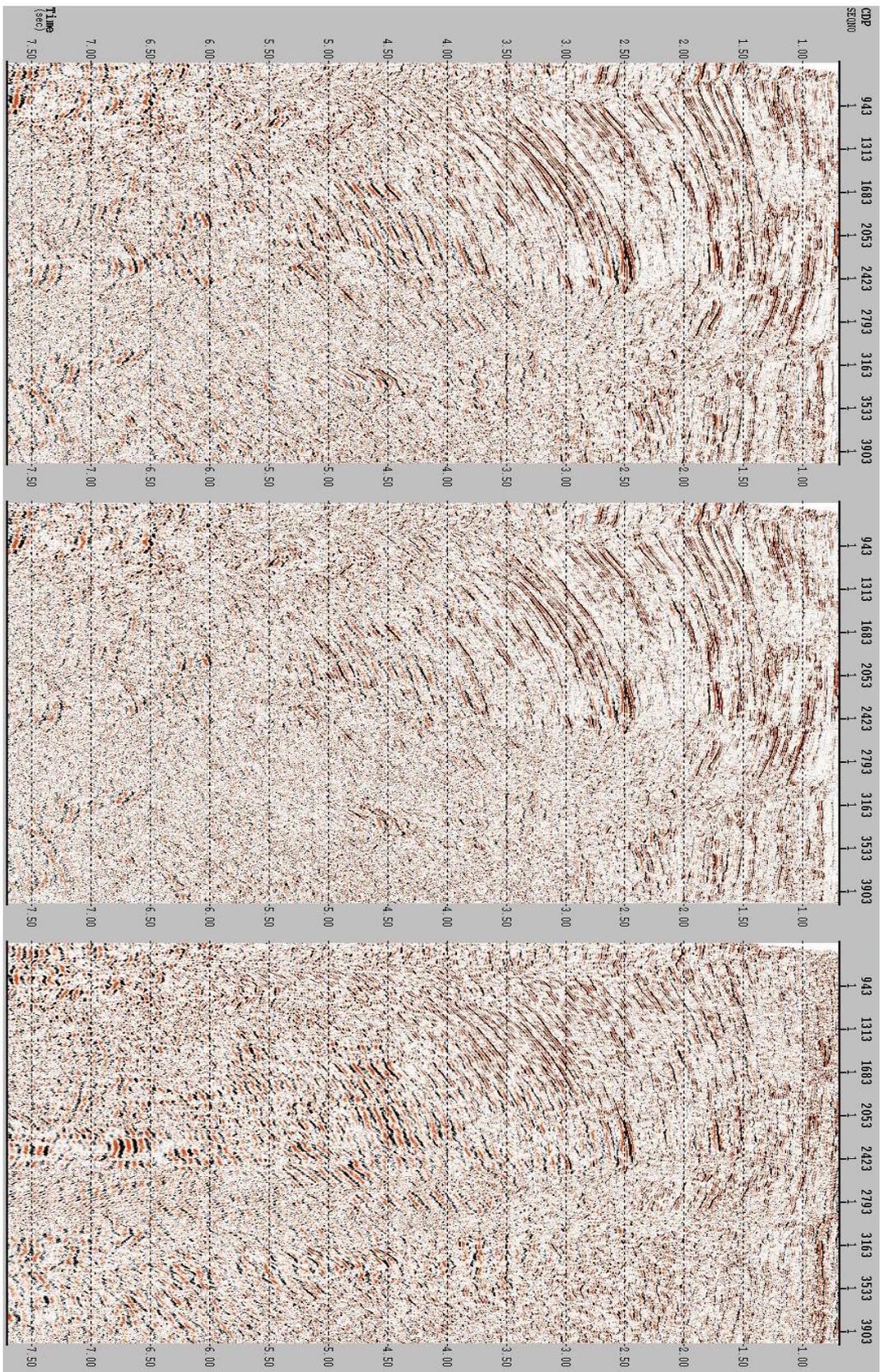


Fig. 34-Empilhado sem SRME, Empilhado após SRME e a diferença entre ambos, respectivamente.

4.12 - Radon

A técnica do Radon foi desenvolvida inicialmente por *Thorson e Claerbout* em 1985 e por *Hampson* em 1986 e vem sendo refinada e aprimorada por diversos autores, tais como *Foster & Mosher* (1992) e *Hargreaves & Cooper* (2001).

O Radon é uma técnica para supressão de múltiplas, baseada em um filtro parabólico, em dados corrigidos de NMO. Ou seja, é uma técnica baseada na diferença de Velocidade entre a onda primária e a múltipla. A velocidade para esse tipo de eliminação de múltipla deve picada com bastante acurácia, para que seja possível a distinção entre elas.

Por ser um método baseado na velocidade, o Radon parabólico não é eficiente para remoção de múltiplas no offset curto. Isso ocorre porque nesses locais, a inclinação da múltipla em relação à primária é pequena.

A transformada de Radon é uma técnica matemática utilizada no processamento sísmico. Consiste em transformar o dado, ordenado em famílias de CMP, do domínio do espaço-tempo para o domínio τ -p. Onde τ representa o tempo de intercepção e p representa a vagarosidade.

No domínio τ -p, as múltiplas são calculadas, e posteriormente, o dado é transformado, de volta, para o domínio do espaço-tempo, e somente então se remove as múltiplas no domínio do tempo-espaço. A conversão para o domínio τ -p pode ser feita de três maneiras distintas, através da Transformada Radon Linear, Transformada Radon Hiperbólica ou da Transformada Radon Parabólica.

4.13 - Transformadas Radon

A Transformada Radon é transformada numérica, assim como a Transformada FK. Tem como objetivo transformar o dado do domínio tempo-distância (t-x) para o domínio τ -p, onde τ representa o tempo de intercepção e $p(x)$ representa o parâmetro de raio horizontal (função variável em (x)). A escolha desse último parâmetro (p) é o que determina se a transformada é linear, hiperbólica ou parabólica.

A transformada Radon mais simples é a linear, para esse caso, o Parâmetro de raio Horizontal é a Vagarosidade. Essa transformada mapeia os eventos primários retilíneos no domínio do t-x (CMP corrigidos de velocidade) para pontos no domínio τ -p, como pode ser visto na fig. 35, através da equação abaixo:

$$F(\tau,p) = \int f(\tau + px, x) dx$$

p - Parâmetro de raio Horizontal, para o Radon linear, a vagarosidade (gradiente)

τ - tempo de inserção

x- distância da fonte-receptor

Para uma fonte pontal $f(\tau + px, x) = f(x,t)$

Quando $x = 0$, conseqüentemente, $t = \tau$. Isso significa que uma reta no domínio t-x, cuja inclinação é zero ($p=0$) é mapeada apenas como um ponto.

Analisando a equação percebe-se que quando p é maior ou menor que zero é indicativo que o evento tem alguma inclinação. Para valores de p maiores que zero, o evento

é considerado como uma múltipla, pois significa que este necessita de uma velocidade menor do que aquela aplicada para ser corrigido corretamente de NMO, caracterizando-o como uma múltipla.

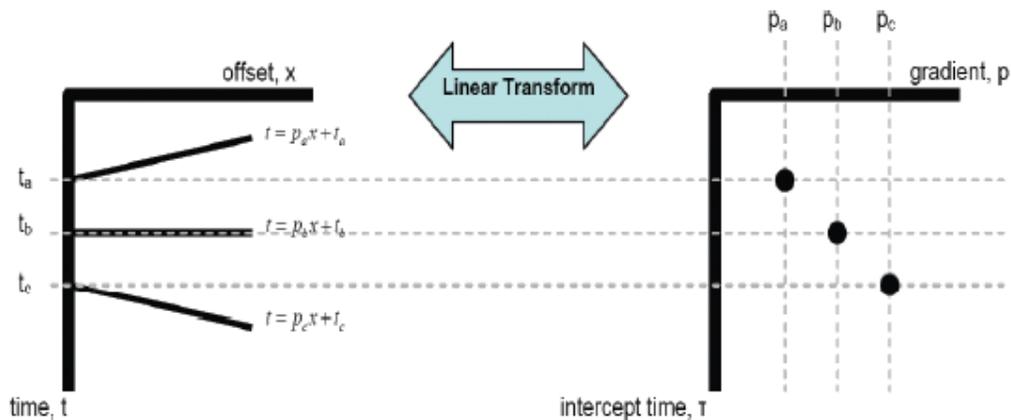


Fig. 35 – Transformada Radon Linear

Essa transformada é feita somando (integral da equação) as amostras ao longo da trajetória retilínea no domínio t - x , que permite obter o novo valor de amplitude já no domínio τ - p . Repetindo esse processo para diferentes inclinações (valores de p), gera-se a seção τ - p (Novaes, 2007).

A segunda transformada Radon é a Parabólica, os eventos parabólicos no domínio t - x são mapeados como pontos no domínio τ - p . Essa transformada consegue separar eficientemente os eventos hiperbólicos. Sendo assim, essa transformada é amplamente utilizada para atenuação das múltiplas.

A transformada Radon Parabólica é feita através da equação descrita por Verschuur:

$$m(q, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x, t = \tau + qx^2) dx$$

Onde τ representa o tempo de intercepção e o parâmetro p a curvatura.

A fig. 36 mostra uma imagem da transformada Radon Parabólica. Percebe-se que assim como no Radon Linear, a transformada parabólica também é feita somando (integral da equação) as amostras ao longo de uma trajetória, mas para esse caso a soma é feita ao longo de uma trajetória parabólica no domínio t - x , gerando assim a seção no domínio τ - p .

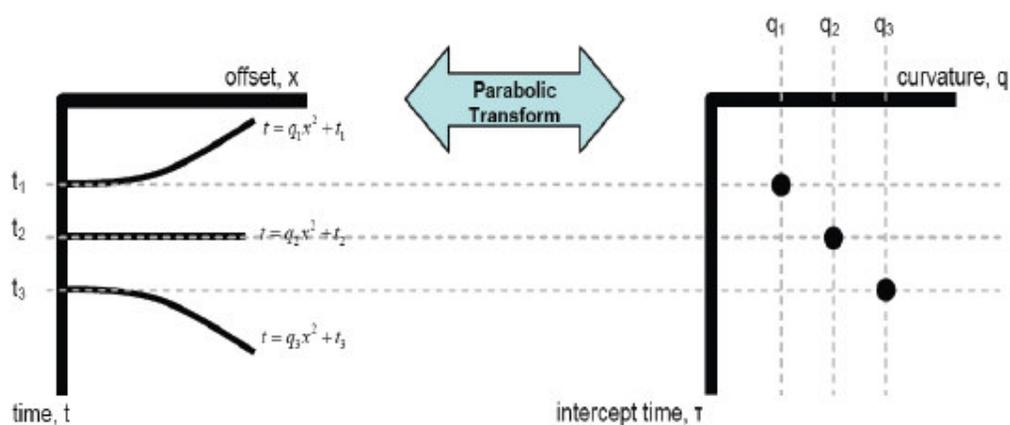


Fig. 36 – Transformada Radon Parabólica

Na teoria a transformada mais utilizada no processo para atenuação das múltiplas seria a transformada Radon Hiperbólica. Pois, para dados corrigidos ou não de NMO, as múltiplas assumem forma hiperbólica, à medida que o afastamento fonte-receptor aumenta.

Dessa forma, essa transformada é indicada para atenuação das múltiplas. Porém a transformada inversa do Radon hiperbólico envolve um processo muito complexo, exige muita capacidade computacional e é um processo demorado, tornando essa transformada desvantajosa, quando comparada a eficiência, tempo e custo do Radon Parabólico

Para transformadas hiperbólicas o v representa a velocidade. A transformada Radon hiperbólica é dada pela fórmula: (*Verschuur*)

$$m(v, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} d \left(x, t = \sqrt{t^2 + \frac{x^2}{v^2}} \right) dx,$$

Onde:

τ - representa a intercepção do tempo (não linear)

$d(x,t)$ - representa o CMP no domínio do tempo-offset

$m(v,\tau)$ – representa o CMP Gather no domínio velocidade-intercepção.

A grande aplicabilidade da técnica da Transformada Radon para a atenuação de múltiplas está relacionada com a capacidade do método em separa entre eventos primários dos eventos múltiplos. Principalmente para afastamento entre fonte-receptor longa

Um dos motivos de limitação do método é a transformada inversa. O cálculo destas é difícil e muitas vezes podem até não existir. Por isso, utilizam-se os mínimos quadrados para realizar a transformada Radon inversa, otimizando o dado de forma que seja possível reconstruí-lo no domínio t-x.

4.14 - Radon no Focus

O PRADMUS é um módulo do Focus que realiza a Transformada Radon Parabólica e a Transformada Radon Linear. A primeira é utilizada para atenuação de múltiplas e a segunda para atenuar eventos lineares no dado sísmico.

A transformada Radon Parabólica realiza a transformada nos CMP corrigidos de NMO. Essa transformada consegue separar eventos com *moveout* diferentes. Pois as múltiplas apresentam um *moveout* residual, ou seja, a velocidade aplicada não foi capaz de transformá-las em eventos retilíneos.

As transformadas diretas e inversas podem rodar em diferentes PRADMUS, ou seja, o primeiro PRADMUS executa a transformada direta e o segundo PRADMUS, logo em seguida, calcula a transformada inversa. A grande desvantagem é que o usuário não poderá desenhar o mute desejado no domínio τ -p.

O módulo permite que o usuário escolha a metodologia aplicada, que pode ser Radon Parabólico convencional (NORMAL) ou o Radon Parabólico High Resolution (HIRES). Para os dois métodos o PRADMUS calcula a transformada direta e inversa do Radon no domínio da frequência independentemente para cada frequência.

A diferença entre os dois métodos encontra-se na etapa de inversão da transformada direta. No caso do Radon convencional, assume-se que os parâmetros do modelo t-x e o ruído (múltiplas) têm distribuição Gaussiana, resultando no uso do modelo inversão pelos mínimos quadrados linear, conhecida como inversão de Toeplitz. Essa metodologia recebe esse nome porque o operador da matriz de inversão tem a estrutura de Toeplitz, ou seja, a matriz

necessita de apenas uma única coluna e o sistema de equações lineares pode ser resolvido a partir do algoritmo de Levinson.

Assumindo que o ruído (múltiplas) tem distribuição Gaussiana e que os parâmetros do modelo de espacial apresentam distribuição de Cauchy, resulta-se na utilização do método de inversão dos mínimos quadrados de forma iterativa e não linear. Esse modelo de inversão produz painéis de τ -p nos quais a energia dos eventos parabólicos são mais focalizados e menos manchados, quando comparados com aqueles criados a partir da inversão de Toeplitz.

A inversão utilizada pela Radon High Resolution é dita como inversão esparsa e é capaz de gerar soluções de alta resolução para a Transformada direta de Radon. Dessa forma, o método é HR Radon consegue mapear bem os eventos, e conseqüentemente separa melhor o evento primário do evento múltiplo, favorecendo a eliminação das múltiplas e preservando as primárias.

A primeira desvantagem do HR Radon é o tempo, e conseqüentemente, custo computacional envolvido é bem maior. A segunda é que apesar do aprimoramento da técnica do Radon parabólico para HR Radon, o HR ainda não é totalmente eficiente para remoção de múltiplas de offset curto, devido à pequena diferença de curvatura entre as primárias e as múltiplas nesses locais.

Após a transformada Radon, o dado é visualizado no domínio τ -p e a região correspondente às múltiplas é mutada. Como se verifica na figura abaixo. Quando q é maior que zero, ou seja, quando a curvatura é maior que zero, é um indicio que o evento é uma múltipla.

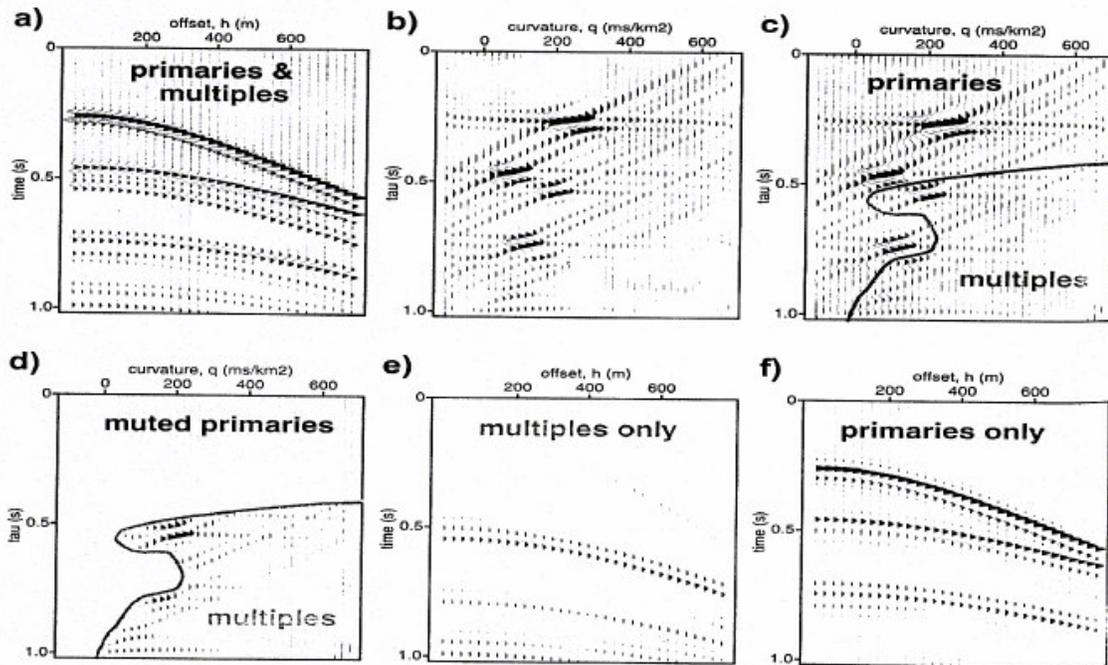


Fig. 37 - Dado de entrada original; (B) – Após a Transformada Radon; (C) Aplicação do mute; (D) -Primárias mutadas; (E) Transformada inversa Radon, com a modelagem das múltiplas. (F) – Subtração das múltiplas.

Os passos para aplicação do Radon HR são os seguintes:

- Agrupar em famílias de CMP
- Calcular uma Velocidade com acurácia
- Transformar o dado sísmico para o domínio τ -p
- Aplicar um mute no domínio τ -p
- Transformada Inversa de Radon (voltar para o tempo-espço)
- Subtrair as múltiplas modeladas do dado

4.15 - Aplicação do HR Radon na linha 0222-0736

Para este trabalho foi escolhido trabalhar com o método Radon de alta resolução, pois este método fornece uma melhor qualidade da seção τ -p e consegue mapear e separar melhor os eventos nesse domínio. Como dado de entrada para esta fase foi utilizado os CMP com SRME e corrigidos de NMO.

Utilizou-se um módulo de entrada do PRADMUS especificando os parâmetros necessários, tais como:

TYPE – Tipo de transformada – Parabólica

METHOD – Método de inversão utilizado na transformada direta – HIRES

NENSM – Número de parábolas utilizadas na Transformada direta – 590

Offset Máximo - 4390

Tempo final e Inicial para aplicação – Dado completo

PBEG – Mínimo moveout (ms) no offset de referência – 600

PEND – Máximo moveout (ms) no offset de referência – 1200

Desenhou-se a área na qual o dado deve ser “mutado”. A transformada inversa é aplicada somente nessa área e o resultado é subtraído do dado de entrada. O resultado do HR pode ser conferido no CMP na fig. 38.

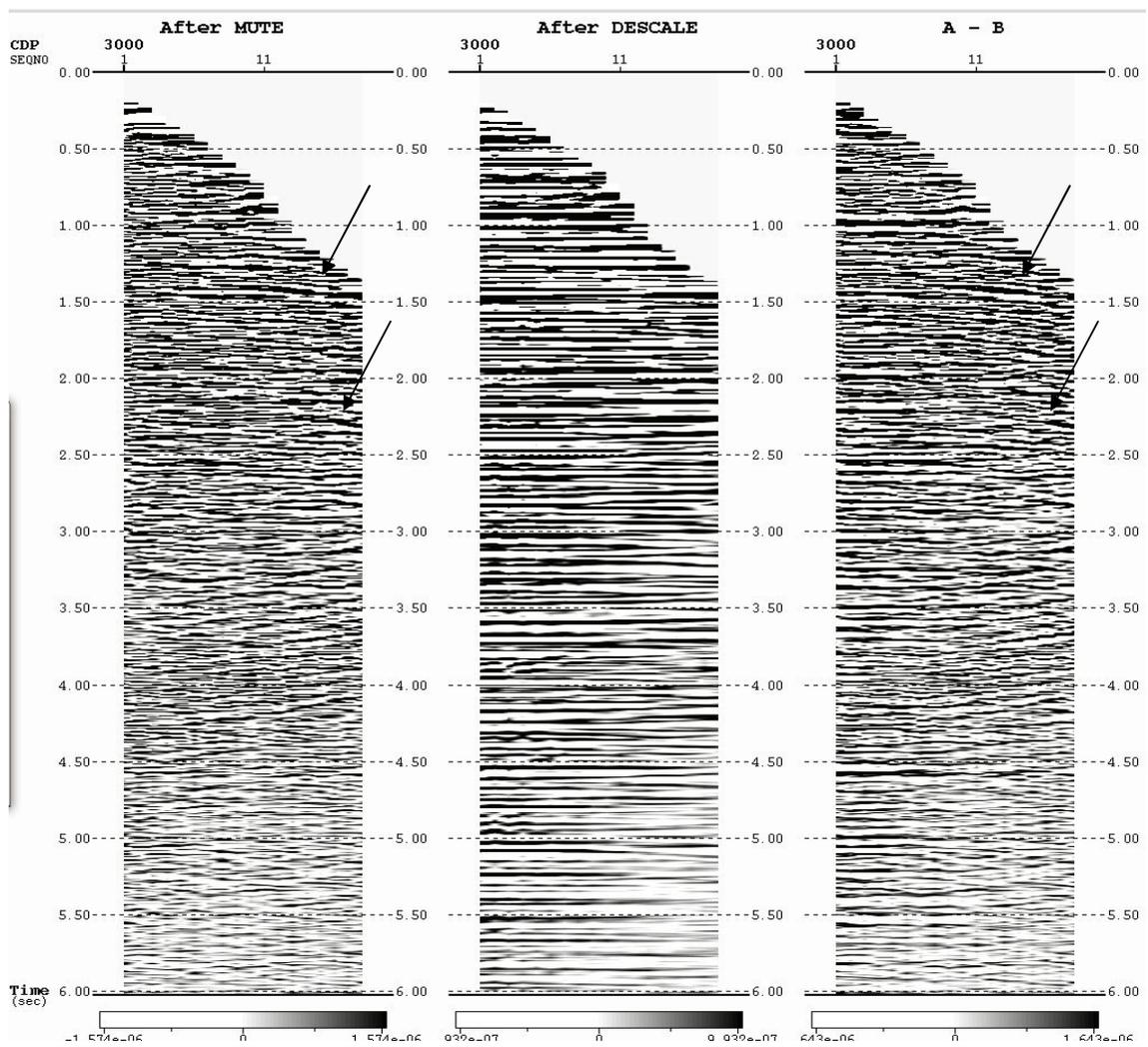


Fig. 38 – Na esquerda, CMP de entrada corrigido de NMO. No centro, o CMP após o Radon. Na direita, o que foi subtraído do dado de entrada.

Foi realizada uma análise fk no CMP antes e após o HR Radon. Pode-se perceber que após o Radon a energia concentra-se nas faixas de frequência até 45 Hz e com k próximo de zero, como mostra a fig. 39.

Na figura 41 observa-se o Empilhado com SRME + RADON, outro só com o SRME e a diferença entre os dois. Foi realizado também uma auto-correlação para os dois primeiros empilhados. Na auto-correlação referente ao SRME é possível perceber a presença de múltiplas localizadas em valores múltiplos da lâmina de água, indicando que o método não conseguiu remover todas as múltiplas do dado. Após o Radon a auto correlação do dado melhora consideravelmente.

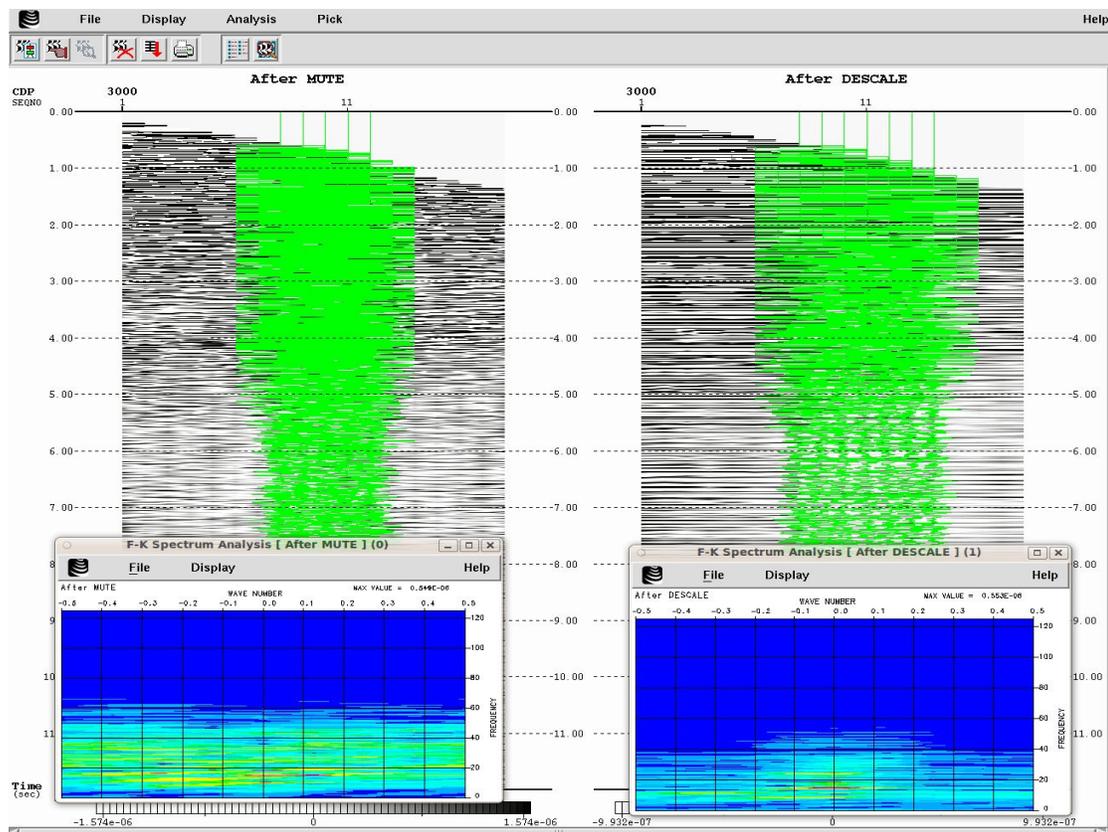


Fig. 39 – Fk antes e após Radon

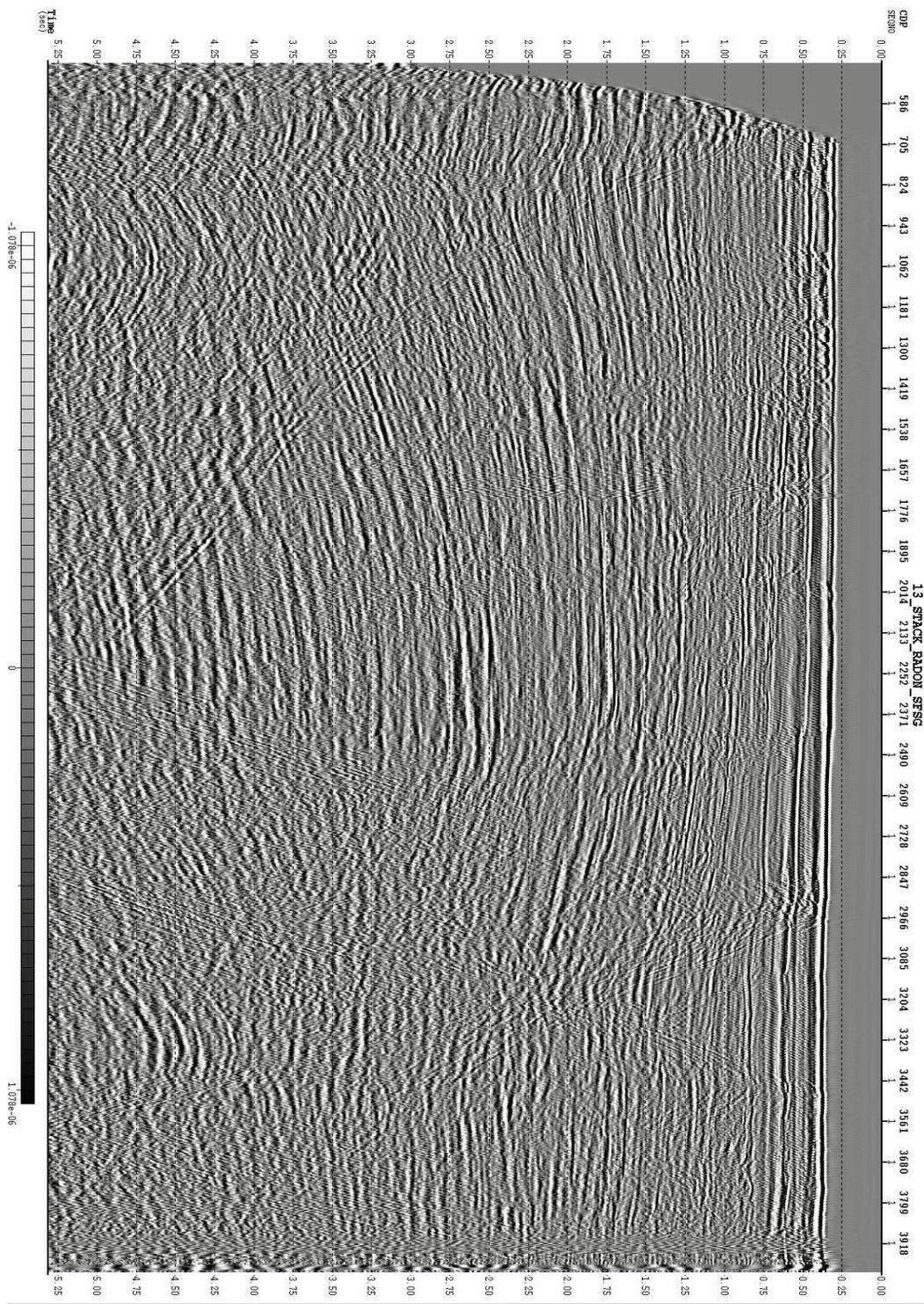


Fig. 40 – Empilhado após o Radon HR.

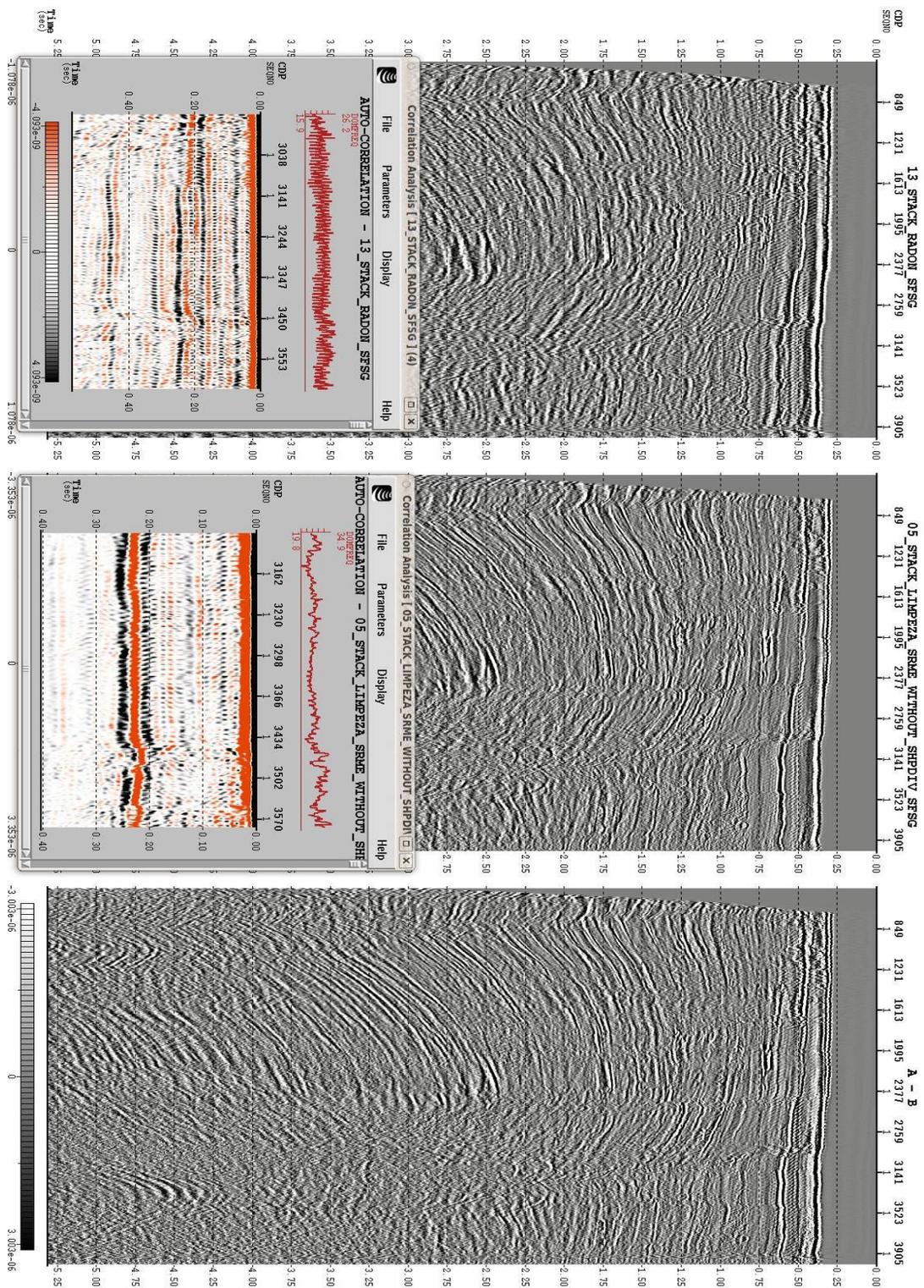


Fig. 41- Empilhado com Radon e SRME. No centro, empilhado apenas com SRME e diferença entre os dois.

4.16 - Deconvolução Preditiva

A deconvolução é uma operação matemática que tem como objetivo comprimir o pulso sísmico e eliminar o efeito da fonte do traço sísmico. O traço sísmico é o resultado da convolução entre o sinal da fonte e o coeficiente de refletividade do meio, sendo assim, aplicar a deconvolução no dado torna-se uma etapa imprescindível no processamento de dados sísmicos.

Neste trabalho, será utilizado a deconvolução preditiva, pois esta metodologia é capaz de suprimir múltiplas periódicas do dado sísmico. Como comprimento do operador será utilizado uma janela de predição um pouco maior do que o período das múltiplas que se deseja atenuar. Nesse caso, foi realizado uma auto-correlação numa área com múltiplas de interbed (figura 42) e percebeu-se que o operador deveria ser maior que 250 ms.

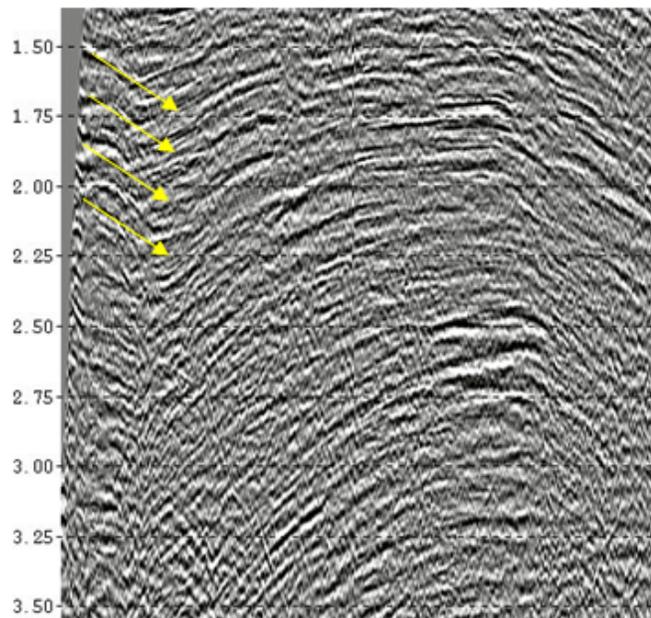


Figura 42 – Área do Stack no qual é possível identificar múltiplas de interbed, como mostra as setas em amarelo.

Para a deconvolução preditiva foi utilizado o comprimento de 320 ms e um Gap de 32ms. Foi aplicado ao dado o módulo do focus que realizou a deconvolução preditiva, esse módulo recebe o nome de DECONA.

A figura 42 mostra um CMP antes da deconvolução preditiva (A), após a deconvolução (B) e a diferença entre eles (C). As setas em verde, vermelho, azul e a linha tracejada indicam diferentes múltiplas que foram retiradas do dado sísmico.

A seta verde identifica uma múltipla visível, no tempo de aproximadamente 0.4s. Essa múltipla foi atenuada no processo de deconvolução preditiva. Percebe-se também que no CMP após a deconvolução (B) foi possível identificar a presença de um refletor, que antes não era visível, alguns milissegundos abaixo do tempo da múltipla. Nesses casos, a múltipla se sobrepõe a um evento sísmico e desloca a wavelet.

A seta vermelha representa uma múltipla visível, em 0.75s, que foi atenuada após a deconvolução preditiva. Percebe-se que no CMP após a deconvolução (B) em 0.75 a presença de dois refletores que antes eram “mascarados” pela presença desta múltipla. A seta em azul representa outra múltipla foi atenuada do dado sísmico.

A linha traceja está localizada exatamente em cima de uma múltipla. No CMP antes da deconvolução (A) é possível perceber a presença desta múltipla. Após a deconvolução (B) essa múltipla teve sua amplitude reduzida, o refletor localizado logo abaixo dela foi ressaltado. Na diferença entre o dado sem e com deconvolução, (Figura C) a presença desta múltipla é evidente.

Realizou-se uma análise do conteúdo de frequência antes e após a deconvolução, pois a aplicação da deconvolução no dado sísmico tem como característica o aumento do espectro de frequência. Essa análise é vista na parte inferior da imagem, o primeiro espectro corresponde ao dado antes da aplicação da deconvolução e o segundo espectro, após a deconvolução. É evidente ao aumento frequência no dado após a deconvolução.

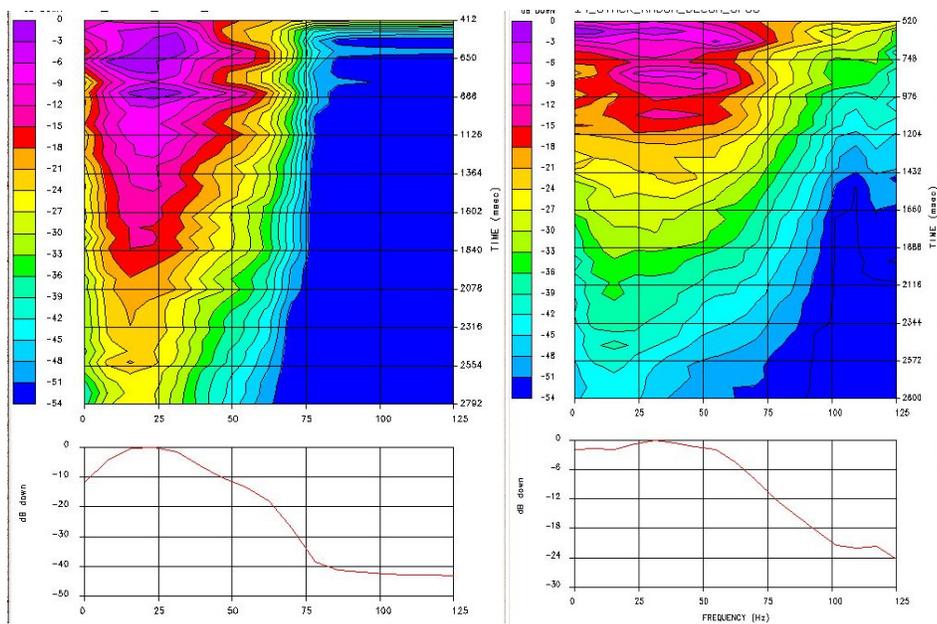
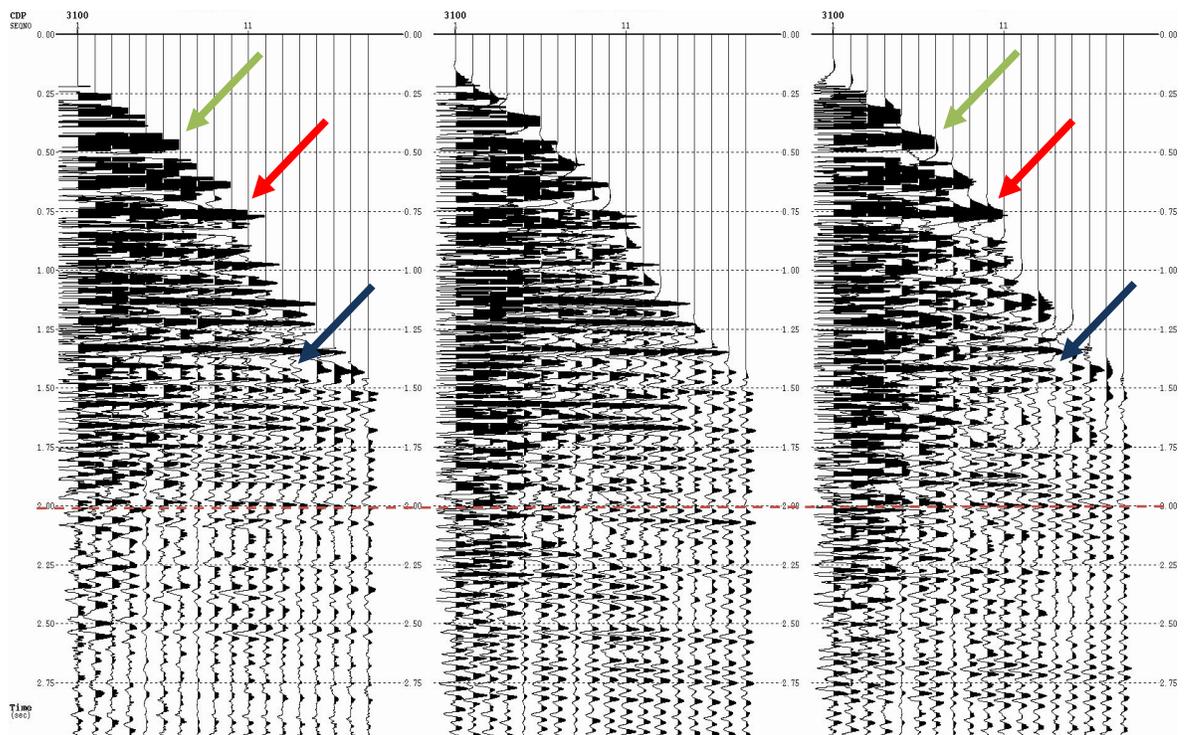


Figura 43 – Na parte superior (A) CMP antes da deconvolução(B) Após a deconvolução. (C) diferença entre eles, respectivamente. Na parte inferior: análise da frequência antes e após a deconvolução

4.17 - Migração Pós – Empilhamento

Após as etapas referentes à atenuação de múltiplas, utilizou-se o empilhamento com Limpeza + SRME + RADON + DP como entrada para realizar uma migração pós-empilhamento.

Nesse dado foi utilizada a migração Kirchhoff, por ser a metodologia mais simples e fácil de ser aplicada, obtendo resultados muito bons quando os mergulhos das camadas não são muito pronunciados.

Na figura 43 será visto o Empilhado utilizado como entrada para migração.

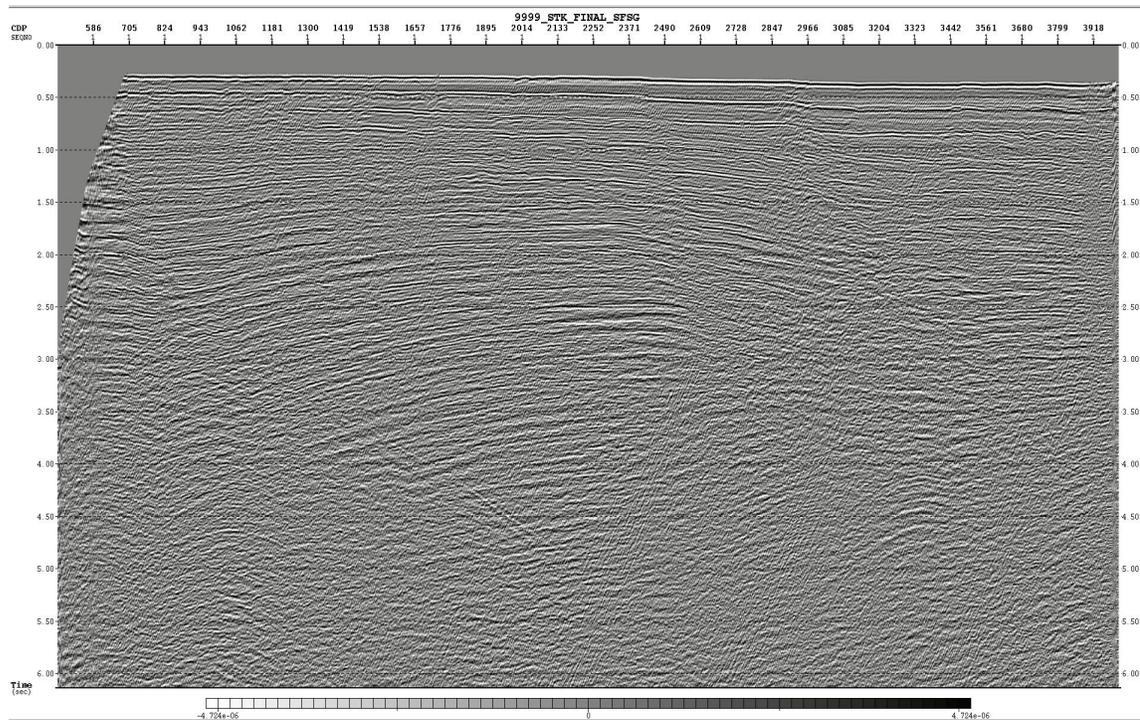


Figura 43 – Empilhado utilizado como entrada para migração

5. RESULTADOS OBTIDOS

No dado sísmico real existem diferentes tipos de múltiplas e por isso, foram utilizadas três técnicas diferente para a etapa referente à atenuação de múltiplas.

Por ser um *data-driven* o primeiro método a ser aplicado foi o SRME, que tem como objetivo remover todos os tipos de múltiplas relacionadas com a superfície. Neste trabalho o SRME obteve um resultado satisfatório para supressão de múltiplas de afastamento fonte-receptor curto, tais como múltiplas de peg-leg. Como mostraram os resultados do capítulo referente ao SRME.

O Radon foi utilizado logo após o SRME. Foi utilizada a técnica “High Resolution” para obter uma separação entre primárias e múltiplas ainda melhor do que o Radon convencional. Esse método foi bastante eficaz para remoção de múltiplas de afastamento médio a longo.

Após a aplicação desses dois métodos foi necessário ainda aplicar um terceiro método de atenuação de múltiplas, que foi a deconvolução preditiva. Esse método foi escolhido devido à identificação de múltiplas de interbed. Nesse tipo de múltipla o SRME e o RADON não são eficientes.

Após essas etapas, foi aplicada ao dado uma migração pré stack, depois empilhadas e geradas foram testados filtros finais e aplicado ao dado.

A figura abaixo mostra o dado empilhado após as etapas do SRME, RADON, Deconvolução preditiva e com a aplicação de alguns filtros.

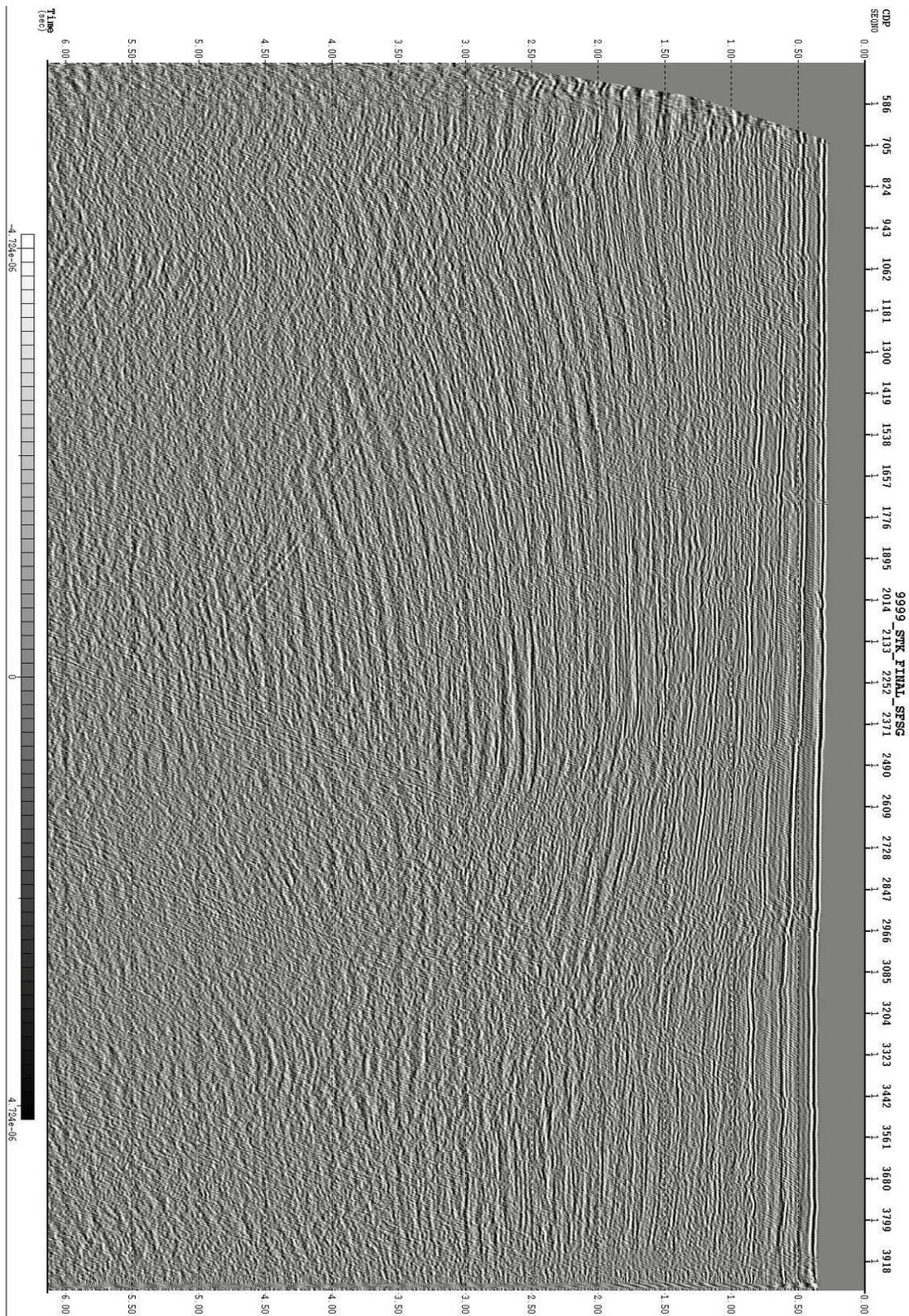


Fig. 46 -Empilhado após as etapas do SRME, RADON, Deconvolução preditiva e com a aplicação de alguns filtros.

6. CONCLUSÕES

Cada tipo de dado exige um tratamento específico e diferencial, e cabe ao analista sísmico escolher todas as etapas que levam o dado sísmico a obter a melhor qualidade possível. Inicialmente, para a linha 0222-0736 foi desenhado um fluxo de processamento sísmico com duas etapas de atenuação de múltiplas.

À medida que o processamento sísmico foi avançando sentiu-se a necessidade de aplicar uma terceira técnica para atenuação de múltiplas, com o objetivo de remover de outro tipo de múltipla, que antes não era tão evidente.

Esta sendo realizada, ainda, uma análise de AVO, cujos resultados só estarão disponíveis após a conclusão da parte escrita. Os resultados do AVO serão enviados assim que possível e serão anexados, posteriormente a esse trabalho, assim como seus resultados.

7. BIBLIOGRAFIA

- Abreu, S.A. 2005. Processamento de dados sísmicos do Golfo do México usando Seismic Unix. Monografia. Salvador -Bahia.
- Brooymans, R., Mojesky, T. & Pham, L. A Review of current Marine Demultiple Techniques with Examples from East Coast of Canada. CGG Canada Services Ltd., Calgary.
- Brunetta, R. 2005. O Processamento da Sísmica de Reflexão Rasa: Desafios encontrados no estudo de Modelos Análogos a Reservatórios Fraturados. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, Brasil.
- Carvalho, P.M. 1992. Método de Eliminação de Reflexões Múltiplas Relacionadas com a superfície livre baseado em inversão não linear de Dados Sísmicos. Tese de Doutorado, UFBa.
- Cary, P.W., The simplest discrete Radon transform, 1998 SEG Expanded Abstracts.
- Castagna, J.P. and Swan, H.W., 1998, Principles of AVO crossplotting: The Leading Edge, 16, 337-342.
- Curia, D. F. A. 2010. AVO: Fundamentos y Procesamiento
- Elboth, T. & Hermansen, D. Attenuation of noise in marine seismic data
- Hargreaves, N. & Cooper, N. High-Resolution Radon Demultiple. Disponível em: web3.veritasdgc.com/WebSite/VTechDocWeb.nsf/all/.../0010.pdf Acesso em: 02/05/2010.
- Hargreaves, N.; Cooper, N. & Whiting, P. High-Resolution Radon Demultiple. ASEG 15 Geophysical Conference and Exhibition, August 2001, Brisbane. Disponível em: web3.veritasdgc.com/WebSite/VTechDocWeb.nsf/all/.../0011.pdf Acesso em: 02/05/2010.
- Hugonnet, P., Hardouin D., & Lecocq, P. Deep Water cases histories -SRME /HR Radon / Diffracted Multiple Attenuation. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, U.S.A., 3-6 May, 2004.

- Hugonnet, P., Boelle, J.L., Mihoub, M. & Herrmann, P. High Resolution 3D parabolic Radon filtering, 71st EAGE Conference & Exhibition — Amsterdam, The Netherlands, 8 - 11 June 2009
- Long, A, *et al.* – Multiple Removal success in the Carnarvon with SRME. APPEA JOURNAL 2005.
- Mayne, W. H. Common reflection point horizontal data stacking techniques. Geophysics, v.27, n.6, p.927-938, 1962.
- Moore, I., Kostov, C. & Yingst, D., High Resolution Radon Transform for Processing Seismic Data, United States Patent No.: 6,636,810 B1. Outubro, 2003.
- Ng, M. & Perz, M. High Resolution Radon Transform in the T-X Domain, 2004 CSEG National Convention, Calgary, Alberta, Canadá.
- Novaes, F. C. 2007. Processamento de dados sísmicos da Bacia de Campos utilizando deconvolução multicanal para a supressão de múltiplas. Monografia, Salvador - Bahia .
- Ostrander, W.J., 1982, Plane-wave reflection coefficients for gas sands at non normal angles of incidence: Geophysics, 49, 1637-1648.
- PGS, Radon Transform Demultiple Techniques at PGS. TECH PGS LINK, A Publication of Petroleum Geo-Services, Vol. 8 No. 7, July 2008.
- Rutherford, Williams 1989. Amplitude-versus-offset variations in gas sands; Vol: 54, N:6
- Sacchi, M.D. & Porsani, M., Fast high resolution parabolic Radon transform, SEG 1999 Expanded Abstracts.
- Silva, M. G. 2004. Processamento de dados Sísmicos da Bacia do Tacutu. Dissertação de Mestrado, Salvador – Bahia.
- Stewart P. G., Jones, I.F. & Hardy, P.B. Solutions for Deep water Imaging. SPG, GeoHorizons, P8-22. Janeiro, 2007.
- Tanaka, M.D. 2003. Reconhecimento das ocorrências de Hidratos de Gás no cone do Amazonas. Dissertação de Mestrado, UFF.
- Telford, W., Geldart, L. & Sheriff, R. 1990. Applied Geophysics, Cambridge , University Press.
- Vasconcellos, G.D. 2009. Processamento de dados sísmicos sintéticos de um modelo de sal utilizando o software SPW, Monografia UFF.

- Verschuur, D. J., 1991. Surface-related multiple elimination: an inversion approach, tese de Ph.D., Delft University of Technology.
- Verschuur, D. J., Berkhout, A. J. and Wapenaar, C. P. A., 1992. Adaptive surface-related multiple elimination, *Geophysics* 57:1166-1177.
- Verschuur, D. J. Seismic multiple removal techniques. Past, present and future. 2006. EAGE
- Verschuur, D.J., Surface related Multiple Removal in Seismic Data by a data Drive Methodology
- Valterlene, O. 2005. A Tectônica Gravitacional no Cone do Amazonas: Compartimentação estrutural e mecanismos controladores. Dissertação de Pós-Graduação, UFF.
- Weglein, A.B., Multiple attenuation: an overview of recent advances and the road ahead, *The Leading Edge*, 18 (1), 40-44, 1999
- Yilmaz, O. 1987. Seismic Data Processing, Society of Exploration Geophysicists-SEG, Tulsa.

8. LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 – Mapa da área de Estudo, localizado na Bacia da Foz do Amazonas, destacado em amarelo. Base de dados batimétricos extraídos do GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans)

Fig. 2 – Reconstrução pré-drift da América e da África. Em destaque a evolução Transformante da Margem Equatorial brasileira. (Editado de Mohriak, 2003)

Fig. 3 – Estágios da evolução da Margem Equatorial Transformante (Masclé e Blarez, 1987)

Fig. 4 – Perfil SW-NE da Bacia da Foz da Amazonas (Agência Nacional do Petróleo –ANP)

Fig. 5 – Limites e Divisão da Bacia da Foz do Amazonas (Modificado de Damuth et. al., 1988)

Fig. 6 – carta Estratigráfica da Bacia da Foz do Amazonas

Fig. 7 – Efeito hiperbólico e pontilhado a correção de NMO.(Modificada de EAGE)

Fig. 8 – Os pontos indicam onde foram feitas as amostragens. (fonte: Smith, S.)

Fig. 9 – Múltiplas Relacionadas com a Superfície (Modificado Yilmaz, 1987)

Fig 10 – Múltiplas de peg-leg (Yilmaz, 1987)

Fig. 11 - Basemap do Focus com as coordenadas do CMP

Fig.12 - Tabela com os CMP's com máximo fold.

Fig.13 – Interactive Geometry

Fig.14 - Controle de qualidade da Geometria. Na parte superior está o afastamento fonte-receptor mínimo (202 metros) e máximo (4390 metros) do FFID 143, que corresponde ao tiro 143.

Fig. 15 – Análise de frequência dos traços destacados em verde.

Fig. 16 – Traço mais próximo.

Fig. 17 – Source Delay time

Fig.18 - Análise espectral de um traço

Fig.19 - Análise espectral de um traço

Fig. 20 – Parâmetros utilizados no AMPSCALE

Fig. 21 – Resultado do AMPSCALE

Fig. 22 – Resultado do TFCLEAN

Fig. 23 – Identificação do Ruído de strum noise em amarelo e em marrom o local no qual do foi feito o análise fk

Fig. 24 – Análise fk e o polígono que foi utilizado para atenuação do ruído de strum

Fig. 25 - Tiro com ruído de swell, com uma das listras verticais destacadas. (Modificado de Yilmaz, 1987)

Fig. 26 – Resultado da Limpeza no domínio do tiro

Fig. 27 – Múltipla de primeira ordem podem ser considerada uma unificação de duas reflexões primárias, na qual o ponto de reflexão é considerado a “nova fonte” (Verschuur, SURFACE-RELATED MULTIPLE REMOVAL IN SEISMIC DATA BY A DATA-DRIVEN METHODOLOGY)

Fig. 28 – Resultado de todas as combinações possíveis em superfície, para uma múltipla de primeira ordem.

Fig. 29. a) Dado original. b) Predição das múltiplas. c) Resultado. Abaixo as correlações do dado sísmico correspondentes.

Fig. 30. a) Dado antes e após do SRME e sua diferença.

Fig. 31 – Interpolação no domínio do tiro.

Fig. 31 - Na parte superior da imagem pode-se visualizar o valor do IT-FLAG-2 e é possível conferir que o afastamento máximo da fonte-receptor não foi alterado.

Fig. 32 – Dado antes, Após o SRME e a diferença entre ambos, respectivamente.

Fig. 33 mostra o dado antes do SRME e o dado após o SRME.

Fig. 34-Empilhado sem SRME, Empilhado após SRME e a diferença entre ambos, respectivamente.

Fig. 35 – Transformada Radon Linear

Fig. 36 – Transformada Radon Parabólica

Fig. 37 - Dado de entrada original; (B) – Após a Transformada Radon; (C) Aplicação do mute; (D) -Primárias mudadas; (E) Transformada inversa Radon, com a modelagem das múltiplas. (F) – Subtração das múltiplas.

Fig. 38 – Na esquerda, CMP de entrada corrigido de NMO. No centro, o CMP após o Radon. Na direita, o que foi subtraído do dado de entrada.

Fig. 39 – Fk antes e após Radon

Fig. 40 – Empilhado após o Radon HR.

Fig. 41- Empilhado com Radon e SRME. No centro, empilhado apenas com SRME e diferença entre os dois.

Figura 42 – CMP antes da deconvolução, após a deconvolução e a diferença entre eles, respectivamente.

Figura 43 – Empilhado utilizado como entrada para migração

Fig. 44: Configuração CMP aplicada na análise de AVO.

Fig 45: Classificação de Rutherford e Willians (1989) para areias com gás. Modelo modificado por Castagna (1997). Nota-se que as areias com gás classe III e IV apresentam o

mesmo coeficiente de reflexão à incidência normal sendo que no primeiro tipo a amplitude aumenta com o afastamento enquanto que no segundo a amplitude decai.

Fig. 46 - dado empilhado após as etapas do SRME, RADON, Deconvolução preditiva e com a aplicação de alguns filtros.