



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

A MONTAGEM E O EMPREGO DE
FONTES ALTERNATIVAS PARA
LEVANTAMENTOS SÍSMICOS
TERRESTRES EM ÁREAS SENSÍVEIS

PAULO RODRIGO LEAL PEREIRA

SALVADOR – BAHIA

Março – 2014

**Emprego de Fontes Alternativas para Levantamentos Sísmicos Terrestres em
Áreas Sensíveis**

por

PAULO RODRIGO LEAL PEREIRA

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Barsottelli Botelho

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora

_____ Dr. Marco Antônio Barsottelli Botelho
_____ Dr. Wilson Mouzer Figueiró
_____ Me. Michelângelo Gomes da Silva

Data da aprovação: /03/2014

Dedico este trabalho aos meus pais,
Raimundo Pereira e Selma Leal,
minha esposa Daiane Leal,
e a meus tios, Jorge Aragão e Ana
Aragão, que sempre me apoiaram
na minha caminhada.

RESUMO

A fonte sísmica que utiliza a queda de um peso com aceleração é conhecida como AWD (*Accelerated Weight Drop*), a qual é dita não explosiva e, portanto, tem como principal virtude, sua empregabilidade em áreas ambientalmente sensíveis. O seu funcionamento consiste em um sistema hidráulico que desce uma placa metálica elipsoidal até o solo, realizando o acoplamento desta placa ao solo e suspendendo o sistema. Em nosso caso, o sistema é a carroceria do caminhão, de modo que todo o peso da parte trazeira do caminhão fica apoiada na placa.

O mesmo sistema hidráulico também suspende um êmbolo cilíndrico de aço, por dentro de um pilar ôco formado por uma casca cilíndrica, a qual mantém o peso do caminhão sobre a placa acoplada ao solo. Este êmbolo sobe até atingir uma chave que dispara liberando nitrogênio líquido que estava armazenado sob pressão em um cilindro de gás. A pressão do gás faz com que o êmbolo cilíndrico caia com maior aceleração causada pela pressão do gás nitrogênio liberado, e vá se chocar contra a placa acoplada ao solo, gerando o pulso sísmico.

Neste trabalho a fonte AWD foi comparada com fonte sísmica explosiva, e ela mostrou ter menor custo, ocasionou pouco ou nenhum impacto ao meio ambiente, porém tem menor energia que a fonte explosiva. Outro aspecto positivo da fonte AWD é podermos realizar o somatório de diferentes registros, levantados por diferentes tiros, desde que se mantenha o mesmo arrajo de fonte e receptores, tendo ainda uma maior velocidade no processo de aquisição de dados sísmicos terrestres. O sistema AWD tem sido historicamente usado para levantamentos sísmicos de exploração com foco em alvos geológicos rasos a intermediários. É indicado para complementar levantamentos sísmicos que necessitem atravessar áreas urbanas.

Este trabalho mostra o processo de adaptação da fonte sísmica AWD AF450 sobre a carroceria de um caminhão de fabricação nacional, um FORD CARGO 1717.

Realizou-se uma aquisição sísmica terrestre com a referida fonte AWD no campo-escola da UFBA, situado no município de Araçás, gerando os dados que foram utilizados nesse trabalho. Realizamos um processamento básico desse dado sísmico através dos softwares livres Seismic Unix e GêBR, com a finalidade de gerar uma seção empilhada da área de estudo.

ABSTRACT

A source of accelerated weight drop (AWD) is a non explosive seismic source, which is a load power source gas that accelerates a large mass of steel making a colliding coupled to ground steel plate . When compared with other seismic sources such as dynamite and Vibroseis, she was shown to have lower cost, resulting in little or no impact to the environment and still have a higher speed in the acquisition of land seismic data processing. The AWD system has historically been used for seismic exploration with focus on geological targets shallow to intermediate.

This work shows the process of adapting the seismic source AWD AF450 on the back of a truck FORD CARGO 1717 . Also describes the specifications of the equipment, as well as their advantages and disadvantages relative to other seismic sources .

We made a seismic land with said source AWD field school UFBA acquisition, located in the municipality of Araçás, generating data that were used in this work. We performed a basic processing of this seismic data through free software Seismic Unix and GêBR, with the purpose of we generate a stacked section of the study area .

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 O Método Sísmico	3
1.1 Teoria Sísmica	3
CAPÍTULO 2 Adaptação da Fonte Sísmica ao Caminhão	12
CAPÍTULO 3 Fonte Sísmica AWD (<i>Accelerated Weight Drop</i>)	22
3.1 Histórico	22
3.2 Funcionamento e Especificações da Fonte Awd AF450	22
3.3 Aspectos Físicos, Segundo o Fabricante	24
3.4 Vantagens e Desvantagens da Fonte AWD	26
CAPÍTULO 4 Aquisição e Processamento	29
4.1 Processamento do Dado Sísmico	31
4.2 Leitura do Dado SEG-Y através do Seismic Unix	31
4.3 Geometria	32
4.4 Edição dos Traços e Mute	34
4.5 Compensação das Perdas de Amplitude	35
4.6 Análise Espectral do Dado	38
4.7 Filtragem	39
4.8 Deconvolução	42
4.9 Análise de Velocidade	44
4.10 Common mid-point	44
4.11 Normal Moveout	45
4.12 Espectro de velocidade	47
4.13 Coerência	47
4.14 Semblance	47

4.15 Empilhamento	50
CAPÍTULO 5 Conclusões	54
Agradecimentos	56

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Elemento de volume cúbico infinitesimal cujas faces estão submetidas a tensões normais e cisalhantes, localizado no interior de um material perfeitamente elástico e isotrópico.	4
1.2	Tipos de ondas sísmicas. (a) e (b): ondas de corpo; (c) e (d): ondas superficiais (Bolt, 1976).	6
1.3	Movimentação durante a passagem da onda Rayleigh.	7
1.4	Princípio de Huygens para localização de novas frentes de onda.	8
1.5	Frente de onda plana incidindo sobre a interface entre os meios 1 e 2 a partir do meio 1, produzindo uma frente de onda refletida que retorna para o meio 1 e uma frente de onda transmitida que se propaga para o meio 2.	8
1.6	Fenômeno de difração. A onda ao atingir o ponto A (ponto difrator) irradia novas frentes de ondas em diversas direções (DOBRIN, 1976).	10
2.1	Fonte sísmica AWD.	12
2.2	Caminhão Ford Cargo 1717.	13
2.3	Planta da instalação enviada pelo fabricante.	14
2.4	Travessa.	15
2.5	Contato entre o 'martelo' e a caixa do diferencial.	15
2.6	O desalinhamento é nítido.	16
2.7	Envergamento do chassi (observar as lanternas).	16
2.8	Quando o guindaste aliviou a carga sobre o chassi, o 'martelo' voltou espontaneamente para a posição correta.	16
2.9	Caminhão desmontado.	17
2.10	Eixo traseiro.	17
2.11	Posicionamento dos novos furos do eixo traseiro.	18
2.12	Furação das longarinas do chassi.	18
2.13	Madeiras sobre as longarinas do chassi.	19
2.14	Madeiras colocadas entre as longarinas do chassi e a fonte sísmica AWD.	19
2.15	Travessa adaptada (observar os cortes no centro).	20
2.16	'Capa do chassi'.	20
2.17	Caminhão com a fonte sísmica AWD.	21
3.1	Perspectiva de fonte sísmica AWD AF450.	23
3.2	Acoplamento da placa de aço ao solo.	24
3.3	Tabela com as especificações segundo o fabricante.	25

3.4	Energia de saída em função da pressão do gás.	26
3.5	Marca deixada por uma fonte AWD no Canadá.	27
3.6	Fonte sísmica AWD montada num trator.	28
4.1	Campo-escola da UFBA em Araçás-BA.	29
4.2	Parâmetros dos geofones.	29
4.3	Parâmetros de tiro.	30
4.4	Tabela com os parâmetros da aquisição.	30
4.5	Montagem da linha sísmica pelos estudantes da UFBA.	30
4.6	Fluxograma utilizado nesse trabalho.	31
4.7	Parte inicial do dado sem nenhum tratamento: aparenta um arranjo end-on.	33
4.8	Parte central do dado sem tratamento: aparenta um arranjo split-spread.	33
4.9	Parte final do dado sem tratamento: aparenta um arranjo end-off.	33
4.10	Tiro 247 sem edição dos traços (janela de tempo até 2,5 s).	35
4.11	Tiro 247 com edição dos traços e mute (janela de tempo até 2,5 s).	35
4.12	Tiro 247 com edição dos traços e mute (janela de tempo de 2,5 s).	37
4.13	Tiro 247 com edição dos traços, mute e ganho (janela de tempo de 2,5 s).	37
4.14	Espectro de Amplitude x Frequência para o tiro 247 sem edição dos traços ruidosos.	39
4.15	Filtros de frequência do tipo trapezoidal: passa-baixa ou corta-alta (a), passa-alta ou corta-baixa (b), passa-banda (c) e rejeita-banda (d).	40
4.16	Aplicação do filtro trapezoidal no tiro 247 para as frequências 10,15,50 e 60 Hz.	41
4.17	Aplicação do filtro trapezoidal no tiro 247 para as frequências 10,15,140 e 150 Hz.	42
4.18	Tiro 247 após a aplicação da deconvolução (janela de tempo de 2,5 s).	44
4.19	Modelo de uma reflexão no refletor plano a uma profundidade h.	45
4.20	Super Gather com 5 CDPs. Após a aplicação, surgiram eventos de reflexão.	49
4.21	Semblance plot, durante a etapa de Análise de Velocidade. Nessa Janela devem ser aplicados os picks das velocidades, que serão armazenadas e gerarão o arquivo que será utilizado na correção NMO.	50
4.22	Seção empilhada para o filtro 10,15,50 e 60 Hz.	52
4.23	Seção empilhada para o filtro 10,15,140 e 150 Hz.	53

INTRODUÇÃO

Os métodos sísmicos se baseiam na propagação de uma onda mecânica produzida por uma fonte sísmica, ao qual percorre o substrato geológico, e ao encontrar camadas com diferentes propriedades elásticas, contrastes de impedância acústica, reflete diante dos contatos dessas diferentes camadas, até que a energia dessa onda seja captada por receptores que se encontram dispostos na superfície. Comumente, as ondas sísmicas mais analisadas são as ondas P, primárias, devido a maior facilidade de produção e captação dessas ondas, contudo, não podemos descartar as informações que o estudo de ondas S, secundárias, trazem para os métodos sísmicos; basicamente as ondas P e S são as únicas estudadas, onde o efeito das demais ondas, como por exemplo a superficial Rayleigh, é considerado fonte de ruído para os dados sísmicos, sendo alvo de correções no processamento.

O trabalho a que nos propomos desenvolver consiste em descrever o acoplamento mecânico da Fonte Sísmica AWD fabricada pela empresa USAlliance Ltda, com sede na cidade do Texas, no Texas, na carroceria de um caminhão Ford Cargo 1717, além dos conceitos para o processamento básico de um dado sísmico gerado por esse equipamento.

O processo de instalação mecânica da fonte sísmica AWD durou aproximadamente 3 meses. No planejamento da instalação pareceu que seria uma operação rotineira, mas no decorrer do processo apareceram vários problemas que atrasaram o término do trabalho, além de onerar os custos da instalação. Com muita competência, a oficina contratada para executar a adaptação do equipamento AWD no caminhão conseguiu contornar as situações adversas, finalmente colocando o equipamento em operação. Foram feitos alguns testes em campo, com o equipamento se comportando de forma satisfatória.

O trabalho realizado por A Ganguly e Ivan Moissa em dezembro de 2002, na Índia, mostrou que o AWD é uma alternativa ecológica, econômica e eficiente em relação ao uso de fontes de energia sísmica explosivas e Vibroseis. Para muitos levantamentos sísmicos que usam Vibroseis ou explosivos como fonte de energia primária em apenas uma parte da área de pesquisa, o AWD pode ser usado como uma fonte complementar para obter dados sísmicos perto de zonas urbanas ou ambientalmente protegidas onde podem ser proibidas a perfuração e a utilização de explosivos e Vibroseis.

Usado como uma alternativa para Vibroseis e fontes sísmicas explosivas, o AWD tem sido usado com sucesso em levantamentos 2D e 3D, com o objetivo de imagear alvos geológicos rasos a intermediários. Segundo o trabalho de Monk realizado no Canadá em 2002, a taxa de produção de aquisição de dados é pelo menos cinco vezes mais rápido em relação a vibradores

ou fontes de energia de explosão. Além disso, os requisitos de manutenção e de transporte são uma fração do custo e do tempo quando comparado com Vibrosais.

O processamento de dados sísmicos é uma atividade comum e essencial na indústria do petróleo e teve um crescimento significativo devido ao avanço computacional. O objetivo desta etapa é gerar uma imagem representativa da subsuperfície e para que esse objetivo seja alcançado, uma série de operações são feitas nos dados sísmicos, onde um fluxograma de processamento, listando cada operação, é elaborado e aplicado ao dado sísmico até que se obtenha uma imagem da subsuperfície que revele as diferentes camadas e estruturas presentes. O fluxograma pode ser criado de diferentes maneiras e dependerá tanto da qualidade dos dados e dos recursos disponíveis no software adotado, quanto do objetivo a ser alcançado. No trabalho de processamento, adotamos o software livre Seismic Unix desenvolvido pela Colorado School of Mines, com exceção para a aplicação da função mute, onde utilizamos o pacote SU X MUTE do software livre GêBR, desenvolvido pela Free Software Foundation, sediada em Boston, EUA.

CAPÍTULO 1

O Método Sísmico

A sísmica de reflexão é um método geofísico baseado na propagação de ondas mecânicas em subsuperfície em função das propriedades elásticas das rochas e dos fluidos no interior delas. Essas ondas são produzidas por fontes sísmicas artificiais, geralmente alocadas em superfície, enquanto receptores registram os tempos de chegada e as amplitudes das ondas que retornam, depois de serem refletidas pelas interfaces entre meios geológicos com propriedades elásticas diferentes.

Dentre os métodos geofísicos, o método sísmico se destaca por fornecer imagens com boa resolução das estruturas geológicas, tanto em pequenas quanto em grandes profundidades. Mas devido aos elevados custos de aquisição e processamento de dados sísmicos, sua aplicação é limitada para exploração de água subterrânea e de minérios. Já para a indústria de petróleo e gás natural, o conhecimento detalhado das estruturas geológicas é de fundamental importância para se detectar as armadilhas de hidrocarbonetos. Nesse caso, o aumento das chances de sucesso que o método sísmico proporciona viabiliza seus custos elevados.

1.1 Teoria Sísmica

Teoria da Elasticidade e Lei de Hook

Quando se aplica uma força externa à superfície de um sólido, o tamanho e forma deste corpo sofrem alterações. Essa força externa encontra resistência devido às forças internas que se opõem a estas mudanças. Devido a isso, quando a força externa para de atuar, a tendência é que o corpo volte ao seu estado original. Esta propriedade de resistir às mudanças de forma e tamanho recebe o nome de Elasticidade. Um corpo perfeitamente elástico é aquele que retorna ao seu estado normal após sofrer uma deformação.

O esforço aplicado, ou força aplicada, pode ser definido como Tensão, que é a razão entre a força e a área onde está sendo aplicada esta força. Caso esta força seja perpendicular à área, dá-se o nome de tensão normal. Se a força for tangencial à área, dá-se o nome de tensão de cisalhamento.

Para descrever matematicamente as deformações elásticas, considere a Figura 1.1, na qual

é representado um elemento de volume cúbico infinitesimal cujas faces estão sob a ação de forças. A tensão sobre uma das faces é definida como a intensidade da força que nela atua por unidade de área. Na figura, o símbolo sigma ij representa a componente da tensão paralela ao eixo i sobre uma face perpendicular ao eixo j.

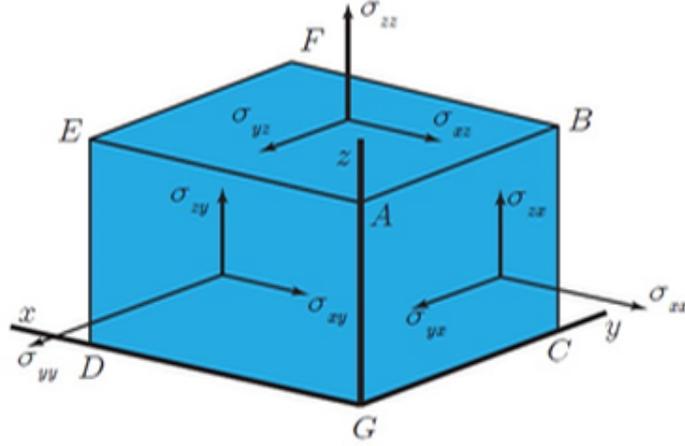


Figura 1.1: Elemento de volume cúbico infinitesimal cujas faces estão submetidas a tensões normais e cisalhantes, localizado no interior de um material perfeitamente elástico e isotrópico.

As tensões sigma ij podem causar deslocamentos nos pontos no interior e na superfície do cubo. Seja então $\zeta = ui + vj + wk$ o vetor deslocamento de um desses pontos. Se o cubo sofrer deformação, u , v e w poderão ser diferentes para cada ponto do cubo, ou seja, $u = u(x; y; z)$, $v = v(x; y; z)$ e $w = w(x; y; z)$. As mudanças relativas de comprimento para cada dimensão do cubo são chamadas de deformações normais:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (1.3)$$

A ocorrência de deformações normais implica numa mudança relativa no volume do cubo, que é dada por:

$$\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \nabla \cdot \zeta. \quad (1.4)$$

Definem-se também as deformações de cisalhamento, que são uma medida da mudança da forma do cubo (Sherif e Geldart, 1995):

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (1.5)$$

$$\varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (1.6)$$

$$\varepsilon_{zx} = \varepsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (1.7)$$

A lei de Hooke estabelece que, para pequenas deformações, existe uma relação linear entre as tensões e as deformações. Considerando-se meios isotrópicos, a relação pode ser escrita como (Mavko et al., 2009):

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{ij} & \text{se } i = j; \\ \mu\varepsilon_{ij} & \text{se } i \neq j; \end{cases} \quad (1.8)$$

Onde lambda e mi, conhecidos como constantes de Lamé, dependem do material e das condições termodinâmicas. A constante mi também é conhecida como módulo de cisalhamento.

Constantes Elásticas

Além das constantes de Lamé, existem outras constantes que são muito utilizadas. O Módulo de Young (E) é expresso como sendo a razão entre um esforço aplicado apenas nas extremidades de um corpo cilíndrico, onde a deformação se dará na direção de aplicação do esforço. Considerando que todas as tensões são zero, exceto σ_{xx} , sendo esta paralela ao eixo x do cilindro, o Módulo de Young pode ser expresso por:

$$E = \frac{\mu(3\lambda' + 2\mu)}{\lambda' + \mu} \quad (1.9)$$

A razão de Poisson (σ) é definida como a razão entre a contração lateral e a distensão longitudinal do sólido, expressa por:

$$\sigma = \frac{\lambda'}{2(\lambda' + \mu)} \quad (1.10)$$

O Módulo de Bulk (k) é a razão entre a pressão (p) e a mudança de volume, ou dilatação (Δ), quando um sólido está sujeito a uma compressão hidrostática. Este módulo é expresso como:

$$k = \frac{-p}{\Delta} = \frac{3\lambda' + 2\mu}{3} \quad (1.11)$$

Ondas Sísmicas

Há dois tipos de ondas sísmicas: ondas de Corpo e ondas Superficiais, (Figura 1.2). As ondas de Corpo são classificadas como ondas P e ondas S. As ondas Superficiais são classificadas como ondas Rayleigh e ondas Love. Cada um destes tipos de ondas possui características de propagação distintas e que serão descritas a seguir.

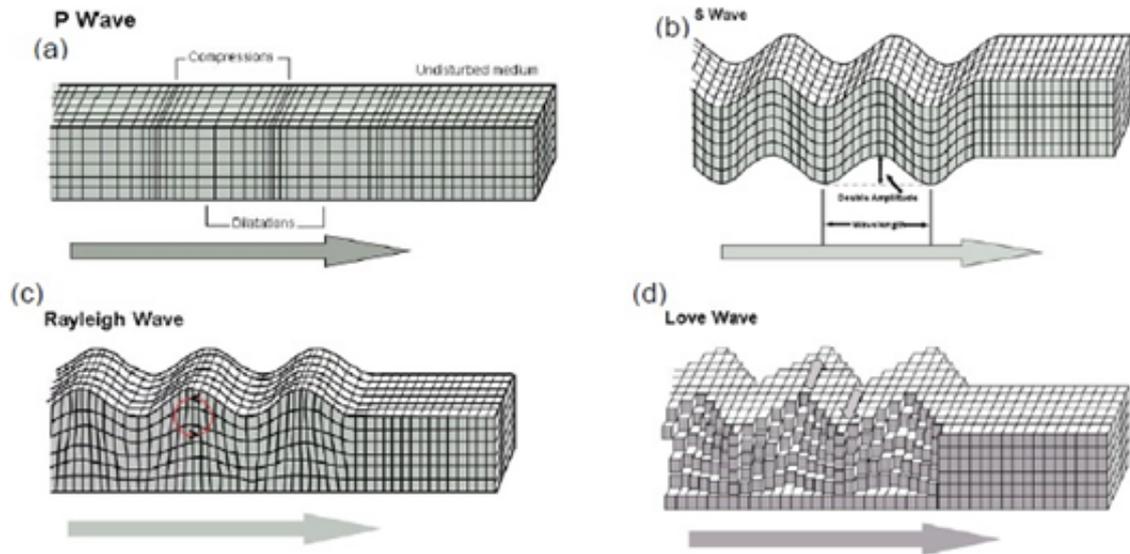


Figura 1.2: Tipos de ondas sísmicas. (a) e (b): ondas de corpo; (c) e (d): ondas superficiais (Bolt, 1976).

Ondas de corpo

As ondas de Corpo (P e S) são as mais importantes para levantamentos sísmicos de reflexão. Elas causam uma perturbação no meio, propagando-se de um ponto a outro em subsuperfície, com uma velocidade V . A onda do tipo P é também conhecida como onda, compressional, longitudinal ou primária. A onda do tipo S é também conhecida como cisalhante, transversal ou secundária. As velocidades das ondas P e S são relacionadas à α e β respectivamente, onde:

$$\alpha = \{(\lambda + 2\mu) / \rho\}^{\frac{1}{2}} \quad (1.12)$$

$$\beta = (\mu / \rho)^{\frac{1}{2}} \quad (1.13)$$

Uma vez que as constantes elásticas são positivas, α sempre será maior do que β .

A onda S não se propaga em um meio líquido, porque μ é zero e conseqüentemente β também será zero.

A oscilação do meio submetido às ondas S pode ser em qualquer plano perpendicular à

direção de propagação do meio. Na exploração sísmica, entretanto, considera-se somente ondas SV (vibração no plano vertical) e as ondas SH (vibração no plano horizontal).

Ondas de superfície

Em um meio infinito, homogêneo e não isotrópico, somente ondas do tipo P e S existem. Mas como o meio não se estende ao infinito em todas as direções, um tipo de onda é gerada e confinada nas proximidades da superfície, por isso então o nome de Ondas de Superfície.

Na exploração sísmica, a onda que tem maior impacto é chamada de onda Rayleigh, também conhecida como Ground Roll. Este tipo de onda se propaga com movimentos longitudinais e transversais de maneira combinada e com uma relação de fase definida. A movimentação de uma partícula quando submetida a este tipo de onda se dá de forma elíptica, sendo que o eixo maior está na vertical. A combinação de movimentação e propagação de uma partícula ao longo da elipse é chamada de movimento retrógrado(Figura 1.3).

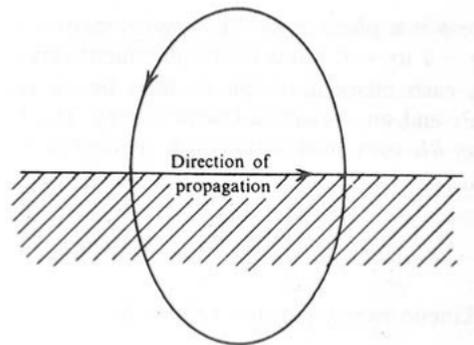


Figura 1.3: Movimentação durante a passagem da onda Rayleigh.

A velocidade de propagação das ondas Rayleigh depende da constante elástica próxima à superfície e sempre será menor que a velocidade das ondas do tipo S. Quando $s = 1/4$, a velocidade da onda Rayleigh será de $0,92\beta$. À medida que ela se propaga em profundidade, sua amplitude decresce exponencialmente, isso porque as constantes elásticas variam com a profundidade, variando também o comprimento de onda, ou frequência. Essa variação é conhecida como Dispersão, que resulta na mudança da forma da onda com a distância.

Outro tipo de onda de superfície é conhecido como onda Love, que é gerada quando uma camada superficial de baixa velocidade recobre um meio de alta velocidade. É um tipo de onda dispersiva e possui um deslocamento horizontal, perpendicular à direção de propagação. A velocidade de propagação está entre a onda S gerada em superfície e em camadas mais profundas. As fontes sísmicas utilizadas na exploração não geram ondas Love o suficiente para serem levadas em consideração.

Princípio de Huygens

A movimentação de uma onda se dá pelo princípio de Huygens, que diz que cada ponto da

frente de onda pode ser uma nova fonte geradora de ondas sísmicas. Com isso, é possível prever a posição das novas frentes de ondas geradas, sempre considerando que cada uma delas tem potencial para a geração de novas frentes de ondas. Na Figura 1.4, AB é uma frente de onda em um instante t_0 e deseja-se encontrar esta frente de onda em um determinado tempo $(t_0 + \Delta t)$. Durante o intervalo Δt , a onda irá avançar uma distância $V\Delta t$, onde V é a velocidade de propagação. Seleccionam-se pontos na frente de onda (P_1, P_2, P_3 , etc) e desenham-se pequenos arcos com raio $V\Delta t$. A partir destes pequenos arcos (frentes de onda secundárias), é possível determinar a posição da frente de onda $A'B'$ em um tempo $(t + \Delta t)$, que corresponde à superfície que tangencia simultaneamente todas as frentes de onda secundárias.

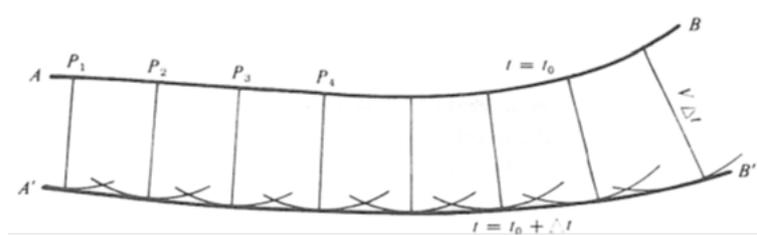


Figura 1.4: Princípio de Huygens para localização de novas frentes de onda.

Reflexão e transmissão nas interfaces

As equações de onda discutidas nos itens anteriores descrevem apenas a propagação de ondas em meios homogêneos. Para descrever o comportamento da onda quando se propaga de um meio para outro com propriedades elásticas diferentes, deve-se aplicar condições de contorno. O fenômeno mais usual que ocorre quando a frente de onda incide em uma interface é aquele em que uma parte da energia é transmitida e a outra é refletida.

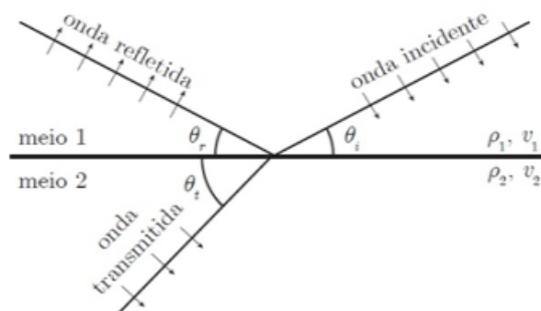


Figura 1.5: Frente de onda plana incidindo sobre a interface entre os meios 1 e 2 a partir do meio 1, produzindo uma frente de onda refletida que retorna para o meio 1 e uma frente de onda transmitida que se propaga para o meio 2.

A Figura 1.5 mostra uma frente de onda plana que incide sobre a interface entre os meios acústicos 1 e 2, formando um ângulo θ_i . As frentes da onda refletida e transmitida formam,

respectivamente, ângulos θ_r e θ_t com a interface. A relação entre os ângulos é dada por:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{v_1} = \frac{\text{sen } \theta_r}{v_1} = \frac{\text{sen } \theta_t}{v_2} = p, \quad (1.14)$$

onde v_1 e v_2 são, respectivamente, as velocidades de propagação da onda P nos meios 1 e 2 e p é conhecido como parâmetro do raio. A primeira igualdade mostra que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. A segunda igualdade, conhecida como lei de Snell, mostra que os senos dos ângulos de incidência e de refração são proporcionais à velocidade da onda sísmica do meio em que a onda se propaga.

A relação entre as amplitudes das ondas em meios elásticos é dada pelas equações de Zoeppritz (Zoeppritz, 1919). Na forma geral, a complexidade matemática das equações de Zoeppritz dificulta interpretações físicas. Por outro lado, considerando-se meios acústicos e incidência normal (ou seja, ângulo de incidência nulo), elas se simplificam consideravelmente. Se ρ_1 e ρ_2 são as densidades dos meios 1 e 2 (Figura 1.4), e v_1 e v_2 são as velocidades da onda P nesses meios, as equações se reduzem a (Sheriff e Geldart, 1995)

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} \quad (1.15)$$

e

$$T = \frac{2\rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} \quad (1.16)$$

onde R é a razão entre a amplitude da onda refletida e a amplitude da onda incidente, e T é a razão entre a amplitude da transmitida e amplitude da onda incidente. Os parâmetros R e T são conhecidos como coeficiente de reflexão e coeficiente de transmissão do par de meios. Para ângulos de incidência pequenos, de até 15 graus, as Equações (1.14) são uma boa aproximação.

Essas equações mostram que a reflexão e a transmissão, no caso da incidência normal, são controladas pela propriedade $I = \rho.v$, que é conhecida como impedância acústica. Ocorre reflexão se a onda atravessa meios com impedâncias acústicas distintas, e quanto maior a diferença de impedância, maior a amplitude da onda refletida. Além disso, deve-se observar que se a impedância do meio de incidência for maior que a do meio de transmissão, R é negativo, ou seja, a reflexão ocorre com inversão de fase.

Difração

Quando uma onda encontra uma feição cujo raio seja menor que o comprimento de onda, por exemplo, uma quina, essa superfície irregular se comportará como um ponto. Sendo assim, a onda irá se propagar em várias direções ao atingir este ponto. Essa radiação da

onda sísmica é chamada de Difração. Para melhor entender este fenômeno, observe-se a Figura 1.6. Ela ilustra um objeto onde A seria o ponto de difração. Ao sofrer a difração, as ondas resultantes terão a mesma velocidade de propagação. A amplitude da onda difratada diminui rapidamente com a distância do ponto de difração.

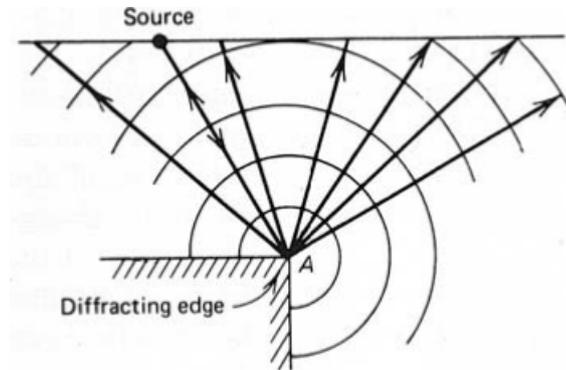


Figura 1.6: Fenômeno de difração. A onda ao atingir o ponto A (ponto difrator) irradia novas frentes de ondas em diversas direções (DOBRIN, 1976).

As aquisições de dados sísmicos realizadas em programas de exploração de hidrocarbonetos envolvem grandes equipes de profissionais, com até centenas de pessoas. Adicionando-se isso ao fato de que as áreas estudadas podem ser muito grandes, da ordem de quilômetros quadrados, dá para entender o porquê da maior parte dos gastos do método sísmico de reflexão ser voltada à aquisição de dados. Os custos são ainda maiores na aquisição de dados sísmicos tridimensionais (3D), em que a quantidade de equipamentos, a complexidade dos arranjos, o número de considerações envolvidas e o volume de dados são ainda maiores.

Fontes e receptores

No método sísmico de reflexão, a energia se propaga no interior da Terra na forma de ondas, as quais são produzidas por fontes artificiais. Em aquisições terrestres, utilizam-se principalmente fontes explosivas, fontes de impacto (como martelos e pesos abandonados de grandes alturas) e fontes vibratórias (como o vibroseis). Em aquisições marítimas, a fonte mais comum é um dispositivo que descarrega ar sob alta pressão na água, conhecido como pistola de ar ou airgun.

Receptores sísmicos são utilizados para detectar a passagem de frentes de onda que são supostamente refletidas pelas interfaces em subsuperfície. Os receptores sísmicos utilizados em aquisições terrestres são chamados de geofones, enquanto aqueles utilizados em aquisições marinhas são chamados de hidrofones. Apesar de os seus princípios de funcionamento serem diferentes, ambos transformam a energia mecânica de propagação da onda em sinais elétricos, para que possam ser registrados.

O registro dos sinais é armazenado na forma de uma série temporal chamada de traço sísmico, em que o campo de pressões ou de deformações é amostrado discretamente. O intervalo de

amostragem normalmente é da ordem de milissegundos ou de décimos de milissegundos. Na prática, para aumentar a razão sinal-ruído, a indústria de exploração de petróleo utiliza, para cada posição de registro, grupos de receptores próximos um ao outro. Os registros desses receptores são somados para produzir um único traço sísmico.

CAPÍTULO 2

Adaptação da Fonte Sísmica ao Caminhão



Figura 2.1: Fonte sísmica AWD.

Nós supervisionamos a montagem da fonte sísmica AWD (Figura 2.1), a qual foi instalada entre os meses de janeiro e março de 2012 pela oficina FNE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA, localizada na Rua da Indonésia, nº 54C, Mata Escura, SSA-BA, CEP: 41230-020, tel.: 3215-4020 / 1473. Esta foi a única dentre várias oficinas consultadas que aceitou o desafio de fazer a adaptação da fonte sísmica AWD na carroceria de um caminhão Ford Cargo 1717 (Figura 2.2).



Figura 2.2: Caminhão Ford Cargo 1717.

O fabricante da fonte sísmica AWD após longa discussão técnica aceitou a compra do caminhão Ford Cargo 1717, que corresponde ao modelo de menores dimensões dessa linha, que segundo ele, atenderia perfeitamente as especificações necessárias (Figura 2.3) para a adaptação da fonte AWD. Mas as informações repassadas pelo fabricante foram parcialmente equivocadas e o processo de instalação tornou-se uma verdadeira maratona, com sucessivos problemas.

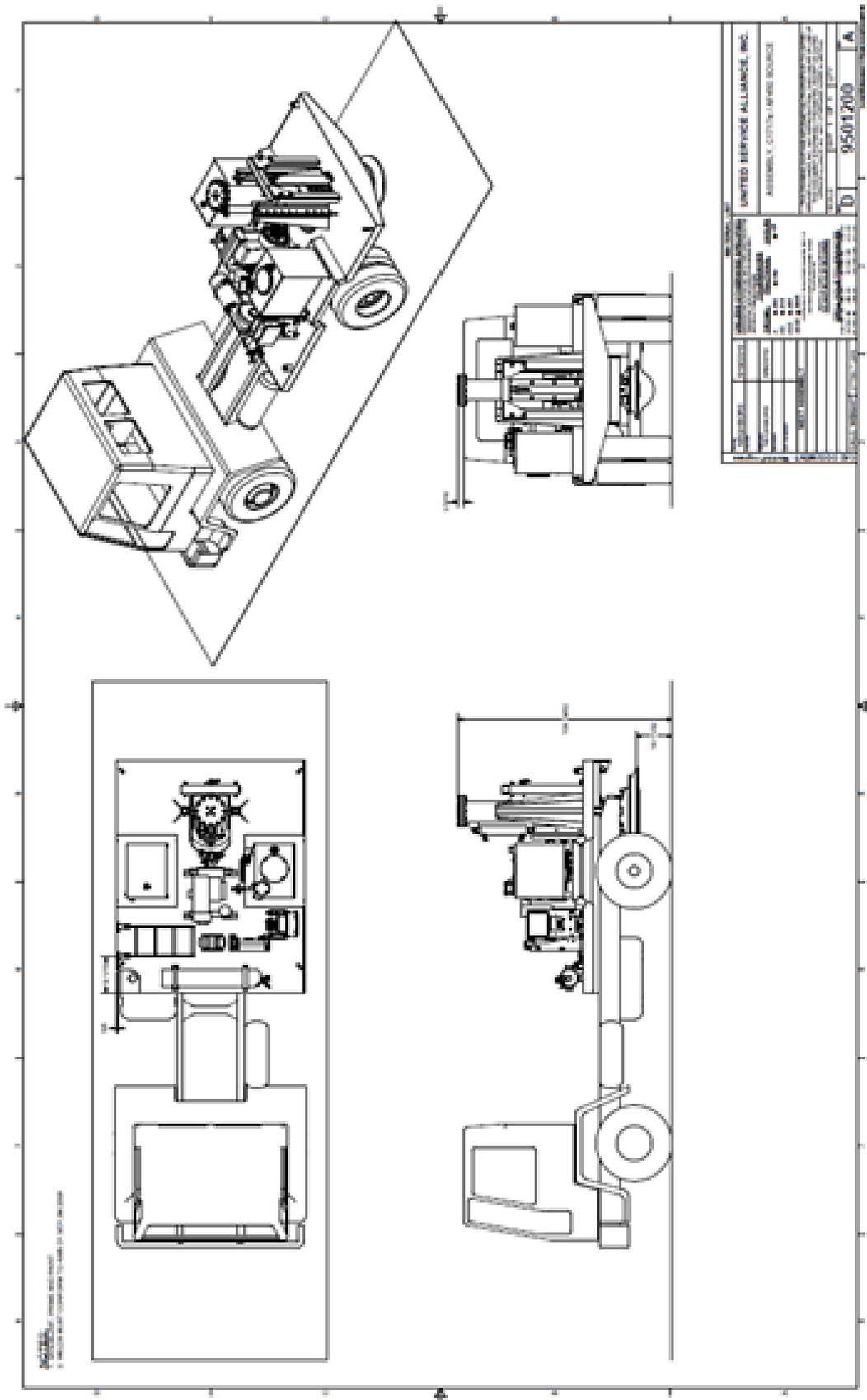


Figura 2.3: Planta da instalação enviada pelo fabricante.

No momento da colocação da fonte sísmica sobre o caminhão, foi necessário remover temporariamente uma peça na extremidade traseira do chassi denominada 'travessa' (Figura 2.4), para que o 'martelo' da fonte sísmica pudesse ficar na posição correta. Logo um problema ficou perceptível: a placa de aço localizada na extremidade inferior do eixo cilíndrico que envolve o martelo da fonte sísmica encostou-se à caixa do diferencial do caminhão (Figura 2.5).



Figura 2.4: Travessa.



Figura 2.5: Contato entre o 'martelo' e a caixa do diferencial.

Ficou constatado que as longarinas do chassi ficaram curtas em relação ao posicionamento da fonte sísmica. A consequência disso foi uma torção na extremidade do chassi (Figuras 2.6 e 2.7), devido ao peso da fonte sísmica sobre o caminhão. Isto foi comprovado posteriormente quando o guindaste suspendeu a fonte sísmica, aliviando o peso na parte traseira do caminhão, fazendo com que o 'martelo' voltasse para sua posição correta (Figura 2.8).



Figura 2.6: O desalinhamento é nítido.



Figura 2.7: Envergamento do chassi (observar as lanternas).



Figura 2.8: Quando o guindaste aliviou a carga sobre o chassi, o 'martelo' voltou espontaneamente para a posição correta.

Para resolver o problema, recuou-se o eixo traseiro das rodas em aproximadamente 30 cm. Com o encurtamento da distância do eixo traseiro, seria necessário reposicionar o "step", o

tanque de combustível, a bateria, etc., além da redução do eixo diferencial, que seria feito em uma oficina especializada.

O caminhão foi desmontado (Figuras 2.9 e 2.10). Iniciou-se o processo de furação no chassi, onde todos os furos que continham os parafusos que fixavam o eixo traseiro foram realocados 30 cm para frente (Figuras 2.11 e 2.12).



Figura 2.9: Caminhão desmontado.



Figura 2.10: Eixo traseiro.

O eixo diferencial foi levado para uma oficina especializada para sua devida redução.

Terminado o processo de furação das longarinas do chassi, o eixo traseiro do caminhão foi remontado na nova posição, recuado 30 cm.



Figura 2.11: Posicionamento dos novos furos do eixo traseiro.



Figura 2.12: Furação das longarinas do chassi.

Antes da fonte sísmica ser posicionada sobre o caminhão, foi orientado pelo fabricante a colocação de dois pedaços de madeira sobre as longarinas do chassi, para funcionarem como um tipo de 'amortecedor' (Figuras 2.13 e 2.14).



Figura 2.13: Madeiras sobre as longarinas do chassi.



Figura 2.14: Madeiras colocadas entre as longarinas do chassi e a fonte sísmica AWD.

Sendo erguida por duas talhas de 16 toneladas de capacidade de carga, a fonte sísmica foi posicionada sobre as madeiras no caminhão. Corrigido o posicionamento, foi reinstalada a peça chamada travessa. Esta peça une as extremidades traseiras das longarinas do chassi. Durante a instalação, constatou-se que a referida peça entraria em contato com o eixo cilíndrico que envolve o elevador da fonte sísmica e a mesma teve que ser adaptada (Figura 2.15). Também houve a preocupação para que sobrasse espaço para serem feitas futuras manutenções e reparos no equipamento.



Figura 2.15: Travessa adaptada (observar os cortes no centro).

Quando as talhas liberaram todo o peso da fonte sísmica sobre o caminhão, o chassi não o suportou. Então foi preciso desmontar tudo o que tinha sido feito e reforçar o chassi, que consistiu basicamente em colocar 'capas' de ferro (Figura 2.16) envolvendo cada longarina do chassi. Todo o processo de furação que foi feito nas longarinas do chassi tiveram que ser feitas nas 'capas' de ferro.



Figura 2.16: 'Capa do chassi'.

Após o procedimento de reforço no chassi, tudo foi montado novamente conforme feito anteriormente, e, ao se colocar a fonte sísmica AWD sobre o caminhão, o chassi devidamente reforçado suportou seu peso. Foram então fabricados suportes para fixação da fonte sísmica no chassi e posteriormente feita sua fixação.

Foi preciso reforçar a suspensão traseira por causa do peso excessivo de todo o conjunto. Então o veículo foi encaminhado para uma oficina especializada em suspensões para o devido serviço.



Figura 2.17: Caminhão com a fonte sísmica AWD.

CAPÍTULO 3

Fonte Sísmica AWD (*Accelerated Weight Drop*)

3.1 Histórico

A utilização de queda de um peso como uma fonte sísmica não é nova. Embora fosse possível gerar altos pontos de energia e bons registros sísmicos com este método, havia preocupações compreensíveis sobre segurança em um ambiente de produção em contínuo. Os problemas que estes tipos de fonte tiveram no passado foram à falta de controle da fonte, bem como a confiabilidade e repetibilidade na sincronização. Sistemas de queda de peso foram em grande parte substituídas por dinamite e Vibroseis para exploração do subsolo, e a dinamite geralmente tem prevalecido como a fonte sísmica, em parte devido ao problema de acesso associado com Vibroseis. Fontes de dinamite têm a capacidade de gerar uma medida de sinal da fonte maior do que as fontes tradicionais de queda de peso, mas um aumento da energia sísmica de um sistema de queda de peso pode ser conseguido de várias maneiras, sendo uma delas acelerando um peso com uma força maior do que a força da gravidade, oferecendo um bom potencial para uma análise mais aprofundada.

Os registros feitos usando sistemas de queda de peso acelerado eram muito semelhantes uns aos outros, em muitos casos praticamente indistinguíveis. A fonte AWD tem a capacidade de gerar um impacto muito grande na superfície, com um elevado grau de repetibilidade e sendo também controlável, de modo que o esforço do impacto pode ser reduzido, se necessário. Este controle pode ajudar a minimizar a geração de *ground roll* e melhorar os dados sísmicos resultantes. O sistema AWD tem sido historicamente usado para levantamentos sísmicos de exploração com foco em alvos geológicos rasos a intermediários.

3.2 Funcionamento e Especificações da Fonte Awd AF450

A fonte sísmica AWD AF450 foi fabricada pela empresa United Service Alliance, sediada no estado norte americano do Texas.

O AWD é uma fonte sísmica não explosiva, que pode ser usada em ambientes urbanos e em áreas com alta sensibilidade ambiental, sem oferecer perigo à equipe que a está operando.



Figura 3.1: Perspectiva de fonte sísmica AWD AF450.

A fonte AWD funciona acoplando-se uma placa de aço ao solo (Figura 3.2), sobre a qual o caminhão apoia todo o peso de sua carroceria, através de um eixo cilíndrico vertical e um sistema de deslocamento hidráulico. No interior deste eixo cilíndrico, um êmbolo de aço é suspenso desde a placa na base até a parte superior do cilindro. Canalizado para o topo do cilindro hidráulico está um gás de nitrogênio carregado num acumulador. A pressão no acumulador pode ser ajustada (utilizamos uma pressão de 400 psi), e esta pressão controla a força que age sobre o topo da massa quando ela é lançada. O massa é liberada sob pressão para atingir a placa na base, produzindo um movimento de queda acelerado. Um GPS pode ser sincronizado com o sistema para permitir uma posição precisa da fonte para cada ponto de tiro.



Figura 3.2: Acoplamento da placa de aço ao solo.

O equipamento foi adquirido com recursos de um projeto de pesquisa financiado pela Petrobrás (Termo de Cooperação 0050.0047542.08.9). A companhia queria conhecer o desempenho de fontes sísmicas alternativas ao emprego de explosivos, que permitissem levantamentos sísmicos de reflexão em áreas ambientalmente sensíveis.

Atualmente, apenas as Universidades Federais da Bahia e Fluminense estão equipadas com esse tipo de equipamento.

3.3 Aspectos Físicos, Segundo o Fabricante

Ao longo dos anos, vários fabricantes têm se esforçado na tentativa de quantificar o desempenho de uma fonte sísmica de queda de peso acelerado (AWD), em particular, na sua energia total de saída. Muitas tentativas foram feitas para quantificar a saída de energia, com resultados diferenciados, com muito poucos sendo repetitivos, previsíveis e comparáveis. A força máxima é uma expressão instantânea administrada durante um período muito curto de tempo, conseguida "normalmente" através da utilização de acelerômetros montados no martelo ou da placa da base (caso do nosso equipamento). Após o primeiro impacto, a dinâmica do solo é alterada devido à compactação do mesmo, o que muda a distância e o tempo de queda do martelo. Devido ao sistema mecânico e as condições do mecanismo de lançamento do martelo, ocorrem alguns tipos de atrito e deformações no próprio martelo, afetando a saída de energia final do sistema, onde nenhum deles é fácil de quantificar.

O martelo é estudado em termos de energia potencial, com base na aceleração da massa sobre uma determinada distância. Aceleração do martelo é calculada através da aplicação da força externa média aplicada pelos aceleradores divididos pela massa conhecida do martelo. Com a distância de queda conhecida, o tempo de queda é então calculado. Com isso a velocidade de impacto é então calculada e a energia potencial pode ser encontrada, já que é dependente da massa e da velocidade.

Assim, o sistema passa a ser definido por princípios básicos da física.

$$F = m.a \quad (3.1)$$

$$S = \frac{1}{2}a.t^2 \quad (3.2)$$

$$v = a.t \quad (3.3)$$

$$PE = \frac{1}{2}m.v^2 \quad (3.4)$$

Utilizando-se um acelerômetro montado na placa de base e / ou no martelo, pode-se calcular o pico de força, já que esse é o recurso de interesse. O trabalho é definido pelo produto da força pela distância ($W = F.d$), por isso, se os dados de compactação são registrados e a saída teórica da energia é conhecida (com base na pressão da carga de nitrogênio, no peso do martelo, e na distância da queda), o pico de força naquelas condições pode então ser calculado.

$$\frac{1}{2}m.v^2 = fd \quad (3.5)$$

	Especificações	Características / notas
Modelo	AF450	Tiro automático, ondas P
Peso do conjunto	2809 lbs (1274 kg)	
Altura total	92 in (234 cm)	
Peso do martelo	458 lbs (208 kg)	
Distância de vôo	16.50 in (42 cm)	Totalmente fechado
Fonte de nitrogênio	Única	Durável
Variação da pressão de nitrogênio	500-2000 psi	Ajustável

Figura 3.3: Tabela com as especificações segundo o fabricante.

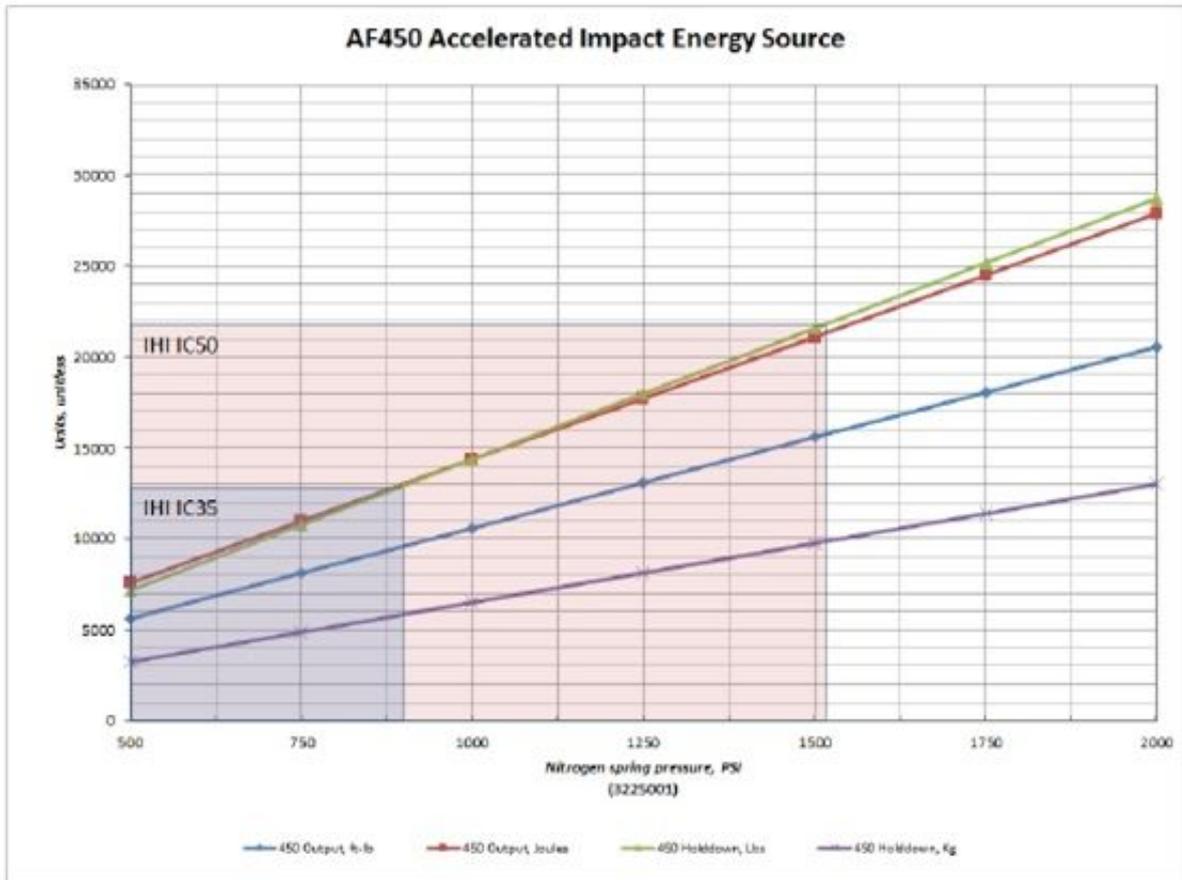


Figura 3.4: Energia de saída em função da pressão do gás.

3.4 Vantagens e Desvantagens da Fonte AWD

Até meados de 2005, explosivos e Vibroseis são as fontes de energia dominante para a maioria das pesquisas de exploração sísmica terrestre 2D e 3D. Aproximadamente 40% de todos os levantamentos sísmicos realizados no mundo usam dinamite, outros 50% usam Vibroseis, e 10% para outros tipos de fonte. Para alvos geológicos muito profundos, além de 15000 pés (aproximadamente 4500 m), grandes cargas de dinamite e grupos de vibradores continuarão a dominar como a fonte sísmica selecionada. Estas são as únicas fontes de energia sísmica que atualmente produzem energia suficiente para atingir alvos geológicos mais profundos. No entanto, existe uma necessidade para uma fonte de energia sísmica alternativa que seja projetada para lidar com alvos em profundidades superficiais e intermediárias, ou que pode ser usada para fornecer suplementos para dados sísmicos rasos em programas sísmicos 2D/3D que incluem zonas onde dinamite e grandes vibradores têm uso limitado devido à regulamentação ambiental e as restrições locais.



Figura 3.5: Marca deixada por uma fonte AWD no Canadá.

Existe uma crescente pressão de regulamentações governamentais e ambientais, e de proprietários de terrenos privados e comerciais, que limitam ou proíbem o uso de dinamite e / ou Vibroseis em muitas regiões do mundo. Como resultado, a indústria geofísica tem experimentado a crescente dificuldade de operação e custos mais elevados associados ao uso de explosivos ou Vibroseis, e é provável que alguns projetos sísmicos em algumas áreas ao redor do mundo nunca possam ser concluídos. Com relação aos fatores ambientais e de custos crescentes, a fonte AWD pode ser uma boa fonte sísmica alternativa. Quando aplicável, o AWD tem várias vantagens operacionais e de custos em comparação com dinamite e Vibroseis, tais como:

1. Levantamentos sísmicos com dinamite exigem a abertura de furos. Em levantamentos 3D, isso pode significar milhares de furos. Nos Estados Unidos, o custo médio para carregar um furo perfurado a uma profundidade de 20 metros gira em torno de 165 dólares americanos.

Para cada 1.000 furos, o custo médio é de 165 mil dólares, não incluindo licenças, títulos de seguro e posterior limpeza do levantamento. Em alguns países, onde os custos de trabalho e de perfuração são muito mais baixos, podem surgir outros problemas que afetam o uso da dinamite, como problemas especiais de segurança e proteção com transporte para o campo.

Para os mesmos 1.000 furos, o AWD é cerca de 1/10 do custo (nos EUA) de perfuração e carregamento do furo. Os projetos usando o AWD são completados mais rapidamente, porque o tempo para permissão, perfuração, e carregamento dos furos para tiro é eliminada. Tendo-se a disposição uma completa configuração de geofones e cabos sísmicos, as operações de aquisição de dados podem ser iniciadas de imediato. Uma segunda vantagem para usar o AWD é a segurança. A fonte sísmica AWD é benigna em termos de riscos de segurança. Ao

contrário de pesquisas com dinamite que exigem a limpeza após a aquisição, o AWD também é ambientalmente amigável, causando pouco ou nenhum dano na área do levantamento.

2. Levantamentos com Vibroseis são extremamente caros, especialmente para pesquisas localizadas em áreas remotas, ou aquelas que requerem vários vibradores, juntamente com um complemento considerável de equipamentos de reposição e recursos de suporte a operação. O licenciamento da terra e compensações, expedição e transporte para o local, testes de campo, combustível e custos com equipamentos de apoio, custos com operadores e mecânicos, e custos com danos estruturais e de limpeza da terra são alguns dos fatores que contribuem para o alto custo do uso de Vibroseis.

O custo por unidade de um AWD é muito menor do que o custo de operação de uma unidade de um Vibroseis. O AWD é menor, consome menos combustível, não requer o mesmo nível de equipamentos e apoio de pessoal, e é muito menos prejudicial ao meio ambiente. Em geral, um caminhão montado com o sistema AWD deve ter taxa de produção de 3 a 5 vezes mais rápida do que um Vibroseis.

Embora o AWD seja menor e mais manobrável sobre terrenos montanhosos e acidentados, tanto o Vibroseis quanto o AWD têm limitações em terrenos montanhosos e declives íngremes. No entanto, o AWD tem a opção de ser montado na parte de trás de um trator (Figura), gerando a possibilidade dele funcionar em áreas moderadamente inclinadas e terrenos irregulares.



Figura 3.6: Fonte sísmica AWD montada num trator.

CAPÍTULO 4

Aquisição e Processamento

O dado sísmico utilizado nessa pesquisa que foi adquirido durante um levantamento sísmico 2D efetuado em março/2013 no campo-escola da UFBA, situado no município de Araçás-BA.



Figura 4.1: Campo-escola da UFBA em Araçás-BA.

Na Figura 4.2 temos os parâmetros do arranjo dos sensores multi-componentes. Nota-se que esse arranjo contém 48 sensores, espaçados 20 metros entre si, onde o primeiro sensor foi colocado a uma distância de 100 metros em relação à posição do primeiro tiro.

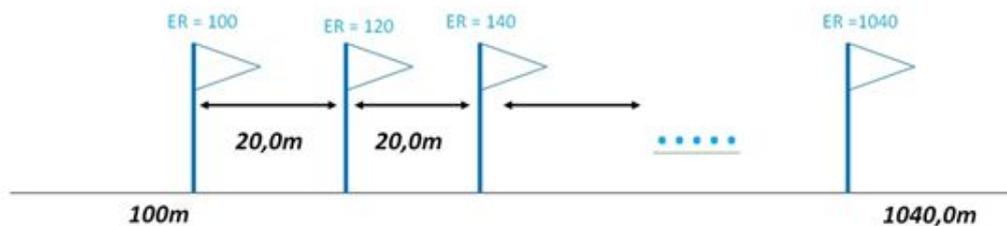


Figura 4.2: Parâmetros dos geofones.

Na Figura 4.3 temos os parâmetros de tiros da aquisição realizada com a fonte AWD. Ao todo foram realizados 115 tiros, onde a distância entre os tiros foi de 10 metros.

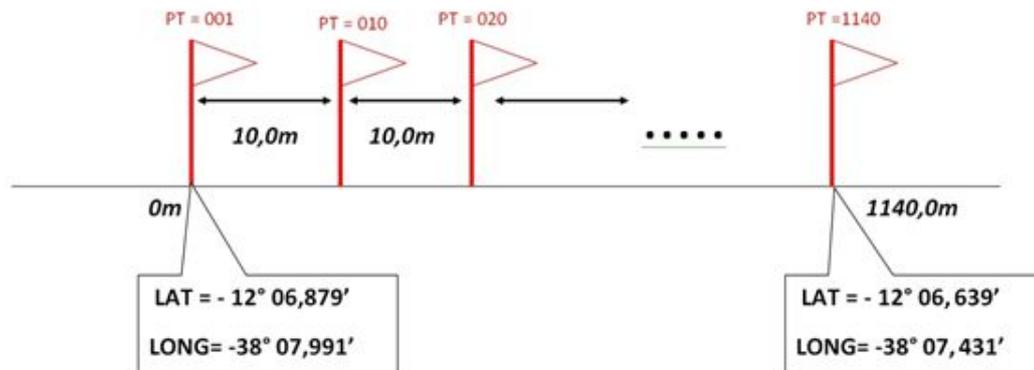


Figura 4.3: Parâmetros de tiro.

Observando-se os parâmetros da aquisição do dado e os valores da chave do header pelo SU, pudemos organizá-los na tabela abaixo:

Parâmetros de aquisição do dado de Araçás-BA	
Distância entre geofones (m)	20
Distância entre tiros (m)	10
Lanço (m)	0-100-1140
Número de tiros	115
Número de canais	48
Intervalo de amostragem (ms)	5
Número de amostras do traço	2501

Figura 4.4: Tabela com os parâmetros da aquisição.

As informações a respeito dos parâmetros de aquisição são muito importantes para todas as etapas de processamento do dado.



Figura 4.5: Montagem da linha sísmica pelos estudantes da UFBA.

Na figura 4.6 temos o fluxograma utilizado para o processamento do dado em questão.

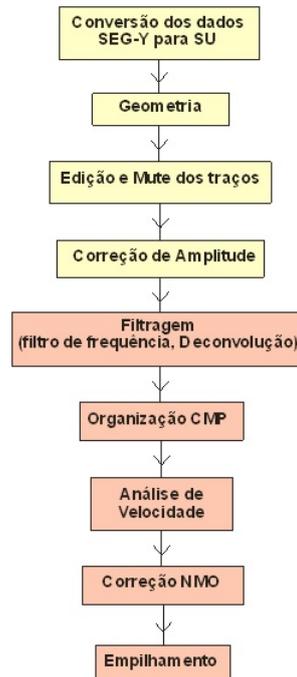


Figura 4.6: Fluxograma utilizado nesse trabalho.

Todas as etapas do processamento do dado estão descritas nesse trabalho, apresentando a teoria a respeito de cada passo do processo, incluindo as imagens geradas.

4.1 Processamento do Dado Sísmico

O processamento de dados sísmicos apresenta uma sequência de procedimentos a serem realizados que garantam o melhor resultado do imageamento de estruturas em subsuperfície.

O dado sísmico deste trabalho foi gravado num sensor de três componentes, capaz de registrar ondas P e ondas S. A componente vertical (ondas P) do dado em questão foi separada usando-se o software Vista. Com o dado contendo somente a componente vertical, utilizamos o software livre Seismic Unix, desenvolvido pela Colorado School of Mines para o seu devido processamento.

4.2 Leitura do Dado SEG-Y através do Seismic Unix

O formato SEG-Y é um dos diversos padrões de gravação de dados sísmicos desenvolvidos pela Society of Exploration Geophysicists (SEG). Trata-se do formato mais comum utilizado

para dados sísmicos na indústria do petróleo.

O primeiro passo do processamento do dado foi sua conversão do formato SEG-Y para o formato SU. Posteriormente, ao visualizarmos o dado, observamos que o mesmo estava com algumas chaves do header incompatíveis, provavelmente porque a separação das componentes do dado foi feita num software diferente do que usamos (no caso o Vista). Utilizamos então o comando SEGYCLEAN para zerar essas chaves.

4.3 Geometria

A geometria é uma etapa fundamental para o processamento sísmico e deve receber a devida atenção por parte de quem o está processando, pois é nessa etapa que informamos as corretas posições da fonte e receptores durante todo o levantamento e que serão usadas no restante do processamento. Caso haja algum erro nessa etapa, o trabalho poderá ser total ou parcialmente perdido posteriormente, pois estaremos trabalhando com posicionamentos errados de fontes e receptores. O objetivo é registrar no header de cada traço sísmico as coordenadas do ponto de tiro, do receptor, do ponto médio comum e do seu offset correspondente e outras informações relevantes, para possibilitar a organização dos traços em família CDP.

Existem três tipos principais de arranjo na aquisição: end-on, end-off, split-spread. No arranjo end-on, a fonte encontra-se à frente do primeiro geofone. No arranjo end-off a fonte localiza-se atrás do último geofone. No arranjo split-spread a fonte localiza-se no meio da linha de geofones, onde a quantidade de geofones pode ser a mesma de cada lado da fonte, ou não.

A configuração/arranjo utilizada na aquisição deste trabalho não foi de nenhum dos tipos citados acima. Foi uma aquisição atípica, onde os receptores permaneceram fixos com a fonte se deslocando ao longo da linha. Observando-se imagens de alguns tiros do dado, podemos notar que o início da aquisição assemelha-se a um arranjo end-on (Figura 4.7); na parte central assemelha-se a um arranjo split-spread (Figura 4.8); no final assemelha-se a um arranjo end-off (Figura 4.9).

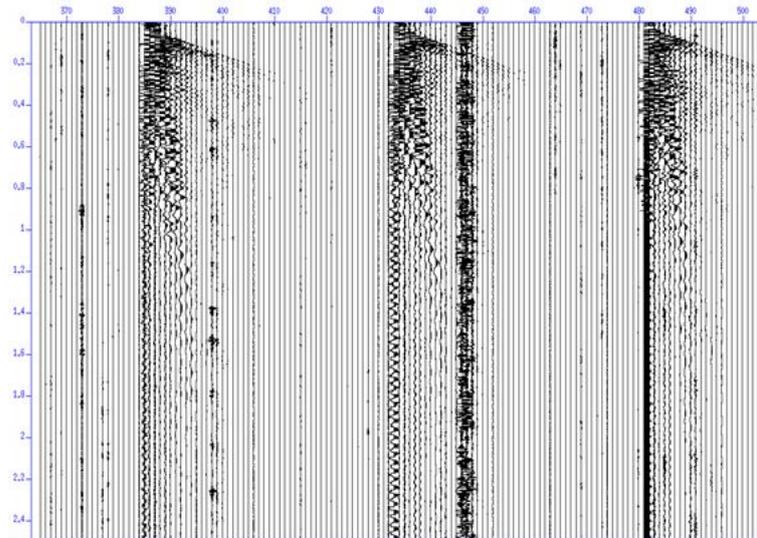


Figura 4.7: Parte inicial do dado sem nenhum tratamento: aparenta um arranjo end-on.

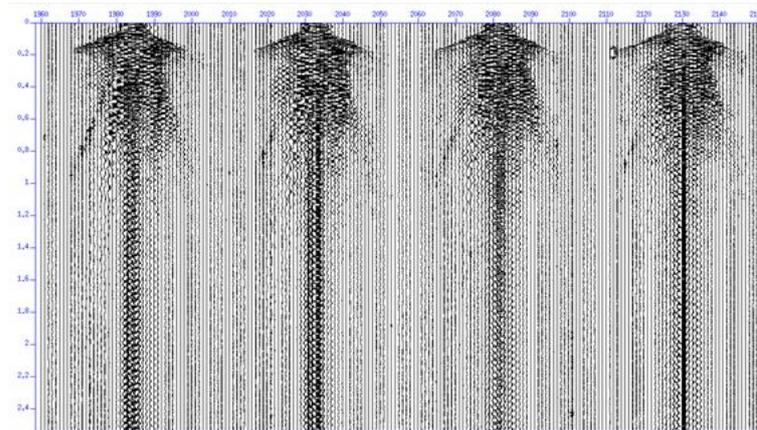


Figura 4.8: Parte central do dado sem tratamento: aparenta um arranjo split-spread.

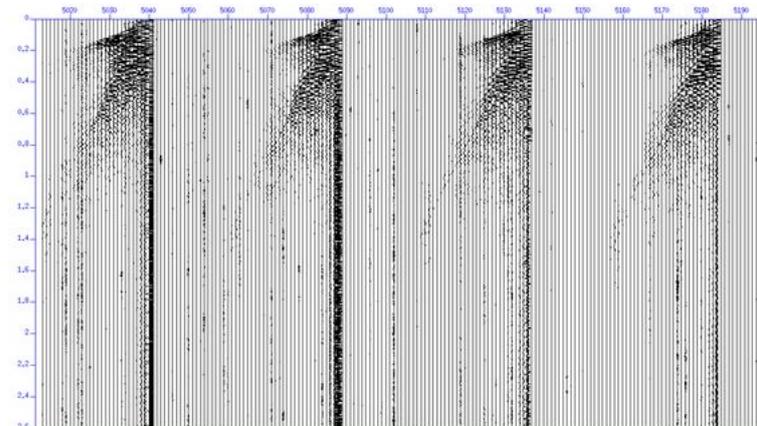


Figura 4.9: Parte final do dado sem tratamento: aparenta um arranjo end-off.

4.4 Edição dos Traços e Mute

Nessa etapa é realizada uma análise dos dados com o intuito de eliminar parcialmente ou totalmente traços e/ou tiros que possam comprometer a qualidade do resultado desejado. Os traços editados serão aqueles com uma baixa razão sinal-ruído e/ou com amplitude nula (devido ao mal ou não funcionamento do receptor).

Os ruídos podem ser causados por vários fatores, dentre eles o trânsito de veículos próximo à aquisição, a interferência de animais, linhas de transmissão de energia e do clima (chuva, vento, etc). Entretanto, é importante que o geofísico responsável por essa etapa tome cuidado para não eliminar traços com informações importantes, pois os ruídos podem estar somados a amplitudes importantes que representam reflexões. Por isso é aconselhável que se preserve a região do sismograma afetada por esse ruído.

A verificação dos dados pode ser realizada tanto visualmente quanto através da análise espectral. Neste trabalho, esta etapa foi feita visualmente. A análise visual mostrou muitos traços ruidosos. Esses traços foram retirados do dado, melhorando assim a sua qualidade.

No software Seismic Unix essa etapa se mostrou muito trabalhosa e demandou um tempo elevado para sua conclusão.

Ainda na etapa de edição, silenciemos todos os traços na região acima da onda direta, já que esta informação não é de interesse por não representar os refletores em subsuperfície. Tal etapa é feita aplicando-se um mute em todos os registros dos dados. A função mute é obtida selecionando pontos no sismograma, os quais representam pares de tempo x distância, que irão determinar uma linha (limite) entre a região dos traços onde serão preservados os valores das amplitudes e a região que será silenciada (região de muting).

Como os registros/tiros do dado deste trabalho sofrem uma "variação" ao longo da aquisição, tornou-se obrigatória a aplicação do mute individualmente em cada tiro, o que seria muito trabalhoso utilizando-se o software SU. Optamos então em utilizar o software GêBR, que simplesmente gera uma interface gráfica para o Seismic Unix, facilitando significativamente essa etapa. Usando o pacote SU X MUTE da GêBR, aplicamos de forma bem menos trabalhosa a função mute em cada tiro.

Nas figuras 4.10 e 4.11 temos as imagens do dado geradas antes e depois da etapa de edição dos traços.

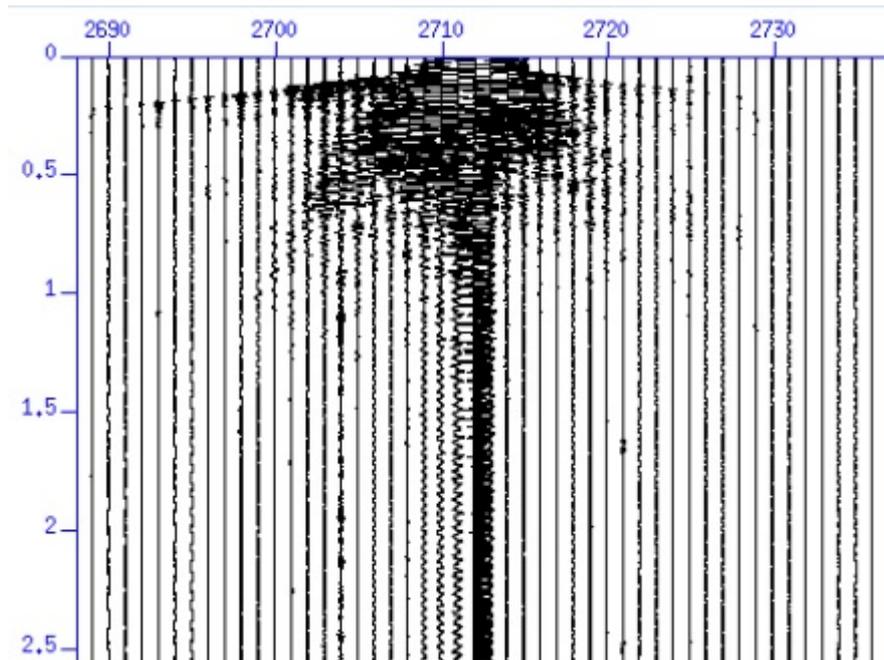


Figura 4.10: Tiro 247 sem edição dos traços (janela de tempo até 2,5 s).

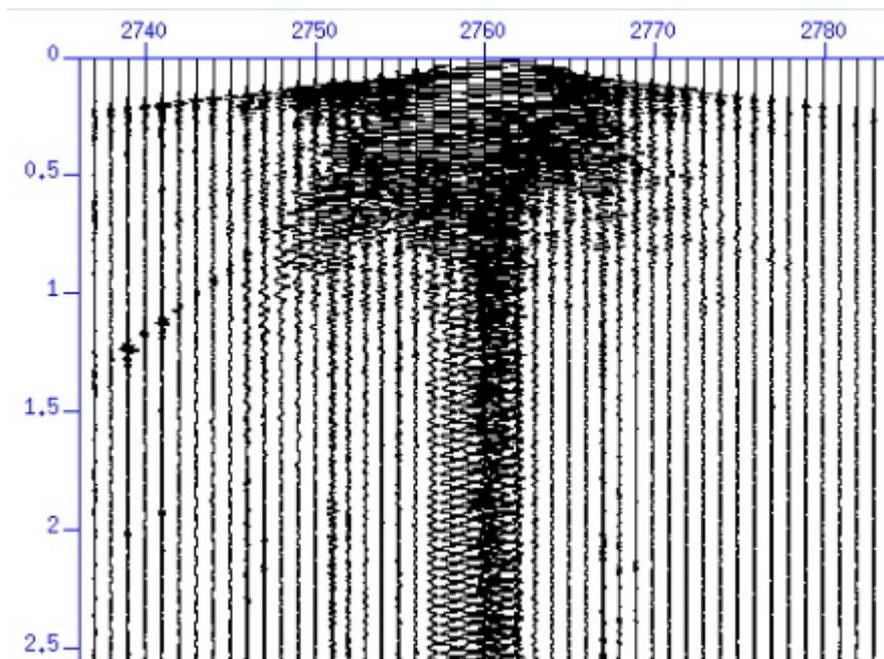


Figura 4.11: Tiro 247 com edição dos traços e mute (janela de tempo até 2,5 s).

4.5 Compensação das Perdas de Amplitude

Ao se propagar no interior da Terra, uma onda sísmica sofre alguns efeitos que contribuem para a perda de energia e atenuação (decaimento da amplitude) do sinal. Dentre esses efeitos podemos destacar a divergência esférica, a absorção e as perdas por transmissão.

A divergência esférica ou espalhamento geométrico está relacionado ao decaimento da amplitude pelo espalhamento da frente de onda sísmica durante sua propagação em subsuperfície. Para um campo de onda esférico gerado por uma fonte pontual num meio isotrópico e homogêneo, a lei da conservação da energia estabelece que a intensidade ou densidade de energia (I) é inversamente proporcional ao quadrado do raio da frente de onda (r), então:

$$I \propto \frac{1}{r^2} \quad (4.1)$$

Como a amplitude (A) da onda sísmica é proporcional à raiz quadrada da densidade de energia, então:

$$A \propto \frac{1}{r} \quad (4.2)$$

Vemos na Equação acima que a amplitude do sinal sísmico é inversamente proporcional à distância percorrida e decresce com o tempo de propagação da energia. Para compensar essa perda precisamos de uma função de correção variável no tempo $C(t)$, de modo que:

$$C(t) \propto r \quad (4.3)$$

Outro processo que causa o decaimento da intensidade da onda elástica é a absorção. Na absorção ocorre a dissipação da energia da onda no meio, transformando a energia em calor, devido às propriedades intrínsecas da rocha. A energia mecânica da onda é convertida em movimento de fricção entre os grãos, onde a conversão é irreversível devido ao comportamento inelástico das rochas. Isso causa uma perda de amplitude e alteração na fase do sinal. Para medida deste efeito usa-se um coeficiente de absorção (ou atenuação) a , definido por:

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (4.4)$$

onde A_0 é a amplitude inicial e x é a distância percorrida pela onda.

Contribuindo ainda para a atenuação da onda temos as transmissões, que ocorrem quando a frente de onda atinge um refletor. Após atingir uma interface parte da energia da onda é refletida e parte é transmitida.

Como a amplitude da onda acústica na Terra decai de modo inversamente proporcional à distância da fonte geradora à medida que o sinal se propaga no interior da Terra, torna-se mais difícil a visualização das reflexões mais profundas devido à perda de energia da onda.

Assim, para efeito apenas de visualização, torna-se necessária a aplicação de uma correção na amplitude dos traços ao longo do tempo. O método utilizado é chamado de Controle

Automático de Ganho (AGC) e consiste, resumidamente, em aplicar um tipo de média móvel quadrática em torno do ponto que se deseja corrigir (Yilmaz, 1987).

Uma das formas de ganho que estão disponíveis no Seismic Unix é função sugain, em que diversos parâmetros podem ser definidos de acordo com a conveniência. Assim, testes podem ser realizados, para que se ajustem os parâmetros com o valor mais adequado.

Nas figuras 4.12 e 4.13 temos as imagens correspondentes ao tiro 247, antes e após a aplicação do AGC.

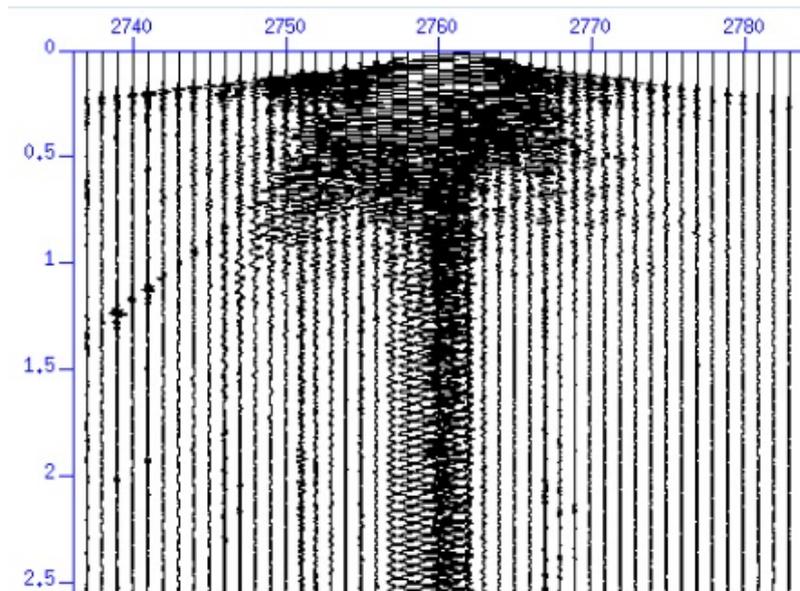


Figura 4.12: Tiro 247 com edição dos traços e mute (janela de tempo de 2,5 s).

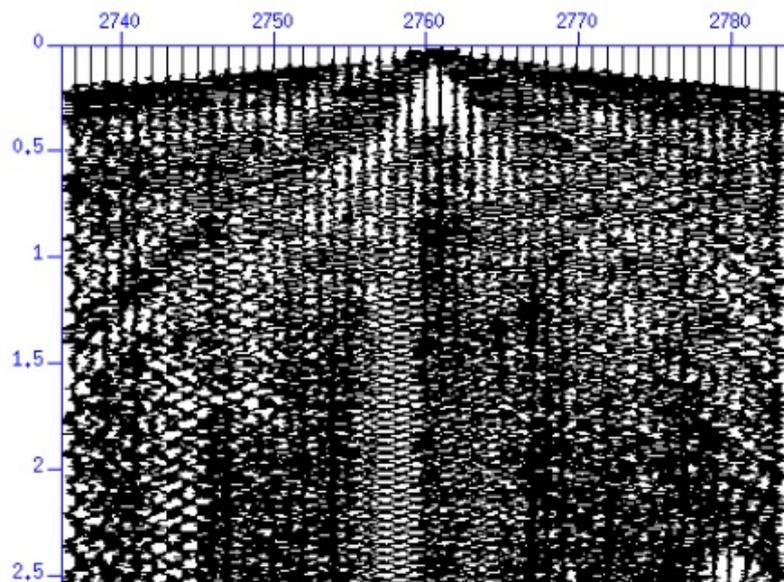


Figura 4.13: Tiro 247 com edição dos traços, mute e ganho (janela de tempo de 2,5 s).

4.6 Análise Espectral do Dado

Na sismica de exploração, os ruídos que são observados nos sismogramas e que apresentam certa regularidade e seja possível sua predição traço-a-traço, são classificados como ruídos coerentes. Dentre esses, merece destaque o groundroll ou ruído de rolamento superficial, que geralmente está presente nos dados sísmicos terrestres.

O groundroll está associado às ondas superficiais do tipo Rayleigh que ocorrem nas camadas de baixa velocidade próximas à superfície. As principais características desse ruído são a alta amplitude, baixa velocidade e a concentração de energia nas baixas frequências. Em geral, a velocidade de propagação das ondas Rayleigh está na faixa de 100 a 1000 m/s e a frequência do groundroll inferior a dos eventos de refração e reflexão, por volta de 10 Hz (Telford et al., 1976).

A análise espectral é necessária durante toda a etapa de processamento do dado, para que possam ser visualizadas as correções aplicadas no dado. Através desta aplicação é possível observar quais são os valores de frequência que predominam no dado, visto que estarão com maiores valores de amplitude. Assim, torna-se possível verificar se existem anormalidades no dado, as quais podem ser retiradas através da aplicação de filtros, evitando que as etapas posteriores possam ser prejudicadas pela presença de dado com alto teor de ruídos. Portanto, torna-se possível obter melhores resultados nas etapas posteriores e, conseqüentemente, uma melhor imagem de subsuperfície.

Nesta etapa geramos e visualizamos o espectro de amplitude x frequência para que fosse possível identificarmos a faixa do groundroll.

Na figura 4.14 temos o espectro de amplitude x frequência do dado em questão.

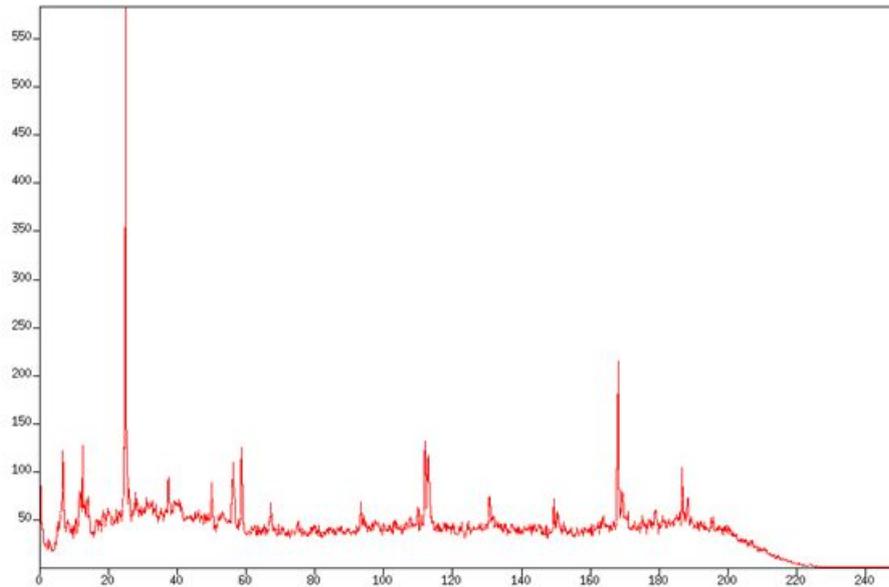


Figura 4.14: Espectro de Amplitude x Frequência para o tiro 247 sem edição dos traços ruidosos.

4.7 Filtragem

Para essa etapa do processamento, existe de um bom número de opções, seja no domínio do tempo ou no domínio da frequência. O objetivo básico dessa filtragem inicial dos dados sísmicos é limitar a banda de frequência, de forma que sejam removidos dos traços os componentes de frequências indesejáveis, preservando as faixas de frequência desejadas do sinal sísmico. Portanto, esta etapa pode significar um razoável aumento da razão sinal-ruído dos dados.

Podemos fazer o uso destes filtros, tanto no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência. Entretanto, a filtragem em frequência tem sido um método bastante requisitado nessa etapa do processamento sísmico, não só pela sua simplicidade e capacidade de melhorar a razão sinal-ruído dos dados, mas por sua rapidez de aplicação, graças ao uso da FFT (Fast Fourier Transform). A eficácia da filtragem em frequência está relacionada diretamente ao conteúdo de frequência do sinal e do ruído, e quanto maior a distinção entre ambos, melhor será o resultado alcançado.

Os principais filtros de frequência são: o corta-alta ou passa-baixa, corta-baixa ou passa-alta, o passa-banda. A atenuação efetiva dos ruídos de baixa frequência por meio dos filtros de frequência corta-baixa ou passa-banda pode ser alcançada. Entretanto, o que deve ser levado em consideração é a possível limitação da banda de frequência do sinal, juntamente com a atenuação dos eventos de reflexão, principalmente os mais profundos que são caracterizados pela baixa frequência e amplitude. Utilizando o filtro de frequência passa-banda do tipo trapezoidal, podemos definir a banda de frequência do sinal a ser preservada, juntamente

com as bandas dos ruídos de baixa e alta frequência. Neste filtro há também duas zonas de transição definidas pelo parâmetro "slope", relacionado à inclinação da reta a partir da frequência de corte. A Figura 4.15 ilustra os filtros de frequência citados acima.

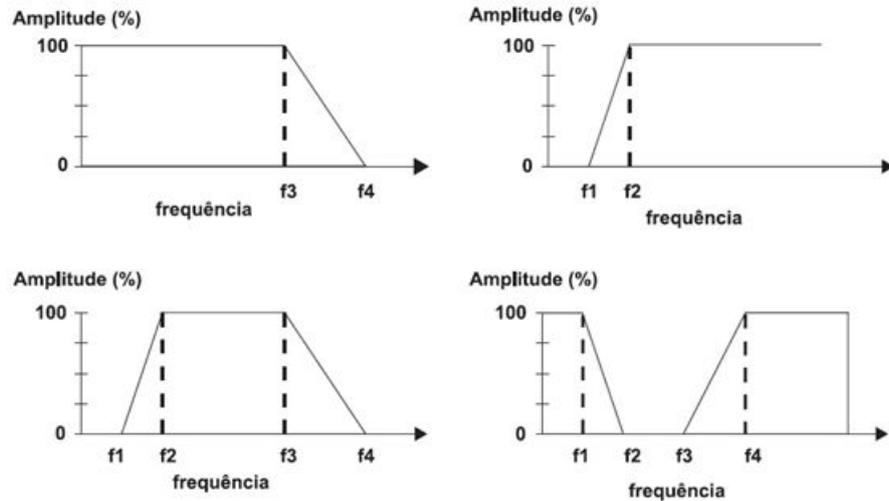


Figura 4.15: Filtros de frequência do tipo trapezoidal: passa-baixa ou corta-alta (a), passa-alta ou corta-baixa (b), passa-banda (c) e rejeita-banda (d).

Sendo $s(t)$ o sinal contínuo no tempo e $F(w)$ a função filtro no domínio da frequência, temos:

$$S(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-iwt} dt \quad (4.5)$$

onde $S(w)$ é o sinal transformado no domínio da frequência após a aplicação da Transformada Direta de Fourier.

Colocando $S(w)$ em função da amplitude e fase teremos:

$$S(w) = A(w) \phi(w) \quad (4.6)$$

Sendo w_c a frequência de corte, então:

$$F(w) = \begin{cases} 1 & \text{se } w \leq w_c \\ 0 & \text{se } w > w_c \end{cases} \quad (4.7)$$

Tendo o filtro definido, fazemos uma multiplicação do espectro de amplitude do sinal com essa função filtro (convolução no domínio da frequência), daí:

$$Y(w) = A(w) F(w) \quad (4.8)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Fourier em: $\bar{S}(w) = Y(w)\phi(w)$, obtemos o sinal filtrado $\bar{s}(t)$

$$\bar{s}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{S}(w) e^{iwt} dw \quad (4.9)$$

Tomando como base as características de amplitude e frequência do evento a ser eliminado, pode-se definir a partir do espectro de amplitude dos traços de alguns sismogramas a frequência de corte, bem como, a banda de frequência a ser preservada.

Para a filtragem dos dados foi utilizado o filtro passa-banda trapezoidal no SU, onde o filtro reteve todas as frequências num intervalo específico, removendo aquelas externas ao mesmo. Foi possível avaliar o espectro de amplitude do dado (Figura 4.14) para detectar a faixa de frequência onde as amplitudes são maiores (groundroll) e assim escolher um filtro que melhor se adeque e preserve a banda de frequência de interesse.

Os valores de corte para o dado deste trabalho foram 10, 15, 50 e 60 Hz, ou seja, preservando as amplitudes entre 15 e 50 Hz, cortando as menores que 10 Hz e maiores que 60 Hz, e suavizando entre 10-15 Hz e entre 50-60 Hz (Figura 4.16).

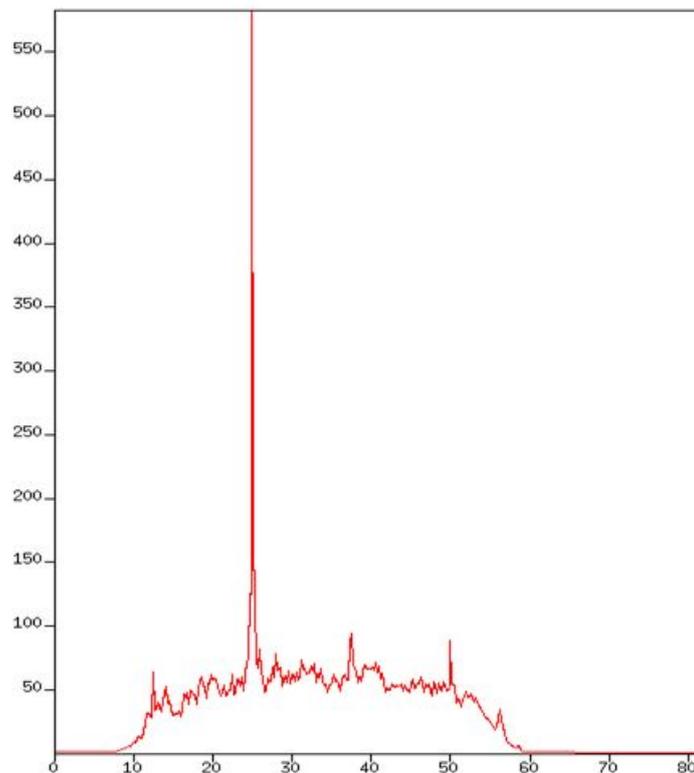


Figura 4.16: Aplicação do filtro trapezoidal no tiro 247 para as frequências 10,15,50 e 60 Hz.

Como a fonte AWD trabalha com altas frequências, trabalhamos num segundo momento com um filtro trapezoidal para frequências de 10,15,140 e 150 Hz, ou seja, preservando as

amplitudes entre 15 e 140 Hz, cortando as menores que 10 Hz e maiores que 150 Hz, e suavizando entre 10-140 Hz e entre 140-150 Hz (Figura 4.17).

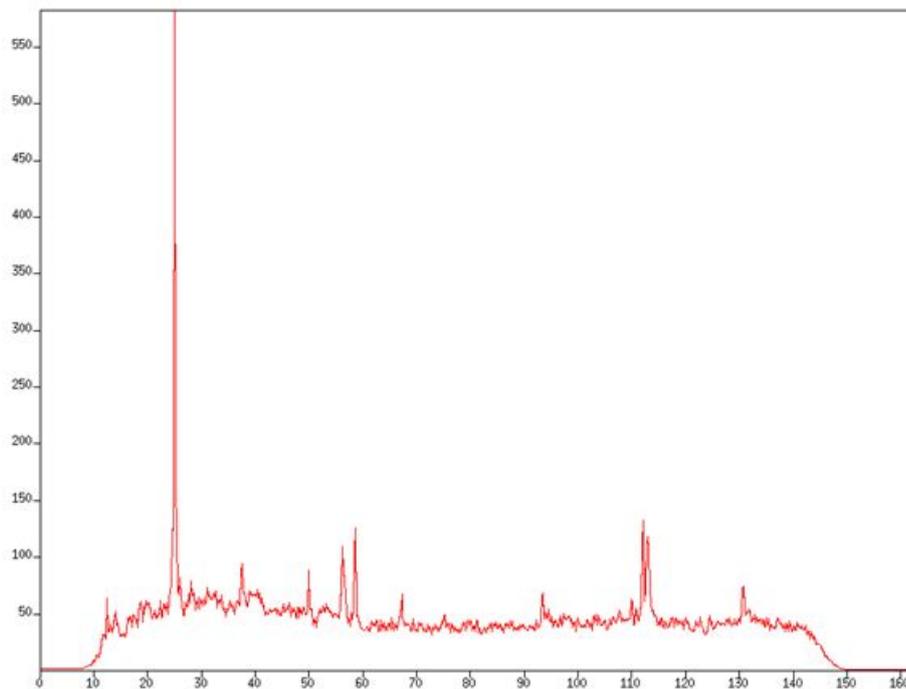


Figura 4.17: Aplicação do filtro trapezoidal no tiro 247 para as frequências 10,15,140 e 150 Hz.

4.8 Deconvolução

A deconvolução é uma ferramenta largamente utilizada no processamento, seja para o aumento da resolução temporal (permitindo uma melhor identificação de topo e base de pacotes mais delgados) ou na supressão das reflexões múltiplas. Nesta etapa, o objetivo é o aumento da resolução temporal, logo a operação é denominada de deconvolução do pulso.

O objetivo da deconvolução do pulso é a estimativa de um filtro inverso que, quando convolvido com o pulso, converte-o em um impulso. Esse filtro, quando convolvido em todos os traços sísmicos dos dados, deve ser capaz de recuperar a resposta impulsional da Terra.

A resposta sísmica (traço sísmico) $x(t)$, é frequentemente descrita pela convolução da assinatura da fonte, $p(t)$, com a série de coeficientes de reflexão ou resposta impulsiva da Terra, $e(t)$, adicionada à série de ruídos $n(t)$. O modelo matemático convolucional do traço sísmico é:

$$x(t) = p(t) * e(t) + n(t) \quad (4.10)$$

Na definição do modelo convolucional do traço sísmico, algumas premissas são admitidas, tais como:

- A Terra é composta por camadas horizontais de velocidade constante;
- A fonte gera uma onda compressional plana (P) que incide nas camadas com ângulo de incidência normal. Sobre essas circunstâncias, não são geradas ondas transversais (S);
- A série de ruídos $n(t)$ é desprezível;
- A forma da onda da fonte sísmica não muda durante seu percurso em subsuperfície (pulso estacionário);
- A função refletividade é um processo aleatório;
- O pulso é de fase mínima.

Convolvendo o traço sísmico com o filtro inverso, iremos obter a função refletividade ou resposta impulsional da Terra, e assumindo que h_t seja uma boa aproximação do inverso do pulso, teremos:

$$h_t \approx p_t^{-1} \quad (4.11)$$

$$h_t * p_t^{-1} \approx \delta_t = \begin{cases} 0, & \text{se } t \neq 0 \\ 1, & \text{se } t = 0 \end{cases} \quad (4.12)$$

Aplicando o filtro inverso aproximado h_t ao traço sísmico:

$$x(t) = p(t) * e(t) + n(t) \quad (4.13)$$

$$h_t * x(t) = h_t * p(t) * e(t) + h_t * n(t) \quad (4.14)$$

$$h_t * x(t) = \delta_t * e(t) + h_t * n(t) \quad (4.15)$$

Desprezando a série de ruídos n_t , a deconvolução restitui a função refletividade.

$$h_t * x(t) = \delta_t * e(t), \quad (4.16)$$

$$h_t * x(t) = e(t) \quad (4.17)$$

Nos casos em que a forma do pulso básico da fonte é conhecida, a deconvolução é considerada um problema determinístico e o filtro calculado é denominado filtro inverso (Yilmaz, 1987).

A figura 4.18 mostra o dado após a aplicação da deconvolução utilizando-se o Seismic Unix.

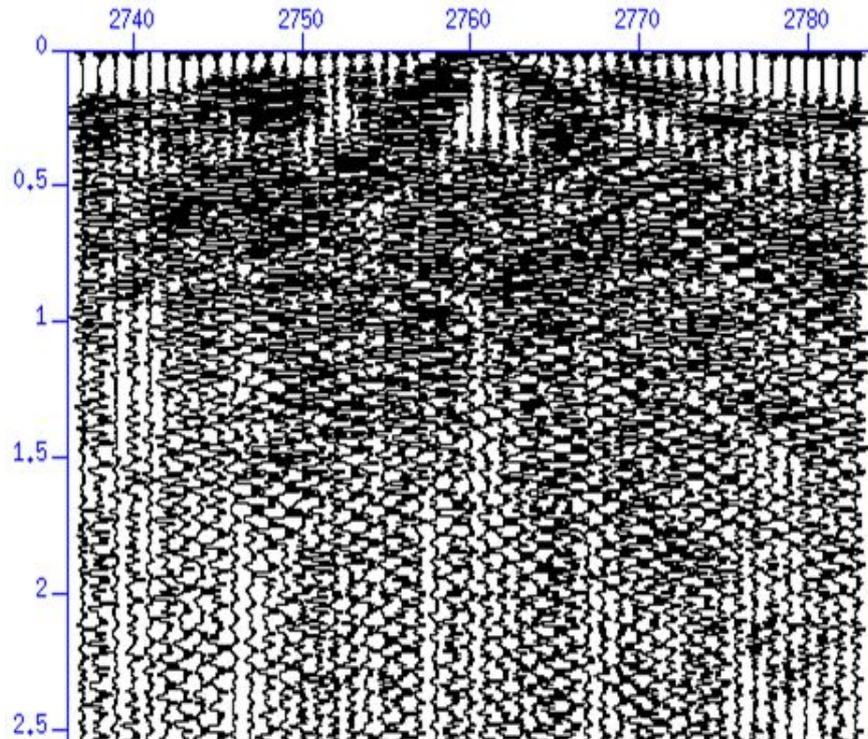


Figura 4.18: Tiro 247 após a aplicação da deconvolução (janela de tempo de 2,5 s).

4.9 Análise de Velocidade

A análise de velocidade é uma etapa que está diretamente ligada ao sucesso do processamento sísmico, pois a qualidade da seção sísmica empilhada obtida dependerá do grau de precisão alcançado na determinação das velocidades das camadas em subsuperfície. Abaixo faremos uma breve introdução sobre os principais conceitos envolvidos nessa etapa do processamento.

4.10 Common mid-point

Em uma aquisição de dados sísmicos 2-D, fontes e receptores são movidos mais ou menos ao longo de uma linha reta. A distância entre fonte e cada receptor é chamada de afastamento ou offset. CMP (abreviação para common mid point) é definido como o ponto médio entre uma fonte e um receptor (Mayne 1962). Daí, traços originados de pares fonte-receptor que possuem o mesmo ponto médio comum são agrupados em um mesmo sismograma, formando assim uma família de CMPs.

Para um meio horizontalmente estratificado com velocidade constante, uma geometria CMP compreende todos os raios que incidem no mesmo ponto refletor. Portanto, uma família CMP contém informações redundantes da subsuperfície. Esta é a base do empilhamento CMP. Já que eventos em traços de diferentes afastamentos trazem informações de um mesmo ponto comum do refletor. Estas informações redundantes podem ser somadas construtivamente aumentando a razão sinal/ruído.

4.11 Normal Moveout

Admitindo um modelo de um refletor plano e horizontal em subsuperfície (Figura 4.19) temos que: M é o ponto médio de SR , $t(x)$ é o tempo de deslocamento ao longo do caminho SDR , onde x são os valores possíveis para a distância entre fonte (S) e receptor (R), e $t(0)$ é o tempo gasto para percorrer duas vezes o caminho MD ($h, x = 0$). A partir daí é possível determinar $t(x)$ usando o teorema de Pitágoras.

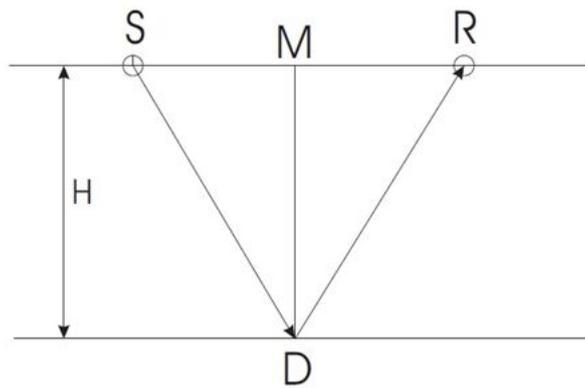


Figura 4.19: Modelo de uma reflexão no refletor plano a uma profundidade h .

Escrevendo em termos de x (offset) temos:

$$v^2 t^2 = x^2 + 4h^2 \quad (4.18)$$

ou

$$\frac{v^2 t^2}{4h^2} = \frac{x^2}{4h^2} + 1 \quad (4.19)$$

ou ainda

$$t^2(x) = \frac{x^2}{v^2} + \frac{4h^2}{v^2} = \frac{x^2}{v^2} + t_0^2 \quad (4.20)$$

Dessa forma a curva de tempo de trânsito é uma hipérbole, onde V é a velocidade do meio e t_0 é o tempo de percurso de afastamento nulo, ou seja, o tempo de percurso medido para fonte e receptor coincidentes ($x = 0$).

A equação representa a forma de uma hipérbole. A diferença de tempo Δt_{NMO} entre o tempo de percurso para um afastamento específico $t(x)$ e o tempo de percurso para o afastamento nulo t_0 é chamada de normal moveout (NMO). Em outras palavras, o normal moveout descreve o efeito do afastamento no tempo de percurso e pode ser calculada da seguinte forma:

$$\Delta t = t(x) - t_0 \quad (4.21)$$

$$\Delta t_{NMO} = t_0 \left(\sqrt{1 + \left(\frac{x}{vt_0} \right)^2} - 1 \right) \quad (4.22)$$

Esse efeito hiperbólico pode ser removido através da correção normal moveout que implica em trazer eventos de tempo de percurso $t(x)$ para tempos de percurso de afastamento zero (t_0).

Depois que a correção NMO é aplicada nas famílias CMPs, os eventos hiperbólicos associados aos refletores em subsuperfície estarão horizontalizados. A velocidade utilizada na correção NMO, recebe a denominação de velocidade NMO (VNMO). Quando os traços de uma família CMP já estão corrigidos do normal moveout, eles serão somados, para depois serem empilhados.

Para um modelo estratificado de camadas horizontais, com velocidades para N camadas dadas por V_j ($j = 1, \dots, N$), Taner e Koehler (1969) definiram a seguinte aproximação para o tempo de trânsito t :

$$t^2 = Z_0 + Z_1 x^2 + Z_2 x^4 + Z_3 x^6 + \dots \quad (4.23)$$

Onde $Z_0 = t_0$, $Z_1 = 1/V_{rms}^2$, e Z_2, Z_3, \dots , são funções complicadas, pois dependem da profundidade e das velocidades intervalares.

Se forem considerados afastamentos pequenos entre traços, quando comparados a profundidade do refletor, a expressão acima pode ser truncada e escrita da seguinte forma:

$$t^2(x) = t_0^2 + \left(\frac{x}{V_{rms}} \right)^2 \quad (4.24)$$

onde V_{rms} é definida como:

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{t(0)} \sum_{i=1}^N V_i^2 \Delta t_i(0) \quad (4.25)$$

com $\Delta t_i(0)$ sendo o tempo duplo de percurso vertical através da i -ésima camada, V_i a velocidade da i -ésima camada e $t(0) = \sum_{k=1}^i \Delta t_k$.

4.12 Espectro de velocidade

O espectro de velocidade é comumente usado em softwares iterativos onde o resultado do empilhamento para intervalos de velocidades diferentes são plotados, lado a lado, num plano de velocidade x tempo. O método mais usado para esse tipo de análise é o semblance.

4.13 Coerência

Sempre que uma mesma onda é detectada por um arranjo de geofones, ela produz quase exatamente o mesmo efeito em cada geofone. Se, no momento em que é captada por um geofone, a onda tiver energia suficiente para se sobrepor a qualquer outro nível de energia (ruídos por exemplo), que também são captadas pelos geofones, a resposta do traço vai ser mais ou menos similar em cada geofone. Essa similaridade denunciada traço a traço é denominada coerência e é a condição necessária para o reconhecimento de qualquer evento.

Para um grande número de traços podemos aproveitar o fato de que quando empilhamos vários canais, a amplitude resultante é, geralmente, muito maior onde cada traço (cada canal) é similar (coerente), logo estão empilhados em fase, e menor onde não são similares (incoerentes). Um dos focos na análise de velocidade é obter picos que correspondam a pontos com melhor coerência do sinal ao longo de uma hipérbole por toda a CMP.

4.14 Semblance

Considerando uma família CMP, temos que Amplitude de Empilhamento (Stacked Amplitude) é definida como:

$$s_t = \sum_{i=1}^M w_{i,t} \quad (4.26)$$

onde M é o número de traços da CMP corrigidos do NMO; e w é o valor da amplitude no i -ésimo traço no tempo t .

Uma das maneiras de quantificar a coerência é através do semblance. Este é usado para determinar parâmetros que irão otimizar o empilhamento, e é calculado pela combinação das mudanças no tempo em cada canal. Sua equação é:

$$semblance = \frac{1}{M} \frac{\sum_t s_t^2}{\sum_t \sum_i w_{i,t}^2} \quad (4.27)$$

onde, $0 \leq semblance \leq 1$.

O semblance não apenas tenderá a ser alto quando um evento com boa coerência ocorrer, mas também é sensível quer os traços contribuam igualmente ou não. Conseqüentemente, eventos "fortes" irão exibir semblance alto, e eventos fracos irão exibir valores moderados para o semblance, ao passo que informações incoerentes possuem um semblance muito baixo.

Como visto anteriormente, em nenhuma etapa foi possível observarmos hipérboles de reflexão. Aplicamos então com sucesso um Super Gather, que consiste num processo de formação de médias de CDPs, cujo cálculo é feito através da coleta e soma de CDPs adjacentes. Este processo aumenta a taxa de cobertura, melhorando a razão sinal/ruído do dado. Foi gerado um Super Gather com 5 CMPs em um intervalo de 11 em 11 para a linha sísmica deste trabalho (Figura 4.20).

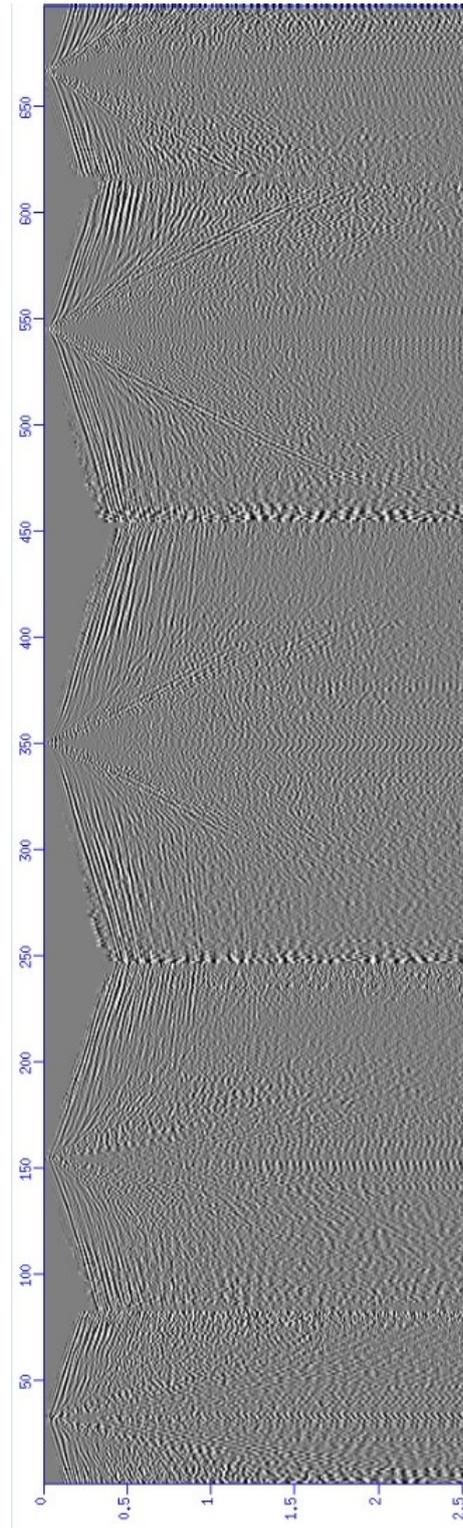


Figura 4.20: Super Gather com 5 CDPs. Após a aplicação, surgiram eventos de reflexão.

O resultado dessa análise é uma estimativa do campo de velocidades que será utilizado para realizarmos empilhamento (Figura 4.21).

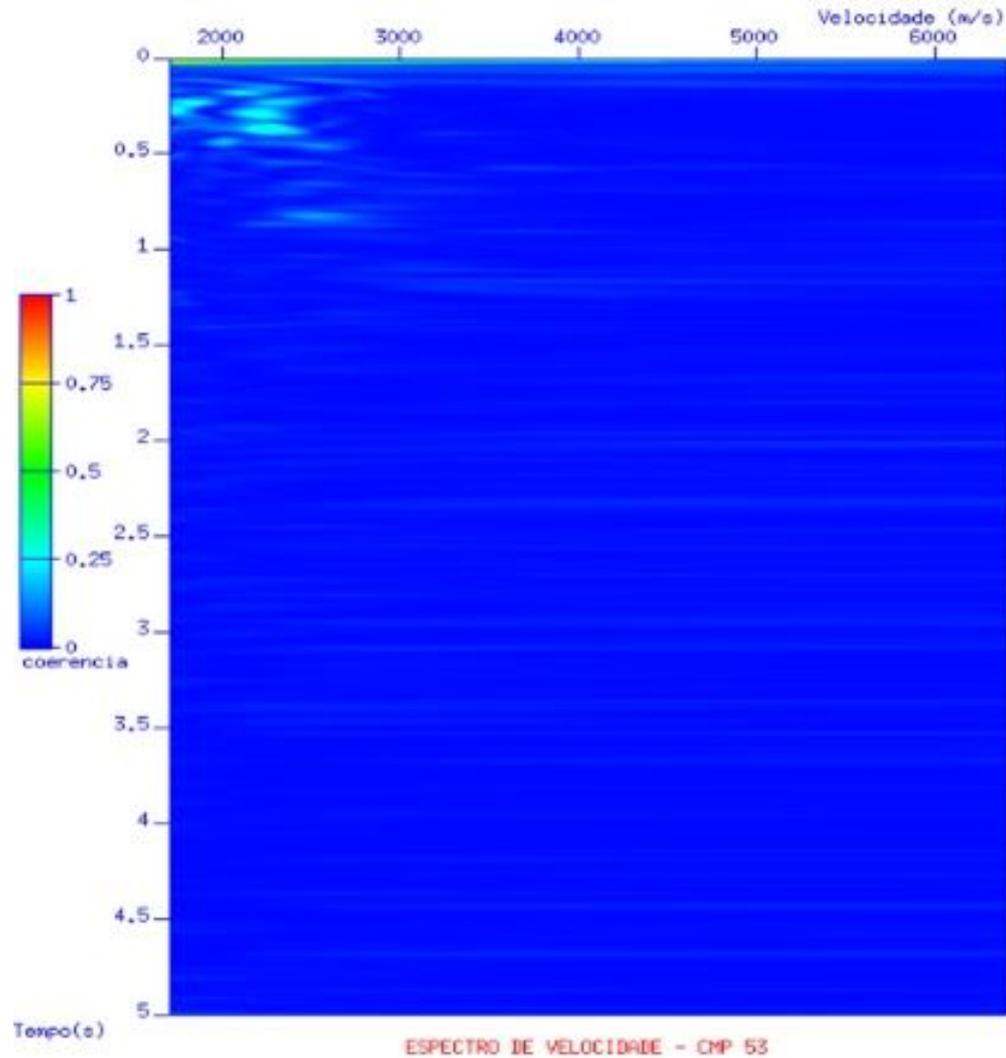


Figura 4.21: Semblance plot, durante a etapa de Análise de Velocidade. Nessa Janela devem ser aplicados os picks das velocidades, que serão armazenadas e gerarão o arquivo que será utilizado na correção NMO.

4.15 Empilhamento

O objetivo do empilhamento é realizar a soma aritmética das amplitudes dos traços das famílias CMPs, após a correção de sobretempo normal, visando aumentar a razão sinal-ruído dos dados. A melhoria dessa razão sinal-ruído, nesse caso, dependerá do grau de coerência alcançada nos eventos de interesse (reflexões). A equação para o empilhamento normalizado é dada por:

$$A(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i(t) \quad (4.28)$$

sendo $A(t)$ =amplitude do traço empilhado no tempo t ; N =número de traços ou cobertura

da família CMP; i =índice indicador do traço; $a_i(t)$ =valor da amplitude do traço i no tempo t .

Como vemos, o empilhamento produz um traço para cada família CMP, normalizado pela média aritmética, preservando as relações entre as amplitudes. Assim, cada traço resultante de um CMP é colocado lado a lado em um gráfico chamado de seção sísmica empilhada (Figuras). A seção sísmica empilhada mostra a feição geral aproximada do modelo geológico estudado, e as amplitudes dos eventos carregam informações sobre as propriedades das camadas.

A qualidade da seção sísmica empilhada obtida dependerá do grau de precisão alcançado na determinação das velocidades das camadas em subsuperfície, ou seja, da análise de velocidade.

Nas figuras 4.22 e 4.23 temos as seções empilhadas para os filtros passa-banda de 10, 15, 50, 60 Hz e 10, 15, 140, 150 Hz, respectivamente.

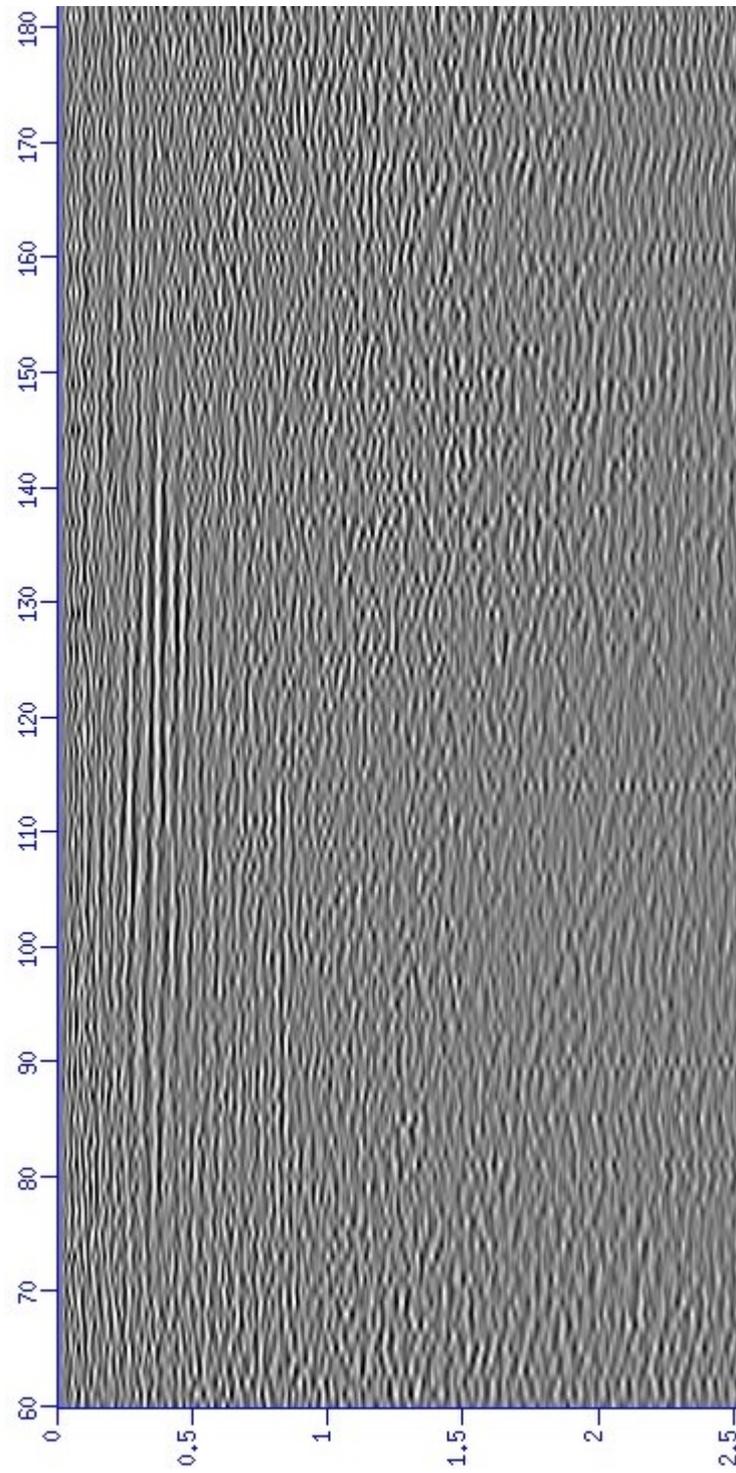


Figura 4.22: Seção empilhada para o filtro 10,15,50 e 60 Hz.

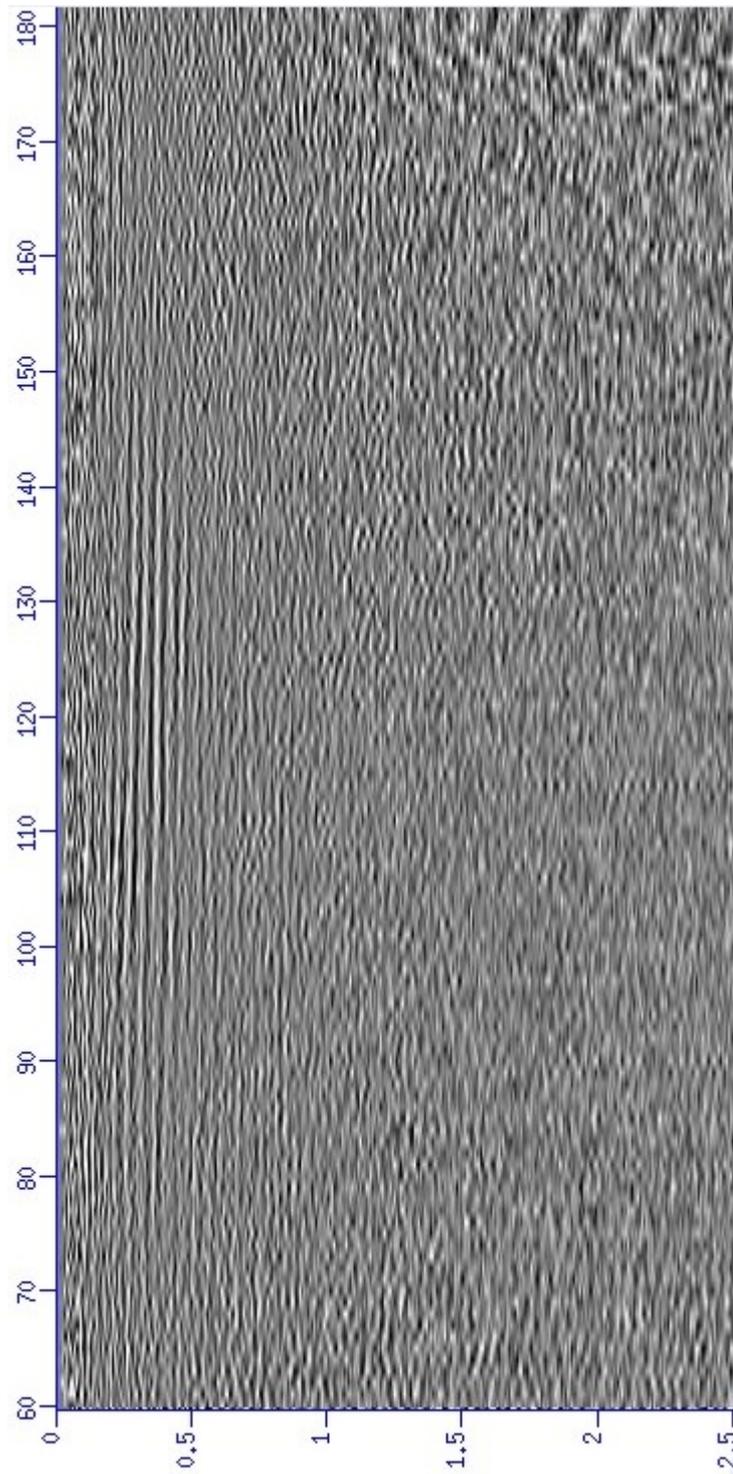


Figura 4.23: Seção empilhada para o filtro 10,15,140 e 150 Hz.

CAPÍTULO 5

Conclusões

Embora o processo de adaptação da fonte sísmica AWD no caminhão Ford Cargo 1717e tenha sido bastante complexo, os testes de campo comprovaram que o equipamento se comportou de forma satisfatória, estando apto a realizar aquisições de dados sísmicos.

O AWD é uma alternativa de fonte mais adequada em áreas urbanas e ambientalmente sensíveis. Em alguns casos, o AWD pode ser combinado com operações que utilizam dinamite ou Vibroseis para adquirir dados sísmicos apenas dentro de áreas que restringem ou proíbem o uso de fontes de energia que são perigosas ou prejudiciais ao meio ambiente. O grande inconveniente da utilização da fonte AWD é iluminar alvos geológicos mais profundos ou se deslocar a locais de difícil acesso.

A fonte AWD gera sinais de conteúdo de frequência muito maiores (0 - 20 Hz) que os gerados por explosivos (0 - 100 Hz), permitindo uma melhor resolução nas seções sísmicas a serem geradas.

A aplicação prática de um fluxograma básico de processamento de dados sísmicos reais no dado terrestre adquirido com a fonte sísmica AWD no município de Araçás mostrou-se de fundamental importância para a obtenção de imagens de estruturas na subsuperfície, embora o dado utilizado neste trabalho seja de baixa qualidade.

A etapa mais importante do processamento foi à aplicação do Super Gather, pois foi através dele que conseguimos o aumento da cobertura do dado e a visualização de eventos de reflexão.

O processamento no dado sísmico adquirido no município de Araçás-BA mostrou que a análise dos espectros de amplitude x frequência é de grande importância para a visualização do evento groundroll, permitindo assim escolhermos as faixas de frequência que usamos no filtro trapezoidal, a fim de atenuá-lo. Mostrou também que existe certa dificuldade na aplicação de algumas das funções do pacote CWP/SU, tais como a edição dos traços e aplicação da função mute, que devem ser realizados traço a traço e tiro a tiro, respectivamente.

Para as pesquisas posteriores, sugere-se uma análise para o aumento da pressão do gás nitrogênio da fonte AWD, com o intuito de gerar uma maior saída de energia sem que isso traga danos ao equipamento ou o comprometimento dos dados. Sugere-se também que sejam feitas maiores análises, tanto na aplicação de filtros mais avançados, quanto no que

diz respeito à compensação das perdas de amplitude, que consistem em importantes passos na etapa de processamento sísmico para que se obtenham imagens de alta resolução de subsuperfície.

Agradecimentos

Agradeço a Deus em primeiro lugar, pela força e coragem necessária para alcançar os meus objetivos.

À minha família e à minha esposa pelo apoio.

A todos os amigos que fiz durante o curso.

Aos professores, que foram tão importantes na minha vida acadêmica, especialmente meu orientador, Marco Botelho, pela paciência e disponibilidade.

À Ana d'O que sempre me apoiou.

À Mateus Aquino pela ajuda durante o curso principalmente nessa reta final.

Referências Bibliográficas

- A Ganguly & Ivan Moissa, (2002) The Digipulse III Accelerated Weight Drop Seismic Source Systems Applications and Performance of the Series Model 1180 GC/TR. Gurgaon, Haryana.
- Abreu, A. S. (2005) Processamento de Dados Sísmicos do Golfo do México Usando o Seismic Unix, Trabalho de graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Bolt, B. 1976. Nuclear explosions and earthquakes: the parted veil. W.H. Freeman & Co. p 48.
- 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, Brasil.
- Costa, A. C. (2004) Fluxo de Processamento Através do Pacote CWP/SU para Imageamento Sísmico de Alta Resolução, Trabalho de graduação, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Macaé, Brasil.
- Costa, F. B. (2007) Processamento e Interpretação de Dados Sísmicos 2D na Bacia de Jequitinhonha, Trabalho de graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Dobrin, M. B. 1976. Introduction to Geophysical Prospecting. USA: New York, McGraw-Hill International Book Company. 630p.
- Gomes da Silva, M. (2004) Processamento de Dados Sísmicos da Bacia do Tacutu, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Hendrick et al. (2008) Minimal-Impact Seismic Acquisition: Successful Maging Using an Accelerated Weight Drop System.
- Mavko, G.; Mukerji, T. e Dvorkin, J. (2009) The Rock Physics Handbook, Cambridge University Press, New York.
- Mayne, W. H. (1962) Common reflection point horizontal data stacking techniques, Geophysics.
- Monk, Dave (2002) Canadian Seismic With a Thump.
- Monk, David et al. (2004) Using thumpers as a seismic source. Why an old technique is now ready for use. Denver, Colorado.
- Sheriff, R. E. e Geldart, L. P. (1995) Exploration Seismology, Cambridge University Press,

Cambridge, England.

Taner, M. T. e Koehler, F. (1969) Velocity spectral digital computer derivation and applications of velocity functions, Geophysics.

Telford, W. M.; Geldart, L. P. e Sherff, R. E. (1990) Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge, England.

Torres, T. C. (2008) Processamento e Interpretação de Dados Sísmicos 2-d da Bacia de Camamu, Trabalho de graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

Zoeppritz, K. (1919) Uber reexion und durchgang seismischer wellen durch unстетigkerlsaschen, Mathematish-physkalische Klasse, K1:57-84.

Yilmaz, O. (2001) Seismic Data Analysis, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, U.S.A.

United Service Alliance, Accelerated Impact Energy Sources. Disponível em:

<<http://www.usallianceinc.net/accelerated-impact-energy-sources.htm>> Acesso em 18 de fevereiro de 2014.

United Service Alliance, AF450 Hammer. Disponível em:

<http://www.usallianceinc.net/pdf/AF450_CutSheet.pdf> Acesso em 18 de fevereiro de 2014.