

Reinaldo Mozart da Gama e Silva

Aplicação de Transformada Wavelet em atenuação de Ruído de Rolamento Superficial

Niterói

2017, Dezembro

Reinaldo Mozart da Gama e Silva

Aplicação de Transformada Wavelet em atenuação de Ruído de Rolamento Superficial

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial do Grau de Bacharel. Área de Concentração: Geofísica

Universidade Federal Fluminense – UFF

Departamento de Geologia e Geofísica

Orientador: Marco Antonio Cetale Santos

Niterói

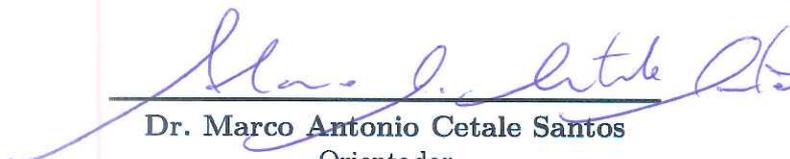
2017, Dezembro

Reinaldo Mozart da Gama e Silva

Aplicação de Transformada Wavelet em atenuação de Ruído de Rolamento Superficial

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial do Grau de Bacharel. Área de Concentração: Geofísica

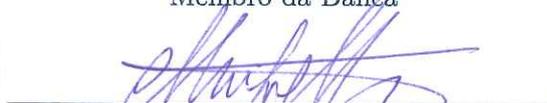
Banca Examinadora:



Dr. Marco Antonio Cetale Santos
Orientador



Dr. Denis Lage Ferreira da Silva
Membro da Banca



Dr. Marcilio Castro de Matos
Membro da Banca

Niterói
Dezembro de 2017

S586

Silva, Reinaldo Mozart da Gama e

Aplicação de Transformada Wavelet em atenuação de Ruído de Rolamento Superficial / Reinaldo Mozart da Gama e Silva. – Niterói : [s.n.], 2017.

102 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geofísica) – Universidade Federal Fluminense, 2017.

1.Processamento de sinais. 2.Dados sísmicos. 3.Geofísica.
I.Título.

CDD 622.1592

Agradecimentos

Os agradecimentos principais são referidos a minha família, em especial meus pais, por fornecer os suporte e apoio durante toda a minha vida, acadêmica e pessoal. Agradeço também a minha namorada, Luiza Serafim, por ter me apoiado em todos esses anos de UFF e por ter me dado o incentivo para sobrepor as dificuldades encontradas. Sem o apoio destes não seria possível chegar onde cheguei e alcançar meus objetivos.

Agradeço também a Lucas Eugenio, Matheus Lima "Caramelinho" e Gabriel Brando pelos 5 anos de amizade durante a graduação. Sem eles, os exaustivos trabalhos de campo, matérias difíceis e Socorros da vida, teriam sido ainda mais árduos. Espero ter essa amizade por toda a vida!

Agradeço aos integrantes do GISIS pelo apoio, paciência e amizade durante todos os anos que estive por lá. Em especial ao Victor Martins, Felipe Timóteo, Felipe Cruz e Oscar Neto, pela ajuda com diversos softwares e por sempre se disporem a tirar dúvidas e auxiliar.

Gostaria de agradecer profundamente ao meu orientador, Prof. Marco Antonio Cetale Santos, pelo suporte e por me guiar ao longo da confecção do presente trabalho e ao longo da iniciação científica que tive o prazer de fazer junto a ele. Agradeço também pelo tempo e paciência dedicada a mim.

Agradeço também aos membros da banca examinadora, Marcílio Matos e Denis Lage, por aceitarem o convite de participação e disporem de seus tempos para estarem presente no dia da apresentação.

Por fim, agradeço a instituição Universidade Federal Fluminense e aos professores que compõem o Departamento de Geologia e Geofísica. Sem ambos não teria tido essa maravilhosa experiência de cursar a graduação em Geofísica.

*"If my doctor told me I had only six minutes to live,
I wouldn't brood. I would type a little faster."
(Asimov, Isaac)*

Resumo

O *Ground Roll*, ou Ruído de Rolamento Superficial, está em uma enorme lista de artefatos inerentes a levantamentos sísmicos terrestres ou levantamentos *OBC*, *ocean-bottom cable*, que limitam a qualidade dos dados sísmicos e por consequência a posterior utilização dos mesmos. Este ruído possui baixa frequência e alta amplitude que dificulta o reconhecimento de eventos de interesse próximos e afastados da superfície. Consequentemente, existe um enorme esforço por parte da indústria e da academia no desenvolvimento de técnicas que atuam na atenuação deste ruído, buscando assim melhorar a qualidade desses dados. Técnicas em filtragem no domínio da frequência, como a transformada de Fourier, são amplamente usadas para tal finalidade, todavia apresentam limitações na resolução da representação do dado e na perda de informações relevantes. Como alternativa, a transformada Wavelet apresenta uma análise tanto no domínio da frequência, quanto do tempo, mostrando resultados com melhor resolução e filtragem do sinal a ser analisado. Desta forma, o presente trabalho visa implementar a ferramenta matemática da transformada Wavelet para atenuar o *ground roll*, comparando com resultados derivados da transformada de Fourier 2D e 1D. Para esta análise, utilizou-se diversos dados sísmicos reais de diferentes regiões geológicas e foi realizada a comparação qualitativa e quantitativa com outros métodos de filtragem.

Palavras-chave: *Ground Roll*, Transformada Wavelet, Dados sísmicos, Processamento de Sinais

Abstract

The Ground Roll, or Surface Rolling noise, is in a huge list of artifacts inherent in land seismic surveys or OBC surveys, ocean-bottom cable, limiting the quality of the seismic data and therefore their subsequent use. Such noise has low frequency and high amplitude which hinders recognition of interest events, near and away from the surface. Hence, there is a huge effort from the industry and the academia to develop techniques that operate in this noise suppression, seeking to improve the quality of these data. Techniques in frequency domain filtering, such as the Fourier transform, are widely used for such purpose, however they present limitations in the data representation resolution and the loss of relevant information. Alternatively, the Wavelet transform provides an analysis in both frequency and time domain, showing results with better data resolution and filtering of the signal to be parsed. Thus, the present work aims to implement the mathematical tool of the Wavelet transform to attenuate the ground roll, comparing with results from 2D and 1D Fourier transform. For this analysis, one used several real seismic data of different geological regions and the qualitative and quantitative comparison with other filtering methods were performed.

Keywords: Ground Roll, Wavelet transform, Seismic data, Signal Processing

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação gráfica de uma levantamento sísmico marinho.	18
Figura 2 – Representação gráfica para o modelo convolucional estacionário do traço sísmico.	19
Figura 3 – Tiro 25 da biblioteca de dados abertos de Yilmaz (2001) editado.	20
Figura 4 – Exemplo de imagem sísmica gerada a partir do processamento e filtragem de dados sísmicos.	20
Figura 5 – Representação gráfica de oscilação de partículas referente a passagem de uma onda compressional.	22
Figura 6 – Representação gráfica de oscilação de partículas referente a passagem de uma onda cisalhante.	23
Figura 7 – Representação gráfica de oscilação de partículas referente a passagem da onda Love.	24
Figura 8 – Representação gráfica de oscilação de partículas referente a passagem da onda Rayleigh. Fonte: Adaptado de Bolt (1982).	24
Figura 9 – Representação gráfica da transformada de Fourier de um sinal composto pela soma dos três sinais cossenoidais. Acima estão representados os cossenos que compõem tal sinal de análise e abaixo o respectivo espectro de magnitude do mesmo.	29
Figura 10 – Representação gráfica da transformada de Fourier de porção discretizada do sismograma referente ao terremoto Kobe de 1995. Acima estão representados o sinal captado pelo sismógrafo e a porção discretizada considerada para análise, e abaixo o respectivo espectro de magnitude do mesmo.	31
Figura 11 – Representação gráfica da transformada de Fourier 2D de uma fotografia. Acima é apresentada a imagem utilizada para análise e abaixo o respectivo espectro de magnitude da mesma.	33
Figura 12 – Interpretação da correlação entre os eventos registrados no espectro de magnitude e suas correspondentes origens na imagem analisada.	34
Figura 13 – Representação gráfica de um sinal <i>chirp</i> logarítmico e seu respectivo espectrograma.	37
Figura 14 – Eventos planos em um sismograma sintético.	38
Figura 15 – Espectro de magnitude de eventos planos em um sismograma sintético.	39
Figura 16 – Escalograma de um sinal senoidal com componente ruidosa de alta frequência.	45
Figura 17 – Representação gráfica da transformada Wavelet contínua de um sinal composto pela soma de três cossenoides.	46

Figura 18 – Diagrama representativo da transformada Wavelet discreta usando implementação proposta por Mallat (1989).	48
Figura 19 – Representação gráfica da implementação proposta por Cohen e Chen (1993) para a transformada Wavelet 2D.	49
Figura 20 – Fluxo utilizado para aplicação da filtragem passa-banda.	52
Figura 21 – Fluxo utilizado para aplicação da filtragem $F-K$	53
Figura 22 – Fluxo utilizado para aplicação da transformada Wavelet.	54
Figura 23 – Wavelet <i>Haar</i> utilizada.	55
Figura 24 – Exemplo de wavelet de <i>Daubechies</i> utilizada.	55
Figura 25 – Exemplo de wavelet <i>Biortogonal</i> utilizada.	56
Figura 26 – Imagens de um microscópio eletrônico de varredura e seus respectivos histogramas.	58
Figura 27 – Resultado derivado da filtragem passa-banda do tiro K1. a) Tiro K1 b) Tiro K1 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.	61
Figura 28 – Resultado derivado da filtragem passa-banda do tiro K2. a) Tiro K2 b) Tiro K2 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.	61
Figura 29 – Resultado derivado da filtragem passa-banda do tiro Oz25. a) Tiro Oz25 b) Tiro Oz25 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.	62
Figura 30 – Resultado derivado da filtragem passa-banda do tiro Oz5. a) Tiro Oz5 b) Tiro Oz5 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.	63
Figura 31 – Resultado derivado da filtragem $F-K$ do tiro K1. a) Tiro K1 b) Tiro K1 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.	64
Figura 32 – Espectro $F-K$ do tiro K1. a) Espectro Bruto b) Espectro Filtrado c) Resíduo.	64
Figura 33 – Resultado derivado da filtragem $F-K$ do tiro K2. a) Tiro K2 b) Tiro K2 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.	65
Figura 34 – Espectro $F-K$ do tiro K2. a) Espectro Bruto b) Espectro Filtrado c) Resíduo.	65
Figura 35 – Resultado derivado da filtragem $F-K$ do tiro Oz25. a) Tiro Oz25 b) Tiro Oz25 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.	66
Figura 36 – Espectro $F-K$ do tiro Oz25. a) Espectro Bruto b) Espectro Filtrado c) Resíduo.	66
Figura 37 – Resultado derivado da filtragem $F-K$ do tiro Oz5. a) Tiro Oz5 b) Tiro Oz5 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.	67
Figura 38 – Espectro $F-K$ do tiro Oz5. a) Espectro Bruto b) Espectro Filtrado c) Resíduo.	67
Figura 39 – Resultado derivado da filtragem utilizando a transformada Wavelet 2D do tiro K1. a) Tiro K1 b) Tiro K1 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.	69

Figura 40 – Coeficientes Verticais do tiro K1. a) Coeficiente de nível 1 b) Coeficiente de nível 2 c) Coeficiente de nível 3.	69
Figura 41 – Resultado derivado da filtragem utilizando a transformada Wavelet 2D do tiro K2. a) Tiro K2 b) Tiro K2 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.	70
Figura 42 – Coeficientes Verticais do tiro K2. a) Coeficiente de nível 1 b) Coeficiente de nível 2 c) Coeficiente de nível 3.	70
Figura 43 – Resultado derivado da filtragem utilizando a transformada Wavelet 2D do tiro Oz25. a) Tiro Oz25 b) Tiro Oz25 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.	71
Figura 44 – Coeficientes Verticais do tiro Oz25. a) Coeficiente de nível 1 b) Coeficiente de nível 2 c) Coeficiente de nível 3.	71
Figura 45 – Resultado derivado da filtragem utilizando a transformada Wavelet 2D do tiro Oz5. a) Tiro Oz5 b) Tiro Oz5 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.	72
Figura 46 – Coeficientes Verticais do tiro Oz5. a) Coeficiente de nível 1 b) Coeficiente de nível 2 c) Coeficiente de nível 3.	72

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de erros	75
--------------------------------------	----

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Organização do Trabalho	16
2	INTRODUÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Sísmica de Reflexão	17
2.2	Ondas Sísmicas	21
2.2.1	Ondas de Corpo	21
2.2.2	Ondas Superficiais	23
2.3	Ruído de Rolamento Superficial	25
3	TRANSFORMADA DE FOURIER	26
3.1	Revisão Bibliográfica	26
3.2	Transformada de Fourier Contínua	27
3.3	Transformada de Fourier Discreta	29
3.4	Transformada de Fourier Janelada	34
3.5	<i>Filtragem F-K</i>	37
4	TRANSFORMADA WAVELET	41
4.1	Revisão Bibliográfica	41
4.2	Transformada Wavelet Contínua	43
4.3	Transformada Wavelet Discreta	46
5	METODOLOGIA	51
5.1	Fluxos de Análise	52
5.2	Critérios de Avaliação	56
5.2.1	Razão Sinal-Ruído (SNR)	56
5.2.2	Coeficiente de Variação	57
5.2.3	<i>Razão Pico de Sinal Ruído (PSNR)</i>	59
6	RESULTADOS	60
6.1	Filtragem Passa-Banda	60
6.2	Filtragem <i>F-K</i>	63
6.3	Decomposição Wavelet 2D	68
6.4	Avaliação Quantitativa	74
7	CONCLUSÃO	77

REFERÊNCIAS	79
APÊNDICES	84
APÊNDICE A – CÓDIGO PARA DECOMPOSIÇÃO WAVELET 2D	85

1 Introdução

A sísmica de reflexão é o método geofísico mais utilizado pela indústria de exploração de Óleo e Gás. Os dados provenientes de tal método fornecem informações relevantes sobre a geometria dos estratos e a configuração estrutural presente em subsuperfície. Além disso, o uso de algoritmos computacionais, informações sobre geologia local, além da utilização de outros dados geofísicos em conjunto com a interpretação sísmica, podem fornecer indicações sobre a litologia e a localização de possíveis acúmulos de hidrocarbonetos.

Todavia, os dados sísmicos, quando adquiridos, não só trazem informações sobre a geologia da Terra, mas também uma gama de ruídos inerentes a eles. Tais artefatos impactam diretamente na utilização dos dados, pois afetam a inversão sísmica, prejudicam a estabilidade e acurácia do algoritmo, e/ou a qualidade da seção sísmica final, limitando a interpretação e mascarando estruturas de interesse. Conseqüentemente, tais efeitos levam ao maior consumo de tempo para o fornecimento de resultados e menor geração de informação a partir dos mesmos.

Dentre as origens de ruídos que mais afetam dados sísmicos referentes a levantamentos terrestres e *OBS*, *ocean-bottom survey*, as ondas superficiais são as mais comuns fontes de eventos indesejáveis. O ruído de rolamento superficial, também chamado de *Ground Roll*, é causado por uma variação dessas ondas, mais precisamente por ondas Rayleigh dispersivas, mas com frequência e velocidade variante em comparação a elas (DEIGHAN; WATTS, 1997). Tal ruído interfere diretamente na visualização de eventos próximos a superfície, gerando um artefato de alta inclinação e alta amplitude, principalmente em afastamentos mais curtos.

Desta forma, um enorme esforço por parte da indústria e da academia é direcionado no desenvolvimento de técnicas e ferramentas capazes de atenuar este tipo particular de ruído. Visando suprimir o *groud roll* ainda na fase de aquisição de dados, arranjos específicos de geofones são desenvolvidos, como em Morse e Hildebrandt (1989) e Halliday et al. (2011), todavia a implementação de tais arranjos podem aumentar o tempo e custo de aquisição e não garantem que o procedimento seja 100% satisfatório em todas as porções do dado.

Em outra vertente, técnicas voltadas a filtragens são amplamente aplicadas no condicionamento e processamento de dados sísmicos, visando a supressão deste ruído em particular. Por estar limitado a bandas de baixa frequência, filtros no domínio da frequência são mais efetivos na atenuação do *ground-roll* como por exemplo a filtragem utilizando a transformada de Fourier. Todavia, técnicas no domínio da frequência resultam em uma alteração em todo o sinal ao longo de seu registro, afetando conjuntamente

frequências correspondentes a eventos de interesse. Alternativas foram desenvolvidas para tal problema, como por exemplo métodos utilizando janelamento do dado no tempo e o próprio janelamento do espectro de frequência, a transformada de Fourier janelada, como pode ser visto em Nawab e Quatieri (1988) e Allen (1977). Todavia, o uso de técnicas de janelamento requer um processamento cuidadoso para o design das janelas a serem usadas, onde as baixas frequências devem se ater a janelas maiores e altas frequências a janelas menores, levando a um problema custoso quando se possui muitas bandas de frequências a serem analisadas (DEIGHAN; WATTS, 1997).

Outra alternativa desenvolvida foram transformadas em duas dimensões, como a transformada $F-K$ que representa o dado no domínio da frequência e no domínio do número de onda. Tal representação geralmente permite que eventos indesejáveis como o ruído de rolamento superficial ou ondas guiadas possam ser identificados separadamente de artefatos relacionados a reflexão de onda (YILMAZ, 2001), além de ser um método que evita a deterioração do sinal a ser analisado (BERESFORD-SMITH; RANGO, 1988). Entretanto, tal método também possui suas desvantagens, gerando alta demanda de análise, podendo ter uso limitado para levantamentos de baixa cobertura e, de acordo com Oppenheim (1999), o uso de filtros 2D não são triviais e podem levar a alto custos computacionais.

Pode se perceber que existe um elemento fundamental e comum nas técnicas de filtragem no domínio da frequência supracitadas, todas utilizam a transformada de Fourier em sua implementação. Vale ressaltar que todos esses métodos fornecem informação da frequência presente no sinal com demasiada precisão, mas consideram o sinal estacionário (BRACEWELL, 1986), suposição que pode não ser bem aplicada a dados de sísmica de reflexão, onde o pacote de frequência presente neste tipo de sinal é dependente do tempo.

Tendo em vista a limitação das técnicas de filtragem e a busca de uma resolução satisfatória tanto no domínio da frequência, quanto do tempo, técnicas voltadas a análise e filtragem de dados usando propriedades de frequência e tempo foram desenvolvidas. Desta forma, têm-se o desenvolvimento da transformada Wavelet, possuindo tais características e sendo usada ao longo dos anos em diversas áreas como por exemplo em processamento de sinais, em trabalhos como Williams e Amaratunga (1994) e Sahambi, Tandon e Bhatt (1997), e em processamento de imagens, como em trabalhos de Xizhi (2008) e Kingsbury (1999).

Na geofísica a transformada Wavelet é implementada com diversas finalidades. Trabalhos como Chakraborty e Okaya (1995), que faz uma comparação entre a transformada de Fourier e a transformada Wavelet para representação e processamento de dados sísmicos no domínio da frequência, Martelet et al. (2001), que utiliza a transformada Wavelet para inversão de dados de gravimetria e possível identificação de fronteiras geologicamente distintas, e Vallée et al. (2004), usando esta ferramenta matemática para construção de modelos estruturais e estimativa de profundidade de fontes homogêneas de anomalias magnéticas, são exemplo de trabalhos aplicados a diversas áreas.

Além destas aplicações, a transformada Wavelet também é amplamente utilizada para a atenuação de *ground-roll*. Introduzindo a implementação desta ferramenta matemática com a finalidade do estudo e supressão do ruído de rolamento superficial os autores de Deighan e Watts (1997) e Deighan e Watts (1996) foram os pioneiros, aplicando a técnica tanto em 1D, quanto em 2D. Posteriormente, trabalhos como Matos e Osorio (2001), Goudarzi e Riahi (2012), Zhang e Ulrych (2003) e Leite et al. (2008) também utilizaram a transformada Wavelet mas com metodologias e resultados diferentes.

O primeiro trabalho utiliza a transformada Wavelet para supressão de da dos sísmicos no domínio do tiro tanto em 1D, quanto em 2D, já o segundo utiliza um método de árvore dupla com dupla densidade e a transformada Wavelet discreta, chamada pelos autores de DDDTDWT, para atenuar o *ground-roll* e outros ruídos em seções pré e pós-*stack*. No terceiro trabalho foi utilizado a estrutura de supressão de ruído da transformada Wavelet levando em conta características de dados sísmico, chamado pelos autores de *physical wavelet frame denoising*, utilizando dados reais e sintéticos para supressão de ruído de rolamento superficial, outros ruídos coerentes e ruídos aleatórios. O último trabalho utiliza análise Wavelet juntamente com a transformada de Karhunen-Loève para uma filtragem localizada de ruídos coerentes, dando destaque ao *ground-roll*.

Desta forma, a transformada Wavelet prova-se como uma ferramenta matemática de uso satisfatório em áreas não relacionadas a geofísica e também na área de geofísica em si. Além disso, mostra-se como uma ferramenta para supressão de ruídos coerentes e aleatórios em diversos tipos de dados geofísicos, principalmente a atenuação do ruído de rolamento superficial em dados de sísmica de reflexão.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é avaliar o uso da ferramenta matemática da transformada Wavelet na supressão do ruído de rolamento superficial, comparando também os resultados com a filtragem *F-K* e passa-banda. Para este procedimento foram usado dados reais, sendo estes oriundos da biblioteca de dados em Yilmaz (2001) e uma linha cedida pelo *British Geological Survey*, a *Kellingley Line*, disponível em BGS (2017). É importante ressaltar que todos os dados utilizados e apresentados pelo presente trabalho são abertos e disponíveis gratuitamente para download.

Para a implementação da transformada Wavelet será utilizado o software Matlab,

referente a empresa *MathWorks*, disponível através de licença acadêmica. Para se obter resultados comparativos, foram feitas filtragens passa-banda simples e a utilização de filtragem $F-K$, ambas utilizando o software Seismic Unix, referente ao *Center of Wave Phenomena of the Colorado School of Mines*, disponível em CWP... (1998).

1.1 Organização do Trabalho

No presente trabalho será apresentado primeiramente uma introdução teórica, referente ao Capítulo 2, para o melhor entendimento da teoria, do objetivo e do próprio *ground-roll*. Após a apresentação da teoria introdutória, será descrita a transformada de Fourier em conjunto com sua revisão bibliográfica dentro e fora do campo da geofísica, referente ao Capítulo 3, e, finalizando a seção teórica, com a apresentação da teoria referente a transformada Wavelet, Capítulo 4, onde é analisado a teoria da transformada contínua e discreta juntamente com a revisão bibliográfica do tema.

Após os capítulos teóricos será apresentada a metodologia aplicada durante o desenvolvimento do trabalho, juntamente com seus respectivos parâmetros de avaliação, Capítulo 5, posteriormente, será apresentado o capítulo referente aos resultados, Capítulo 6. Por fim, o Capítulo 7 irá apresentar as conclusões encontradas após a análise e processamento dos dados.

2 Introdução Teórica

Neste capítulo será apresentado o referencial teórico necessária para o entendimento dos conceitos utilizados e aplicados em capítulos adiante e durante o desenvolvimento do presente trabalho.

Na primeira seção será exibido o método geofísico da sísmica de reflexão, levantamento geofísico mais utilizado pela indústria de exploração e origem dos dados a serem utilizados no desenvolvimento do trabalho. Sendo assim, sua explicação, ainda que seja introdutória, necessária, para o entendimento do tema.

Já na segunda seção, será apresentada a teoria para ondas sísmicas, origem da fonte de informação adquirida pelo método da sísmica de reflexão, e suas variantes, as ondas de corpo e de superfície. Por fim será apresentada a definição do ruído de rolamento superficial.

2.1 Sísmica de Reflexão

O levantamento sísmico de reflexão é a técnica geofísica mais utilizada e conhecida pela indústria de exploração. No estágio em que seu desenvolvimento se encontra este método tem a capacidade de fornecer uma resolução de dezenas de metros em subsuperfície, atingindo profundidades até o limite da litosfera. Através dos dados provenientes de tal método, também é possível obter informações relevantes sobre a geometria dos estratos e a configuração estrutural presente em subsuperfície, levando a indicações litológicas e possíveis locais de acúmulo de hidrocarbonetos.

O método consiste na emissão de energia sísmica através de fontes artificiais, e.g., *air-guns*, *boomers*, *sparkers* e entre outros. Por conseguinte, a perturbação gerada por essas fontes são refletidas ao se depararem com interfaces geologicamente distintas e, ao chegarem a superfície, são registradas por receptores (Figura 1). Os tempos de percurso são medidos assim como a amplitude de chegada das ondas refletidas onde, posteriormente, podem ser convertidos em estimativas de profundidade das interfaces geológicas (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

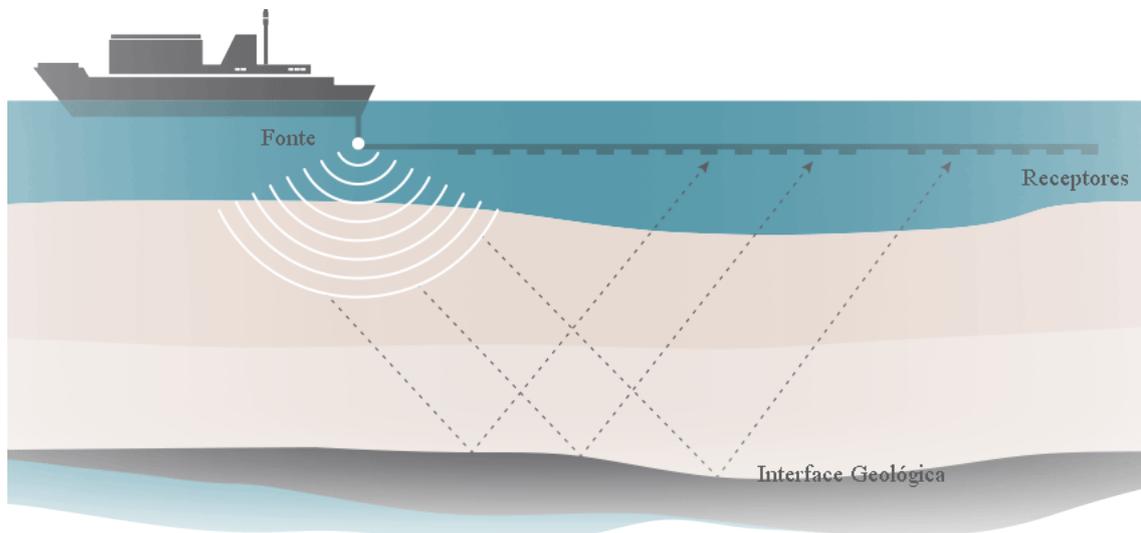
A propriedade física que define a quantidade de energia refletida, derivada de uma onda sísmica incidente, é a impedância acústica, Equação 2.1, mais precisamente, o contraste entre essa propriedade inerente a uma interface entre duas rochas. Onde, ρ é a densidade do corpo, V a velocidade de propagação da onda nele e Z a impedância acústica;

$$Z = \rho \cdot V ; \quad (2.1)$$

Por conseguinte, o coeficiente de refletividade da Terra, medida numérica representativa do efeito de uma interface sobre a propagação da onda, pode ser relacionado, através de devidas simplificações, com o contraste de impedância presente em uma interface, de acordo com a Equação 2.2, fazendo parte de uma série de equações mais conhecidas como equações de Zoeppritz. Vale ressaltar que a fórmula apresentada é dada para um raio incidente normal. Para um estudo mais aprofundado sobre tais equações e devidos desenvolvimentos recomenda-se a leitura de Zoeppritz e Erdbebnenwellen (1919) e Sheriff e Geldart (1982);

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} ; \quad (2.2)$$

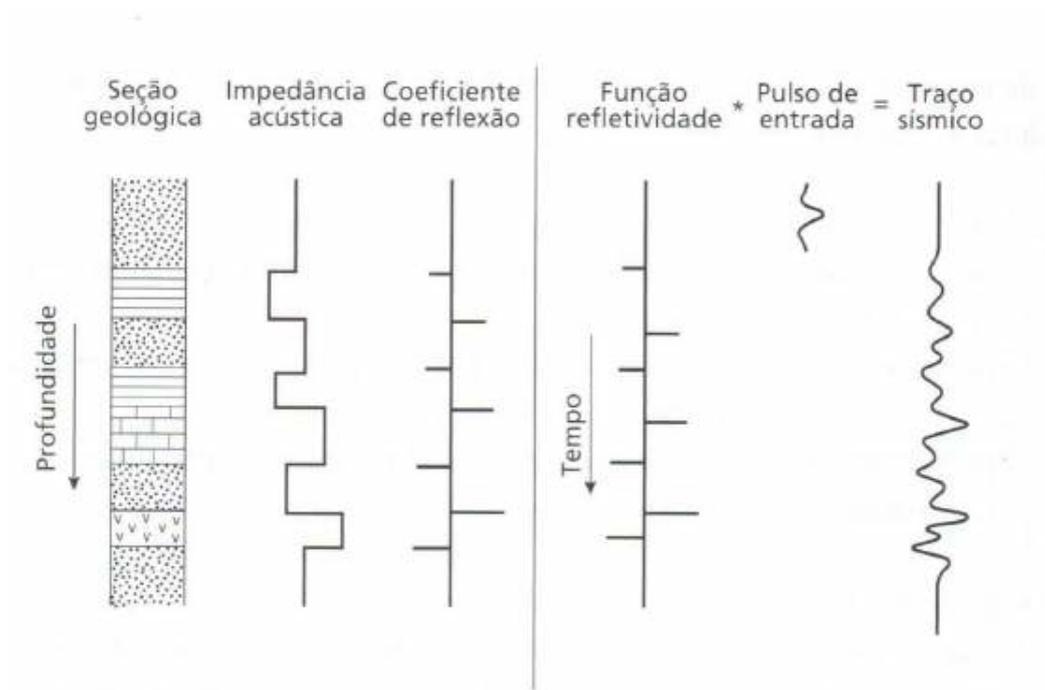
Figura 1 – Representação gráfica de uma levantamento sísmico marinho.



Fonte: Adaptado de SeismicSurvey (2017).

Desta forma, ao interagir com o coeficiente de reflexão da Terra, a assinatura da fonte, resposta impulsiva derivada do tipo de fonte de perturbação utilizado durante o levantamento dos dados, gera o traço sísmico, sendo esse o sinal captado pelos receptores em superfície. A Figura 2 explicita graficamente este processo. É importante salientar que tal modelo apresentado para o traço sísmico é considerado estacionário e simplificado, ou seja, a assinatura da fonte não muda sua forma e fase ao longo do domínio do tempo e diversas suposições são assumidas, para estudo mais aprofundado de outros tipos de modelos recomenda-se a leitura de Yilmaz (2001), Russell (1988), Osman e Robinson (1996), Mendel (2013) e entre outros.

Figura 2 – Representação gráfica para o modelo convolucional estacionário do traço sísmico.



Fonte:

Kearey, Brooks e Hill (2002).

Ao final de um levantamento sísmico se obtém uma determinada quantidade de traços sísmicos, um para cada receptor em dado *tiro* - geração de uma perturbação na terra ou água a partir de uma fonte sintética. Desta forma, pode se organizar esses traços de diversas formas, sendo uma das mais usuais em etapas iniciais do processamento de dados sísmicos a organização de traços por tiro, também chamado de dado no domínio do tiro. Assim, a Figura 3 é apresentado um exemplo de dado sísmico no domínio do tiro. Pode-se observar que além dos eventos que retornam informações relevantes, demarcados em verde na imagem, também há a presença de ruídos mascarando-os, como por exemplo o *ground-roll* juntamente com reverberações de ondas superficiais e canais defeituosos, demarcados em vermelho e laranja respectivamente.

Após diversas etapas de processamento e filtragem, os dados sísmicos não só possuem uma relação sinal ruído mais alta, como as devidas correções e ajustes necessários para a construção de uma imagem sísmica também são aplicados. Nota-se que em um dado no domínio do tiro, vide Figura 3, pode se identificar alguns eventos referentes a reflexão da onda que podem trazer possíveis informações, todavia a geometria da mesma não é representada. Diferentemente, a Figura 4 apresenta um exemplo de sismograma já processado, podendo-se notar a representação da geologia e ratificando a importância e necessidade das etapas supracitadas.

Figura 3 – Tiro 25 da biblioteca de dados abertos de Yilmaz (2001) editado.

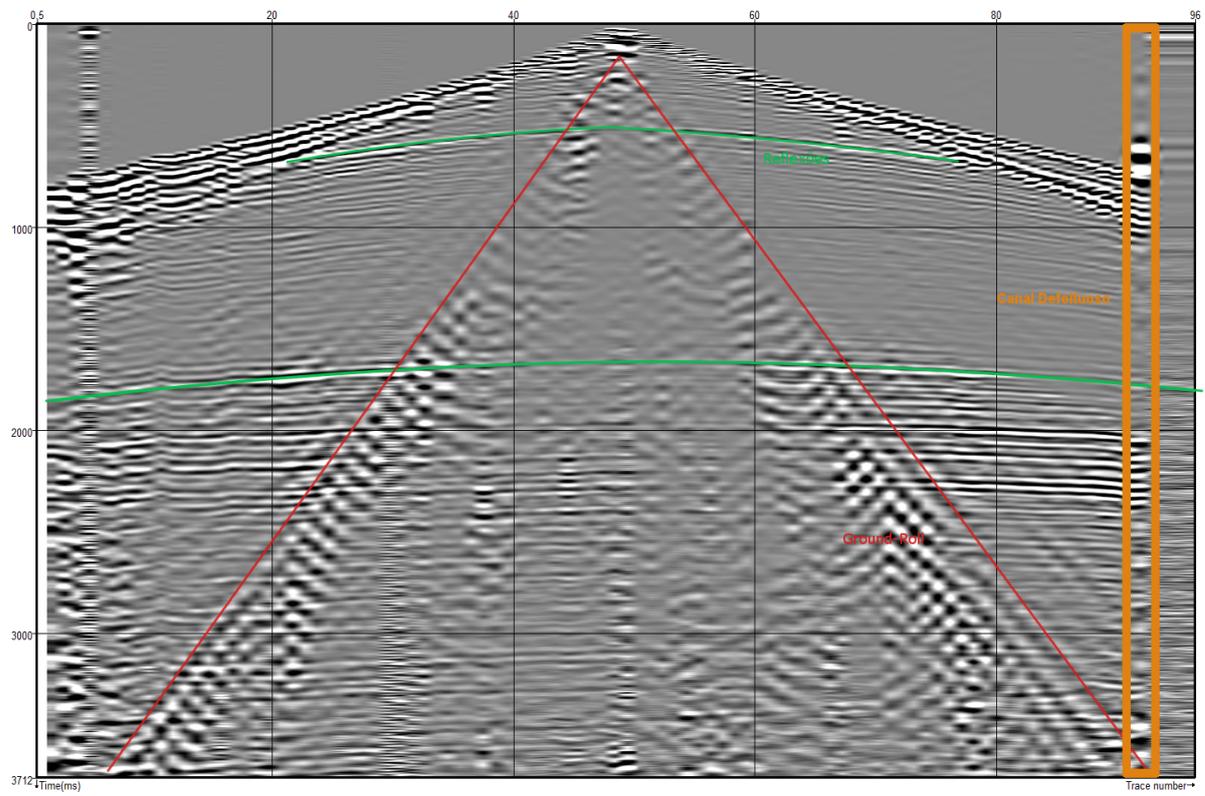
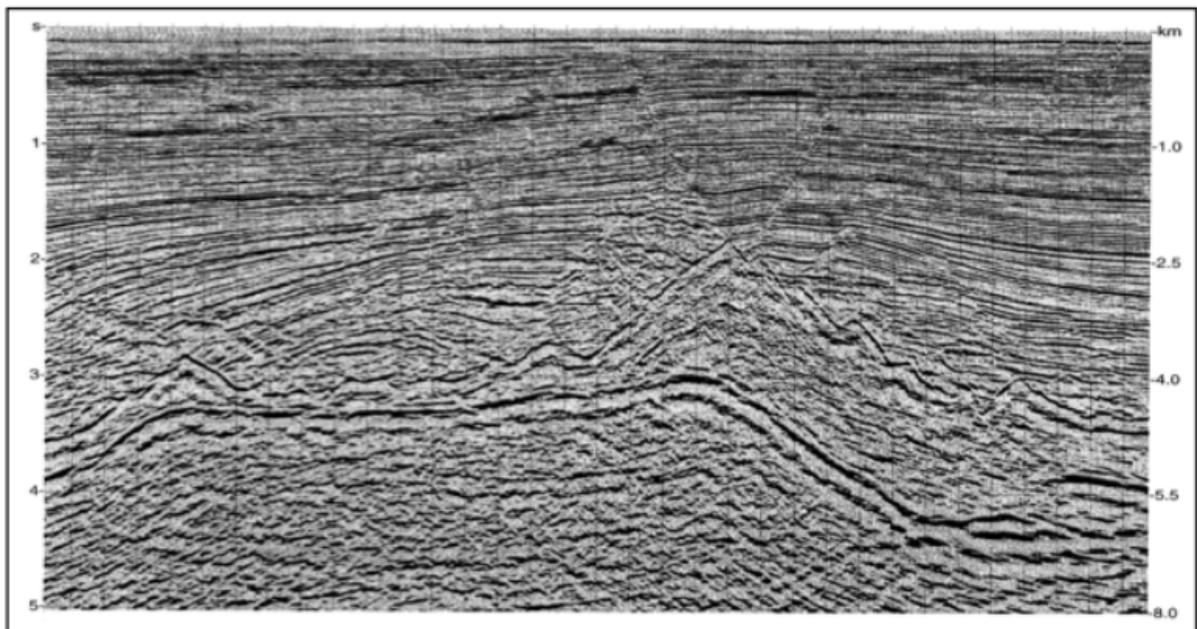


Figura 4 – Exemplo de imagem sísmica gerada a partir do processamento e filtragem de dados sísmicos.



Fonte: Yilmaz (2001).

Para um melhor entendimento da origem do ruído de rolamento superficial e sua relação com os dados sísmicos é fundamental um entendimento mais aprofundado da origem física desses dados, ou seja, as ondas sísmicas, apresentado na seção seguinte.

2.2 Ondas Sísmicas

De acordo com Kearey, Brooks e Hill (2002), ondas sísmicas podem ser definidas como pacotes de deformação elástica que se propagam radialmente a partir de uma fonte sísmica, seja ela natural ou sintética. No caso de um levantamento sísmico, que utiliza fontes sísmicas sintéticas, são gerados trens de onda de curta duração, os pulsos, compostos por uma variedade de frequências.

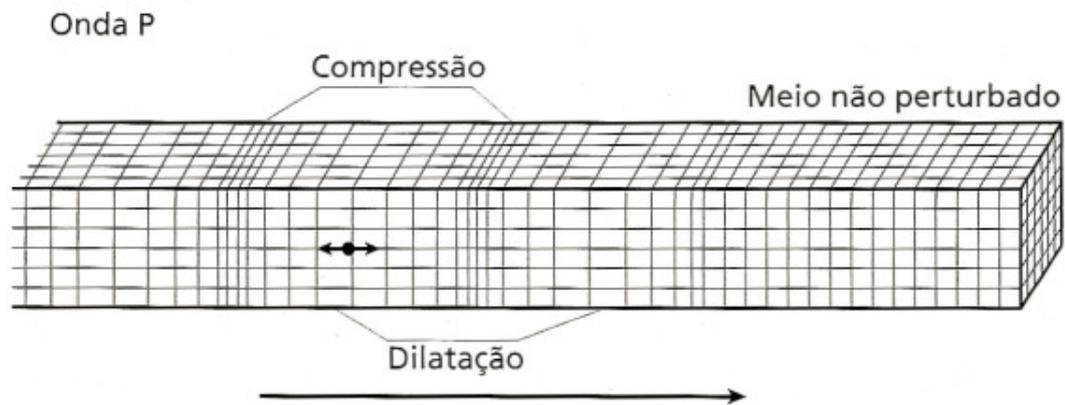
Sob a premissa que as perturbações geradas por essas ondas sísmicas são elásticas, exceto nas proximidades da fonte sísmica, devido as deformações infinitesimais, pode-se obter estimativas de suas respectivas velocidades de propagação através dos módulos elásticos e densidades dos materiais nas quais elas se propagam. Por sua vez, as ondas sísmicas podem ser classificadas em dois tipos: ondas de corpo e ondas superficiais.

2.2.1 Ondas de Corpo

Ondas de corpo se propagam através de um corpo sólido, do que pelos limites que compõem o mesmo (OILFIELDGLOSSARY, 2017). Essas ondas, por sua vez, podem ser classificadas em dois tipos: ondas compressionais e ondas cisalhantes.

As ondas compressionais, ou também chamadas de ondas primárias, ou ondas- P , deslocam-se através deformações paralelas a sua direção de propagação, gerando um movimento de partículas através de compressão e expansão, como pode ser visto graficamente na Figura 5. Tal movimento de propagação permite que a onda primária se propague tanto por corpos sólidos, quanto fluídos. É importante ressaltar que a passagem de uma onda de corpo gera apenas oscilação das partículas que compõem o meio, e não o deslocamento das mesmas.

Figura 5 – Representação gráfica de oscilação de partículas referente a passagem de uma onda compressional.



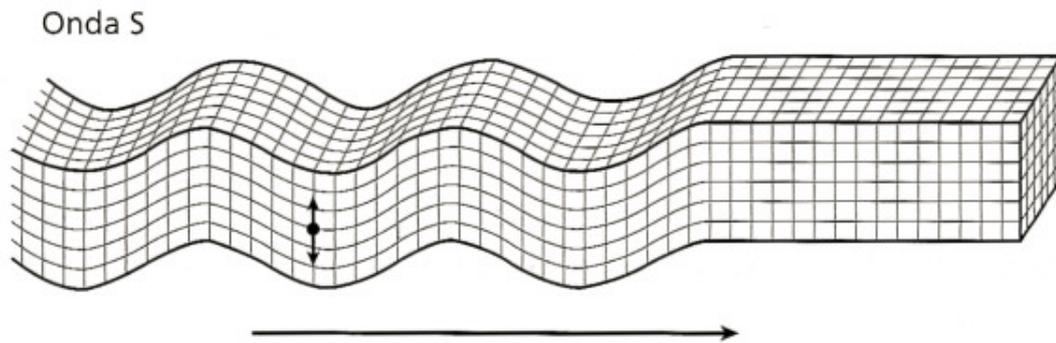
Fonte: Adaptado de Bolt (1982).

Ao considerar a passagem de uma onda- P em um corpo homogêneo e isotrópico, sua velocidade de propagação se dá pela Equação 2.3. Onde K é módulo de volume, mais comumente conhecido como *bulk modulus*, μ representando o módulo de rigidez, conhecido como *shear modulus*, e ρ a densidade do material;

$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}} ; \quad (2.3)$$

Já as ondas de cisalhamento, também conhecidas como ondas secundária, ou ondas- S , deslocam-se por meio de cisalhamento puro ortogonal a direção de propagação de onda, como pode ser visto graficamente na Figura 6. Diferentemente da onda primária, a onda- S não se propaga por meios fluídos, visto que os mesmos possuem módulo de rigidez próximo a zero. Tal afirmação pode ser verificada através da Equação 2.4 referente a velocidade de propagação da onda- S ;

Figura 6 – Representação gráfica de oscilação de partículas referente a passagem de uma onda cisalhante.



Fonte: Adaptado de Bolt (1982).

$$V_p = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} ; \quad (2.4)$$

Apesar de fornecer informação sobre a geometria de geologia em subsuperfície através de imagens sísmicas, a onda- P é um indicador ambíguo de litologia e importantes propriedades físicas das rochas, vide Equação 2.3. Para isso, a razão entre as duas velocidades, V_p/V_s , é utilizada para se estimar a razão de Poisson, σ , uma grandeza independente da densidade do corpo e um indicador litológico muito mais preciso. A Equação 2.5 apresenta expressão matemática, com determinadas suposições assumidas, para a razão V_p/V_s ;

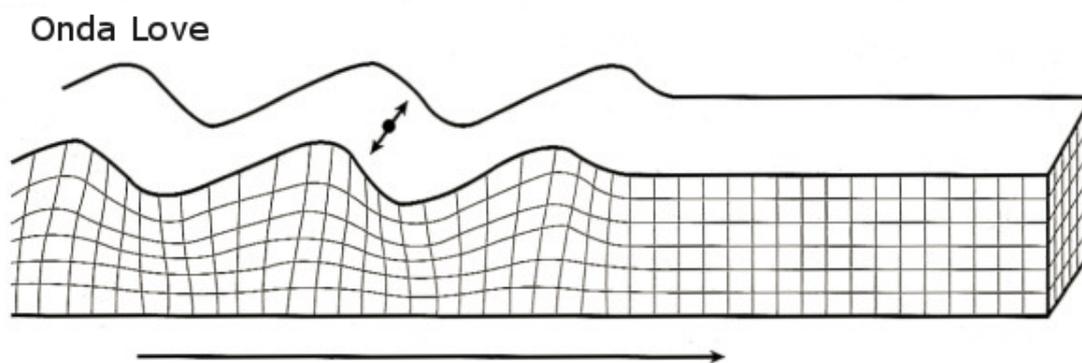
$$V_p/V_s = \sqrt{\frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma}} ; \quad (2.5)$$

2.2.2 Ondas Superficiais

De acordo com OilfieldGlossary (2017), ondas superficiais são ondas que se propagam em interfaces entre dois meios ou corpos de propriedades físicas distintas e não através deles. Neste caso, duas ondas são as mais conhecidas, as onda Love e Rayleigh.

As ondas Love são ondas de cisalhamento polarizadas, com movimento da partícula paralelo a superfície, ou interface, e ortogonal a direção de propagação da onda. A velocidade de propagação dessas ondas é intermediária entre ondas-S superficiais e ondas-S propagantes em porções mais adentro da superfície, região onde as ondas Love são inerentemente dispersivas. Um esquema gráfico da oscilação de partículas na presença deste tipo de onda é apresentado pela Figura 7.

Figura 7 – Representação gráfica de oscilação de partículas referente a passagem da onda Love.



Fonte: Adaptado de Bolt (1982).

Por sua vez, as ondas Rayleigh geram um movimento elíptico oblato nas partículas, perpendicularmente a direção de propagação da onda. Tal movimento de rotação é retrógrado, ou seja, contrário ao sentido de propagação da onda, e se assemelha a um rolamento estático de partícula, vide Figura 8. Através de dada característica de propagação, pode-se considerar que as ondas Rayleigh são geradas através da combinação de ondas compressionais e a componente vertical de ondas cisalhantes. Sua velocidade de propagação é menor que a referente ondas-*S*.

A passagem desta onda não perturba apenas a superfície livre do meio, mas também afeta partículas abaixo. É importante ressaltar que a amplitude do movimento decresce exponencialmente com o aumento da profundidade.

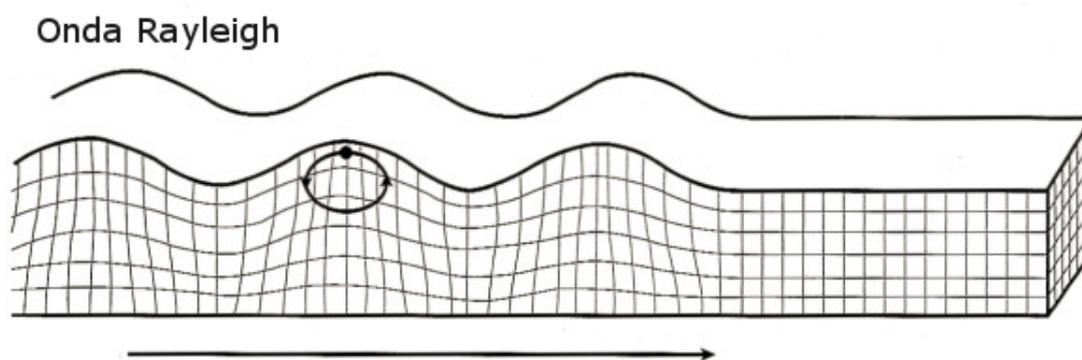


Figura 8 – Representação gráfica de oscilação de partículas referente a passagem da onda Rayleigh. Fonte: Adaptado de Bolt (1982).

2.3 Ruído de Rolamento Superficial

De acordo com OilfieldGlossary (2017), o ruído de rolamento superficial, também conhecido como *ground-roll*, pode ser definido como um tipo de ruído coerente gerado por um tipo de onda Rayleigh de típica baixa-velocidade, normalmente de 100 à 1000 m/s , baixa frequência, por volta dos 10 Hz , e alta amplitude. Tais características singulares permitem a diferenciação do ruído e do sinal de interesse, como pode ser visto na Figura 3. Através da mesma imagem, pode-se notar que em sismogramas o *ground-roll* dispõem-se na forma de um cone, ou semi-cone, se o arranjo utilizado para a aquisição for de lanço-lateral, com uma inclinação quase na vertical e alta amplitude, sobrepondo-se a eventos de interesse tanto próximos a superfície, quanto mais profundos.

Evidencia-se assim a necessidade de desenvolvimento e aplicação de técnicas capazes de suprimir dos dados sísmicos o ruído de rolamento superficial, como a transformada de Fourier e a transformada Wavelet, a serem apresentadas em capítulos seguintes. Caso este ruído não seja devidamente filtrado, pode prejudicar etapas seguintes de processamento dos dados e posterior interpretação dos mesmos.

3 Transformada de Fourier

Como já enfatizado no capítulo anterior, algumas etapas durante o processamento e interpretação sísmica em sí são extremamente sensíveis a ruídos inerentes ao dado. Caso o tratamento de tais dados não for satisfatório, pode-se impactar negativamente em algoritmos de inversão e/ou migração sísmica, afastando assim a seção sísmica final de um modelo geologicamente plausível.

Desta forma, ferramentas de filtragens são amplamente utilizadas e desenvolvidas pela indústria e pela academia com o intuito de impactar positivamente na relação sinal/ruído de dados sísmicos e atenuar ruídos coerente e aleatórios dos mesmos. Sendo assim, o presente capítulo tem como finalidade apresentar a ferramenta matemática da transformada de Fourier, base para diversas técnicas de filtragem utilizadas em processamento de sinais, no campo da geofísica e em especial do método sísmico de reflexão, e sua referente revisão bibliográfica focada na área da geofísica.

3.1 Revisão Bibliográfica

A transformada de Fourier é uma ferramenta matemática que descreve funções por meio de exponenciais complexas. Sua aplicação no processamento de sinais, tanto digitais quanto analógicos, variam no âmbito de imagens, como pode ser visto em Russ et al. (1994) e Xizhi (2008), dados de telecomunicações, exemplificado por trabalhos como Felder, Mason e Evans (1998) e Wala (2000), dados geofísicos e entre outras área, tendo aplicação para análise de dados tanto 1D, quanto 2D.

No âmbito da geofísica diversos exemplos de obras fazem utilização desta ferramenta matemática, seja para puramente análise e estudo de determinado dado, ou para filtragem do mesmo. Em Partyka, Gridley e Lopez (1999), que utilizaram a transformada de Fourier discreta para decomposição espectral aplicada a caracterização de reservatório, os autores apresentam resultados de imageamento e mapeamento temporal de estratos através do espectro de frequência dos dados e descontinuidades geológicas laterais através do espectro de fase. Já em Gülünay (2003), é realizado uma interpolação adaptativa no domínio da transformada de Fourier 2D, tal método permite a aplicação de um operador de interpolação no domínio da transformada, preenchendo assim traços nulos presentes nos domínios do espaço e tempo onde dados interpolados são necessários.

No caso de aplicação da transformada de Fourier para filtragem de dados sísmicos, pode-se notar uma gama de publicações voltadas para a área. Em Canales (1984), os autores utilizam uma visualização no domínio da frequência e do espaço, $f-x$, para melhor a análise e visualização dos dados, para assim realizar uma filtragem mais incisiva de ruídos aleatórios em regiões de razoável complexidade geológica. Já em Askari e Siahkoochi (2008) são utilizadas variações da filtragem $F-K$, $x-f-k$ e $t-f-k$, e a transformada S para atenuação de *ground-roll*, neste trabalho, particularmente, os autores ressaltam a dificuldade encontrada na arquitetura de um filtro 2D para a remoção de tal ruído.

Já em Beresford-Smith e Rango (1988), é apresentado um fluxo de processamento de 3 etapas para atenuação de ruídos dispersivos no domínio tempo e espaço, $t-x$, em dados reais do Ártico. As etapas consistem em compressão traço por traço através de um operador linear no domínio da frequência, a respectiva eliminação dos ruídos e posteriormente a inversão da compressão aplicada. Os mesmos autores posteriormente, em Beresford-Smith e Rango (1989), utilizam diferentes técnicas de janelamento de dados, mais especificamente utilizando os domínios $f-k$ e $t-x$, para filtragem do ruído de rolamento superficial.

3.2 Transformada de Fourier Contínua

A teoria matemática da transformada de Fourier foi desenvolvida por Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), apresentada em seu trabalho Teoria Analítica do Calor. Desde então, a ferramenta matemática desenvolvida por Fourier é a base do processamento de sinais, convertendo sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência (DISTEFANO; STUBBERUD; WILLIAMS, 1997).

Desta forma, a transformada de Fourier de uma função contínua e integrável no tempo, $f(t)$, é representada de acordo com a Equação 3.1 e a transformada inversa representada pela Equação 3.2, dadas abaixo. Onde, ω representa a frequência angular, F o operador de Fourier, j o número complexo $\sqrt{-1}$;

$$X(\omega) = F[f(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt ; \quad (3.1)$$

$$f(t) = F^{-1}[X(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega ; \quad (3.2)$$

Considerando uma função ou sinal não periódico, a transformada de Fourier $X(\omega)$ representa as especificações no domínio da frequência da função $f(t)$ e é denominado como espectro de frequência desta função. Através do espectro de magnitude desta função $|X(\omega)|$ e do espectro de fase $\phi(\omega)$ representados pela Equação 3.3, pode-se obter a representação gráfica de uma desejada função no domínio desta transformada. É importante ressaltar que a transformada de Fourier possui inúmeras propriedades e características matemáticas inerente a tal ferramenta como por exemplo linearidade, simetria e entre outros. Todavia, a construção matemática e seus desdobramentos não são enfoque do presente trabalho, para isso recomenda-se a leitura de DiStefano, Stubberud e Williams (1997), Oppenheim (1999) e Bracewell (1986);

$$X(\omega) = |X(\omega)| e^{j\phi(\omega)} ; \quad (3.3)$$

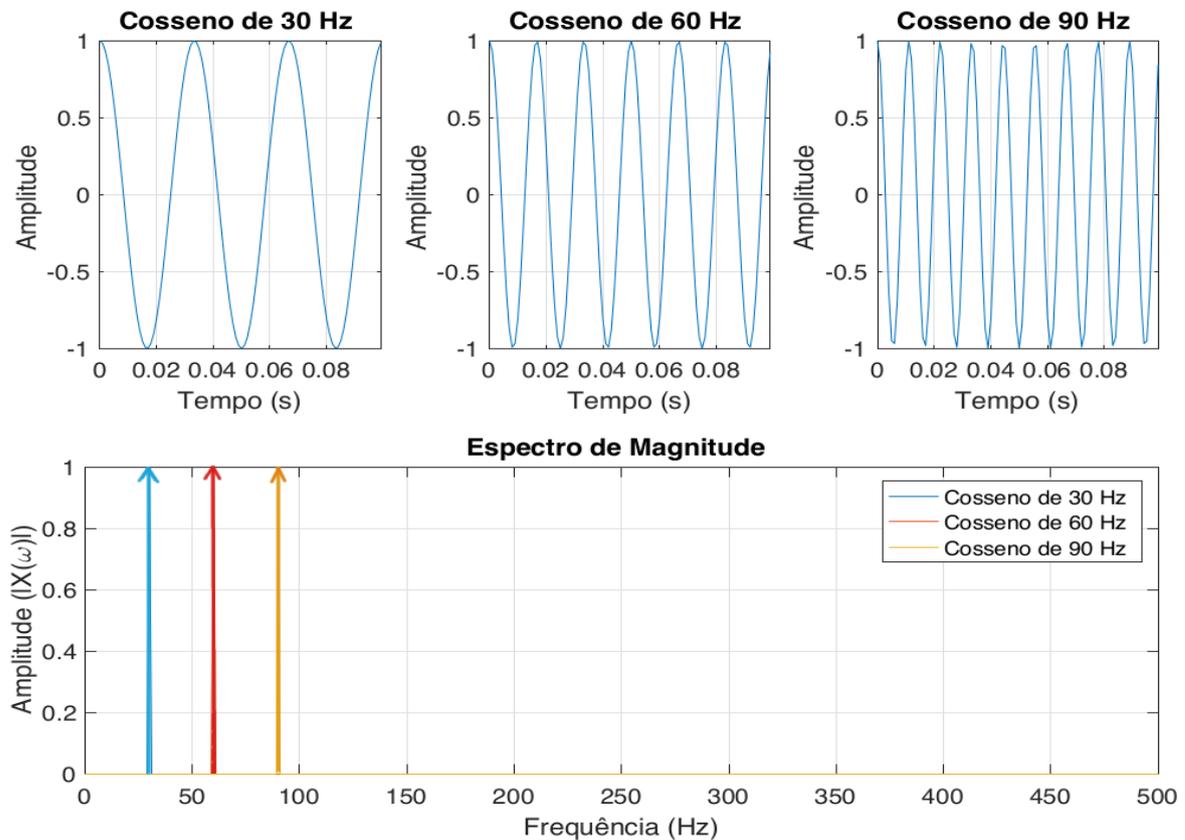
A Figura 9 apresenta um exemplo da utilização da transformada de Fourier. As três imagens acima exibem 3 sinais cossenoidais de 30, 60 e 90 Hz , respectivamente. Abaixo das mesmas é apresentado o espectro de magnitude composto pela soma destes sinais, evidenciando assim a frequência fundamental de cada composição com extrema precisão. Tal análise é útil, visto que identificar as frequências de cada harmônico sem a ferramenta da transformada de Fourier seria uma tarefa não trivial e custosa.

A estender o conceito da transformada de Fourier para o caso de uma função bidimensional $f(x, t)$ contínua e integrável em ambas as dimensões, pode-se definir a transformada de acordo com a Equação 3.4 e sua respectiva inversa definida pela Equação 3.5. Onde, ω e μ representam as frequência referentes aos domínios da função, espaço e tempo, temperatura e entre outros, F o transformador de Fourier, j o número complexo $\sqrt{-1}$;

$$X(\omega, \mu) = F[f(x, t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, t) e^{-j2\pi(\omega x + \mu t)} dx dt ; \quad (3.4)$$

$$f(x, t) = F^{-1}[X(\omega, \mu)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega, \mu) e^{j2\pi(\omega x + \mu t)} d\omega ; d\mu \quad (3.5)$$

Figura 9 – Representação gráfica da transformada de Fourier de um sinal composto pela soma dos três sinais cossenoidais. Acima estão representados os cossenos que compõem tal sinal de análise e abaixo o respectivo espectro de magnitude do mesmo.



3.3 Transformada de Fourier Discreta

Na seção anterior foi apresentada a transformada contínua de Fourier, que é aplicada para funções contínuas e integráveis em todo o seu domínio. Todavia, no processamento de sinais trabalha-se com funções discretas, isso inclui o processamento de dados geofísicos. Além disso, os sistemas e tecnologias digitais utilizadas e desenvolvidas hoje em dia utilizam a discretização de sinais contínuos, reduzindo-os há quantidade finitas de amostras.

Desta forma, a transformada de Fourier de um sinal ou função discretizado $f[n]$ é representada de acordo com a Equação 3.6 e a transformada inversa correspondente dada pela Equação 3.7, dadas abaixo. Onde, Ω representa a frequência em radianos, F o transformador de Fourier, j o número complexo $\sqrt{-1}$, N o número de amostras do sinal e n o índice de cada amostra;

$$X(\Omega) = F[f[n]] = \sum_{n=0}^{N-1} f[n] e^{-j\Omega n} ; \quad (3.6)$$

$$f[n] = F^{-1}[X(\Omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(\Omega) e^{j\Omega n} d\Omega ; \quad (3.7)$$

Como enfoque do presente trabalho não envolve o desenvolvimento matemático das equações acima, tais deduções e suposições consideradas na transformada de Fourier discreta não serão apresentadas. Para tal, é recomendado a leitura de DiStefano, Stubberud e Williams (1997), Oppenheim (1999) e Bracewell (1986).

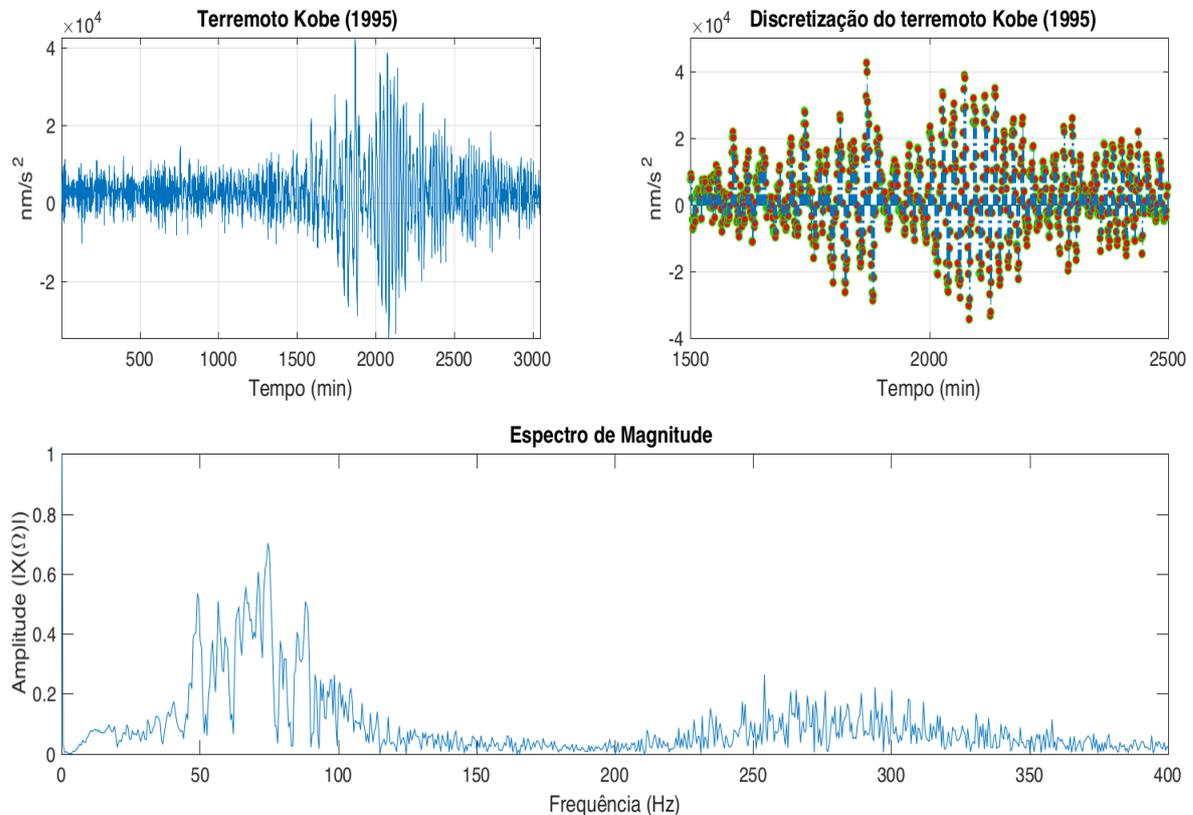
Analogamente ao caso da transformada de Fourier contínua, seu caso discreto, $X(\Omega)$, de um sinal finito e não periódico, $f[n]$, pode ser expressada de acordo com a Equação 3.8. Por ser contínuo no domínio do tempo, esta transformada representa as definições do domínio da frequência de $f[n]$, chamado também de espectro de frequência da função ou sinal. Desta forma, a grandeza $|X(\Omega)|$ é referida como espectro de magnitude e $\phi(\Omega)$ o respectivo espectro de fase de $f[n]$;

$$X(\Omega) = |X(\Omega)| e^{j\phi(\Omega)} ; \quad (3.8)$$

A Figura 10 exibe um exemplo de utilização da transformada de Fourier discreta em uma dimensão. No caso, têm-se o registro do terremoto Kobe que ocorreu em 1995 no Japão. Ao lado do registro do sismograma é apresentada a porção do sinal discretizada utilizada para análise com frequência de amostragem de 1 Hz. Abaixo destas, apresenta-se o espectro de frequência do sinal parcial.

Percebe-se que diferentemente do sinal contínuo apresentado na Figura 9, o espectro de magnitude referente ao terremoto Kobe possui um pacote de frequência mais variado. Possuindo assim, tanto baixas frequências, quanto informações em altas frequências, atingindo os 400 Hz.

Figura 10 – Representação gráfica da transformada de Fourier de porção discretizada do sismograma referente ao terremoto Kobe de 1995. Acima estão representados o sinal captado pelo sismógrafo e a porção discretizada considerada para análise, e abaixo o respectivo espectro de magnitude do mesmo.



A transformada de Fourier em duas dimensões possui diversas formulações, visto que sinais bidimensionais podem possuir variações quanto continuidade, ou periodicidade, nas duas direções. Na seção anterior, foi apresentado o caso para um sinal bidimensional contínuo e periódico em seus dois domínios, vide Equação 3.4 e Equação 3.5. Neste caso, por se tratar da transformada de Fourier discreta, será considerado um sinal discreto e aperiódico nas duas direções, $f[n, m]$, e seu par de Fourier é apresentado pela Equação 3.9 e Equação 3.10, sendo a primeira equação a transformada direta e a segunda a transformada inversa.

Ressalta-se que tal sinal considerado para apresentação da transformada de Fourier 2D discreta é devido a grande maioria dos sinais geofísicos e casos de processamento de sinais enquadrarem-se em tal categoria. Para as equações, considerações e outras suposições referentes a outros tipos de sinais recomenda-se a leitura de Bracewell (1986);

$$X[\Omega, \Lambda] = F[f[n, m]] = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} f[n, m] e^{-j2\pi(\frac{n\Omega}{N} + \frac{m\Lambda}{M})} ; \quad (3.9)$$

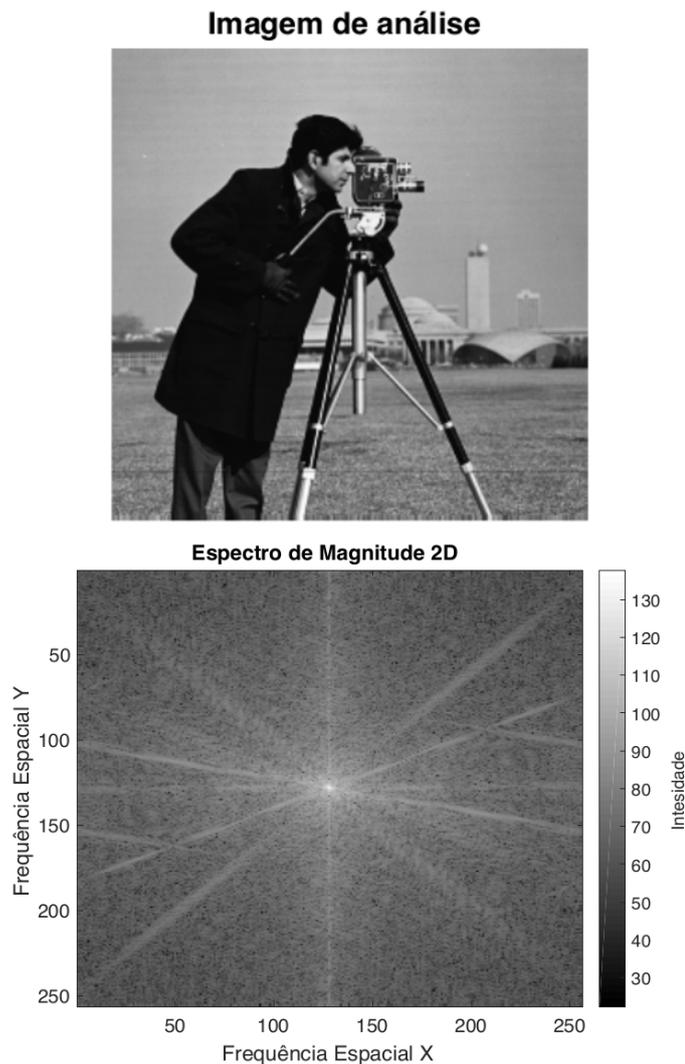
$$f[n, m] = F^{-1}[X[\Omega, \Lambda]] = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{\Lambda=0}^{M-1} \sum_{\Omega=0}^{N-1} X[\Omega, \Lambda] e^{j2\pi(\frac{n\Omega}{N} + \frac{m\Lambda}{M})} ; \quad (3.10)$$

Onde : $(0 \leq m, \Lambda \leq M - 1, 0 \leq n, \Omega \leq N - 1) ;$

Os símbolos M e N são representativos do número de amostras em ambas as dimensões, tanto temporais, quanto espaciais, F o transformador de Fourier, $X[\Omega, \Lambda]$ o espectro de frequência 2D do sinal $f[n, m]$, j o número complexo $\sqrt{-1}$, e n e m o índice de cada amostra do sinal em ambas as direções.

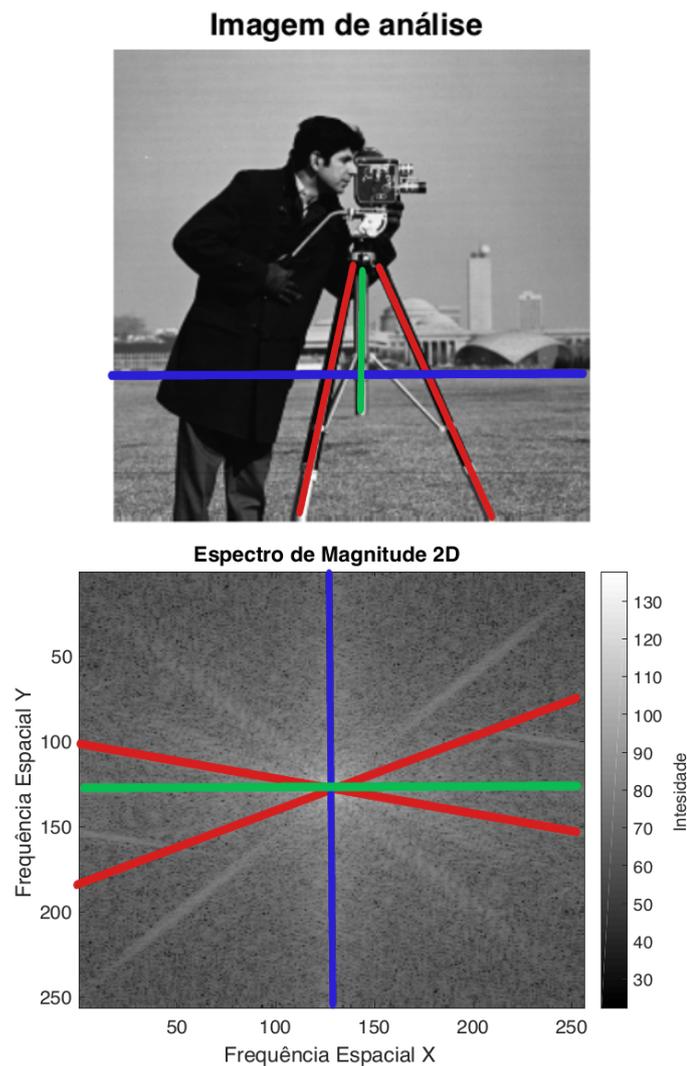
A Figura 11 apresenta um exemplo da aplicação da transformada discreta de Fourier 2D. No caso, utiliza-se uma imagem como sinal discreto de entrada e logo abaixo seu respectivo espectro de magnitude. Extremamente diferente dos gráficos apresentados anteriormente, vide Figura 9 e Figura 10, o espectro de magnitude fornece a intensidade das informações de baixa e alta frequência presentes no sinal de entrada. No centro dela estão presente as informações de baixa frequência como superfícies lisas, céus, pele e paredes em fotografias comuns. Já nas extremidades, referentes as informações de alta frequência, estão representados pontas, ruídos granulares e padrões intrincados (RUSS et al., 1994).

Figura 11 – Representação gráfica da transformada de Fourier 2D de uma fotografia. Acima é apresentada a imagem utilizada para análise e abaixo o respectivo espectro de magnitude da mesma.



Além disso, é possível referenciar no espectro de magnitude alguns eventos, e suas respectivas inclinações, a suas origens na imagem de entrada. A Figura 12 apresenta a "interpretação" de alguns eventos e seus correspondentes no espectro de magnitude, onde alguns padrões diagonais e horizontais corresponderiam aos suportes da câmera, demarcado em vermelho e verde, e o evento vertical ao claro horizonte que divide em duas seções a imagem, a divisa entre o campo e os edifícios ao fundo, demarcado em azul.

Figura 12 – Interpretação da correlação entre os eventos registrados no espectro de magnitude e suas correspondentes origens na imagem analisada.



3.4 Transformada de Fourier Janelada

Como ressaltado nesse e em capítulos anteriores, a transformada de Fourier é uma ferramenta extremamente utilizada para análise de sinais, sejam eles discretos ou contínuos. Todavia, de acordo com Cohen (1994), ao trazer a aplicação desta ferramenta matemática para o processamento e análise de sinais reais percebe-se que ao analisar estes no domínio do tempo, como o sinal é captado, e após no domínio da frequência nota-se que ambas separadamente não descrevem completamente toda a informação presente no dado.

Mais precisamente, através do espectro de magnitude e de fase, pode-se encontrar quais frequências estão presente no dado, mas não é descrito quando estas frequências existiram, visto que tais transformações não levam em conta a mudança do espectro do sinal no tempo. Por exemplo, ao analisar-se um sinal sonoro referente a uma hora de música clássica, o espectro apresentará picos nas frequências correspondentes ao violinos e

tambores, mas não haverá nenhuma indicação de quando tais instrumentos aparecem ou repetem durante o sinal. Sendo assim, caso fosse necessário realizar uma filtragem retirando-se os tambores, haveria, além da supressão das frequências referentes aos tambores, perda de informações referente a outros instrumentos.

Desta forma, a transformada de Fourier janelada aparece como uma vertente da transformada em sí para contornar tal problema de visualização através de ambos os domínios da frequência e do tempo. O procedimento é dado pela partição do sinal em menores porções de tempo e realizar a transformada de Fourier para cada partição, onde o total de cada espectro de magnitude indica como o conteúdo de frequência total do sinal varia no tempo.

Sendo assim, considerando um caso contínuo para uma função contínua e periódica, $f(t)$, pode-se reescrever a Equação 3.1 considerando a aplicação de um janelamento no tempo através de uma função de janela $h(\tau - t)$, sendo esta a transformada de Fourier janelada, explicitada pela Equação 3.11;

$$X_t(\omega) = F[f(\tau)] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) h(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau ; \quad (3.11)$$

Nota-se que o sinal de entrada, $f(t)$, está sendo modificado pela função de janela, $h(\tau - t)$, onde estes interagindo, formam uma função de dois tempos, um fixado onde se tem interesse de análise, um respectivo t do sinal, e o outro fazendo a função do tempo anterior do sinal, τ .

Para cada janela diferente têm-se diferentes espectros e a totalidade de todos representa a distribuição de tempo e frequência do sinal, chamada de espectrograma. Onde, para uma janela de curta duração no domínio tempo, têm-se uma janela correspondente no domínio da frequência maior, o mesmo acontecendo com o oposto, uma janela de longa duração no tempo corresponde a uma janela mais curta no domínio da frequência.

Todavia, deve-se ressaltar que tal variação pode representar um empecilho no processamento de sinais com uma banda de frequência variada, como por exemplo sinais sonoros e geofísicos. Deighan e Watts (1997) ressaltaram que tal técnica requer um processamento cuidadoso para o design das janeladas a serem usadas, onde as baixas frequências devem se ater a janelas maiores e altas frequências a janelas menores, levando a um problema custoso quando se tem muitas bandas de frequências a serem analisadas e a uma não análise do sinal como um todo ao longo do eixo do tempo.

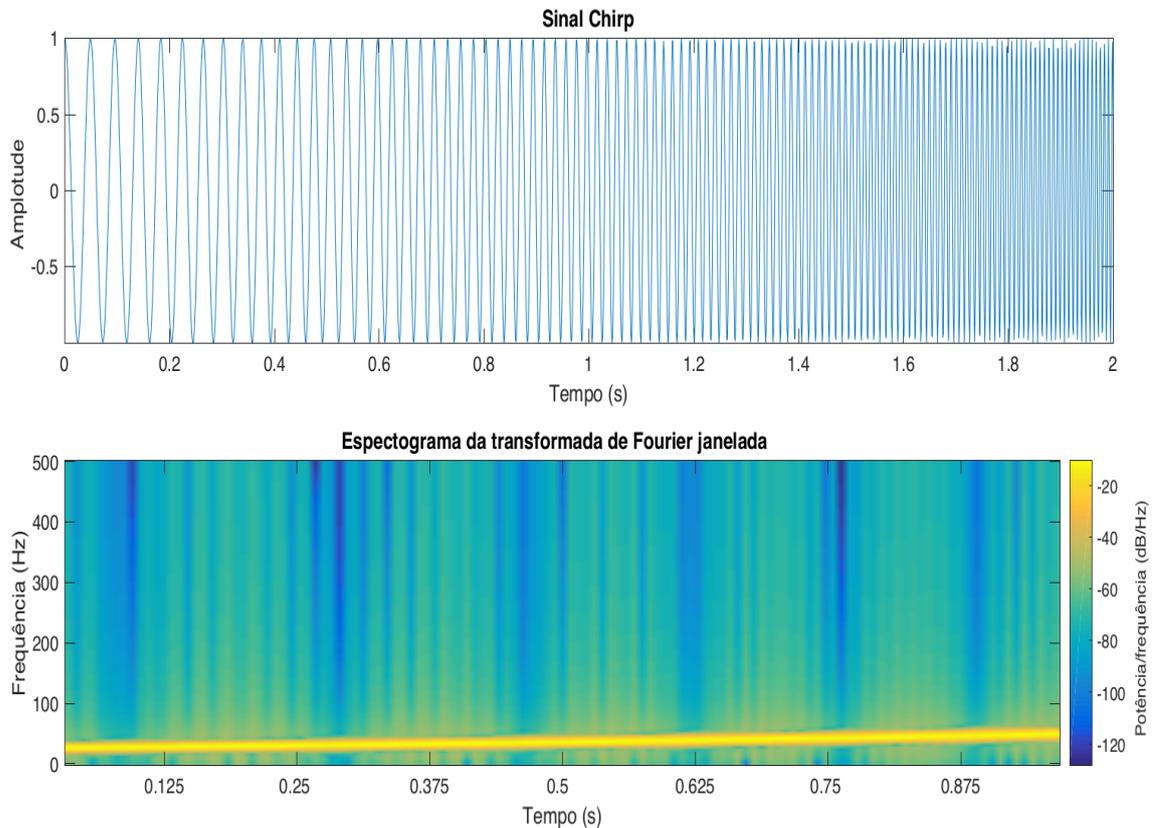
Desta forma, diversas janelas foram desenvolvidas com diferentes enfoques e diferentes limitações. As primeiras, e mais simples, a serem desenvolvidas foram as janelas retangulares. Como o nome já identifica, este tipo de janela são de formato retangular no domínio do tempo, separando a porção de análise do restante do dado de maneira

mais abrupta. Outro tipo de janela, mais usual em processamento de sinais, são as janelas *Hanning*, também conhecidas como *Hann*. Este tipo de janela é formado por um sinal cossenoidal de apenas um período, onde seus picos negativos são nulos, apenas a parte referente ao pico positivo é utilizada. Cabe ressaltar que há uma variedade enorme de designs de janelas, propriedades e limitações inerente as mesmas, para se obter um estudo mais aprofundado sobre essas funções e suas propriedades recomenda-se a leitura de Cohen (1994) e Smith (2011).

Um caso de estudo é apresentado na Figura 13, acima. Nesta imagem, um sinal *chirp* logarítmico, com frequência de amostragem de 1 ms, que começa em 20 Hz e atravessa os 60 Hz após 1 segundo de duração é apresentado na porção mais acima da imagem, logo abaixo é exibido o espectrograma do referente sinal utilizando sucessivas janelas *Hamming* com 128 amostras de comprimento e duração de apenas 1 segundo. Percebe-se que a característica logarítmica do sinal não é evidente através de seu gráfico, mas em seu referente espectrograma nota-se o princípio de uma característica logarítmica da frequência do *chirp* ao longo do tempo de duração dele.

Além disso, pode-se notar que juntamente com a exibição das frequências do sinal até um segundo, também é evidente no espectrograma a presença de informações de alta-frequência, apesar de a mesma não estar presente na janela do sinal. Tal fenômeno é devido ao processo de janelamento que ao analisar o sinal também pode apresentar informações inexistentes, evidenciando assim a necessidade de uma técnica de análise no tempo e frequência com melhor acurácia.

Figura 13 – Representação gráfica de um sinal *chirp* logarítmico e seu respectivo espectrograma.



3.5 Filtragem F-K

Foi visto nas seções anteriores que a transformada de Fourier de duas dimensões é útil para se analisar dados que possuem variações em ambas as direções que os descrevem. Através do espectro de magnitude, também chamado de espectro de densidade, é possível correlacionar eventos presentes nos sinais e suas demarcações no domínio da transformada, vide Figura 11 e Figura 12. Tal possibilidade permite a aplicação de filtros de duas dimensões com a finalidade de suprimir incisivamente eventos específicos e indesejáveis, através do domínio de Fourier, sem a perda de informação relevante.

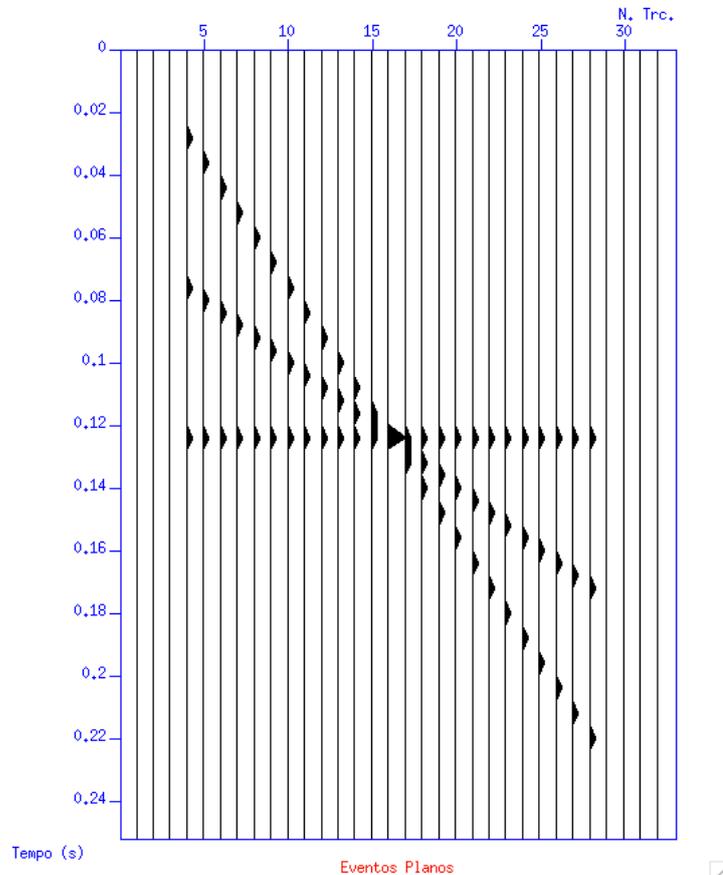
Uma das técnicas mais utilizadas no processamento de sinais é a filtragem F - K , que consiste na aplicação da transformada de Fourier de duas dimensões em dados no domínios de tempo e espaço. No caso de dados sísmicos o domínio do espaço refere-se pela distância entre cada traço e o domínio do tempo referente ao tempo de leitura do sinal. Ao aplicar a transformada de Fourier 2D estes mesmos domínios são lidos como número de onda, K , e frequência, F . Diversos tipos de ruídos coerentes, como o próprio *ground-roll*, podem ser devidamente distintos de eventos reflexivos, de interesse no método, no domínio F - K , havendo assim a possibilidade de suprimir tais ruídos sem haver perda

de informação de interesse.

A Figura 14 apresenta um exemplo de eventos planos em um sismograma sintético e a Figura 15 o seu respectivo espectro de magnitude no domínio $F-K$. Nota-se que é possível corresponder distintamente cada evento plano presente no sismograma com um respectivo registro, de inclinação diferente, no espectro de magnitude exibido na imagem abaixo, assim como no caso da Figura 11 e Figura 12. Mais precisamente, o registro ortogonal a horizontal no espectro $F-K$ corresponde ao evento horizontal no sismograma, o registro com menor ângulo com a normal corresponde ao registro com menor ângulo com a horizontal no sismograma e por último, o evento de maior ângulo com a normal corresponde ao registro de maior ângulo com a horizontal presente no sismograma.

Todavia, nota-se que há a existência de falseamentos espaciais no respectivo espectro de magnitude, mais precisamente na porção a esquerda e afetando até o meio do espectro de magnitude, empecilho constantemente presente em transformadas $F-K$ de dados sísmicos e que prejudicam uma filtragem mais incisiva de dados. É possível reduzir o impacto deste fenômeno através de um filtro anti-falseamento, entretanto, tal procedimento não garante resultados totalmente satisfatórios.

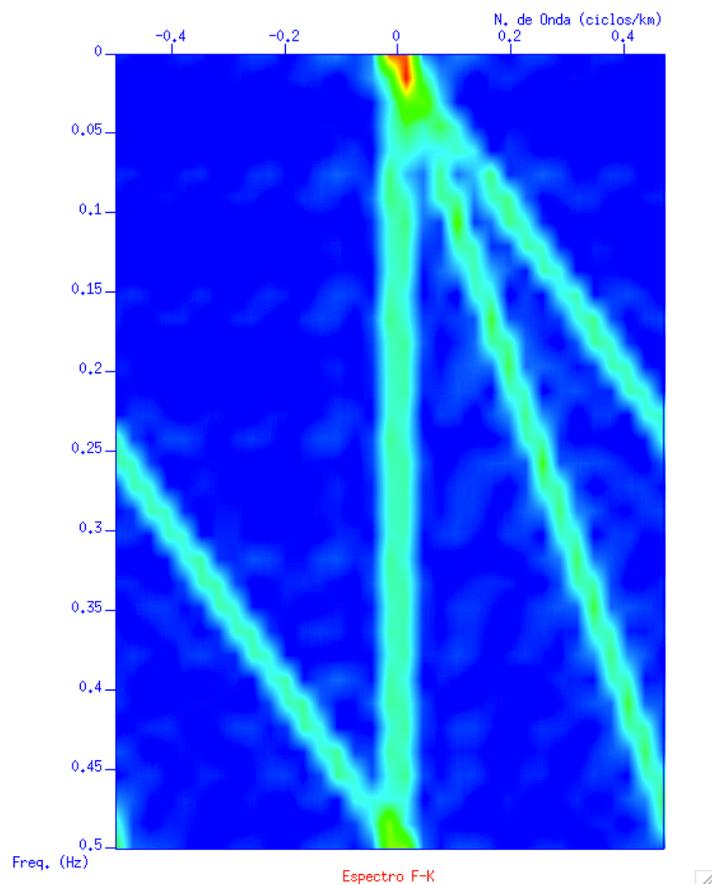
Figura 14 – Eventos planos em um sismograma sintético.



Para a filtragem de determinados eventos e/ou ruídos coerentes no domínio F - K , usa-se filtros de "velocidade aparente", mais comumente chamados de filtros de inclinação. Eventos retilíneos, ou próximo de tal característica, como ondas diretas, ondas refratadas e o ruído de rolamento superficial, possuem uma velocidade aparente característica que pode ser estimada através dos dados sísmicos tanto em domínio do espaço-tempo, quanto no domínio da transformada de Fourier. Através do gradiente dessas retas, é possível estimar a velocidade aparente do evento em questão, tendo a relação explicitada pela Equação 3.12, primeiro para o domínio de Fourier e depois para o domínio espaço-tempo. Analogamente a um filtro de frequência passa-banda, utiliza-se um vetor de inclinações contendo as velocidades que devem ser filtradas ou mantidas.

$$V_{app} = df/dk = ds/dt = 1/inclinação \quad (3.12)$$

Figura 15 – Espectro de magnitude de eventos planos em um sismograma sintético.



Todavia, é importante ressaltar que apesar de tal representação geralmente permitir que eventos indesejáveis como o ruído de rolamento superficial possam ser identificados separadamente de artefatos relacionados a reflexão de onda e ser um método que evita a deterioração do sinal a ser analisado (BERESFORD-SMITH; RANGO, 1988), a filtragem $F-K$ também possui suas desvantagens. Ademais de gerar alta demanda de análise e de uso limitado para levantamentos de baixa cobertura, o uso de filtros 2D não são triviais e podem levar a filtrações errôneas. Além disso, existe o problema do falseamento espacial, comum na filtragem $F-K$ aplicada a dados sísmicos, e parte dos eventos de interesse podem possuir inclinações similares aos ruídos coerentes, havendo perda de informação na filtragem.

Desta forma, outras técnicas foram desenvolvidas para a filtragem de dados sísmicos e geofísicos para a supressão de ruído mais incisiva e sem a perda de informação de interesse. Assim sendo, a transformada Wavelet aparece como alternativa aos métodos de filtragem que utilizam janelamento ou a filtragem $F-K$, sendo esta ferramenta matemática apresentada no próximo capítulo.

4 Transformada Wavelet

Em capítulos anteriores foi possível notar tópicos referentes ao levantamento sísmico de reflexão, onde os sinais oriundos deste método carregam informações geológicas, mas também eventos indesejáveis, sendo esses oriundos de efeitos aleatórios ou inerentes ao próprio funcionamento do levantamento. Por isso, são utilizadas técnicas e ferramentas para aumentar a relação sinal/ruído dos dados sísmicos coletados, aumentando a confiabilidade da interpretação desses dados e otimizando algoritmos utilizados para extrair ainda mais informações dos mesmos.

Assim, as ferramentas mais utilizadas são as de âmbito da filtragem digital, onde esta etapa consiste na atenuação de ruídos por meio da identificação das características particulares dos mesmos, projetando assim um filtro especial para removê-los ou suprimi-los. Ferramentas essas como a filtragem $F-K$, apresentada no capítulo anterior, utilizada em trabalhos como Canales (1984) e Askari e Siahkoohi (2008), a transformada de Fourier janelada, também apresentada no capítulo anterior, utilizada em trabalhos como Nawab e Quatieri (1988) e Allen (1977), e entre outras são desenvolvidas, estudadas e aplicadas para poder melhorar a qualidade do dado sísmico.

Todavia, grande parte delas possuem restrições e limitações quando tratam de filtragem de dados com frequência variante no tempo, vide Capítulo 1 e Capítulo 3. Desta maneira, este capítulo apresenta uma outra ferramenta, a transformada Wavelet, que surge como alternativa para estas técnicas de filtragem. Onde, o objetivo do presente trabalho é aplicação desta transformada a supressão do ruído de rolamento superficial em dados sísmicos.

Sendo assim, o presente capítulo tem como finalidade apresentar a ferramenta matemática da transformada Wavelet, utilizada em diversos métodos de filtragem de dados de uma e duas dimensões, tanta na área da geofísica, como em outras áreas, e sua referente revisão bibliográfica focada na área da geofísica.

4.1 Revisão Bibliográfica

Vários trabalhos apresentam a transformada Wavelet tratando de compressão e processamento de dados. A título de curiosidade, tal ferramenta é amplamente usada em outras áreas como por exemplo em trabalhos de Williams e Amaratunga (1994) e Sahambi, Tandon e Bhatt (1997), aplicados a área de engenharia, e em processamento de imagens como em trabalhos de Xizhi (2008) e Kingsbury (1999). Todavia, como o enfoque do presente trabalho é referente a área da geofísica, demais aplicações não serão apresentadas.

No âmbito da geofísica diversos trabalhos empregam a transformada Wavelet para filtragem e análise de dados. Alguns exemplos serão apresentados ao longo desse seção, tanto para dados não-sísmicos, como para dados de sísmica de reflexão.

Por exemplo, o trabalho de Silva, Protázio e Remacre (2016), utiliza a transformada Wavelet para a mudança de escala e filtragem de perfis geofísicos de poço do campo de Namorado, na Bacia de Campos, mais precisamente em perfis de densidade e sônico, objetivando a transferência de informações geológicas do reservatório alvo para escalas compatíveis a aquisição sísmica.

No trabalho de Chakraborty e Okaya (1995), os autores utilizam a transformada Wavelet discreta e o algoritmo de decomposição *matching pursuit* para análise espectral de dados sísmicos, apresentando resultados comparativos com a transformada de Fourier janelada e no domínio $F-K$.

Em Martelet et al. (2001), os autores aplicam um fluxo de inversão no domínio da transformada Wavelet contínua aplicada a dados gravimétricos dos Himalaias, no Nepal. Os mesmos conseguiram resultados que recuperam aspectos geométricos de corpos de forma simples e com densidades heterogêneas, podendo assim identificar fronteiras geológicas distintas.

Em Vallée et al. (2004), os autores utilizam wavelets de Poisson na transformada Wavelet contínua em dados magnetométricos sintéticos e reais. Através dessa análise, os mesmos alcançaram resultados capazes de construir modelos estruturais e estimar a profundidade de fontes homogêneas de anomalias magnéticas.

No caso da supressão e estudo do *ground-roll*, enfoque do presente trabalho, diversos trabalhos foram desenvolvidos utilizando a transformada Wavelet. Os primeiros a utilizar tal ferramenta para atenuar este ruído coerente foram os autores dos trabalhos Deighan e Watts (1997) e Deighan e Watts (1996). Em ambos, os autores utilizam a transformada aplicando a metodologia de Cohen e Chen (1993), utilizada no presente trabalho, atenuando o ruído de rolamento superficial em casos 1D e 2D, propondo uma metodologia própria para a filtragem.

Em Matos e Osorio (2001), é utilizada a transformada Wavelet 2D para decompor um sismograma no domínio do tiro e suprimir o ruído de rolamento superficial presente no dado. Os autores também fazem uso da metodologia de Cohen e Chen (1993) para aplicar a transformada.

Já em Goudarzi e Riahi (2012), é utilizado um método de árvore dupla com dupla densidade em conjunto com a transformada Wavelet discreta, chamada pelos autores de DDDTDWT, para atenuar o *ground-roll* e outros ruídos coerente em seções pré e pós-*stack*.

Leite et al. (2008) utiliza um método híbrido, combinando a transformada de Karhunen-Loève e análise no domínio da transformada Wavelet para filtrações mais

incisivas de ruídos coerentes. Os autores apresentam uma metodologia visando otimizar a filtragem Wavelet e exibem um estudo de caso utilizando dados com a presença do ruído de rolamento superficial.

4.2 Transformada Wavelet Contínua

A transformada Wavelet nasceu da necessidade de uma análise dos sinais nos domínios da frequência e do espaço/tempo, visto que a transformada de Fourier, mesmo em sua versão janelada, possui limitações quanto a este aspecto. A utilização desta ferramenta matemática na geofísica começou no final da década de 80 com trabalhos como os de Morlet et al. (1982), Goupillaud, Grossmann e Morlet (1984), Mallat (1989), e Daubechies (1988), havendo direta correlação desde o início com o processamento de sinais sísmicos.

A transformada Wavelet contínua é dada pela utilização da wavelet de *kernel*, a wavelet base, onde diversas versões dessa tanto escalada, quanto transladada, Equação 4.1, são convolidas com o sinal a ser analisado, gerando assim coeficientes em função dessas escalas utilizadas. A Equação 4.2 mostra a fórmula para o cálculo dos coeficientes e a Equação 4.3 apresenta a transformada inversa;

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) ; \quad (4.1)$$

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt ; \quad (4.2)$$

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} C(a,b) \psi_{a,b}(t) da db ; \quad (4.3)$$

Onde a e b são os parâmetros de escala e translação respectivamente, $f(t)$ o sinal a ser analisado e $\psi_{a,b}(t)$ as versões da wavelet base utilizada para análise do sinal, onde a cada valor de a , a wavelet é escalada por um fator $1/a$ e transladada pelo fator b . A função respectiva da reconstrução dos aspectos da frequência a partir wavelet base, C_ψ , é apresentada pela Equação 4.4 abaixo, e $\psi(\omega)$ a transformada de Fourier da wavelet de *kernel* utilizada;

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|\omega|} |\psi(\omega)|^2 d\omega ; \quad (4.4)$$

Outro ponto importante que deve se destacar são as restrições necessárias para uma função ser usada como wavelet de *kernel* na transformada. Para a mesma ser considerada como wavelet base ela deve satisfazer tais condições:

1: $\psi(t)$ deve ser absolutamente integrável, assim como seu quadrado:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt < \infty ; \quad (4.5)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty ; \quad (4.6)$$

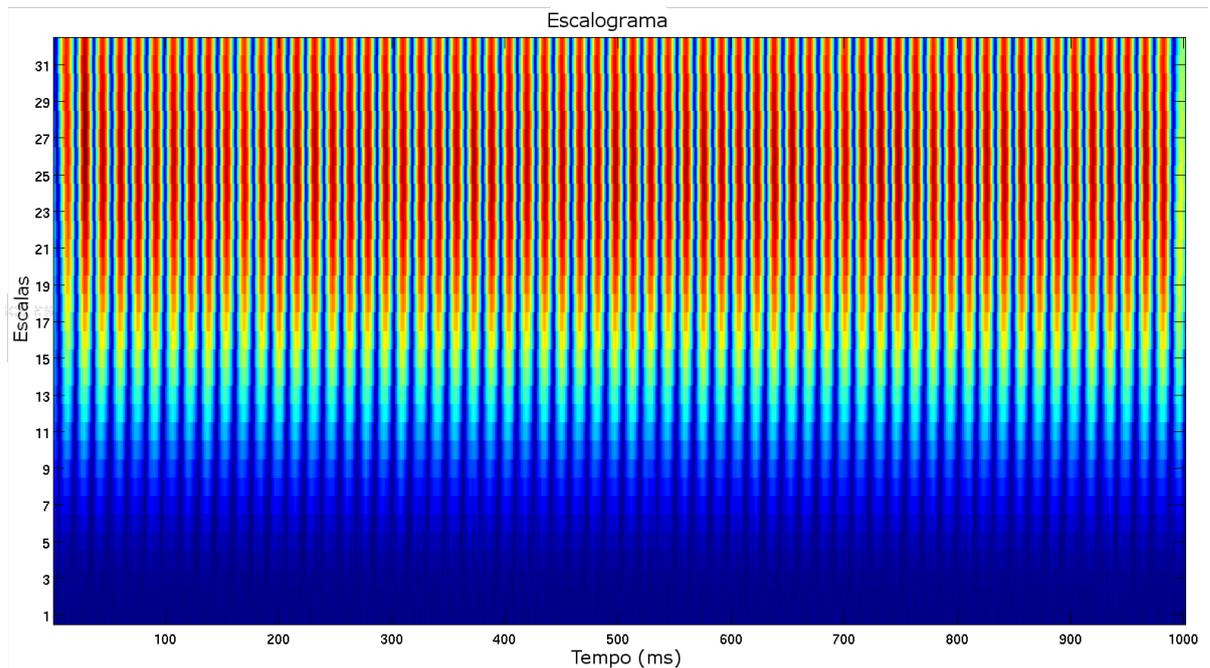
2: $\psi(t)$ deve ser de banda limitada:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{\hat{\psi}(\omega)}{\omega} \right| d\omega < \infty ; \quad (4.7)$$

Nota-se que a transformada Wavelet de uma dimensão representa o sinal em um domínio de duas dimensões, vide Equação 4.2 e Equação 4.3, formando um método que analisa o dado em diferentes escalas e intervalos de tempo. Escalas maiores correspondem e evidenciam as frequências menores do sinal de análise, pois possuem bases mais compactas e conseqüentemente um espectro de frequência maior, já escalas menores possuem bases maiores no domínio do tempo, analisando o comportamento das frequências mais altas. Tal transformação leva a uma representação em forma de escalograma, como pode ser visto na Figura 16 que refere-se a transformada Wavelet de um sinal senoidal com componente ruidosa de alta frequência utilizando a wavelet *Haar*.

Todavia, percebe-se que a representação da transformada Wavelet em forma de escalograma não apresenta de forma trivial as variações de frequências do sinal analisado, tendo apenas uma representação mais qualitativa. Além disso, os limites de cada célula no escalograma não são exatos, podendo ter menor ou maior acurácia dependendo da escolha da wavelet de *kernel*. Outro fator que é dependente da wavelet de entrada é a possibilidade de aumentar ou não a sobreposição de frequência entre escalas, que podem ou não introduzir falseamento no sinal na inversa (CHUI, 1992).

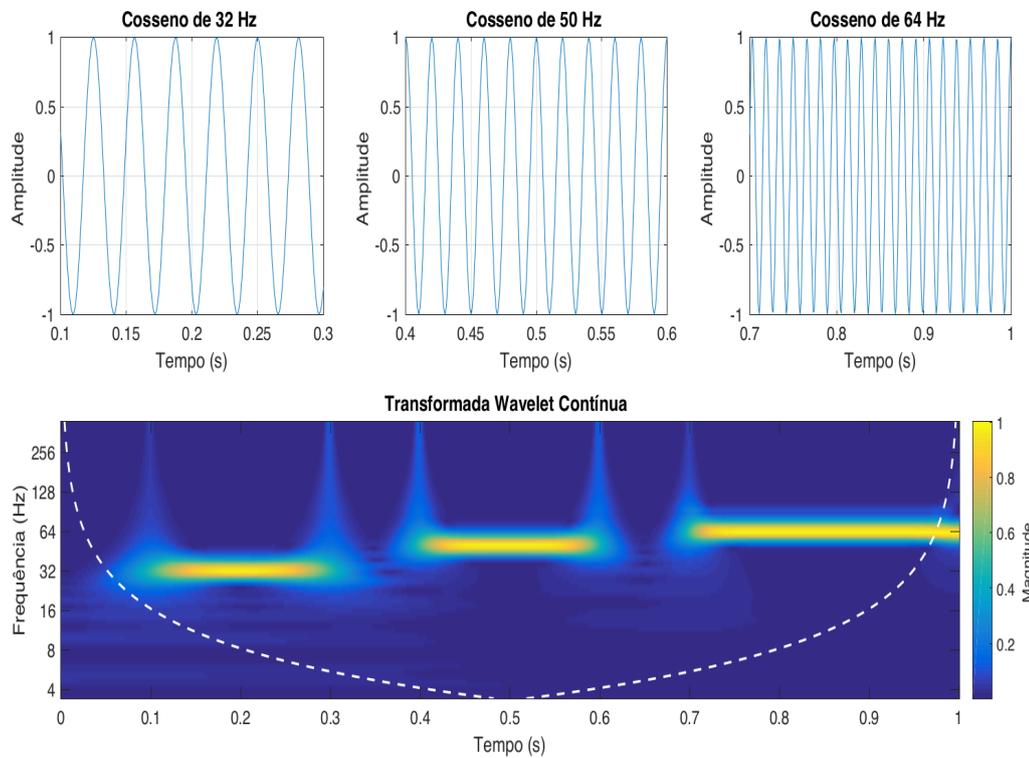
Figura 16 – Escalograma de um sinal senoidal com componente ruidosa de alta frequência.



Entretanto, caba destacar que a transformada Wavelet apresenta também uma outra forma de análise do sinal de entrada através de uma visão similar a um espectrograma, vide Figura 13 do capítulo anterior, todavia com maior resolução e uma análise integra do dado. Tal visualização pode ser vista na Figura 17, que apresenta essa outra representação da ferramenta para um sinal composto pela soma de 3 sinais cossenoidais de 32, 50 e 64 Hz , que ocorrem de 0 à 0.3 s, de 0.4 à 0.6 s, e de 0.7 à 1.0 s, respectivamente, utilizando a wavelet *Morlet*. Cabe ressaltar que as mesma limitações devido as fronteiras da células não serem exatas e dependentes da escolha de wavelet base, também se aplicam a este tipo visualização como pode ser visto.

Como supracitado, diversas wavelets podem ser usadas como entrada para a transformada Wavelet, sendo cada uma delas com propriedades e respostas diferentes no domínio da transformada. Wavelets ortogonais, como *Daubechies*, usadas em Daubechies (1988) e Daubechies (1993), e *Biortogonais*, utilizadas em Cohen e Chen (1993) e Matos e Osorio (2001), tem relativa vantagem sobre os demais tipos, visto que as mesmas não prevem propagação de erro oriundo do próprio sinal a ser analisado e tem maior probabilidade de se obter estabilidade numérica no algoritmo (DEIGHAN; WATTS, 1997).

Figura 17 – Representação gráfica da transformada Wavelet contínua de um sinal composto pela soma de três cossenoides.



4.3 Transformada Wavelet Discreta

Na seção anterior foi apresentada a transformada Wavelet para casos de análise de sinais contínuos. Todavia, como já ressaltado no capítulo anterior, o processamento de sinais trabalha primariamente com funções discretas, isso inclui o processamento de imagens e de sinais geofísicos. Destaca-se que as transformadas de Fourier e Wavelet também podem analisar sinais contínuos desde que os mesmos sejam discretizados como será mostrado a frente.

Desta forma, no caso discreto a implementação é diferente, apesar de analogamente ao caso contínuo transformar um sinal 1D para um domínio 2D. Sendo assim, a formulação matemática da transformada Wavelet discreta, a devida decomposição do sinal, se dispõem de acordo com a equação Equação 4.8 e a formulação recursiva para determinação dos sucessivos coeficientes de detalhe e aproximação de acordo com a Equação 4.9 e Equação 4.10, respectivamente;

$$f_J(t) = \sum_{j=0}^{J-1} \left(\sum_{k \in \mathbb{Z}} d_k^j \psi(2^j t - k) \right) + \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k \phi(t - k) ; \quad (4.8)$$

$$d^{j-1} = DH(a_k^j) ; \quad (4.9)$$

$$a^{j-1} = DL(a_k^j) ; \quad (4.10)$$

Onde $j = J$ é o nível máximo de discretização de um sinal contínuo para que 2^J seja maior que a taxa de *Nyquist*, k sendo o intervalo finito determinado pela duração do sinal, $\psi(t)$ a wavelet de *kernel*, $\phi(t)$ a função de escala, d_k os coeficientes de detalhe, a_k os coeficiente de aproximação, D um operador de decimação e L e H filtros passa-baixa e passa-alta respectivamente. Nota-se que para um valor grande de j , $\psi(2^j t - k)$ se torna uma versão comprimida de $\psi(t - k)$, e para j pequeno têm-se uma versão dilatada. É importante ressaltar que para o caso de um sinal discreto o nível máximo de discretização seria o última amostra do mesmo e 2^J o período de amostragem.

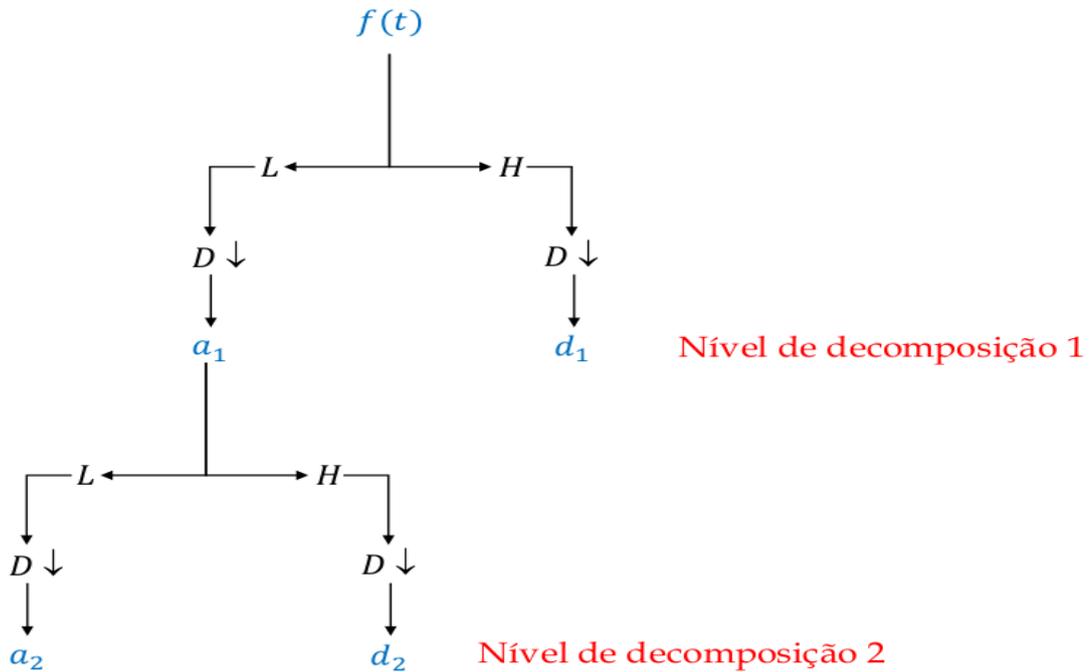
Nota-se que a transformada Wavelet discreta é implementada utilizando um banco de filtros em espelho de quadratura (QMF), ou seja, a utilização de um sucessivo banco de filtros, um passa-alta e outro passa-baixa, a cada nível de decomposição (CHUI, 1992), sendo tal método de implementação da transformada introduzido por Mallat (1989). A Figura 18 apresenta uma representação gráfica de tal processo.

Onde, o sinal de entrada $f(t)$ é discretizado e posteriormente convolvido com um filtro passa-alta H e um passa-baixa L . Para se manter o contínuo processo de partição do espectro de magnitude do sinal em todos os níveis, e atingir assim cada vez mais um grau de detalhamento no processo de análise, é necessário o uso de um operador de decimação, apontada pelo símbolo D e pela seta para baixo \downarrow na imagem abaixo. Após tais processos, têm-se os coeficientes de aproximação, derivado da saída do filtro passa-baixa, e de detalhe, oriundo do passa-alta, de nível 1. Desta forma, a cada nível adicional, os sucessivos coeficientes de aproximação do nível anterior serão a entrada para a próxima decomposição.

Procurando a reconstrução do sinal que fora analisado pelo processo da transformada Wavelet discreta, têm-se que, de acordo com a Equação 4.8, o processo deve ser dado pela reconstrução dos sucessivos coeficientes de aproximação e de detalhe de cada nível de decomposição. Dessa forma, o processo recursivo de reconstrução do coeficiente de aproximação inicial é dado pela Equação 4.11;

$$a^j = DL(a^{j-1}) + DH(b^{j-1}) ; \quad (4.11)$$

Figura 18 – Diagrama representativo da transformada Wavelet discreta usando implementação proposta por Mallat (1989).



É importante destacar que a implementação da transformada Wavelet discreta não é única, onde a formulação apresentada usa o algoritmo proposto por Mallat (1989) como dito acima. Sendo assim, existem diversas maneiras de implementar esta ferramenta matemática, cada uma diferente em termos de uso de wavelets base e diferentes propriedades matemáticas por trás. Alguns exemplos de variações de implementações podem ser encontrados em trabalhos como Mallat e Zhang (1993), usando o algoritmo de *matching-pursuit*, também usado por Chakraborty e Okaya (1995), a decomposição utilizando wavelet *packets* apresentada em Coifman, Meyer e Wickerhauser (1992), decomposição em *frames* aplicada em Daubechies (1988) e entre outras.

No presente trabalho foi utilizado o processo de decomposição proposto por Cohen e Chen (1993), posteriormente utilizado por Matos e Osorio (2001) e Deighan e Watts (1997). No caso de duas dimensões, caso aplicado a dados sísmicos, a maneira mais simples de representar uma base de wavelet, por exemplo em tempo t e espaço x é a partir da multiplicação das duas bases de uma dimensão para cada domínio. Tal representação é descrita pela Equação 4.12 abaixo;

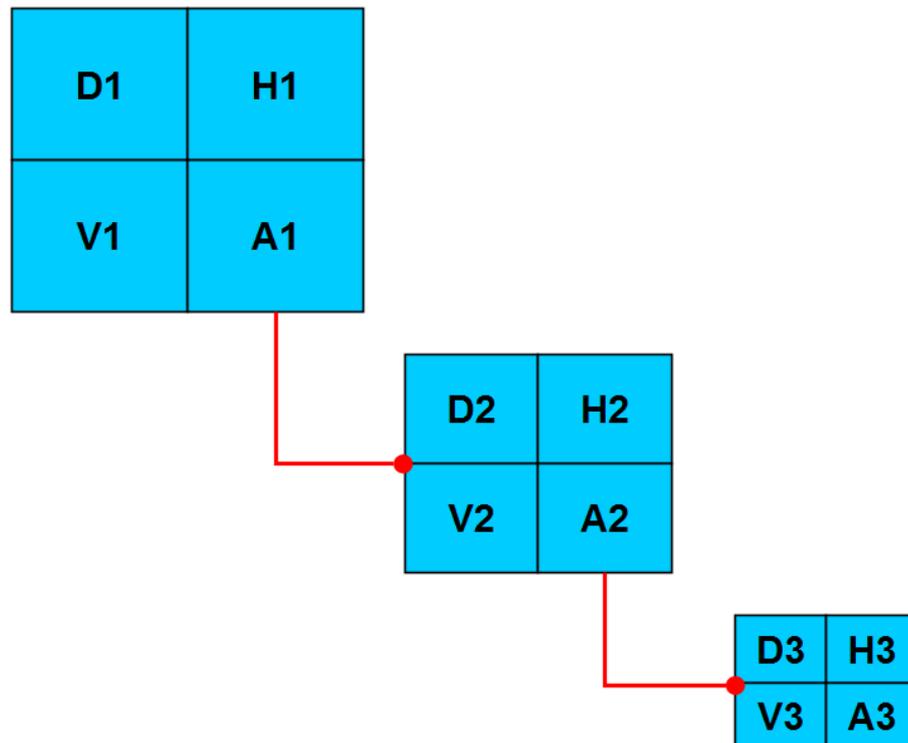
$$\psi_{jj'kk'}(t, x) = \psi_{jk}(t) \psi_{j'k'}(x) ; \quad (4.12)$$

Todavia, os autores Cohen e Chen (1993) ressaltam que tal formulação para a wavelet base tem a desvantagem de misturar as escalas j e j' . Os mesmos apresentam uma possível solução para tal, as custas da construção de uma base utilizando três wavelets, mas apenas utilizando uma escala j para o nível de decomposição. A Equação 4.13 abaixo apresentam essas wavelets;

$$\begin{aligned}\psi_{jkk'}^H(t, x) &= \psi_{jk}(t) \phi_{jk'}(x) ; \\ \psi_{jkk'}^V(t, x) &= \phi_{jk}(t) \psi_{jk'}(x) ; \\ \psi_{jkk'}^D(t, x) &= \psi_{jk}(t) \psi_{jk'}(x) ;\end{aligned}\tag{4.13}$$

O algoritmo também parte da utilização de decimação a cada interação para se manter o número de amostras presente no sinal original no processo de reconstrução, ou seja, cada nível de decomposição tem metade das amostras em tempo e espaço comparado ao nível anterior. Diferentemente da implementação apresentada mais acima, a cada nível de decomposição são gerados 4 coeficientes, o de aproximação A^j , os de detalhes vertical V^j , horizontal H^j e diagonal D^j , correspondentes as wavelets utilizadas no processo. A Figura 19 apresenta um esquema gráfico representativo deste processo.

Figura 19 – Representação gráfica da implementação proposta por Cohen e Chen (1993) para a transformada Wavelet 2D.



Tal implementação é vantajosa na filtragem de eventos com determinadas inclina-

ções, visto que os painéis referentes aos coeficientes de detalhe vertical enfatizam eventos de altos mergulhos, como o *ground-roll* e ondas áreas presentes em dados sísmicos, os coeficientes de detalhe diagonal enfatizam eventos com mergulhos intermediários e os coeficientes de detalhe horizontal a eventos mais próximos a horizontal.

Para o procedimento de reconstrução do sinal os coeficientes de aproximação para cada nível de decomposição podem ser estimados de acordo com a Equação 4.14, também chamada de função média de decomposição;

$$\phi_{jkk'}(t, x) = \phi_{jk}(t) \phi_{jk'}(x) ; \quad (4.14)$$

É importante ressaltar que, assim como no caso da metodologia apresentada por Mallat (1989), tanto as fronteiras de tempo, quanto as de espaço dos coeficiente, podem não ser bem específicas e variantes a escolha da wavelet de *kernel*. O mesmo pode acontecer com as fronteiras no domínio da frequência para cada coeficiente.

5 Metodologia

Nos capítulos anteriores foi introduzido um referencial teórico e o conceito do ruído de rolamento superficial, evento foco do presente trabalho, para melhor entendimento deste artefato indesejável e seu constante empecilho presente em dados sísmicos de reflexão.

Juntamente com este, a teoria referente a transformada de Fourier, ferramenta principal e base para técnicas de filtragem utilizadas em processamento de sinais, também foi apresentada, assim como suas variantes, a transformada contínua, discreta e janelada. Também presente no Capítulo 3, foi denotada a filtragem $F-K$, técnica amplamente utilizada para processamento de dados de sísmica de reflexão.

Posteriormente a estes capítulos, foi apresentada a teoria para a transformada Wavelet, também uma das ferramentas aplicadas durante a metodologia do presente trabalho. Como ressaltado no Capítulo 4, a transformada Wavelet apareceu como alternativa a versão janelada da transformada de Fourier e da filtragem $F-K$, devido a sua maior resolução no domínio da frequência e a possibilidade de separar eventos com inclinações diferentes em dados 2D, possibilitando assim uma filtragem mais incisiva e seletiva dos dados.

Para efeitos comparativos, além da transformada Wavelet, foram utilizadas a filtragem $F-K$ e uma filtragem simples no domínio de Fourier, utilizando um filtro passa-banda. Para implementação da transformada Wavelet foi utilizado o software Matlab, da empresa *MathWorks*, e o referente código para implementação está disponível no Apêndice A. Já para a aplicação das demais ferramentas, foi utilizado o software Seismic Unix, da *Colorado School of Mines*.

Além disso, foram utilizados dados sísmicos reais, sendo estes oriundos da biblioteca de sísmicas em Yilmaz (2001) e uma linha cedida pelo *British Geological Survey*, a *Kellingley Line*, disponível em BGS (2017). A partir dessas linhas foram retirados 5 dados no domínio do tiro, 2 da *Kellingley Line*, K1 e K2 e 3 da biblioteca de dados presente em Yilmaz (2001), Oz25, Oz10 e Oz5.

O tiro K1 possui 137 traços e o tiro K2 possui 121 traços, ambos com frequência de amostragem de 1 ms e 3001 amostras por traço. Por sua vez, os demais dados utilizados possuem 96 traços com 2100 amostras cada, no caso do Oz25, 48 traços com 3100 amostras cada, referente ao Oz5, sendo ambos com frequência de amostragem de 2 ms, e o Oz10 com 120 traços com 1375 amostras cada, possuindo frequência de amostragem de 4 ms. É importante ressaltar que todos os dados utilizados e apresentados pelo presente trabalho são abertos e disponíveis gratuitamente para download.

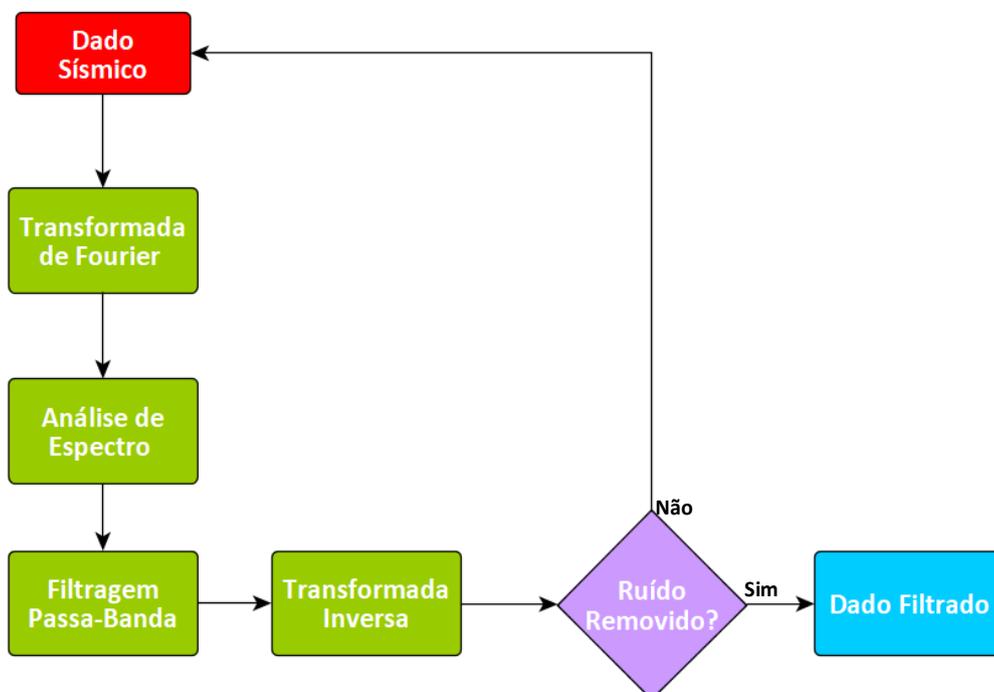
Desta forma, o presente capítulo visa apresentar a metodologia utilizada durante o desenvolvimento do trabalho e, juntamente, os métodos de avaliação dos resultados e suas respectivas métricas.

5.1 Fluxos de Análise

Em respeito a filtragem mais simples, sabe-se que, como ressaltado no Capítulo 2, o *ground-roll* é um ruído de baixa frequência e alta amplitude, sendo localizado então nas porções de menores frequências do sinal a ser analisado. Sendo assim, uma forma simplificada de remover tal ruído seria atenuar tais porções do dado.

Desta forma, o fluxograma utilizado para este método de filtragem é apresentado pela Figura 20. Primeiramente é realizada a transformada de Fourier 1D traço a traço para posteriormente ter-se o espectro de magnitude do sinal como um todo. Após, analisa-se o espectro de magnitude para poder inferir os limites no domínio da frequência do filtro Ormsby que será utilizado. Com os limites definidos, aplica-se o filtro no dado e analisa-se a saída graficamente para verificar se o ruído em questão fora removido, se sim, o dado fora devidamente filtrado, se não, volta-se a etapa inicial.

Figura 20 – Fluxo utilizado para aplicação da filtragem passa-banda.

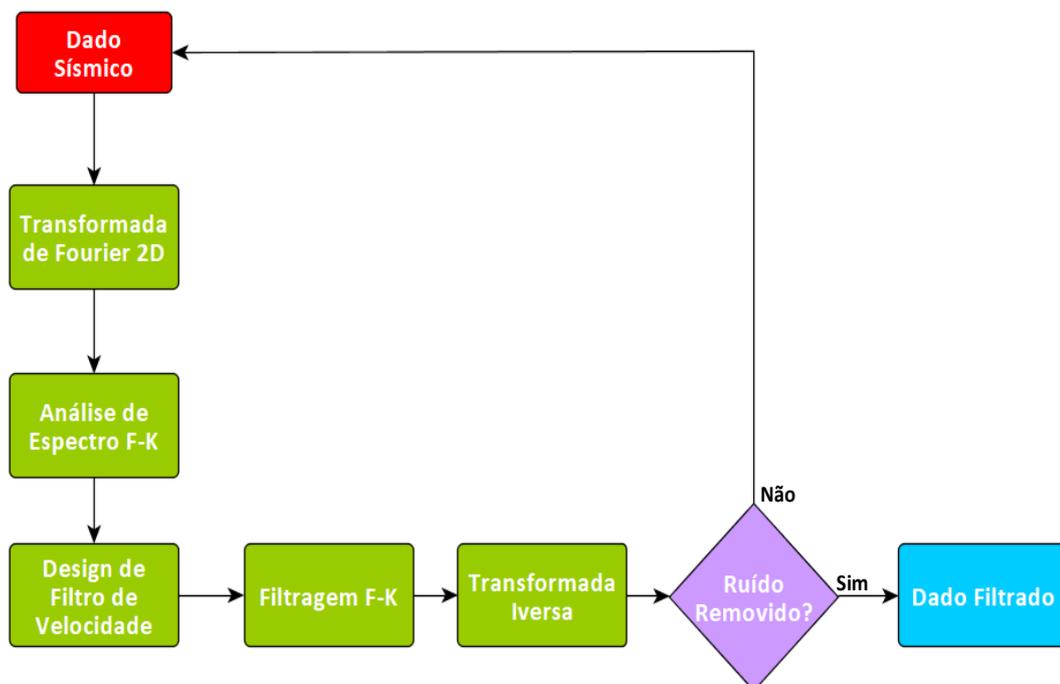


Já referindo-se a filtragem $F-K$, utiliza-se filtros de "velocidade aparente", vide Capítulo 3, para remover eventos com determinadas inclinações presente no espectro $F-K$. O *groun-roll* possui uma velocidade característica baixa, assim como as demais ondas de rolamento, podendo ser estimada facilmente tanto através do sismograma, como através

do espectro de magnitude. Desta forma, a Figura 21 apresenta o fluxo de processamento utilizado este método de filtragem.

Neste fluxo, primeiramente é computada a transformada de Fourier 2D do dado sísmico, obtendo-se o espectro de magnitude nos domínios da frequência e do número de onda, F - K . Posteriormente, analisa-se tal espectro para identificar o evento correspondente ao ruído de rolamento superficial e delimitá-lo, gerando dessa forma o design do filtro de "velocidade", um filtro 2D. Após a aplicação do filtro, faz-se uso da transformada inversa para análise gráfica do sinal processado, caso o ruído fora removido têm-se o sismograma filtrado, caso contrário, volta-se a etapa inicial.

Figura 21 – Fluxo utilizado para aplicação da filtragem F - K .



É importante ressaltar que nos casos de dados *split-spread*, os dados Oz25 e Oz5, foram aplicados dois filtros 2D, ao invés de apenas um, devido ao falseamento espacial percebido no espectro de magnitude.

Já no caso da transformada Wavelet, foi utilizado o método de implementação introduzido por Cohen e Chen (1993), posteriormente aplicado em outros trabalhos como Deighan e Watts (1997) e Matos e Osorio (2001). No Capítulo 4 pôde-se verificar que tal implementação permite a filtragem mais incisiva de eventos com inclinações específicas e que podem ser isolados por determinados coeficientes. Desta forma, os coeficientes verticais, derivados da decomposição Wavelet, foram analisados e filtrados nas regiões que apresentavam o ruído de rolamento superficial, e posteriormente reconstruídos. O fluxograma da utilização desta ferramenta é apresentado pela Figura 22.

Para a escolha da wavelet de *kernel*, que podem ter uma infinidade de variações, foram utilizadas as mais aplicadas na bibliografia para filtragem de dados sísmicos, sendo juntamente consideradas as que possuem menor chance de propagação de erro e introdução de falseamento durante o processo de decomposição, vide Capítulo 4. Sendo essas as wavelets *Haar*, *Daubechies* e *Biorthogonais*, utilizadas em trabalhos como Deighan e Watts (1997), Matos e Osorio (2001), Goudarzi e Riahi (2012), Zhang e Ulrych (2003) e Leite et al. (2008). A Figura 23, Figura 24 e Figura 25 apresentam os exemplos de wavelets das famílias citadas.

Figura 22 – Fluxo utilizado para aplicação da transformada Wavelet.

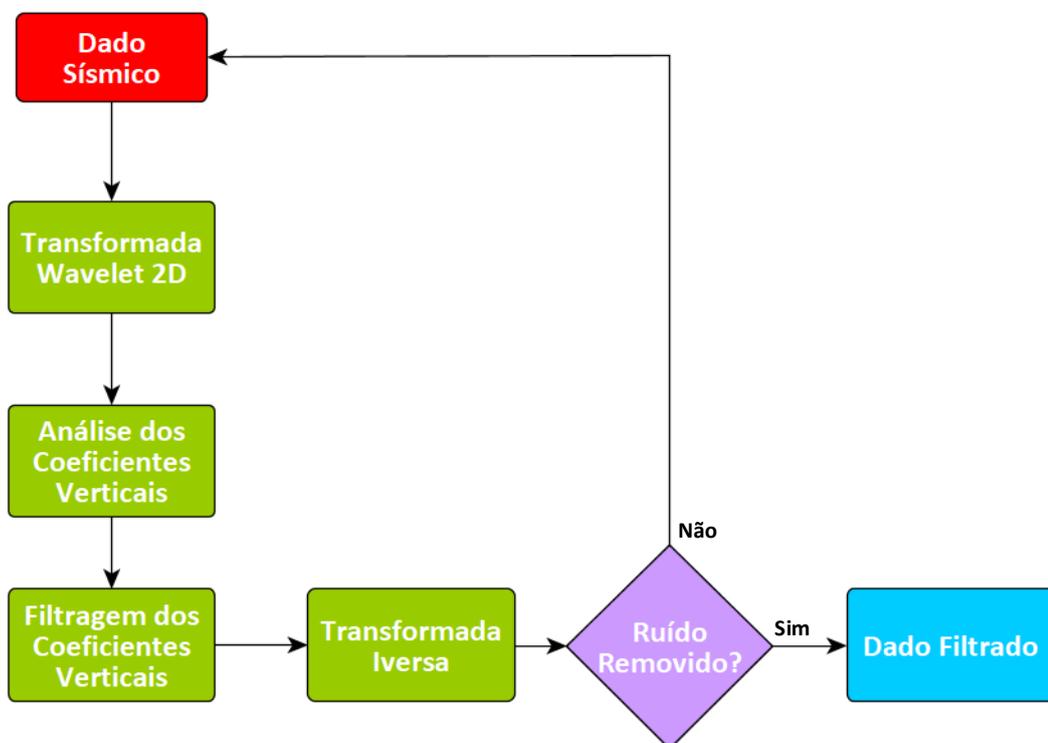


Figura 23 – Wavelet *Haar* utilizada.

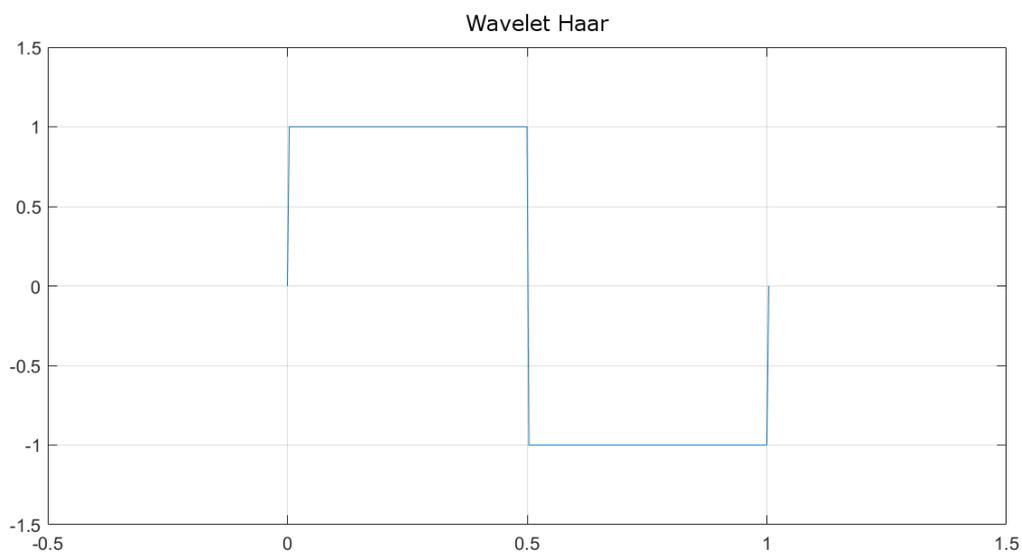


Figura 24 – Exemplo de wavelet de *Daubechies* utilizada.

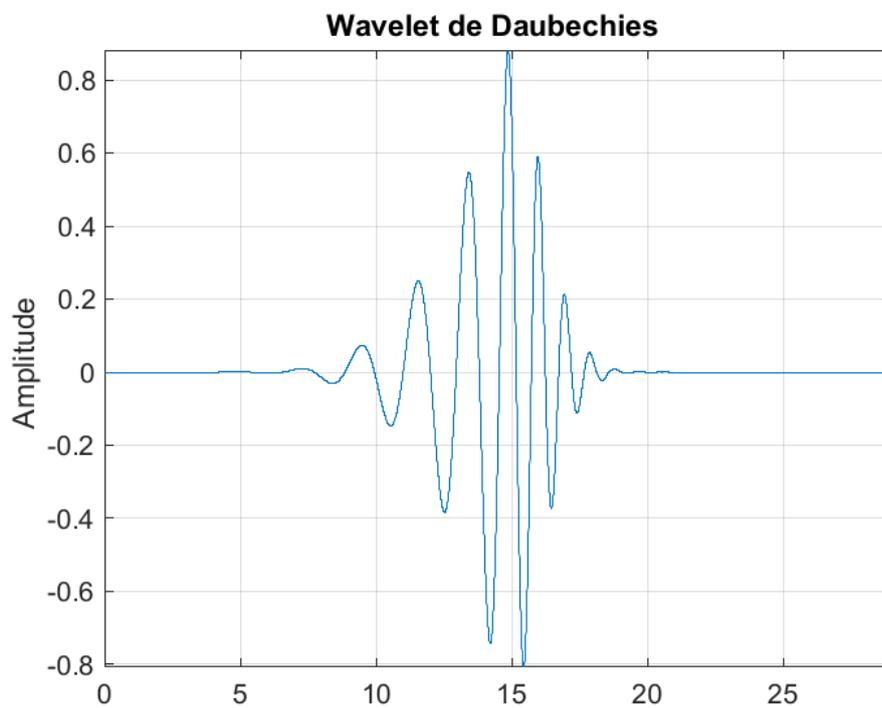
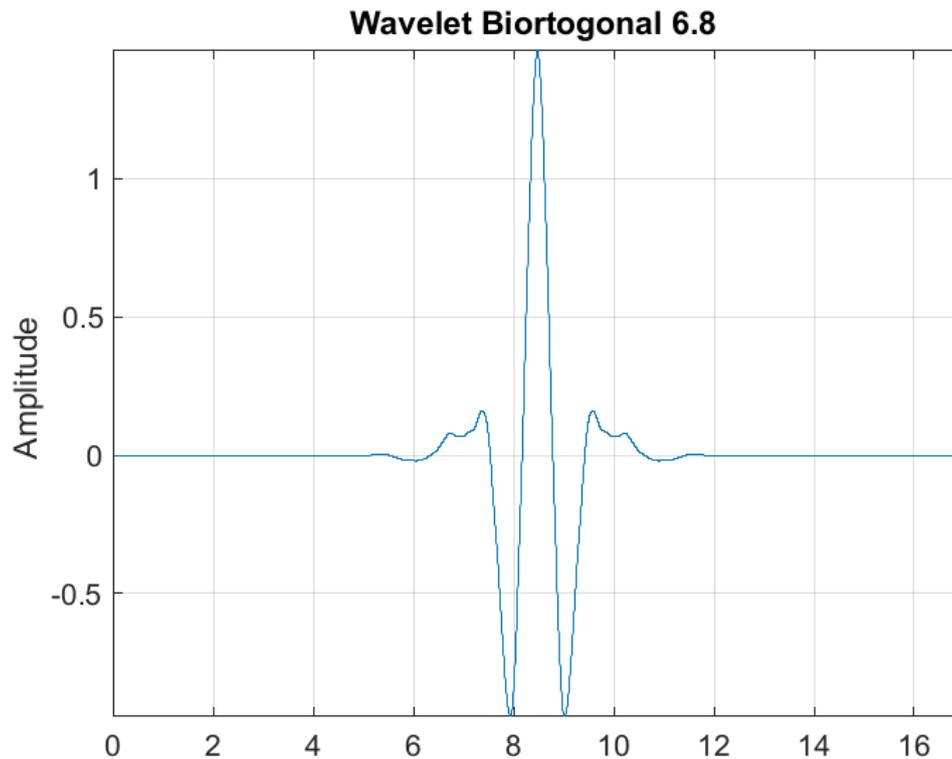


Figura 25 – Exemplo de wavelet *Biortogonal* utilizada.

5.2 Critérios de Avaliação

Após realizado os procedimentos de filtragem, são utilizados dois critérios para avaliação dos resultados: um quantitativo e outro qualitativo. A análise qualitativa é padrão em processamento de sinais geofísicos, principalmente em dados sísmicos, usada através de uma análise gráfica do sinal de entrada, filtrado e do resíduo entre ambos. Quanto a análise quantitativa de resultados, nem todos os trabalhos apresentam tais medidas, todavia, como o objetivo do trabalho visa a análise e implementação da transformada Wavelet na supressão do ruído de rolamento superficial perante as demais técnicas de filtragem, F - K e passa-banda no caso do presente trabalho, algumas medidas de erros foram utilizadas como critério de avaliação, sendo estas apresentadas abaixo.

5.2.1 Razão Sinal-Ruído (SNR)

A razão sinal-ruído, mais conhecida como *signal-to-noise ratio*, é usada amplamente como critério de avaliação para análise de imagens e sinais. Tal medida compara a quantidade de ruído presente no sinal através da potência de ambos, Equação 5.1, e é apresentada em dB . Quando esta razão é acima de 50 dB o ruído é praticamente imperceptível. Em outra vias, quando a razão sinal-ruído for baixa, entre 0 e 5 dB , o ruído

é extremamente dominante. Todavia, como é ressaltado em Russ et al. (1994), ao usar apenas essa medida para quantificar se um processo de filtragem fora bem sucedido ou não, pode se obter uma avaliação errônea, posto que o mesmo pode variar dependendo do que é considerado ruído ou não no sinal analisado;

$$SNR_{db} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \right) ; \quad (5.1)$$

A razão sinal-ruído também pode ser relacionada com o coeficiente de variação, outra medida utilizada no presente trabalho e apresentada mais a frente, de acordo com a Equação 5.2. Onde μ é a média do sinal e σ o desvio padrão do mesmo;

$$SNR = \frac{\mu_{sinal}}{\sigma_{sinal}} = C_v^{-1} ; \quad (5.2)$$

No âmbito de processamento de sinais sísmicos, a razão sinal-ruído é utilizada tanto como critério de avaliação, como atributo sísmico, podendo ser visto em trabalhos como Jones e Levy (1987), Shapiro et al. (2005), Xu e Gui (2014) e entre outros.

5.2.2 Coeficiente de Variação

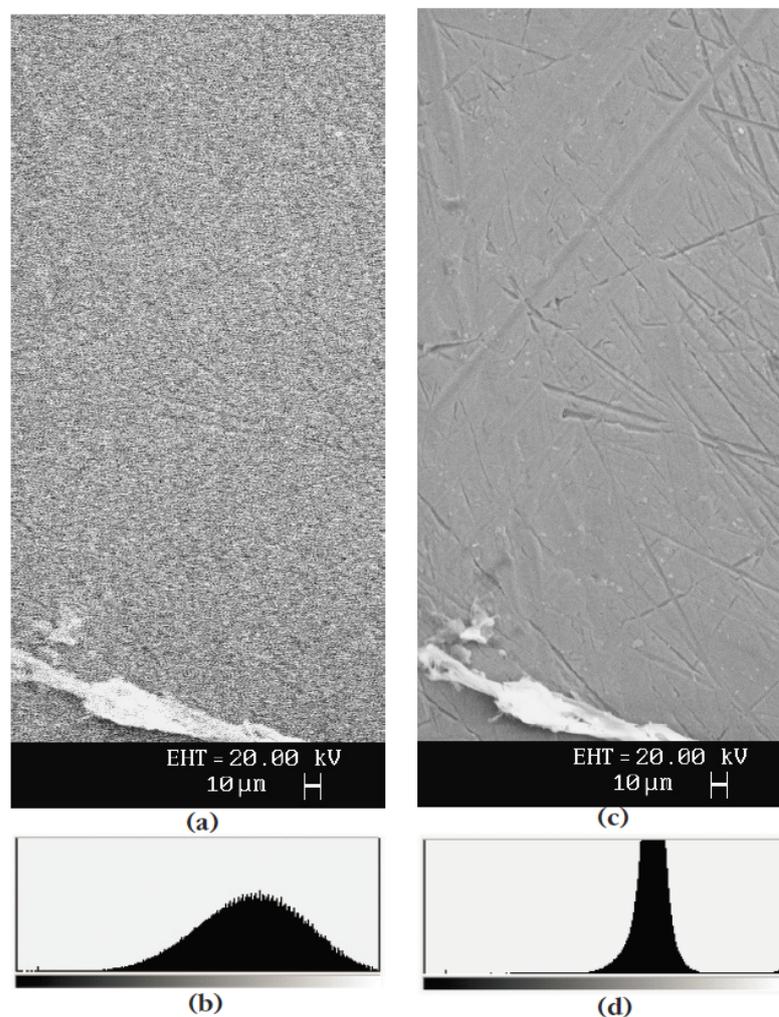
O coeficiente de variação é a medida que indica variabilidade relativa, dado pela razão entre o desvio padrão σ e a média de um sinal μ , Equação 5.3, normalmente expressada em porcentagem. Particularmente, tal medida é extremamente útil para comparar resultados oriundos de diferentes testes (ZADY, 1999), filtragens no caso do presente trabalho, onde compara-se o coeficiente de variação do dado bruto com a mesma métrica oriunda dos dados filtrados utilizando os diferentes processos;

$$C_v = \frac{\sigma_{sinal}}{\mu_{sinal}} * 100 ; \quad (5.3)$$

Tal medida leva vantagem em relação ao uso apenas do desvio padrão σ , posto que essa métrica deve ser sempre interpretada no contexto da média dos dados. No caso de grande parte dos processos de filtragens, pode existir uma alteração da média do dado de análise em comparação ao filtrado, sendo necessário o uso do coeficiente de variação e não do desvio padrão. Todavia, destaca-se que tal métrica pode ser apenas usada em dados que não possuem valores negativos, havendo a necessidade de normalização dos dados sísmicos utilizados no presente trabalho pré cálculo desta métrica.

É importante ressaltar que tanto o uso de desvio padrão, quanto do coeficiente de variação, como critérios de avaliação derivam do grau de variabilidade do histograma de um dado (RUSS et al., 1994), onde um processo de filtragem ou processamento é aplicado, o mesmo pode ou não modificar o histograma do sinal, sempre visando o afinamento do mesmo. Por exemplo, na Figura 26 é apresentada uma imagem de um microscópio eletrônico de varredura, *SEM*, com alta presença de ruído (a), e seu respectivo histograma (b), ao lado dele, a mesma imagem processada (c) e seu respectivo histograma (d). Nota-se que, o histograma da imagem processada está menos esparsa e mais concentrado, dando maior visibilidade aos detalhes presentes na imagem.

Figura 26 – Imagens de um microscópio eletrônico de varredura e seus respectivos histogramas.



Fonte: Russ et al. (1994).

No âmbito da geofísica o coeficiente de variação não é comumente usado como critério de avaliação de resultados de processamento, todavia podem ser encontrados alguns exemplos como em Al-Marzouqi e AlRegib (2013) e Romano et al. (2005).

5.2.3 Razão Pico de Sinal Ruído (PSNR)

A razão pico de sinal ruído, mais conhecida como *peak signal-to-noise ratio* (PSNR), é uma expressão da razão entre o máximo valor possível apresentado por um sinal e a intensidade de ruído que afeta a qualidade do mesmo. Normalmente, de acordo com Huynh-Thu e Ghanbari (2008), tal métrica é aplicada para avaliar algoritmos de processamento de imagem e é considerada referência para tal. Sua formulação matemática é mais facilmente definida, Equação 5.4, usando o erro médio quadrático, Equação 5.5, para se considerar o componente ruidoso no sinal de análise, ambas vistas abaixo;

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{Max_f}{\sqrt{MSE}} \right) ; \quad (5.4)$$

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [F(i, j) - G(i, j)]^2 ; \quad (5.5)$$

Onde F é a matriz $m \times n$ referente ao sinal a ser analisado, G o sinal com adição de ruído ou alterado por algum algoritmo de processamento e Max_f o máximo valor possível do sinal de entrada. Ao contrário do erro médio quadrático, o erro $PSNR$ tem uma escala invertida, como aponta a equação acima. Quanto maior o erro médio quadrático menor será a razão pico de sinal ruído, indicando que o processamento do sinal ou o sinal de comparação é mais ruidoso do que o inicial, caso se utilize o mesmo sinal para comparação o erro MSE é 0, acarretando em um $PSNR$ infinito.

No processamento de sinais sísmicos a métrica $PSNR$ é amplamente utilizada como critério de avaliação. Mais comumente associada a análise de algoritmos de compressão de dados sísmicos como em Zheludev, Kosloff e Ragoza (2004), Dalmau et al. (2014), Xie, Bai e Yu (2014), mas também largamente associado a avaliação de processos de filtragens, como no caso do presente trabalho, e por exemplo em trabalhos como Zhu, Liu e McClellan (2015), Gomes, Santos e Burgos (2016), Shan, Ma e Yang (2009), Awasthi e Singh (2012) e entre outros.

6 Resultados

Nos capítulos anteriores foram apresentados as teorias que envolvem o método sísmico e seus referentes aspectos físicos, Capítulo 2. Posteriormente, foram apresentados as teorias e variações das transformadas de Fourier e Wavelet, ambas utilizadas no presente trabalho, apresentadas pelo Capítulo 3 e Capítulo 4 respectivamente, fundamentais para o entendimento do objetivo e as conclusões que virão. Seguidamente, foi apresentada a metodologia aplicada durante o procedimento do trabalho e as métricas que foram utilizadas para avaliar os resultados adquiridos, Capítulo 5.

Desta forma, o presente capítulo objetiva apresentar os resultados alcançados através das filtragens passa-banda, $F-K$ e Wavelet, visando a atenuação do ruído de rolamento superficial de dados de sísmica de reflexão.

As seguintes seções são separadas por métodos de filtragem utilizados, sendo apresentados os resultados gráficos de cada dado e respectivas filtragens utilizadas, além da análise qualitativa dos mesmos. Ao final, é apresentada a tabela de erro para cada dado e correspondente método de filtragem, além da análise de tal tabela.

6.1 Filtragem Passa-Banda

Em respeito a filtragem passa-banda, a mais simples aplicada no desenvolvimento do trabalho, foram utilizados filtros Ormsby para filtrar as porções de mais baixa frequência dos dados analisados, mais precisamente as porções referente ao *ground-roll*, o fluxograma empregado para esse procedimento pode ser visto no capítulo anterior, mais precisamente na Figura 20. Todavia, como poderá ser visto nas imagens adiante, as bandas de baixa frequência também são referentes as informações de interesse em dados sísmicos, eventos oriundos da reflexão das ondas sísmicas.

A Figura 27, Figura 28, Figura 29 e Figura 30 apresentam os resultados para o devido procedimento nos dados. Em todos os casos percebe-se que o ruído de rolamento superficial fora filtrado, todavia, como se esperava, juntamente com o evento indesejado, houve também perda de uma grande quantidade de informação relevante, podendo ser verificado pelos resíduos das respectivas filtragens, parte **c)** das imagens abaixo.

Figura 27 – Resultado derivado da filtragem passa-banda do tiro K1. a) Tiro K1 b) Tiro K1 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.

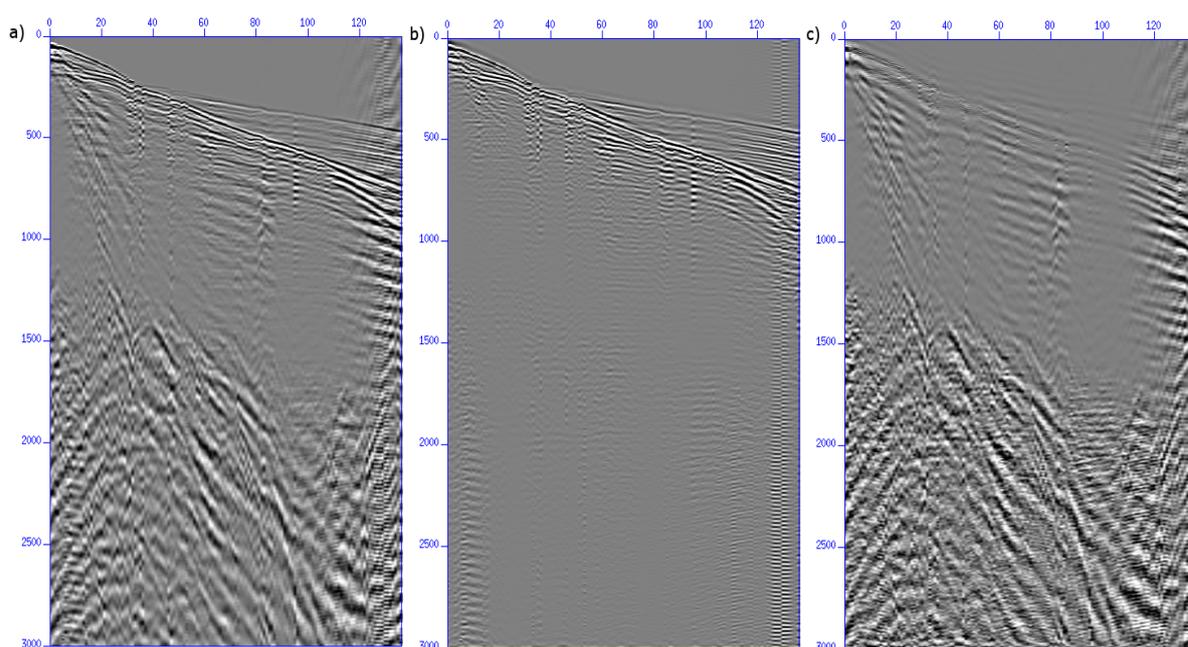


Figura 28 – Resultado derivado da filtragem passa-banda do tiro K2. a) Tiro K2 b) Tiro K2 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.

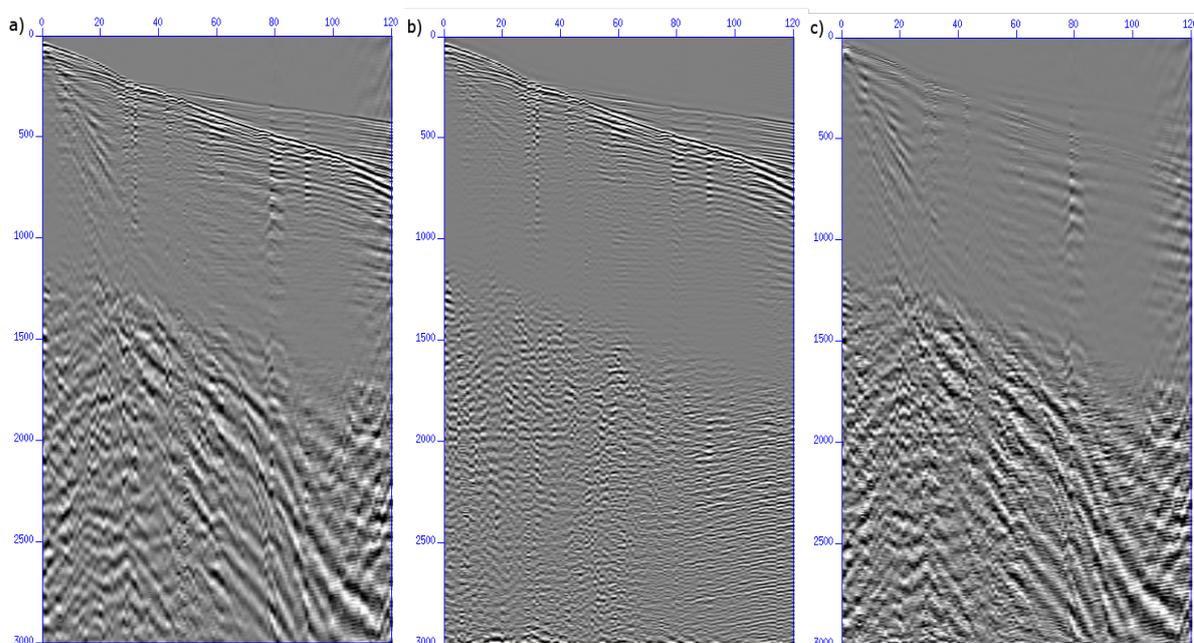
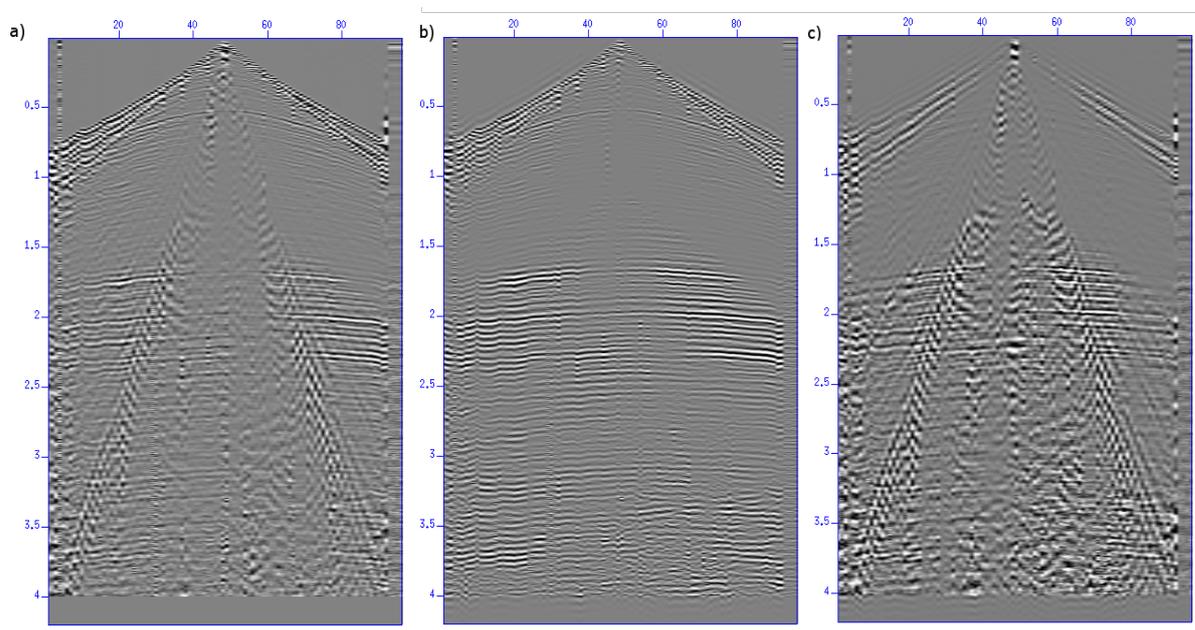


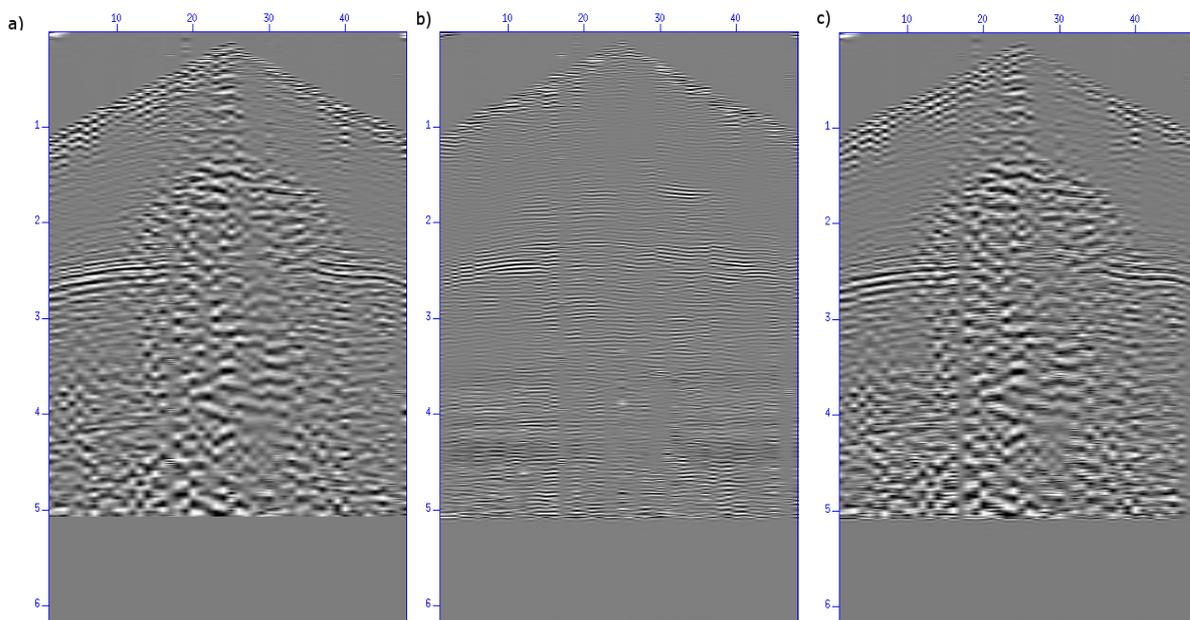
Figura 29 – Resultado derivado da filtragem passa-banda do tiro Oz25. a) Tiro Oz25 b) Tiro Oz25 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.



Pode-se notar que o melhor resultado, onde os eventos de interesse foram melhor preservados, foi o referente ao tiro Oz25, em que possíveis refletos são razoavelmente melhor visualizados depois da filtragem. Todavia, ambos os tiros referentes a *Kellingley Line* tiveram praticamente todos eventos removidos com a filtragem, com exceção da onda direta.

É importante ressaltar que tal característica inerente a filtragem passa-banda de não só filtrar o *ground-roll* mas também remover outros eventos dos dados, é evidenciada pela brusca redução do coeficiente de variação do dado filtrado comparado ao dado de entrada. Tal variação é dada não pela filtragem em si ser satisfatória ao remover o ruído, mas sim devido a remoção de grande parte das informações presente nos dados, encurtando o histograma e conseqüentemente o coeficiente de variação.

Figura 30 – Resultado derivado da filtragem passa-banda do tiro Oz5. a) Tiro Oz5 b) Tiro Oz5 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.



6.2 Filtragem $F-K$

Na filtragem $F-K$ foram utilizados filtros de velocidade aparente, vide Capítulo 3, para que pudesse ser removido o ruído de interesse no presente trabalho. Após identificado o evento no espectro de magnitude e os limites dados pela sua velocidade aparente, o mesmo fora filtrado através de um filtro de duas dimensões em forma de leque.

A Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36, Figura 37 e apresentam os resultados da filtragem $F-K$ para cada dado e seus respectivos espectros de magnitude. Neste caso de metodologia houveram diferentes resultados, cada um com a devida peculiaridade devido ao dado de entrada.

No caso dos dados da *Kellingley Line*, denominados de K1 e K2, pode-se dizer que os resultados foram próximos, sendo o resultado apresentado pelo tiro K1 o mais satisfatório. Em ambos os casos parte do ruído de rolamento superficial fora removido sem grandes perdas de informação relevante. Todavia, nota-se que no caso do tiro K2, algumas porções da onda direta e outros eventos foram removidos juntamente, apesar de ter uma amplitude relativa mais baixa em comparação ao *ground-roll*. Além do mais, ambos os tiros filtrados ainda apresentam ruídos em maior profundidade, podendo ser referente, ou não, ao ruído em questão.

Figura 31 – Resultado derivado da filtragem $F-K$ do tiro K1. a) Tiro K1 b) Tiro K1 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.

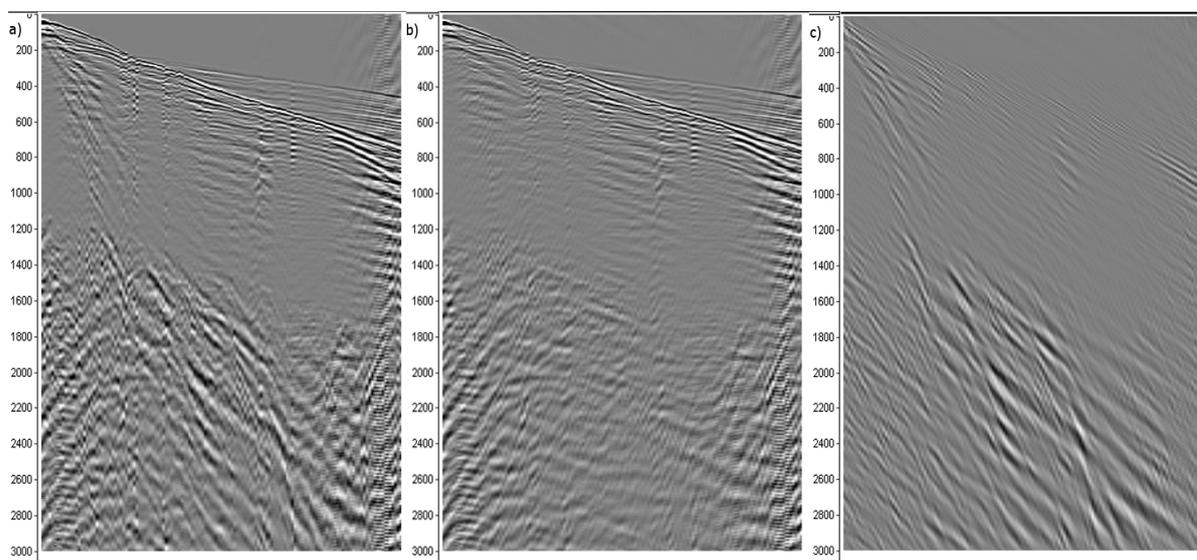


Figura 32 – Espectro $F-K$ do tiro K1. a) Espectro Bruto b) Espectro Filtrado c) Resíduo.

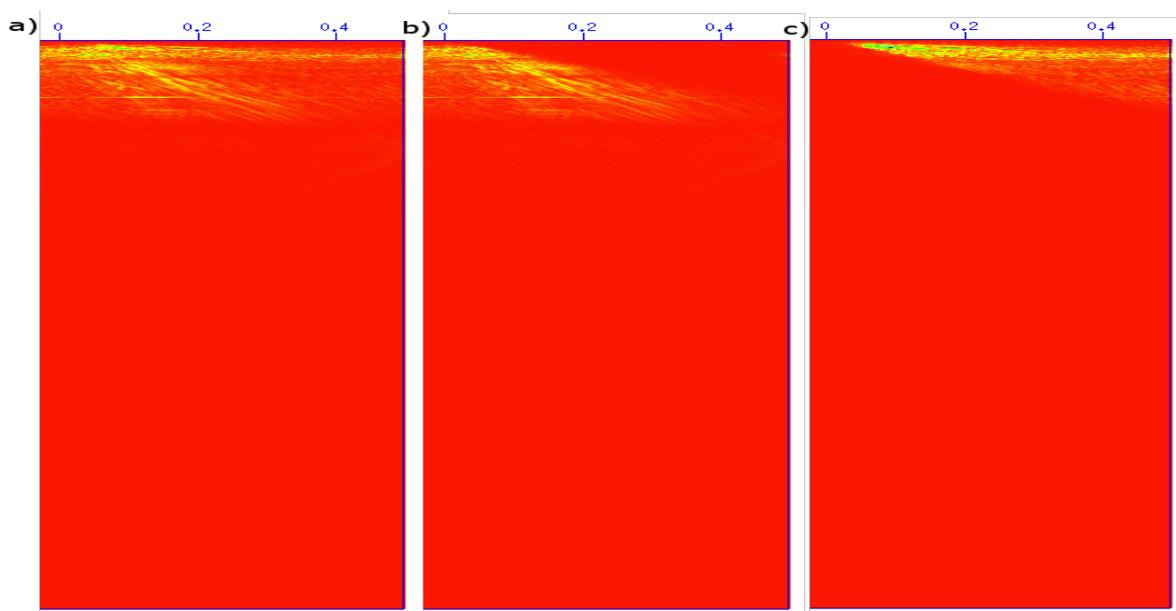


Figura 33 – Resultado derivado da filtragem $F-K$ do tiro K2. a) Tiro K2 b) Tiro K2 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.

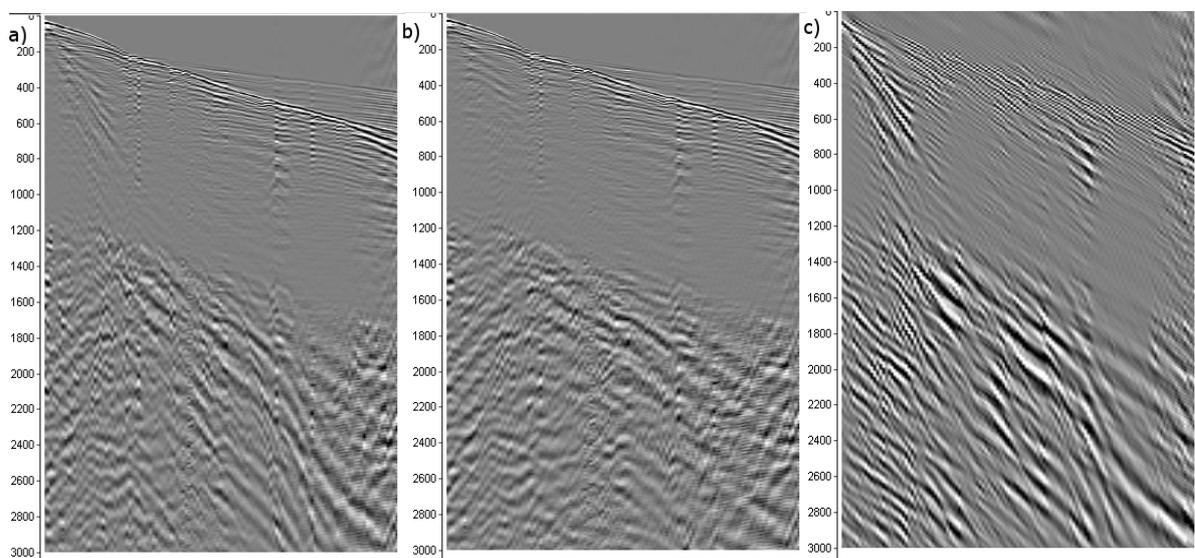


Figura 34 – Espectro $F-K$ do tiro K2. a) Espectro Bruto b) Espectro Filtrado c) Resíduo.

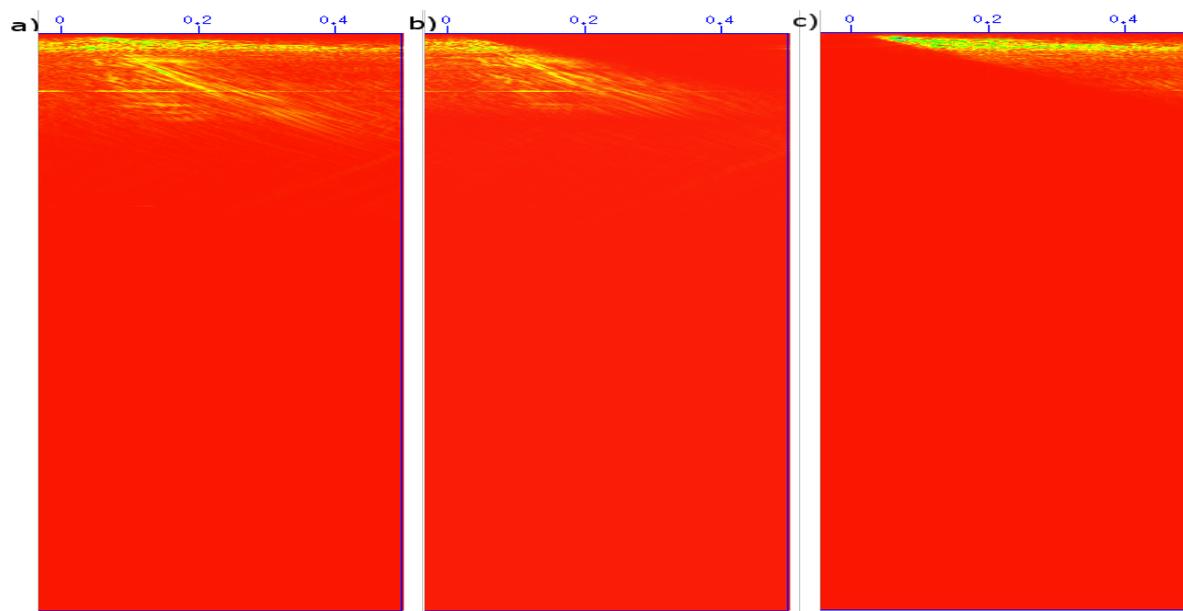


Figura 35 – Resultado derivado da filtragem F - K do tiro Oz25. a) Tiro Oz25 b) Tiro Oz25 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.

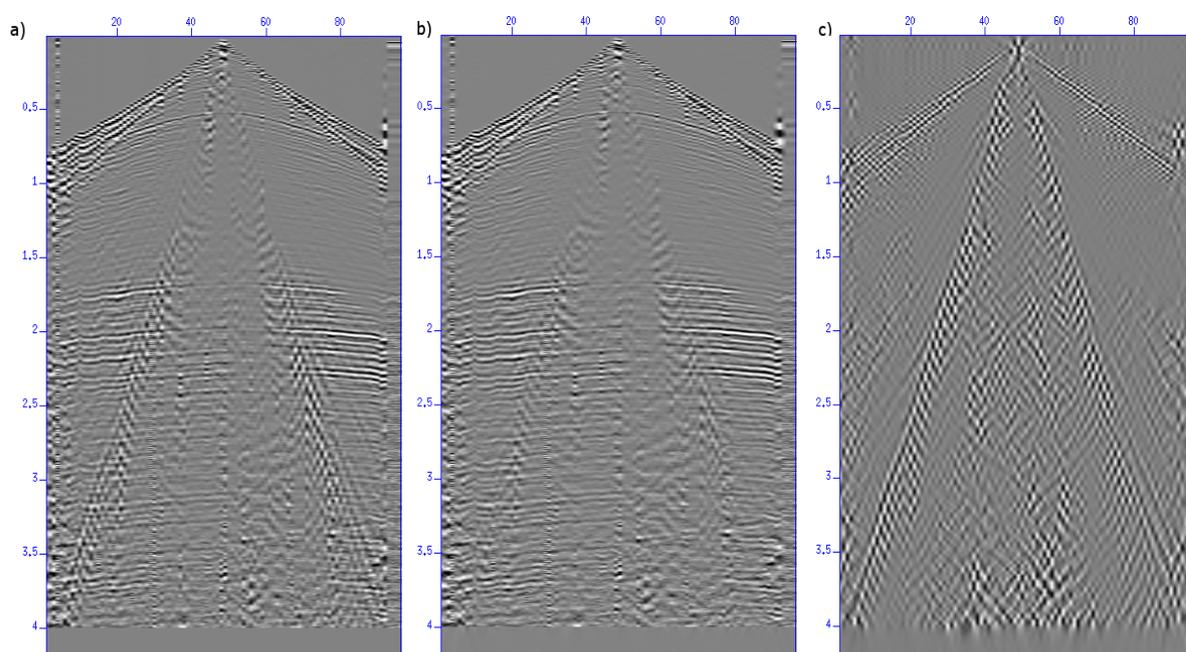


Figura 36 – Espectro F - K do tiro Oz25. a) Espectro Bruto b) Espectro Filtrado c) Resíduo.

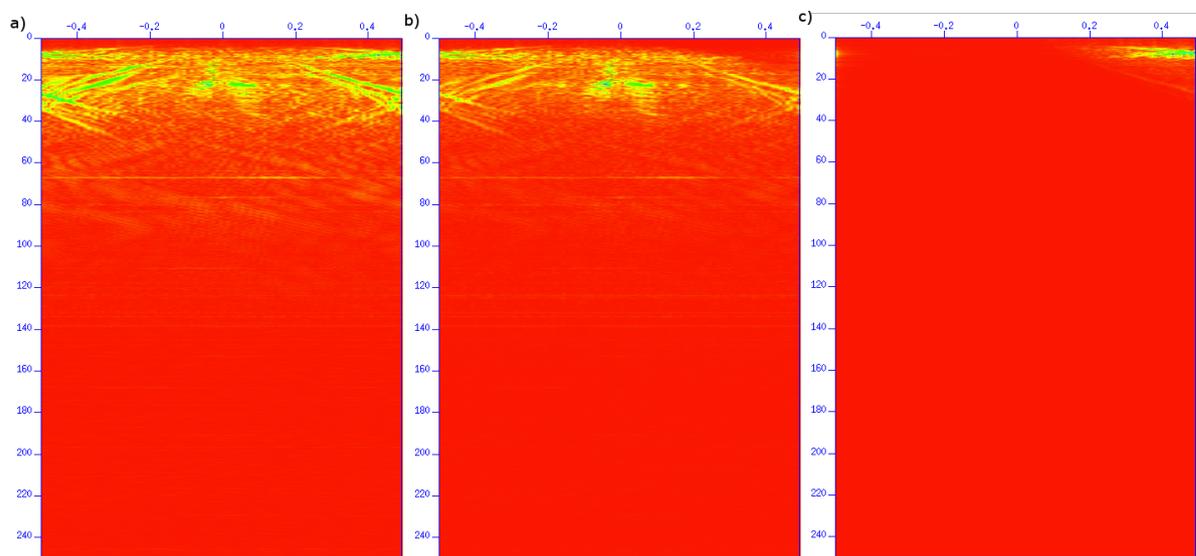


Figura 37 – Resultado derivado da filtragem $F-K$ do tiro Oz5. a) Tiro Oz5 b) Tiro Oz5 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.

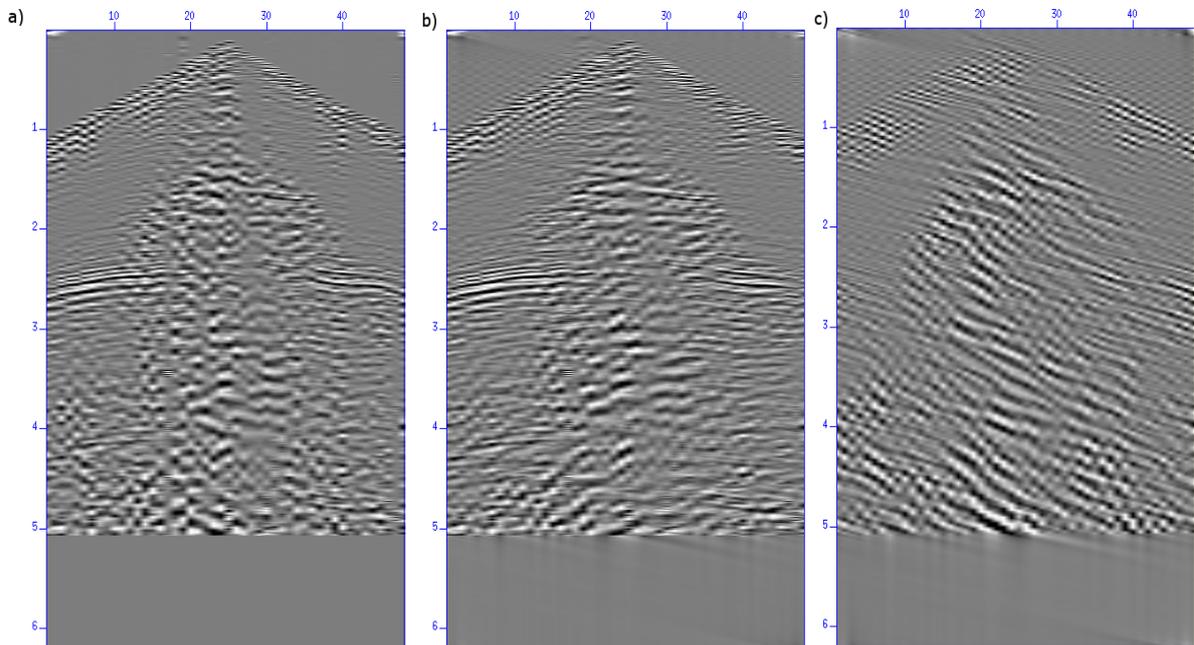
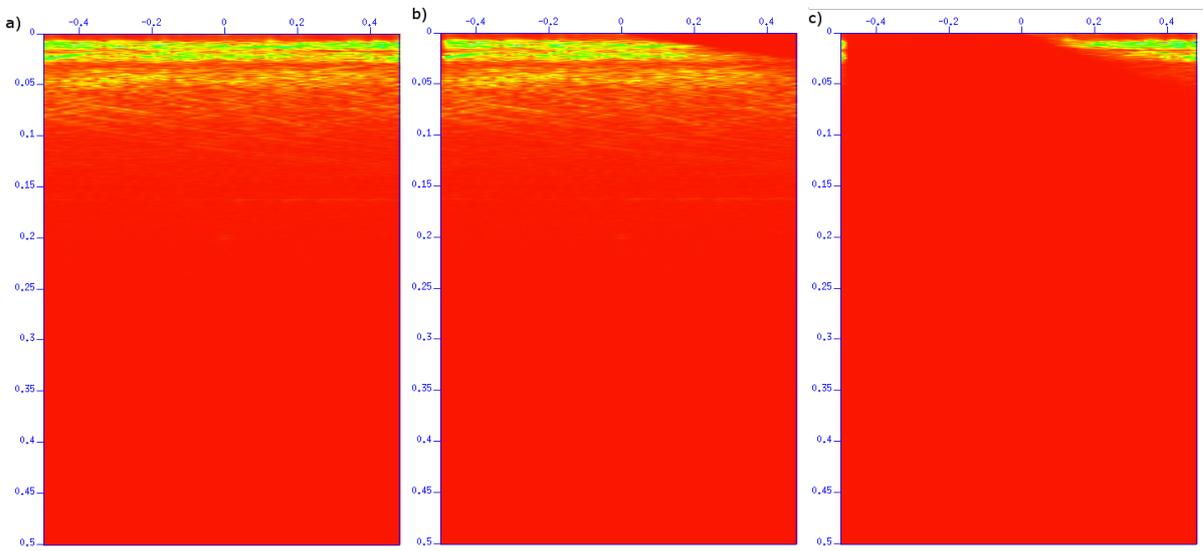


Figura 38 – Espectro $F-K$ do tiro Oz5. a) Espectro Bruto b) Espectro Filtrado c) Resíduo.



No caso do dado Oz25 a filtragem removeu grande parte do ruído de rolamento superficial, diminuindo a amplitude do mesmo e deixando um pouco mais nítidos possíveis refletos mascarados pelo ruído. Além disso, percebe-se que a mesma filtragem removeu também parte da onda direta, apesar de baixa amplitude relativa a porção de *ground-roll* removido, vide Figura 35 (c). Todavia, ressalta-se que as reverberações oriundas de ondas superficiais, representadas pelos limites do cone de ruído, ainda estão presentes, apesar de

estarem em menor amplitude.

Já para do tiro Oz5, nota-se que o resultado não removeu grande parte do *ground-roll*. Apesar de seu resíduo, Figura 37 (c), apresentar a atenuação do ruído em questão e parte da onda direta, a amplitude necessária não fora suficiente para desmascarar os possíveis refletores presentes no dado. Tal situação se deu devido a extrema baixa resolução do dado. Com isso, o espectro $F-K$ do tiro Oz5 apresentou grandes porções de eventos sobrepostos, dificultando demasiadamente uma filtragem mais incisiva. A baixa resolução inerente a este dado também afetou a filtragem utilizando a transformada Wavelet como será visto na seção seguinte.

É importante ressaltar que os resultados apresentados são derivados das melhores filtragens $F-K$ alcançadas, sendo realizadas diversas tentativas com um ou mais filtros de duas dimensões e com diversas formas. Outro ponto importante de se destacar é a constante presença de onda direta sendo parcialmente removida juntamente com o ruído em questão. Apesar de não ser comumente utilizada, a mesma não faz parte do objetivo do presente trabalho e apresentou constante parcial sobreposição com o evento correspondente ao *ground-roll*, por isso fora atenuada também, mas em proporções menores.

6.3 Decomposição Wavelet 2D

No caso do uso da transformada Wavelet 2D para a filtragem do ruído de rolamento superficial, foram utilizadas diversas wavelets base para o processo, sendo apresentados os melhores resultados graficamente. Como ressaltado em capítulos anteriores, o algoritmo utilizado fora o proposto por Cohen e Chen (1993), vide Figura 19 do Capítulo 4.

A decomposição fora realizada em três níveis para todos os dados, exceto o Oz5 sendo realizada apenas uma. Tal escolha de níveis deve-se ao limite de resolução dos coeficientes verticais para a devida filtragem, onde, para a maioria dos dados, os coeficientes verticais até nível 3 possuíam uma resolução razoável para uma remoção de ruído "segura", sem perda de informações relevantes conjuntas. Todavia, como ressaltado na seção anterior, o tiro Oz5 possui menor resolução em comparação aos demais dados utilizados, sendo possível realizar apenas a decomposição em um nível.

Figura 39 – Resultado derivado da filtragem utilizando a transformada Wavelet 2D do tiro K1. a) Tiro K1 b) Tiro K1 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.

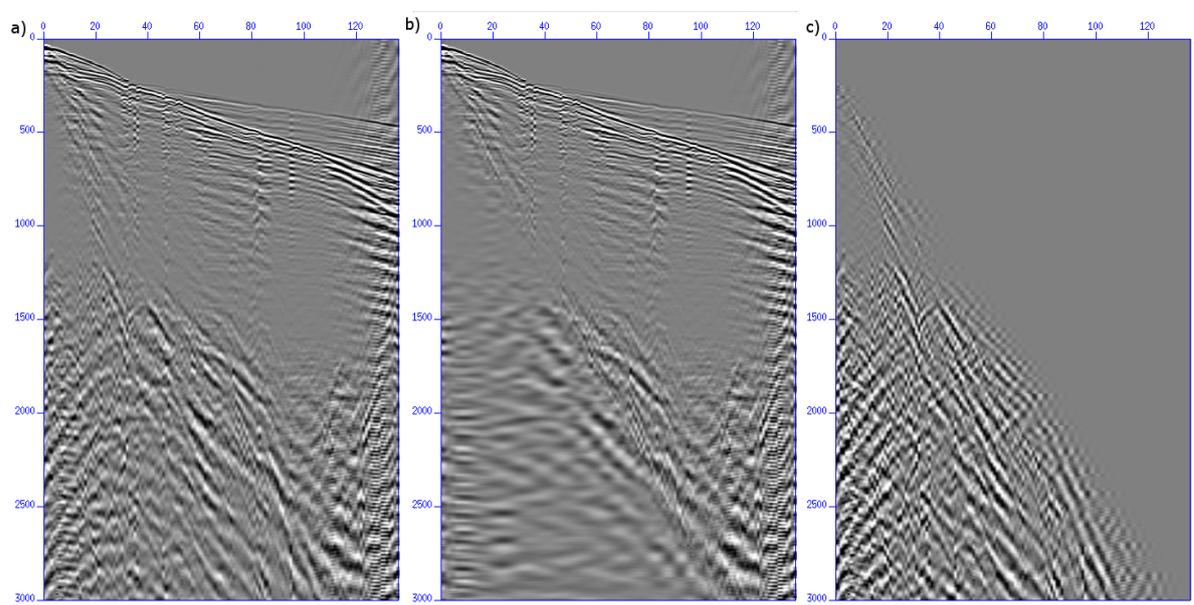


Figura 40 – Coeficientes Verticais do tiro K1. a) Coeficiente de nível 1 b) Coeficiente de nível 2 c) Coeficiente de nível 3.

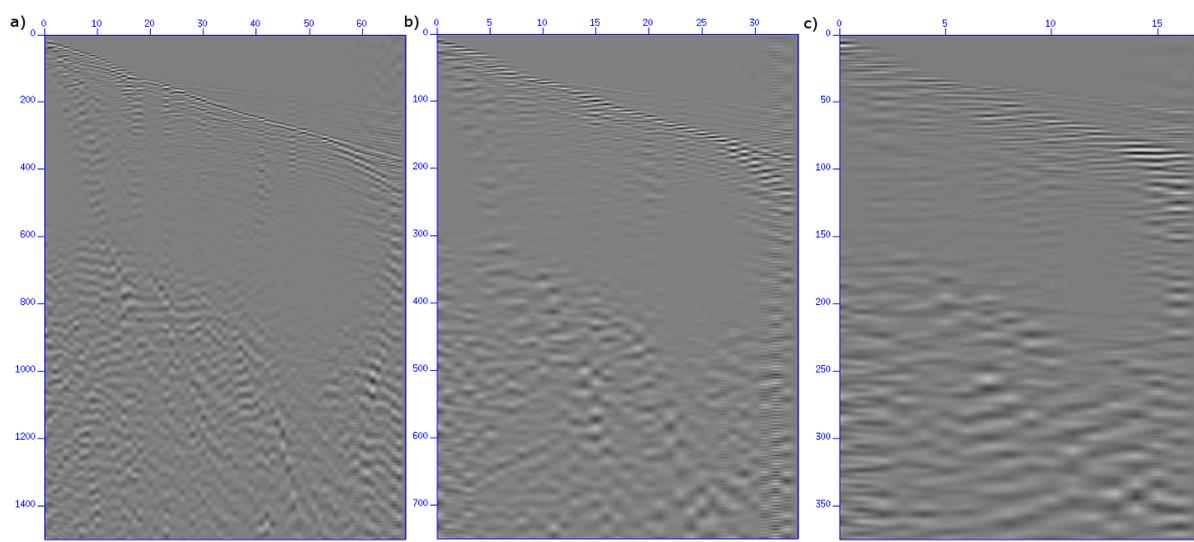


Figura 41 – Resultado derivado da filtragem utilizando a transformada Wavelet 2D do tiro K2. a) Tiro K2 b) Tiro K2 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.

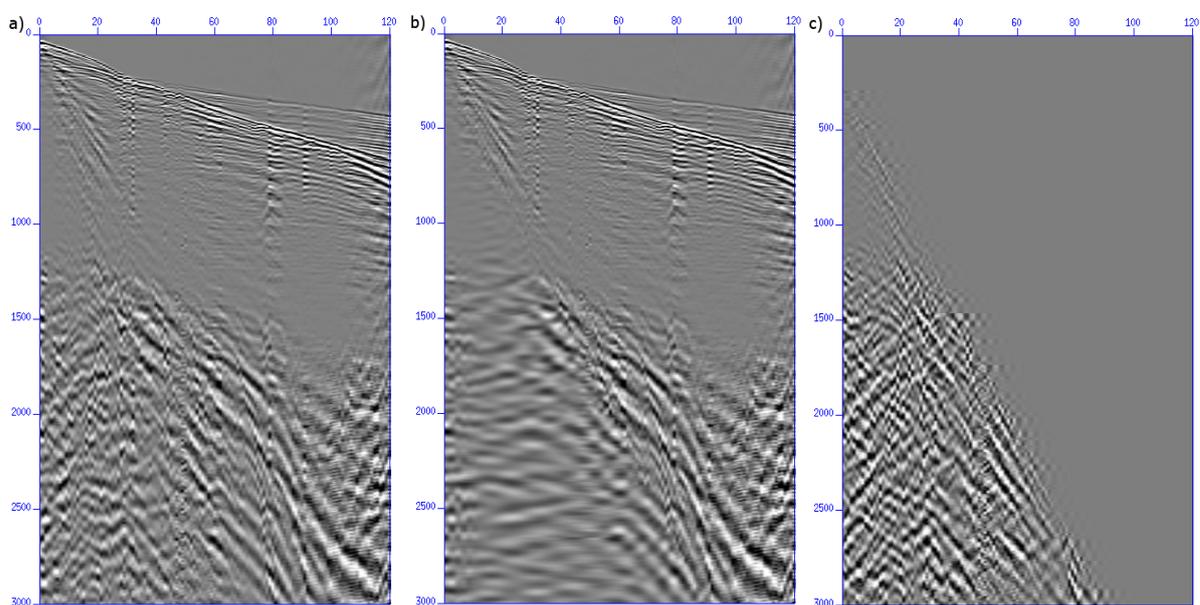


Figura 42 – Coeficientes Verticais do tiro K2. a) Coeficiente de nível 1 b) Coeficiente de nível 2 c) Coeficiente de nível 3.

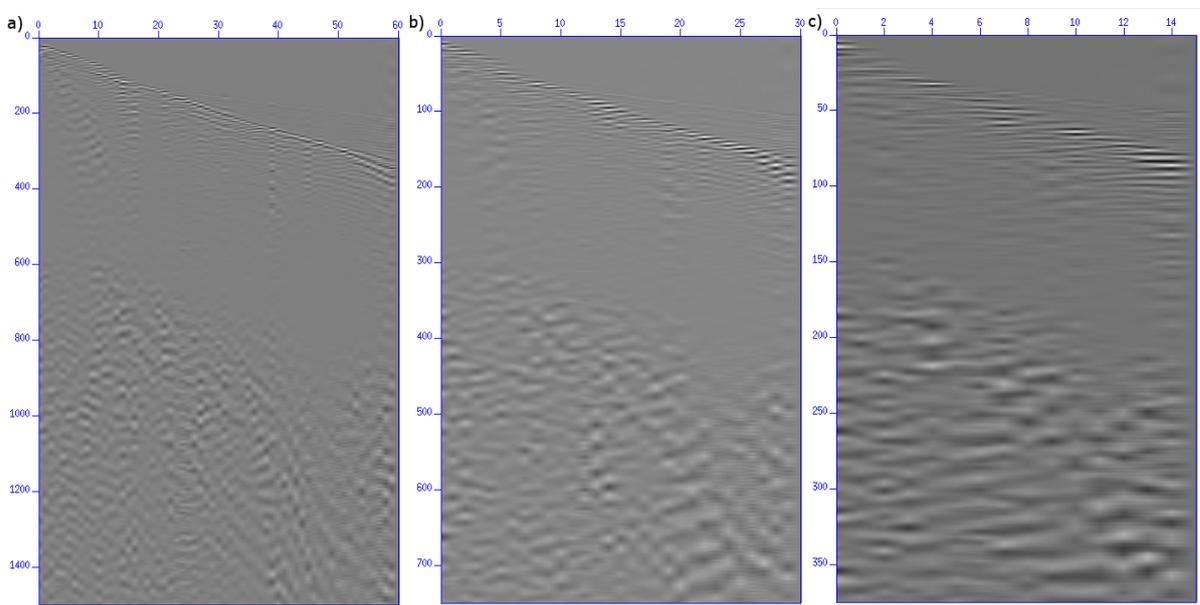


Figura 43 – Resultado derivado da filtragem utilizando a transformada Wavelet 2D do tiro Oz25. a) Tiro Oz25 b) Tiro Oz25 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.

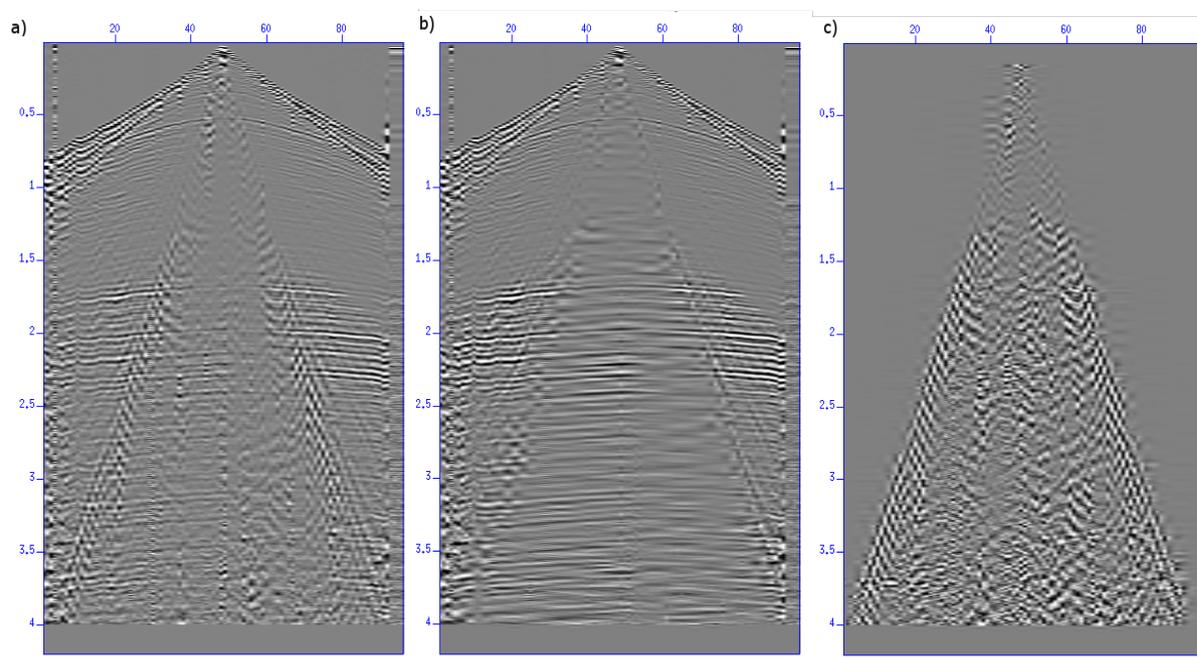


Figura 44 – Coeficientes Verticais do tiro Oz25. a) Coeficiente de nível 1 b) Coeficiente de nível 2 c) Coeficiente de nível 3.

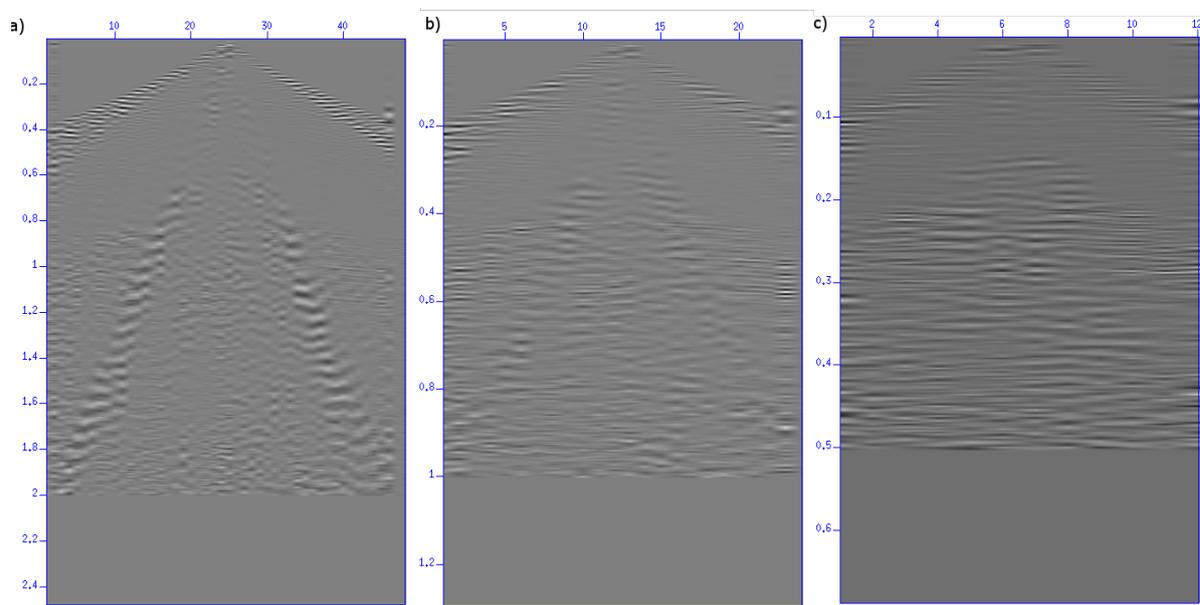


Figura 45 – Resultado derivado da filtragem utilizando a transformada Wavelet 2D do tiro Oz5. a) Tiro Oz5 b) Tiro Oz5 filtrado c) Resíduo oriundo da filtragem.

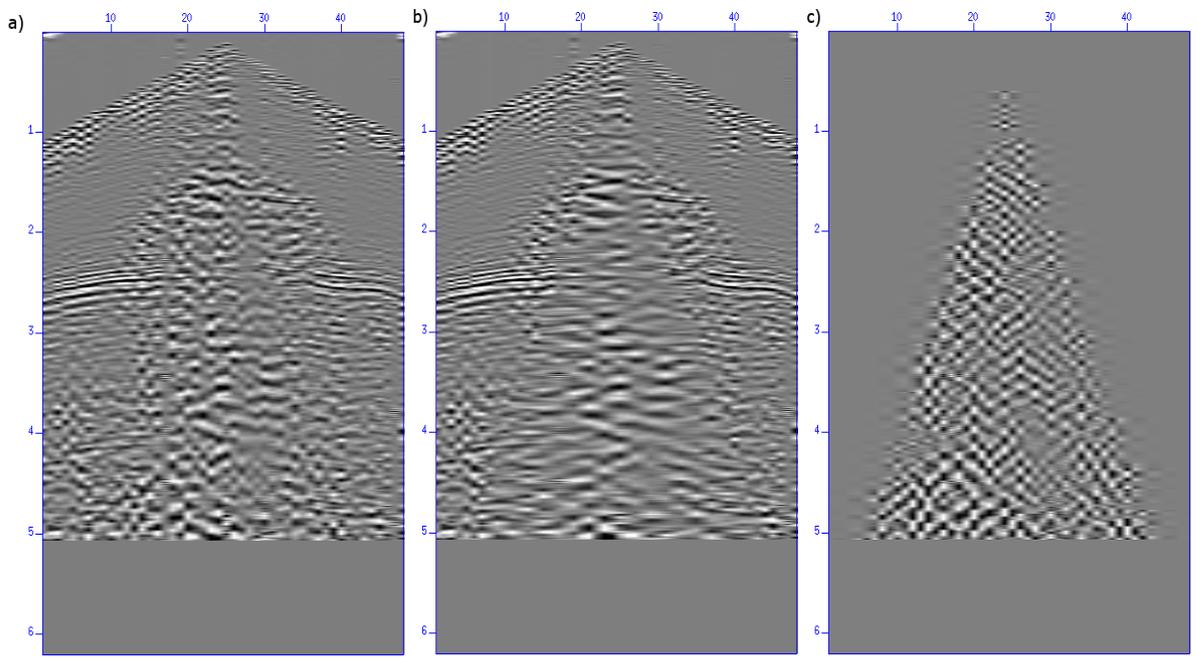
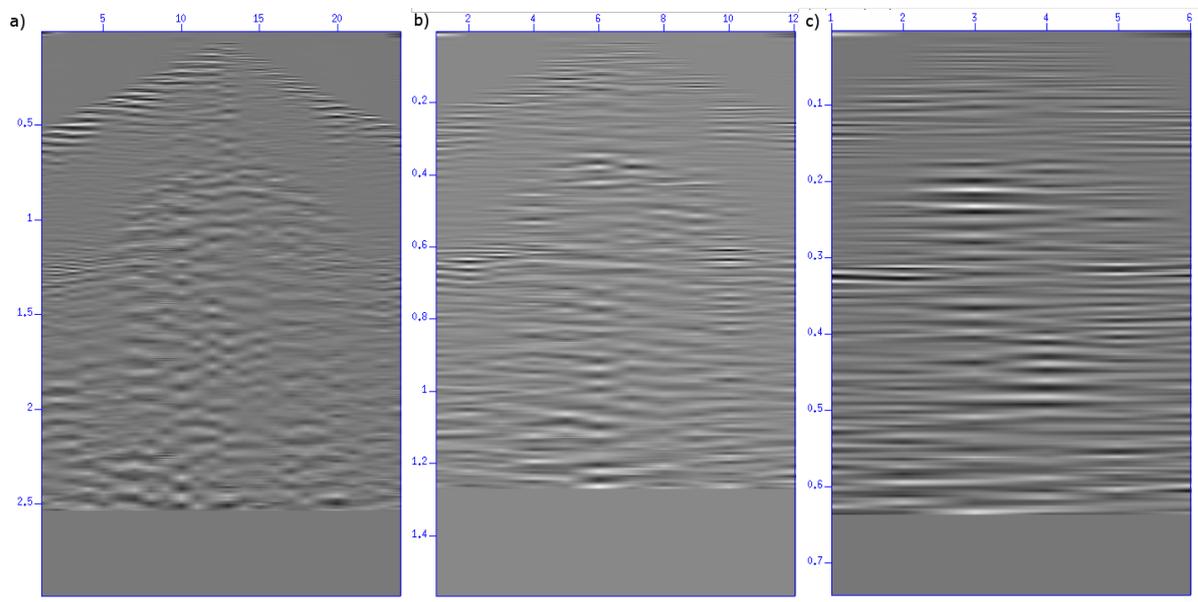


Figura 46 – Coeficientes Verticais do tiro Oz5. a) Coeficiente de nível 1 b) Coeficiente de nível 2 c) Coeficiente de nível 3.



A Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42, Figura 43, Figura 44, Figura 45 e Figura 46 apresentam os resultados das filtrações utilizando a transformada Wavelet e os respectivos coeficientes verticais. Nesta metodologia, os resíduos apresentaram-se concentrados apenas na região do ruído, sem perdas de outras informações, e com a devida remoção do *ground-roll*.

Para o caso do tiro K1, percebe-se que apenas a porção referente a área do ruído de rolamento superficial fora filtrada, vide Figura 39 (c). Todavia, nota-se que ainda há presença de reverberações oriundas de ondas superficiais e os eventos que eram sobrepostos pelo *ground-roll* também foram atenuados, mesmo que em proporções menores. Ressalta-se que, apesar do processo de filtragem, a porção onde antes havia presença de ruído ainda aparenta possuir outros tipos de eventos indesejáveis. Tal situação pode ser devida, como ressaltado anteriormente, a possível presença de outros ruídos na mesma região do dado além do ruído de rolamento superficial.

Nota-se que uma situação similar a descrita acima ocorre para o tiro K2, onde o resíduo apresenta uma filtragem incisiva da região do ruído de interesse, mas a saída da filtragem utilizando a decomposição Wavelet ainda apresenta uma região ruidosa e os eventos sobrepostos também foram atenuados, mesmo que em menores proporções.

Já para o caso do tiro Oz25, que pode ser dito como o melhor resultado gráfico apresentado por este método de filtragem, o resíduo evidencia que o processo fora incisivo, assim como os demais. Além disso, a mesma imagem, Figura 43 (c), evidencia que o ruído fora devidamente removido, juntamente com parte das reverberações das ondas superficiais. Remetendo-se ao dado filtrado, Figura 43 (b), nota-se que as reflexões antes sobrepostas pelo *ground-roll* ficaram mais nítidas e concordantes fora da região de filtragem. Todavia, percebe-se também que algumas reverberações mais distantes da área de filtragem ainda permaneceram e que, assim como nos casos anteriores, os eventos reflexivos também foram parcialmente atenuados.

No caso do tiro Oz5, nota-se que parte da amplitude do ruído de rolamento superficial fora atenuada, assim como alguns eventos de interesse, vide Figura 45 (b). O resíduo, assim como nos demais casos deste método, mostrou mais uma vez que a filtragem fora precisa, afetando apenas eventos dentro da área do cone de remoção. É importante ressaltar também, assim como no caso da filtragem $F-K$, que a baixa resolução do dado afetou diretamente o processo de filtragem. Diferentemente dos demais tiros, o Oz5 não pôde ser decomposto em três níveis, mas apenas em um, devido a grande perda de resolução a cada nível de decomposição em conjunto com a já baixa qualidade apresentada, havendo assim um resultado menos satisfatório comparado aos demais.

Percebe-se, ao final, que a filtragem derivada da decomposição Wavelet 2D apresentou os melhores resultados gráficos em comparação aos demais métodos utilizados. Além disso, nota-se que também foi a filtragem mais incisiva, onde apenas a área referente ao ruído de rolamento superficial fora atenuado, tendo mínima perda de informação relevante. Em respeito a avaliação quantitativa, que será apresentada em seção a seguir, a decomposição Wavelet 2D também apresentou os melhores resultados.

É importante destacar que, assim como no caso da filtragem $F-K$, os resultados apresentados são derivados das melhores filtrações alcançadas, sendo realizados diversos

testes com áreas de remoções e com diferentes wavelets das famílias *Biortogonais* e *Daubechies*, além da wavelet *Haar*.

6.4 Avaliação Quantitativa

Juntamente com a avaliação gráfica de cada método de filtragem em todos os dados utilizados, foram gerados também medidas para avaliar o erro por trás de cada processo. Estas métricas trabalham tanto no âmbito da imagem, no caso do *PSNR* e *SNR*, quanto no domínio estatístico do dado, no caso do *CV*, vide capítulo anterior.

Destaca-se que para o caso da filtragem utilizando a transformada Wavelet 2D, serão apresentados 6 variações de wavelets, todas dentro das famílias citadas em seção anterior, visando apresentar um resultado mais sucinto e conciso.

Desta forma, a Tabela 1 apresenta as medidas de erro adquiridos durante os processos de filtragem realizados, visando a atenuação do ruído de rolamento superficial. Onde, ao lado do nome dos dados estão os respectivos coeficientes de variação de referência, ou seja, antes de aplicado qualquer processo de filtragem.

Nota-se que para todos os casos a filtragem passa-banda reduziu o coeficiente de variação dos dados. Todavia, apesar de na maioria dos cenários esta diminuição ser indicativo de atenuação de ruído, nesta situação é devido a brusca retirada de informação do dado, reduzindo assim a largura do histograma não somente a supressão de ruído, mas também a grande quantidade de informação relevante. Esta redução é evidenciada também pelos resíduos desta filtragem, que apresentam não só o *ground-roll* mas outros eventos, e pelos valores das demais métricas serem significativamente menores em comparação aos outros processos de filtragem, sendo a média do *SNR* igual a 3,6976 dB e do *PSNR* igual a 17,9206 dB.

No caso da filtragem *F-K*, percebe-se notoriamente que os resultados numéricos são melhores que os alcançados pela filtragem passa-banda. A média do *PSNR* de 23,8296 dB e do *SNR* de 7,0268 dB, juntamente com os resíduos apresentados pela filtragem, corroboram com tal afirmação. Evidenciando assim, que a filtragem *F-K* foram mais bem sucedida comparada ao método utilizando o filtro passa-banda, apesar de ainda remover algumas informações além do ruído de rolamento superficial.

Tabela 1 – Tabela de erros

Dado	Erro	Passa-Banda	F-K	Haar	db5	db15	Bior. 6.8	Bior. 5.5	Bior 3.9
K1 CV= 22,92%	SNR (dB)	3,3908	5,8460	11,5948	12,2084	12,9169	12,2443	12,087	12,3825
	PSNR (dB)	17,11	22,197	27,9203	28,5342	29,2426	28,5700	28,4064	28,7083
	CV (%)	21,87	24,17	21,93	21,88	21,94	21,88	21,9	21,9
K2 CV= 22,94%	SNR (dB)	4,6781	7,1952	11,5763	12,2443	12,5077	11,8698	12,375	11,9891
	PSNR (dB)	19,0569	25,6771	29,2888	29,6661	30,0022	29,5823	30,0875	29,7016
	CV (%)	21,68	23,85	21,91	21,93	21,97	21,92	21,96	21,95
Oz5 CV= 14,69%	SNR (dB)	1,8986	5,3879	9,4999	8,689	8,5521	8,1015	8,4405	8,694
	PSNR (dB)	15,9972	21,3258	25,4379	24,6270	24,4900	24,0394	24,3785	24,587
	CV (%)	13,76	21,63	14,72	14,68	14,71	14,70	14,69	14,72
Oz25 CV= 20,43%	SNR (dB)	4,8231	9,6853	10,9444	11,0666	11,1082	11,3501	11,1973	10,8935
	PSNR (dB)	19,5181	26,1184	27,3775	27,4997	27,5412	27,7831	27,6303	27,3265
	CV (%)	19,66	22,91	19,45	19,46	19,44	19,43	19,44	19,46

Todavia, cabe ressaltar que em todos os casos utilizando a filtragem $F-K$ o CV foi aumentado, podendo indicar que juntamente com a supressão de ruídos e outros eventos, informações indesejáveis podem ter sido adicionadas ao dado filtrado. Para esta inferência, a Figura 37 (b) apresenta alguns indícios corroborando, onde na região sem informação, correspondente a porção nula do dado, alguns eventos podem ser notados onde antes não havia informação.

Para o caso da filtragem utilizando a decomposição Wavelet 2D, pode-se notar que, assim como os resultados gráficos, as métricas utilizadas também apontam que este método obteve os melhores resultados para filtragem do ruído de rolamento superficial. A média dos erros PSNR e SNR foram, respectivamente, de 27,0061 dB e 11,2604 dB para a wavelet *Haar*, 28,0170 dB e 11,6375 dB para a wavelet *db5*, 28,3919 dB e 11,8080 dB considerando o uso da wavelet *db15*. Para o caso das wavelets *Biortogonais* apresentadas, têm-se que a média dos erros PSNR e SNR de 28,1766 dB e 11,6100 dB para a wavelet *bior 6.8*, 28,0184 dB e 11,6422 dB para a wavelet *bior 5.5* e 28,0174 dB e 11,4413 dB para a *bior 3.9*. Em geral, nota-se que os resultados foram próximos, com pequenas variações

entre as wavelets base utilizadas durante o processo de decomposição, mas todas, sem exceção, apresentaram resultados melhores que as demais técnicas de filtragem, tanto quantitativa, quanto qualitativamente.

Para o caso da métrica do coeficiente de variação (CV), nota-se também que os resultados apresentados foram melhores que dos adquiridos a partir dos demais métodos. Em todos os casos, o coeficiente de variação foi reduzido, e, diferentemente do que foi apresentado pela filtragem passa-banda, os resíduos apontam um processo incisivo, atuando apenas na área do *ground-roll*. Todavia, é importante ressaltar que, assim como no caso da filtragem $F-K$, eventos reflexivos que são sobrepostos pelo ruído de rolamento superficial também foram atenuados, mesmo que em amplitudes menores. Tal atenuação também contribuí para a diminuição do coeficiente de variação do dado filtrado, mesmo que em menores proporções, ao se comparar com a diminuição levada pela supressão do ruído em estudo.

7 Conclusão

Através de toda a discussão apresentada pelo presente trabalho, foi possível se obter uma compreensão tanto teórica, quanto prática dos métodos utilizados e aplicados, permitindo assim estruturar conclusões sobre os processos e resultados alcançados.

O objetivo principal do trabalho residiu na análise e aplicação da transformada Wavelet na supressão do ruído de rolamento superficial. Juntamente com esta ferramenta, outros métodos de filtragem, a $F-K$ e passa-banda, foram aplicados para efeitos comparativos e por serem comuns no âmbito de atenuar este ruído.

Após a obtenção dos resultados foi possível realizar a análise dos mesmos através de avaliações qualitativas, no âmbito da análise da imagem representativa do dado, e quantitativas, através do uso de erros que trabalham no âmbito estatístico do dado, o coeficiente de variação, e no âmbito da imagem, o SNR e PSNR.

Desta forma, ao associar todas as informações encontradas através dos resultados e das métricas, pôde-se concluir que, além de que o objetivo fora alcançado, a transformada Wavelet obteve resultados satisfatórios ao atenuar o ruído de rolamento superficial.

A ferramenta proposta obteve erro PSNR médio de 27,9379 dB, cerca de 4,1083 dB a mais em comparação a filtragem $F-K$ e 10,0173 dB em comparação a filtragem passa-banda. Além disso, a decomposição Wavelet também obteve SNR médio de 11,5666 dB, maior aproximadamente 4,5397 dB em média do que apresentado pela filtragem $F-K$ e 7,8690 dB em média do que comparado a filtragem passa-banda.

Ambas as métricas acima apontaram que a transformada Wavelet atingiu resultados de maior qualidade gráfica e menor atenuação de informação no processo de filtragem, do que comparado com os demais métodos utilizados.

Além disso, o coeficiente de variação também apontou para uma vantagem no uso da transformada Wavelet para a filtragem do *ground-roll*. Para todas as wavelets utilizadas no processo de decomposição, o CV do dado filtrado diminuiu consideravelmente em comparação ao CV do dado de entrada, o que denota a redução na largura do histograma após o processo de filtragem. Todavia, cabe ressaltar que, apesar de a mesma diminuição ocorrer na filtragem passa-banda, o caso da transformada Wavelet é devido, principalmente, a perda de eventos indesejáveis, do que a perda de todo tipo de informação presente nas porções de corte como ocorrido no outro método.

Destaca-se também que graficamente os resultados oriundos da decomposição Wavelet corroboram as indicações apontadas pelas métricas acima. Os resíduos apresentados por todos os tiros apresentam uma filtragem bastante incisiva, atendo-se apenas a região do ruído de rolamento superficial e mais nenhuma outra, onde a maior parte da atenuação é focada no ruído em questão, tendo assim a mínima perda de informação relevante.

Todavia, é importante destacar que a transformada Wavelet, assim como a filtragem $F-K$, apresentou limitações quanto a dados de baixa resolução, como no caso do tiro Oz5. A cada nível de decomposição a resolução dos coeficientes reduzia, desta forma, ao se deparar com dados de entrada já em baixa resolução, o nível de detalhe que se deseja alcançar através da decomposição não poderia ser alcançado sem prejudicar o processo de filtragem. Outro ponto a se destacar é que os erros utilizados obtiveram pequenas variações em relação a wavelet base usada, mas as mesmas são ortogonais e já aplicadas em diversas bibliografias, sendo tal efeito esperado. Sendo assim, o mesmo pode não ocorrer com o uso de outras wavelets como base para a decomposição 2D.

Desta forma, como observação final, coloca-se que a escolha do método de filtragem deve ser feita atendo-se principalmente ao tipo de dado e ruído que deseja-se filtrar. Para o caso da supressão do *ground-roll* em dados sísmicos utilizando a metodologia proposta por Cohen e Chen (1993), a transformada Wavelet mostrou-se uma ferramenta prática, de excelente acurácia, com perdas mínimas de informações relevantes em comparação a demais técnicas usuais de filtragem e sendo extremamente incisiva. Todavia, ressalta-se que para outros tipos de filtragens considerando ruídos que não possuam mergulhos específicos, diferentemente do ruído aqui estudado, recomenda-se ainda se fazer uma análise prévia de qual tipo implementação se empregaria e quais wavelets base obteriam as melhores respostas e resultados, antes da aplicação da metodologia aqui utilizada.

Referências

- AL-MARZOUQI, H.; ALREGIB, G. Using the coefficient of variation to improve the sparsity of seismic data. In: IEEE. *Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), 2013 IEEE*. [S.l.], 2013. p. 630–630. Citado na página 58.
- ALLEN, J. Short term spectral analysis, synthesis, and modification by discrete fourier transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, IEEE, v. 25, n. 3, p. 235–238, 1977. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 41.
- ASKARI, R.; SIAHKOOHI, H. R. Ground roll attenuation using the s and x-f-k transforms. *Geophysical Prospecting*, Blackwell Publishing Ltd, v. 56, n. 1, p. 105–114, 2008. ISSN 1365-2478. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2478.2007.00659.x>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 41.
- AWASTHI, R.; SINGH, M. S. P. Improved seismic denoising curvelet transform. *Int. J. Electron. Comput. Sci. Eng.*, v. 4, p. 2270–2278, 2012. Citado na página 59.
- BERESFORD-SMITH, G.; RANGO, R. Suppression of ground roll by windowing in two domains. *First Break*, v. 7, n. 2, p. 55–63, 1989. Citado na página 27.
- BERESFORD-SMITH, G.; RANGO, R. N. Dispersive noise removal in tx space: Application to arctic data. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 53, n. 3, p. 346–358, 1988. Citado 3 vezes nas páginas 14, 27 e 40.
- BGS. *British Geological Survey - Natural Environment Research Council*. 2017. Disponível em: <<http://www.bgs.ac.uk/home.html>>. Acesso em: 2016-07-30. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 51.
- BOLT, B. A. *Inside the Earth: Evidence from earthquakes*. [S.l.]: Freeman, 1982. Citado 4 vezes nas páginas 7, 22, 23 e 24.
- BRACEWELL, R. N. *The Fourier transform and its applications*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1986. v. 31999. Citado 4 vezes nas páginas 14, 28, 30 e 31.
- CANALES, L. L. Random noise reduction. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1984*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1984. p. 525–527. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 41.
- CHAKRABORTY, A.; OKAYA, D. Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 60, n. 6, p. 1906–1916, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 15, 42 e 48.
- CHUI, C. K. *An introduction to wavelets*. [S.l.]: Elsevier, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 47.
- COHEN, J. K.; CHEN, T. Quantitative dip bounds for the two-dimensional discrete wavelet transform. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *SPIE's 1993 International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation*. [S.l.], 1993. p. 140–157. Citado 8 vezes nas páginas 8, 42, 45, 48, 49, 53, 68 e 78.

- COHEN, L. *Time Frequency Analysis: Theory and Applications*. 1st. ed. Prentice Hall, 1994. ISBN 0135945321,9780135945322. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=D6B829385FDAEF4CB48B26907E8A6781>>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 36.
- COIFMAN, R. R.; MEYER, Y.; WICKERHAUSER, V. Wavelet analysis and signal processing. In: CITESEER. *In Wavelets and their applications*. [S.l.], 1992. Citado na página 48.
- CWP, Center of Wave Phenomena of the Colorado School of Mines. 1998. Disponível em: <<http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes/>>. Acesso em: 2016-07-30. Citado na página 16.
- DALMAU, F. R. et al. Lossy data compression with dct transforms. In: *EAGE Workshop on High Performance Computing for Upstream*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 59.
- DAUBECHIES, I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Communications on pure and applied mathematics*, Wiley Online Library, v. 41, n. 7, p. 909–996, 1988. Citado 3 vezes nas páginas 43, 45 e 48.
- DAUBECHIES, I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets ii. variations on a theme. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, SIAM, v. 24, n. 2, p. 499–519, 1993. Citado na página 45.
- DEIGHAN, A.; WATTS, D. 2d filtering using the wavelet packet transform. In: *58th EAGE Conference and Exhibition*. [S.l.: s.n.], 1996. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 42.
- DEIGHAN, A. J.; WATTS, D. R. Ground-roll suppression using the wavelet transform. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 62, n. 6, p. 1896–1903, 1997. Citado 9 vezes nas páginas 13, 14, 15, 35, 42, 45, 48, 53 e 54.
- DISTEFANO, J. J.; STUBBERUD, A. J.; WILLIAMS, I. J. *Schaum's Outline of Feedback and control Systems*. [S.l.]: McGraw-Hill Professional, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 30.
- FELDER, M. D.; MASON, J. C.; EVANS, B. L. Efficient dual-tone multifrequency detection using the nonuniform discrete fourier transform. *IEEE Signal Processing Letters*, IEEE, v. 5, n. 7, p. 160–163, 1998. Citado na página 26.
- GOMES, V. M.; SANTOS, M. A. C.; BURGOS, R. B. Analysis of seismic data compression using spiht in seismic inversion. 2016. Citado na página 59.
- GOUDARZI, A. R.; RIAHI, M. A. Adaptive seismic ground roll attenuation using the double density dual tree discrete wavelet transform (dwt) method. *Earth Sciences Research Journal*, Maestría en Geofísica, Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia., v. 16, n. 2, p. 113–120, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 15, 42 e 54.
- GOUPILLAUD, P.; GROSSMANN, A.; MORLET, J. Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis. *Geoexploration*, Elsevier, v. 23, n. 1, p. 85–102, 1984. Citado na página 43.
- GÜLÜNAY, N. Seismic trace interpolation in the fourier transform domain. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 68, n. 1, p. 355–369, 2003. Citado na página 26.

- HALLIDAY, D. et al. Scattered ground-roll attenuation for 2d land data using seismic interferometry. In: *73rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 13.
- HUYNH-THU, Q.; GHANBARI, M. Scope of validity of psnr in image/video quality assessment. *Electronics letters*, IET, v. 44, n. 13, p. 800–801, 2008. Citado na página 59.
- JONES, I.; LEVY, S. Signal-to-noise ratio enhancement in multichannel seismic data via the karhunen-loève transform. *Geophysical prospecting*, Wiley Online Library, v. 35, n. 1, p. 12–32, 1987. Citado na página 57.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *Geofísica de Exploração*. [S.l.]: Oficina de Textos, 2002. ISBN 9788586238918. Citado 3 vezes nas páginas 17, 19 e 21.
- KINGSBURY, N. Image processing with complex wavelets. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, v. 357, n. 1760, p. 2543–2560, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 41.
- LEITE, F. et al. Optimal wavelet filter for suppression of coherent noise with an application to seismic data. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 387, n. 7, p. 1439–1445, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 15, 42 e 54.
- MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Ieee, v. 11, n. 7, p. 674–693, 1989. Citado 5 vezes nas páginas 8, 43, 47, 48 e 50.
- MALLAT, S. G.; ZHANG, Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries. *IEEE Transactions on signal processing*, IEEE, v. 41, n. 12, p. 3397–3415, 1993. Citado na página 48.
- MARTELET, G. et al. Characterization of geological boundaries using 1-d wavelet transform on gravity data: Theory and application to the himalayas. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 66, n. 4, p. 1116–1129, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 42.
- MATOS, M. C.; OSORIO, P. L. M. Supressão do ruído de rolamento superficial utilizando transformada wavelet 2d. *Sociedade Brasileira de Geofísica*, v. 1, n. 1, p. 1202–1205, 2001. Citado 6 vezes nas páginas 15, 42, 45, 48, 53 e 54.
- MENDEL, J. M. *Optimal seismic deconvolution: an estimation-based approach*. [S.l.]: Elsevier, 2013. Citado na página 18.
- MORLET, J. et al. Wave propagation and sampling theory—part i: Complex signal and scattering in multilayered media. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 47, n. 2, p. 203–221, 1982. Citado na página 43.
- MORSE, P. F.; HILDEBRANDT, G. F. Ground-roll suppression by the stackarray. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 54, n. 3, p. 290–301, 1989. Citado na página 13.
- NAWAB, S. H.; QUATIERI, T. F. Advanced topics in signal processing. *Lim and Oppenheim, P~aatice Hall, Englewood Cliffs, N*, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 41.

- OILFIELDGLOSSARY. *Schulumberger Oilfield Glossary*. 2017. Disponível em: <<http://www.glossary.oilfield.slb.com>>. Acesso em: 2016-07-30. Citado 3 vezes nas páginas 21, 23 e 25.
- OPPENHEIM, A. V. *Discrete-time signal processing*. [S.l.]: Pearson Education India, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 14, 28 e 30.
- OSMAN, O.; ROBINSON, E. *Seismic source signature estimation and measurement*. Society of Exploration Geophysicists, 1996. (Geophysics reprint series). ISBN 9780931830006. Disponível em: <<https://books.google.co.uk/books?id=ir4SAQAIAAJ>>. Citado na página 18.
- PARTYKA, G.; GRIDLEY, J.; LOPEZ, J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization. *The Leading Edge*, Society of Exploration Geophysicists, v. 18, n. 3, p. 353–360, 1999. Citado na página 26.
- ROMANO, F. L. et al. Analysis of the coefficient of variation in shear and tensile bond strength tests. *Journal of Applied Oral Science*, SciELO Brasil, v. 13, n. 3, p. 243–246, 2005. Citado na página 58.
- RUSS, J. C. et al. The image processing handbook. *Computers in Physics*, AIP Publishing, v. 8, n. 2, p. 177–178, 1994. Citado 4 vezes nas páginas 26, 32, 57 e 58.
- RUSSELL, B. *Introduction to Seismic Inversion Methods*. Society of Exploration Geophysicists, 1988. (Course Notes Ser. : No. 27). ISBN 9780931830655. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=uUIx-89aifwC>>. Citado na página 18.
- SAHAMBI, J.; TANDON, S.; BHATT, R. Using wavelet transforms for ecg characterization. an on-line digital signal processing system. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, IEEE, v. 16, n. 1, p. 77–83, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 41.
- SEISMICSURVEY. *Seismic Survey | A vital part of oil and gas exploration*. 2017. Disponível em: <<http://www.seismicsurvey.com.au/>>. Acesso em: 2017-10-18. Citado na página 18.
- SHAN, H.; MA, J.; YANG, H. Comparisons of wavelets, contourlets and curvelets in seismic denoising. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, v. 69, n. 2, p. 103–115, 2009. Citado na página 59.
- SHAPIRO, N. M. et al. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 307, n. 5715, p. 1615–1618, 2005. Citado na página 57.
- SHERIFF, R.; GELDART, L. *Exploration seismology: History, theory, data acquisition vol. 1*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1982. Citado na página 18.
- SILVA, A. da; PROTÁZIO, J. M. B.; REMACRE, A. Z. Análise wavelet aplicada na mudança de escala em perfis geofísicos do campo de namorado. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. suppl. 2, p. 121–126, 2016. Citado na página 42.
- SMITH, J. O. *Spectral audio signal processing*. [S.l.]: W3K publishing, 2011. Citado na página 36.

- VALLÉE, M. A. et al. Estimating depth and model type using the continuous wavelet transform of magnetic data. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 69, n. 1, p. 191–199, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 42.
- WALA, P. M. *Scanning RSSI receiver system using inverse fast fourier transforms for a cellular communications system with centralized base stations and distributed antenna units*. [S.l.]: Google Patents, 2000. US Patent 6,112,086. Citado na página 26.
- WILLIAMS, J. R.; AMARATUNGA, K. Introduction to wavelets in engineering. *International journal for numerical methods in engineering*, Wiley Online Library, v. 37, n. 14, p. 2365–2388, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 41.
- XIE, K.; BAI, Z.; YU, W. Fast seismic data compression based on high-efficiency spiht. *Electronics Letters*, IET, v. 50, n. 5, p. 365–367, 2014. Citado na página 59.
- XIZHI, Z. The application of wavelet transform in digital image processing. In: IEEE. *MultiMedia and Information Technology, 2008. MMIT'08. International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 326–329. Citado 3 vezes nas páginas 14, 26 e 41.
- XU, H.-Q.; GUI, Z.-X. Signal-to-noise ratio application to seismic marker analysis and fracture detection. *Applied Geophysics*, Springer Science & Business Media, v. 11, n. 1, p. 73, 2014. Citado na página 57.
- YILMAZ, O. *Seismic data analysis*. [S.l.]: Society of exploration geophysicists Tulsa, 2001. v. 1. Citado 6 vezes nas páginas 7, 14, 15, 18, 20 e 51.
- ZADY, M. F. *Z4: Mean, Standard Deviation, And Coefficient of Variation*. [S.l.]: Westgard-QC, 1999. Citado na página 57.
- ZHANG, R.; ULRYCH, T. J. Physical wavelet frame denoising. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 68, n. 1, p. 225–231, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 54.
- ZHELUDEV, V. A.; KOSLOFF, D. D.; RAGOZA, E. Y. Compression of segmented 3d seismic data. *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, World Scientific, v. 2, n. 03, p. 269–281, 2004. Citado na página 59.
- ZHU, L.; LIU, E.; MCCLELLAN, J. H. Seismic data denoising through multiscale and sparsity-promoting dictionary learning. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, 2015. Citado na página 59.
- ZOEPPRITZ, K.; ERDBEBNENWELLEN, V. On the reflection and penetration of seismic waves through unstable layers. *Göttinger Nachrichten*, I, p. 66–84, 1919. Citado na página 18.

Apêndices

APÊNDICE A – Código para Decomposição Wavelet 2D

```

%% Comments

% Code for Wavelet decomposition 2D of a seismic data

% Reinaldo Mozart – Univesidade Federal Fluminense

% Contact : rmozart@id.uff.br

% 09/05/2017

% WARNING!!!!!! Following function and package are needed (all
    opensource):

% 1– Seislab 3.01 or higher

% 2– Ginputc.m

%% Reading File

seismic=read_segy_file; % Select file

seismic=s_gain(seismic); % Automatic Gain Control

%s_spectrum(seismic); % Spectrum plot

matrix= seismic.traces; % Matrix of trace data

figure; imagesc(matrix);colormap gray ; title('Raw data'); %
    Data

%% Data Top Mute (Optional)

```

```
[a1,b1]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %  
    Select data interactively  
  
x1= min(round(a1(:))): max(round(a1(:))); % Curver domain for  
    interpol  
  
eq1=polyfit(a1,b1,2); % Generation of angular and linear  
    coefficient  
  
y1=round(polyval(eq1,x1)); % Generate the result of the interpol  
  
i=1;  
  
while i < size(x1,2); % Reduction  
  
    matrix(1:y1(i),x1(i))=0;  
  
    i= i+1;  
end  
  
[a2,b2]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %  
    Select data interactively  
  
x2= min(round(a2(:))): max(round(a2(:))); % Curver domain for  
    interpol  
  
eq2=polyfit(a2,b2,2); % Generation of angular and linear  
    coefficient  
  
y2=round(polyval(eq2,x2)); % Generate the result of the interpol  
  
j=1;  
  
while j < size(x2,2); % Reduction  
  
    matrix(1:y2(j),x2(j))=0;  
  
    j= j+1;
```

```
end
```

```
figure; imagesc(matrix); colormap gray ; title('Data with Top  
Mute'); % Data  
% with To Mute
```

```
%% 2D Wavelet Decomposition using Biorthogonal wavelet 6.8
```

```
[c,s]= wavedec2(matrix,3,'bior 6.8'); % Wavelet Decomposition in  
3 Levels
```

```
cv1= detcoef2('v',c,s,1); % Vertical Coefficient of level 1
```

```
cv2= detcoef2('v',c,s,2); % Vertical Coefficient of level 2
```

```
cv3= detcoef2('v',c,s,3); % Vertical Coefficient of level 3
```

```
cd1= detcoef2('d',c,s,1); % Diagonal Coefficient of Level 1
```

```
cd2= detcoef2('d',c,s,2); % Diagonal Coefficient of Level 2
```

```
cd3= detcoef2('d',c,s,3); % Diagonal Coefficient of Level 3
```

```
%% Filtering Vertical Coefficient of Level 1
```

```
figure; imagesc(cv1); colormap gray; title('Vertical Coefficient  
of Level 1');
```

```
[a3,b3]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %  
Select data interactively
```

```
x3= min(round(a3(:))): max(round(a3(:))); % Curver domain for  
interpol
```

```
eq3=polyfit(a3,b3,1); % Generation of angular and linear  
coefficient
```

```
y3=round(polyval(eq3,x3)); % Generate the result of the interpol

i=1;

while i < size(x3,2); % Reduction

    cv1(y3(i):size(cv1,1),x3(i))=0;

    i= i+1;
end

figure; imagesc(cv1); colormap gray; title('Vertical Coefficient
of Level 1'); ...
hold on; plot(x3,y3);

[a4,b4]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %
Select data interactively

x4= min(round(a4(:))): max(round(a4(:))); % Curver domain for
interpol

eq4=polyfit(a4,b4,1); % Generation of angular and linear
coefficient

y4=round(polyval(eq4,x4)); % Generate the result of the interpol

j=1;

while j < size(x4,2); % Reduction

    cv1(y4(j):size(cv1,1),x4(j))=0;

    j= j+1;
end

figure; imagesc(cv1); colormap gray; ...
```

```

    title('Vertical Coefficient of Level 1 Filtered');

%% Filtering Vertical Coefficient of Level 2

figure; imagesc(cv2); colormap gray; title('Vertical Coefficient
of Level 2');

[a5,b5]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %
    Select data interactively

x5= min(round(a5(:))): max(round(a5(:))); % Curver domain for
    interpol

eq5=polyfit(a5,b5,1); % Generation of angular and linear
    coefficient

y5=round(polyval(eq5,x5)); % Generate the result of the interpol

i=1;

while i < size(x5,2); % Reduction

    cv2(y5(i):size(cv2,1),x5(i))=0;

    i= i+1;
end

figure; imagesc(cv2); colormap gray; title('Vertical Coefficient
of Level 2'); ...
hold on; plot(x5,y5);

[a6,b6]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %
    Select data interactively

x6= min(round(a6(:))): max(round(a6(:))); % Curver domain for
    interpol

eq6=polyfit(a6,b6,1); % Generation of angular and linear
    coefficient

```

```
y6=round(polyval(eq6,x6)); % Generate the result of the interpol

j=1;

while j < size(x6,2); % Reduction

    cv2(y6(j):size(cv2,1),x6(j))=0;

    j= j+1;
end

figure; imagesc(cv2); colormap gray;...
title('Vertical Coefficient of Level 2 Filtered');

%% Filtering Vertical Coefficient of Level 3

figure; imagesc(cv3); colormap gray; title('Vertical Coefficient
of Level 3');

[a7,b7]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %
    Select data interactively

x7= min(round(a7(:))): max(round(a7(:))); % Curver domain for
    interpol

eq7=polyfit(a7,b7,1); % Generation of angular and linear
    coefficient

y7=round(polyval(eq7,x7)); % Generate the result of the interpol

i=1;

while i < size(x7,2); % Reduction

    cv3(y7(i):size(cv3,1),x7(i))=0;

    i= i+1;
end
```

```

figure; imagesc(cv3); colormap gray; title('Vertical Coefficient
      of Level 3'); ...
hold on; plot(x7,y7);

[a8,b8]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %
      Select data interactively

x8= min(round(a8(:))): max(round(a8(:))); % Curver domain for
      interpol

eq8=polyfit(a8,b8,1); % Generation of angular and linear
      coefficient

y8=round(polyval(eq8,x8)); % Generate the result of the interpol

j=1;

while j < size(x8,2); % Reduction

    cv3(y8(j):size(cv3,1),x8(j))=0;

    j= j+1;
end

figure; imagesc(cv3); colormap gray; ...
title('Vertical Coefficient of Level 2 Filtered');

%% Filtering Diagonal Coefficient of Level 1 (optional!)

figure; imagesc(cd1); colormap gray; title('Diagonal Coefficient
      of Level 1');

[a8,b8]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %
      Select data interactively

a8= round(a8); % Round the data

b8= round(b8); % Round the data

```

```
[a9,b9]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %  
    Select data interactively  
  
a9= round(a9); % Round the data  
  
b9= round(b9); % Round the data  
  
if a8(1,1) < a8(2,1);  
  
    for i= a8(1,1): a8(2,1); % Reduction  
  
        for j= 1: b8(1,1);  
  
            cd1(j,i)=0;  
        end  
  
    end  
  
else  
  
    for i= a8(2,1): a8(1,1); % Reduction  
  
        for j= 1: b8(1,1);  
  
            cd1(j,i)=0;  
        end  
  
    end  
  
end  
  
if a9(1,1) < a9(2,1)  
  
    for i= a9(1,1): a9(2,1); % Reduction  
  
        for j= 1: b9(1,1);  
  
            cd1(j,i)=0;
```

```
        end

    end

else

    for i= a9(2,1): a9(1,1); % Reduction

        for j= 1: b9(1,1);

            cd1(j,i)=0;
        end

    end

end

end

figure; imagesc(cd1); colormap gray; title('Diagonal Coefficient
of Level 1');

%% Filtering Diagonal Coefficient of Level 2 (optional)

figure; imagesc(cd2); colormap gray; title('Diagonal Coefficient
of Level 2');

[a10,b10]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %
    Select data interactively

a10= round(a10); % Round the data

b10= round(b10); % Round the data

[a11,b11]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %
    Select data interactively
```

```
a11= round(a11); % Round the data

b11= round(b11); % Round the data

if a10(1,1) < a10(2,1);

    for i= a10(1,1): a10(2,1); % Reduction

        for j= 1: b10(1,1);

            cd2(j , i)=0;
        end

    end

else

    for i= a10(2,1): a10(1,1); % Reduction

        for j= 1: b10(1,1);

            cd2(j , i)=0;
        end

    end

end

if a11(1,1) < a11(2,1)

    for i= a11(1,1): a11(2,1); % Reduction

        for j= 1: b11(1,1);

            cd2(j , i)=0;
        end

    end

end
```

```
else

    for i= a11(2,1): a11(1,1); % Reduction

        for j= 1: b11(1,1);

            cd2(j,i)=0;
        end

    end

end

end

figure; imagesc(cd2); colormap gray; title('Diagonal Coefficient
of Level 2');

%% Filtering Diagonal Coefficient of Level 3 (optional!)

figure; imagesc(cd3); colormap gray; title('Diagonal Coefficient
of Level 3');

[a12,b12]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %
Select data interactively

a12= round(a12); % Round the data

b12= round(b12); % Round the data

[a13,b13]= ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true); %
Select data interactively

a13= round(a13); % Round the data

b13= round(b13); % Round the data

if a12(1,1) < a12(2,1);
```

```
    for i= a12(1,1): a12(2,1); % Reduction

        for j= 1: b12(1,1);

            cd3(j , i)=0;
        end

    end

else

    for i= a12(2,1): a12(1,1); % Reduction

        for j= 1: b12(1,1);

            cd3(j , i)=0;
        end

    end

end

if a13(1,1) < a13(2,1)

    for i= a13(1,1): a13(2,1); % Reduction

        for j= 1: b13(1,1);

            cd3(j , i)=0;
        end

    end

else

    for i= a13(2,1): a13(1,1); % Reduction
```

```

        for j= 1: b13(1,1);

            cd3(j , i)=0;
        end

    end

end

figure; imagesc(cd3); colormap gray; title('Diagonal Coefficient
of Level 2');

%% Inverse Wavelet transform

t1=s(1,1)*s(1,2); % Level 3 size coefficients

t2= s(3,1)*s(3,2); % Level 2 size coefficients

t3= s(4,1)*s(4,2); % Level 1 size coefficients

c((2*t1)+1:(3*t1))=cv3(:)'; % Inputing CV3 in C matrix

c((4*t1)+(t2+1):(4*t1)+(2*t2))=cv2(:)'; % Inputing CV2 in C
matrix

c((4*t1)+(3*t2)+(t3+1):(4*t1)+(3*t2)+(2*t3))=cv1(:)'; % Inputing
CV1 in C matrix

reduc_mat= waverec2 (c,s,'bior 6.8'); % Inverse transform and
recution matrix

%% Evaluation of the process

[peaksnr , snr] = psnr(reduc_mat , matrix ,max(matrix(:))) % PSNR and
SNR error

```

```
matrix_eq = histeq(matrix); % Equalization of the matrix  
    histogram for CV evaluation
```

```
reduc_mat_eq = histeq(reduc_mat); % Equalization of the filtered  
    data histogram for CV evaluation
```

```
dp_ref = std2(matrix_eq)/mean(matrix_eq(:)) % Standard deviation
```

```
dp_reduc = std2(reduc_mat_eq)/ mean(reduc_mat_eq(:)) % Standard  
    deviation
```