

4

Método Proposto

Neste trabalho é sugerida uma nova metodologia para compressão de dados sísmicos volumétricos. O método proposto é baseado no uso da transformada *wavelet* 3D. Também será apresentado neste trabalho, o estudo que foi feito sobre a aplicação do método a alguns atributos sísmicos obtidos através do traço complexo.

A principal motivação para o uso da transformada *wavelet* 3D é que esta tira proveito da coerência espacial do dado nas três dimensões e não somente na direção na qual é feita a decomposição, como é o caso da transformada 2D. Outra vantagem da transformada 3D é que a cada nível de decomposição cria-se subvolumes que são uma representação em menor resolução do volume original.

Será apresentada a transformada *wavelet* de Haar 3D. Esta *wavelet* foi utilizada por ser de fácil implementação e por ser bem discutida pela comunidade acadêmica. Qualquer tipo de transformada *wavelet* que possa ser estendido para o 3D pode substituir a *wavelet* de Haar que foi utilizada.

4.1.

Visão geral do Método

A natureza oscilatória, de forma aleatória, do dado sísmico dificulta a compressão do mesmo. Na maioria das técnicas conhecidas para compressão de dados, que exploram a coerência espacial do mesmo, quanto menor for a variação de duas amostras consecutivas no dado, maior é a taxa de compressão.

A figura 23 mostra como é o *pipeline* de compressão da maioria dos métodos conhecidos de compressão de sinais. O sinal de entrada é transformado utilizando *wavelet*, *Fourier*, transformada do cosseno, etc., o sinal transformado é então quantizado e, por fim, é utilizado um algoritmo de compactação para retirar as redundâncias do sinal.

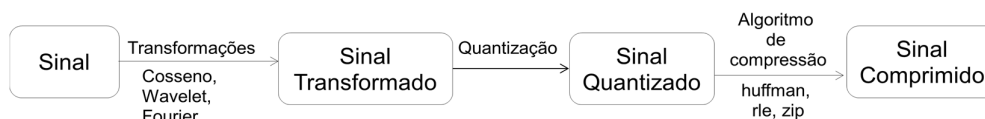


Figura 23 Método convencional de compressão de dados sísmicos.

A compressão do dado sísmico também pode ser analisada como sendo a compressão de um sinal, por isso a maioria dos trabalhos de compressão de dados sísmicos, até a presente data, utiliza o fluxo de compressão descrito na figura 23.

O sinal utilizado no desenvolvimento deste trabalho é a amplitude sísmica. Neste tipo de sinal, tem-se uma variação da amplitude da onda captada por hidrofones (ou geofones). Este sinal varia com o tempo e com a posição. Neste trabalho, serão utilizados os dados sísmicos volumétricos.

O uso da transformada *wavelet* 3D apresenta benefícios na compressão, pois faz uso da correlação entre as amostras nas três direções do dado sísmico e não apenas em uma direção. No capítulo 5, serão apresentadas comparações entre a taxa de compressão de um dado sísmico utilizando as transformadas *wavelet* 2D e 3D.

4.1.1. Transformada Wavelet

Em todos os trabalhos pesquisados sobre compressão de dados sísmicos, os tipos de dados utilizados para compressão ou são provenientes de sísmica 2D ou a compressão é feita sobre dados volumétricos, mas utilizando uma sequência de transformadas *wavelets* 2D. Neste trabalho, será utilizada a transformada *wavelet* de Haar para comparar os benefícios entre aplicar várias transformadas 2D e aplicar a transformada 3D. Neste trabalho foi utilizado apenas a transformada não-padrão, seja 2D ou 3D, para tirar proveito da coerência espacial.

Como dito anteriormente, a transformada de Haar possui uma restrição que impõe que a dimensão a ser decomposta tem que ser potência de dois. No caso dos dados volumétricos, como é o caso das imagens médicas provenientes de tomografia computadorizada e ressonância magnética e os dados sísmicos, é preciso que as três dimensões do dado sejam potência de dois. Para se obter todas as resoluções possíveis em todas as direções, ao mesmo tempo, é preciso ainda que as três dimensões do dado sejam iguais. Esta restrição pode ser contornada utilizando uma estrutura de dados “mais inteligente” que não transforme o dado

em potência de dois fisicamente. Porém, para este trabalho, a estrutura de dados utilizada não permite este tipo de abordagem, devendo o dado ser completado fisicamente.

Para serem aplicadas várias transformadas 2D no dado, é necessário apenas que as duas dimensões do dado a ser transformado sejam iguais e potência de dois. No caso da transformação 3D, é necessário também que a terceira dimensão possua essa característica.

Para utilizar a transformada de Haar em um dado qualquer às dimensões que não são potência de dois devem ser completadas com algum valor até ser potência de dois. No caso da transformada 3D, deve-se descobrir qual é a maior dimensão do dado a ser comprimido e expandir todas as outras dimensões para a menor potência de dois superior à maior.

Existem três possibilidades para se preencher o dado sísmico para executar a transformada *wavelet*. A primeira possibilidade é preencher o dado com valor zero. Neste caso, ao aplicar os algoritmos de compressão, os zeros têm a vantagem de possuir uma elevada taxa de compressão. A segunda possibilidade é espelhar o dado, dando uma continuidade. Outra possibilidade é repetir a parte inicial do dado, porém, neste caso, é introduzida uma descontinuidade no mesmo.

A figura 24 representa o dado sísmico chamado de *Volume1*. A figura 25 mostra o *Volume1* decomposto utilizando a transformada de Haar. Na figura 25 (a) encontra-se a transformada 3D e em (b) encontra-se a transformada 2D. Na transformada *wavelet* 3D, são formadas regiões de alta frequência, de baixa frequência e regiões mistas. Na figura 25 (a), pode-se observar algumas das regiões formadas pela transformada *wavelet* 3D no dado sísmico. As regiões de baixa frequência representam o dado sísmico com uma menor resolução.

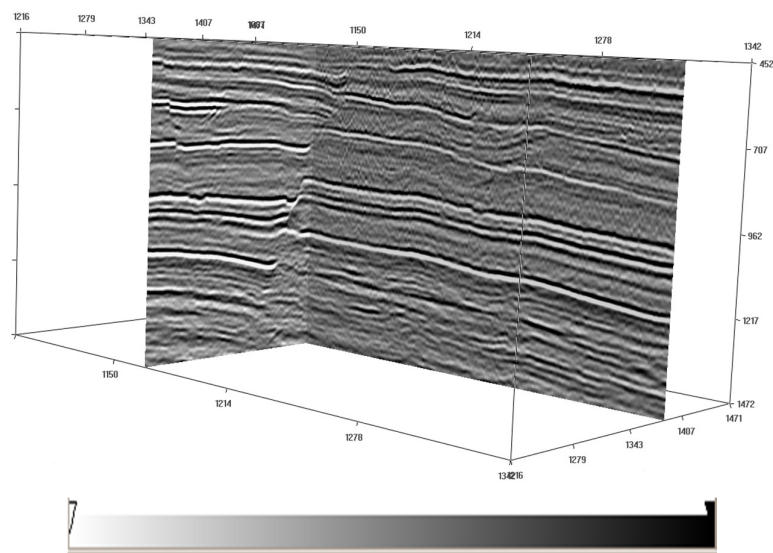


Figura 24 Dados sísmico Volume 1.

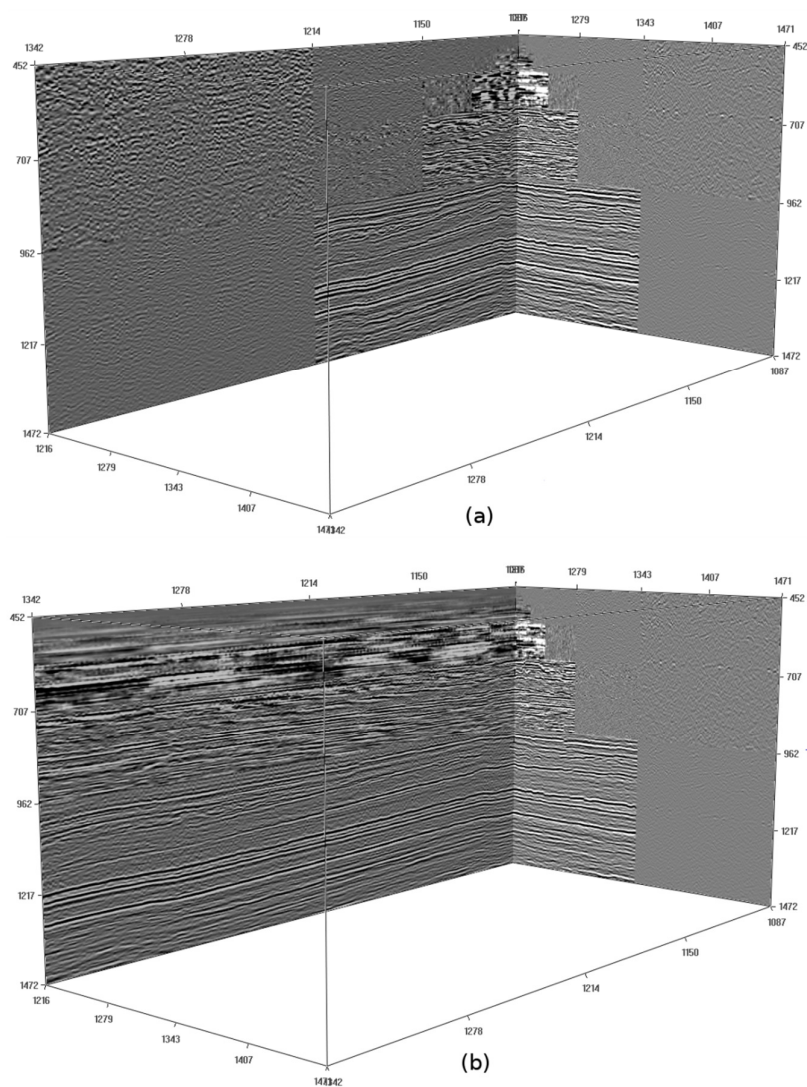


Figura 25 Transformada de Haar 3D (a) e a 2D (b).

Estes cubos com baixa frequência podem ser utilizados para obter visualizações rápidas do dado sísmico, fazendo uso das técnicas de multiresolução. Na transformada 2D, na seção vertical ao eixo que a transformada foi executada, tem-se vários níveis de resolução.

A transformada *wavelet* tem como característica decompor um sinal e recompor este sinal sem a introdução de ruído. No caso dos dados sísmicos, esta é uma característica desejada, pois estes dados serão processados numericamente, e qualquer erro que seja introduzido ao mesmo, afetará o resultado final.

Para verificar que a transformada *wavelet* não introduz erro ao dado sísmico, foi feito o experimento de decompor o dado sísmico, recompor e calcular o SNR, através da equação (3.1), aqui reproduzida:

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum_i a_i^2}{\sum_i (a_i - \hat{a}_i)^2} \quad (4.1)$$

Ao calcular a divisão da equação, estoura a capacidade do ponto-flutuante utilizado, pois o denominador é um número muito próximo de zero e o resultado da divisão tende para o infinito. O fato de $\sum (a_i - \hat{a}_i)^2$ ser bem próximo de zero e não exatamente zero é devido a erros numéricos da máquina, porém nesta etapa do processo, este erro não é impactante.

Por tirar proveito da correlação espacial entre as amostras, acredita-se que a transformada *wavelet* 3D juntamente com a quantização melhore a compressão do dado sísmico. Utilizando o algoritmo de Huffman para compressão, foi feita a seguinte comparação: fornecido o dado original, foi aplicado Huffman e gerado um novo dado comprimido. Em seguida foi aplicada a transformação *wavelet* 3D no dado original e aplicado Huffman no dado decomposto. Sendo o dado original representado pelo *Volume1* com dimensões de 256 x 256 x 256, tem tamanho de 64 MB. O resultado do Huffman sobre o dado original foi de 40,5 MB, ou seja, uma taxa de compressão de 1:1,58. Já utilizando a transformada *wavelet* 3D, o dado comprimido teve o tamanho de 41,3 MB, ou seja, taxa de compressão de 1:1,54. Neste caso o dado que utilizou a transformada *wavelet* teve uma taxa de compressão pior que apenas aplicar o algoritmo de Huffman ao dado original. Esse comportamento é esperado, pois a transformada *wavelet* tem como resultado criar os coeficientes de detalhes com valores bem próximos de zero, para no momento da quantização aumentar a redundância do dado transformado.

Entretanto, ao trabalhar com valores em ponto-flutuante, estes coeficientes são próximos de zero, mas diferentes entre si, o que faz com que o algoritmo de Huffman tenha um resultado pior.

No capítulo 5 serão mostrados casos de como a transformada *wavelet* influencia na compressão do dado sísmico.

4.1.2. Quantização

A quantização utilizada neste trabalho é semelhante à utilizada por Averbuch *et al* [3] e por Wu *et al.* [4]. A única diferença é que não foi criada uma tabela de quantização para cada sub-banda. Neste trabalho, todas as sub-bandas foram codificadas com base na mesma tabela de quantização.

É nesta etapa que será definido o quanto se quer de compressão para o dado sísmico. Pode-se conseguir uma maior compressão do dado aumentando o valor de Z_k na equação (3.2). Como neste trabalho será utilizada apenas uma tabela de quantização, o valor Z_k será representado apenas por Z .

$$p(m, n) = \begin{cases} \left\lceil \frac{a(m, n) - Z/2}{Q} \right\rceil + 1, & a(m, n) > Z/2 \\ 0, & -Z/2 < a(m, n) < Z/2 \\ \left\lfloor \frac{a(m, n) + Z/2}{Q} \right\rfloor - 1, & a(m, n) < -Z/2 \end{cases} \quad (4.2)$$

Isto ocorre, pois ao aumentar o valor de Z , uma maior quantidade de coeficientes da transformada *wavelet* será levado a zero na quantização. Porém, quanto maior for Z , maior será o erro introduzido ao dado sísmico. Na quantização adotada, o valor de C adotado foi de 0,5, ou seja, o valor desquantizado será sempre o centro do intervalo.

O gráfico 1, a seguir, mostra o comportamento da curva de compressão do dado sísmico *Volumel* em função do valor do intervalo de Z . É importante observar que foi utilizada a transformada de Haar com bases ortonormais. Logo, Z varia de 0 até o maior valor de detalhe obtido em módulo, sendo simétrico em relação às partes positiva e negativa do eixo. O dado utilizado para gerar o

gráfico foi o *Volume1*, fazendo uso do atributo de amplitude e da transformada *wavelet* 3D.

Para gerar o gráfico, o parâmetro Z , variou de 0,001 em 0,001 e apresentou uma taxa de compressão máxima de 16,1:1 e a menor taxa de compressão foi de 7,0:1.

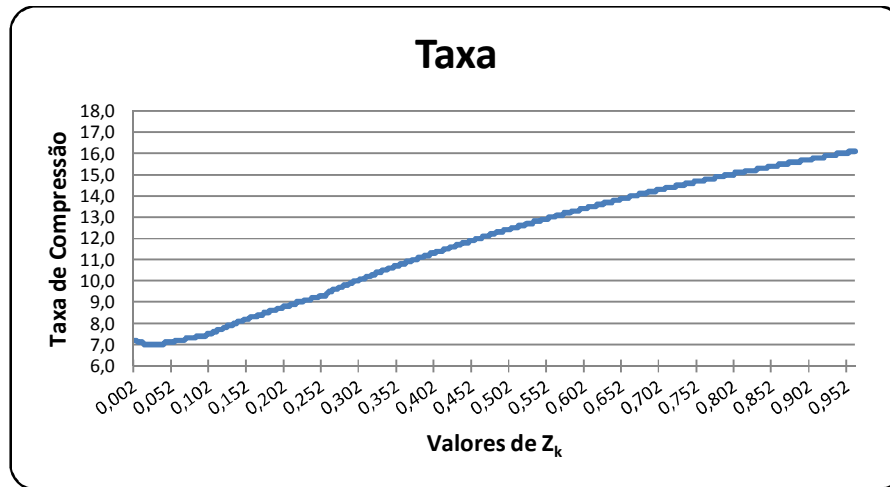


Gráfico 1 Curva de variação da taxa de compressão de acordo com o valor de Z_k .

Na quantização, um determinado intervalo de valores é levado em um único representante para este intervalo. Isto faz com que a redundância do dado seja aumentada. Este efeito é desejado para que na próxima etapa, a etapa de compressão, as taxas de compressão obtidas sejam maiores.

4.1.3. Compressão

Após aplicar a transformada *wavelet* no dado sísmico e quantizar os coeficientes da transformação, é aplicado um algoritmo de compressão sem perda sobre os coeficientes quantizados. Nesta etapa, é feita a eliminação da redundância do dado.

A entropia é uma medida científica que diz qual é a menor quantidade de *bits* necessária, na média, para representar um determinado símbolo no conjunto de dados ([28]). A entropia é utilizada para saber qual é a compressão máxima, sem perda, que um determinado conjunto de dados pode ter.

Para calcular a entropia, basta calcular o número de símbolos que existem no dado e qual a probabilidade de ocorrência de cada símbolo. Seja P_i a

probabilidade de ocorrência do i -ésimo símbolo e n o número de símbolos existentes no dado, a entropia é dada por ([28]):

$$\mathcal{H} = - \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i \quad (4.3)$$

Uma vez que a entropia representa a quantidade de *bits* necessária para representar um símbolo, logo, para saber qual é a compressão máxima de um determinado dado basta fazer o número de símbolos multiplicado pela entropia. O resultado é então dividido por oito para se ter a representação em *bytes*.

O dado sísmico *Volume1* tem tamanho de 64 MB (*megabytes*) e o valor da entropia de $\mathcal{H} = 12,605$. Sendo as dimensões do dado de $256 \times 256 \times 256$, o total de símbolos do dado é de 16.777.216 símbolos. Isso quer dizer que, se fosse utilizado um algoritmo ótimo de compressão, baseado na entropia, este dado ao ser comprimido passaria a ter tamanho de 25,21 MB, o que representa uma taxa de compressão de 2,53; 1.

Sabe-se que os algoritmos baseados na probabilidade tendem a se aproximar da entropia, mas não se igualam a ela. Se aplicar o algoritmo de Huffman ao dado *Volume1*, o resultado será um dado de tamanho 40,05 MB, o que representa uma taxa de compressão de 1,58: 1, bem abaixo do esperado pela entropia. No método proposto será utilizada a compressão de Huffman seguida da compressão por RLE.

De acordo com experimentos realizados, para dados pequenos, que possam ser carregados para a memória do computador, é mais vantajoso aplicar primeiro o RLE e em seguida o Huffman. Porém ao trabalhar com arquivos muito grandes, que não cabem em memória, é mais vantajoso aplicar primeiro Huffman e em seguida o RLE. No capítulo 5, será apresentada a comparação entre as duas sequências.

4.1.4. Descompressão

Para descomprimir o dado resultante basta aplicar os operadores inversos na sequência contrária ao que foi aplicada. Ou seja, deve-se primeiro aplicar a descompressão do RLE e em seguida a de Huffman. Tendo o dado

descomprimido, deve-se aplicar a desquantização do dado e por fim aplicar a transformada *wavelet* inversa.

Para ser possível descomprimir o Huffman, é necessário que no momento da compressão, a árvore gerada pelo algoritmo seja armazenada junto com o arquivo. O mesmo ocorre para a quantização. Neste caso, devem ser salvas as informações de menor e maior valor original do dado sísmico, o número de classes utilizadas na quantização e o tamanho do intervalo que contém o zero.

Para aplicar a desquantização, será necessário dividir o intervalo que vai do menor valor original até o maior valor original. Serão criados dois intervalos do Z , que é o intervalo que contém o zero, um intervalo de zero até Z e outro de zero até $-Z$. O intervalo que vai do menor valor original até $-Z$ deve ser dividido por número de classes menos dois, dividido por dois. O intervalo de Z até o maior valor original também deve ser dividido pelo valor anterior.

4.2.

Estudo sobre Compressão de Atributos Sísmicos

Devido às características oscilatórias do dado sísmico, este não possui grandes taxas de compressão. Porém, ao analisar os atributos sísmicos, calculados a partir da amplitude sísmica, pode-se verificar que estes possuem uma aparência mais suave (com pouca variação), o que para a compressão é uma característica relevante. Esta afirmação será vista ao longo desta seção.

A seguir será apresentado um estudo sobre a inclusão da transformada do traço complexo no fluxo de compressão apresentado na figura 23.

4.2.1.

Decomposição em atributos sísmicos

De acordo com os experimentos da decomposição de uma imagem em magnitude e fase, descritos por Oppenheim e Lim [37], a maior parte da informação da imagem está contida na fase. Analisando as equações utilizadas por Oppenheim e Lim para o cálculo da magnitude espectral, equação (3.5), e para o cálculo da fase, equação (3.6), percebe-se que estas equações possuem uma similaridade com as equações utilizadas para o cálculo de atributos sísmicos,

como o envelope, equação (2.2), e com a fase instantânea, equação (2.3). Estas equações são reproduzidas na tabela 2.

Imagem	Atributo Sísmico
$ \mathcal{F}(\omega) = \sqrt{\Re(\mathcal{F})^2 + \Im(\mathcal{F})^2}$	$A(t) = \sqrt{f^2(t) + f^{*2}(t)}$
$\theta(\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{\Im(\mathcal{F})}{\Re(\mathcal{F})}\right)$	$\phi(t) = \arctan\left(\frac{f^*(t)}{f(t)}\right)$

Tabela 2 Comparativo entre as equações de atributos de imagens e dados sísmicos.

O traço complexo é definido através da transformada de Hilbert, mas esta faz uso da transformada de Fourier. Desta forma, espera-se que o comportamento dos atributos sísmicos de envelope e fase instantânea seja parecido com o comportamento apresentado pelos atributos de imagem, magnitude espectral e fase, respectivamente.

A figura 24, anteriormente apresentada, mostra duas seções sísmicas sobre o atributo de amplitude do dado sísmico *Volume1*. Este é o atributo original do dado sísmico que será decomposto em envelope e fase instantânea.

A figura 26 mostra as mesmas duas seções sísmicas, porém sobre o atributo envelope calculado no dado sísmico *Volume1* e a figura 27 mostra estas mesmas seções sísmicas sobre o atributo de fase instantânea.

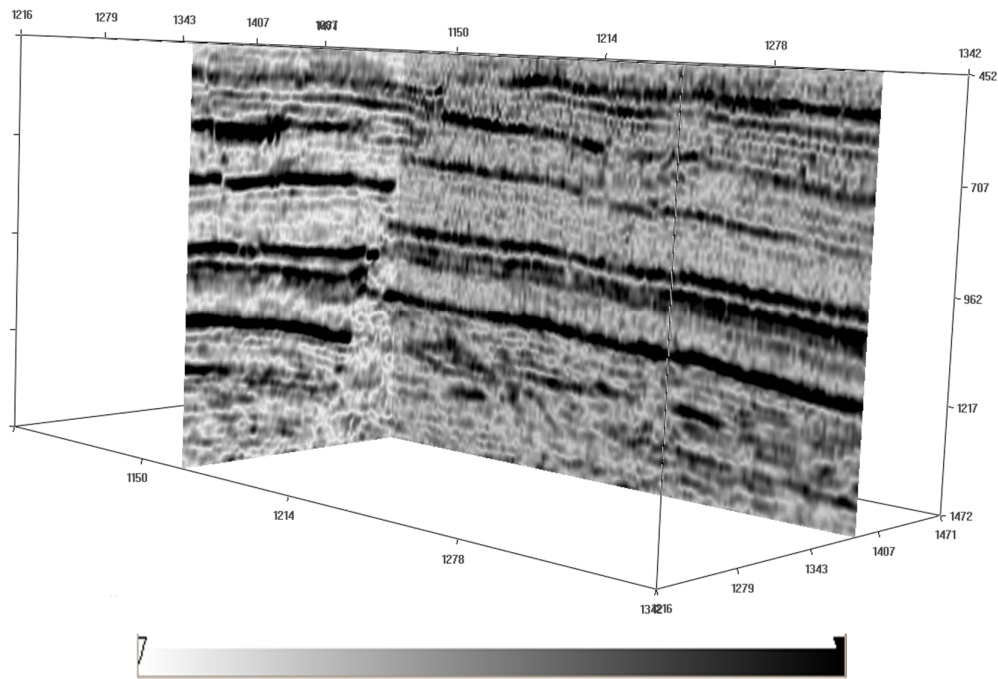


Figura 26 Duas seções sísmicas do *Volume1* sobre o atributo de envelope.

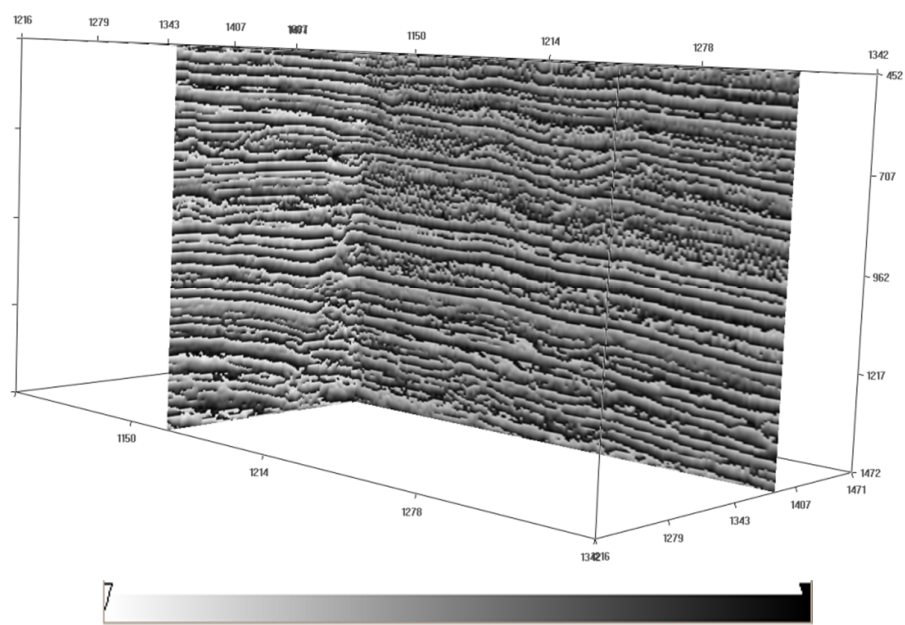


Figura 27 Duas seções sísmicas do Volume1 sobre o atributo de fase instantânea.

O outro dado sísmico a ser utilizado no experimento será denominado de *Volume2*. A figura 28 mostra duas seções sísmicas sobre o atributo de amplitude.

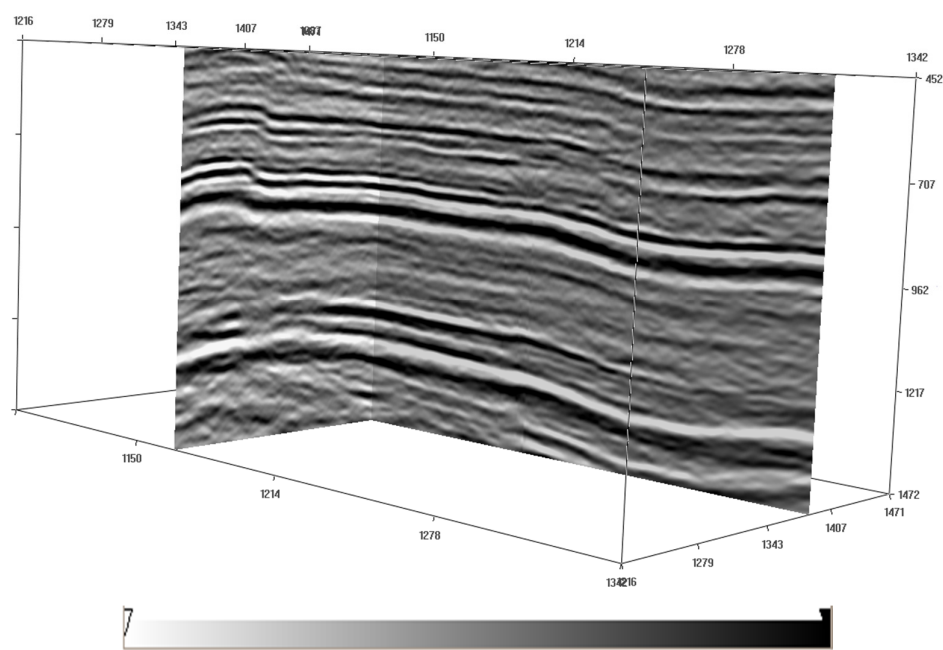


Figura 28 Duas seções sísmicas do Volume2 sobre o atributo de amplitude sísmica.

A figura 29 mostra as mesmas seções sísmicas apresentadas na figura 28 sobre o atributo envelope e a figura 30 mostra estas mesmas seções sísmicas sobre o atributo de fase instantânea.

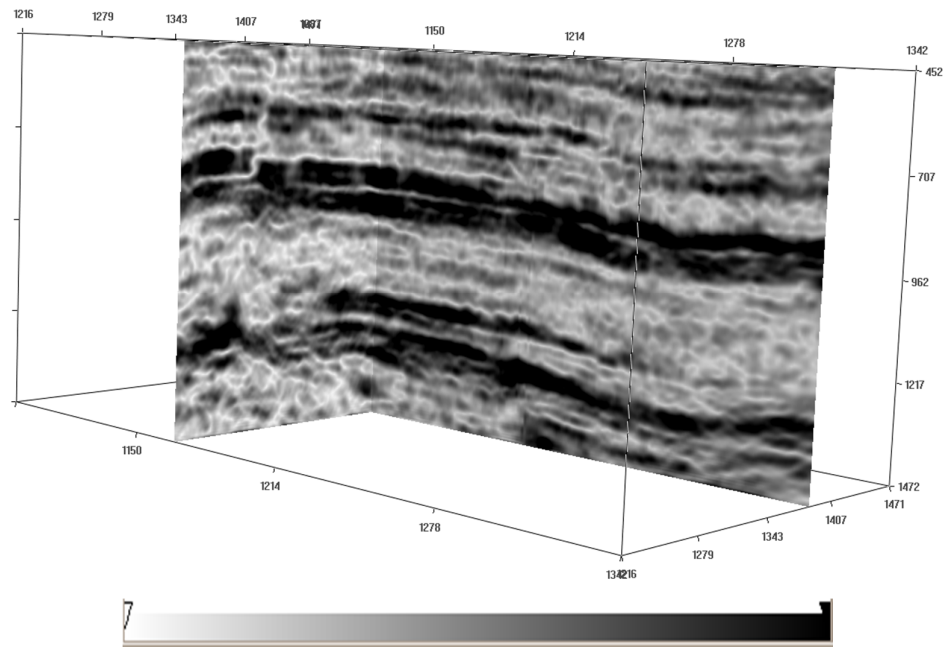


Figura 29 Duas seções sísmicas do Volume2 sobre o atributo de envelope.

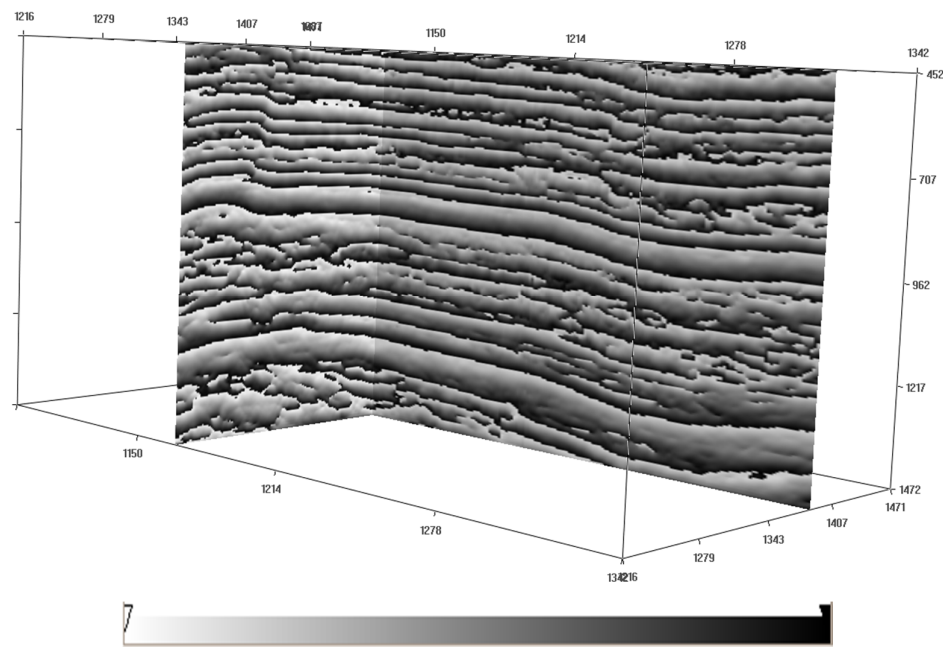


Figura 30 Duas seções sísmicas do Volume2 sobre o atributo de fase instantânea.

Será utilizada a fase instantânea do *Volume1* juntamente com o envelope do *Volume2* para reconstruir o *Volume1*. E para reconstruir o *Volume2* será utilizada a fase instantânea do *Volume2* junto com o envelope do *Volume1*. Este experimento tem por objetivo determinar se, assim como nas imagens, o atributo de fase instantânea carrega uma maior quantidade de informação sobre o dados sísmico original que o atributo de envelope.

Para reconstruir o dado de amplitude sísmica utilizando os atributos de envelope e fase instantânea, pode-se utilizar a mesma equação utilizada no experimento de Oppenheim e Lim, equação (3.4).

O traço sísmico complexo, representado na equação (2.1), é formado pelo traço sísmico e pelo resultado da transformada de Hilbert sobre o traço sísmico, que representam a parte real e a parte complexa, respectivamente.

Como o que se deseja reconstruir é o atributo de amplitude, que inicialmente era representado pelo traço sísmico original, basta resolver a parte real da equação (3.4), ficando o traço sísmico representado por:

$$f(t) = A(t)\cos(\phi(t)) \quad (4.4)$$

A figura 31 (a) mostra as mesmas seções sísmicas representadas na figura 24 sobre o *Volume1* reconstruído utilizando a equação (4.4). A figura 31 (b) mostra as mesmas seções sísmicas representadas na figura 28 sobre o *Volume2* reconstruído.

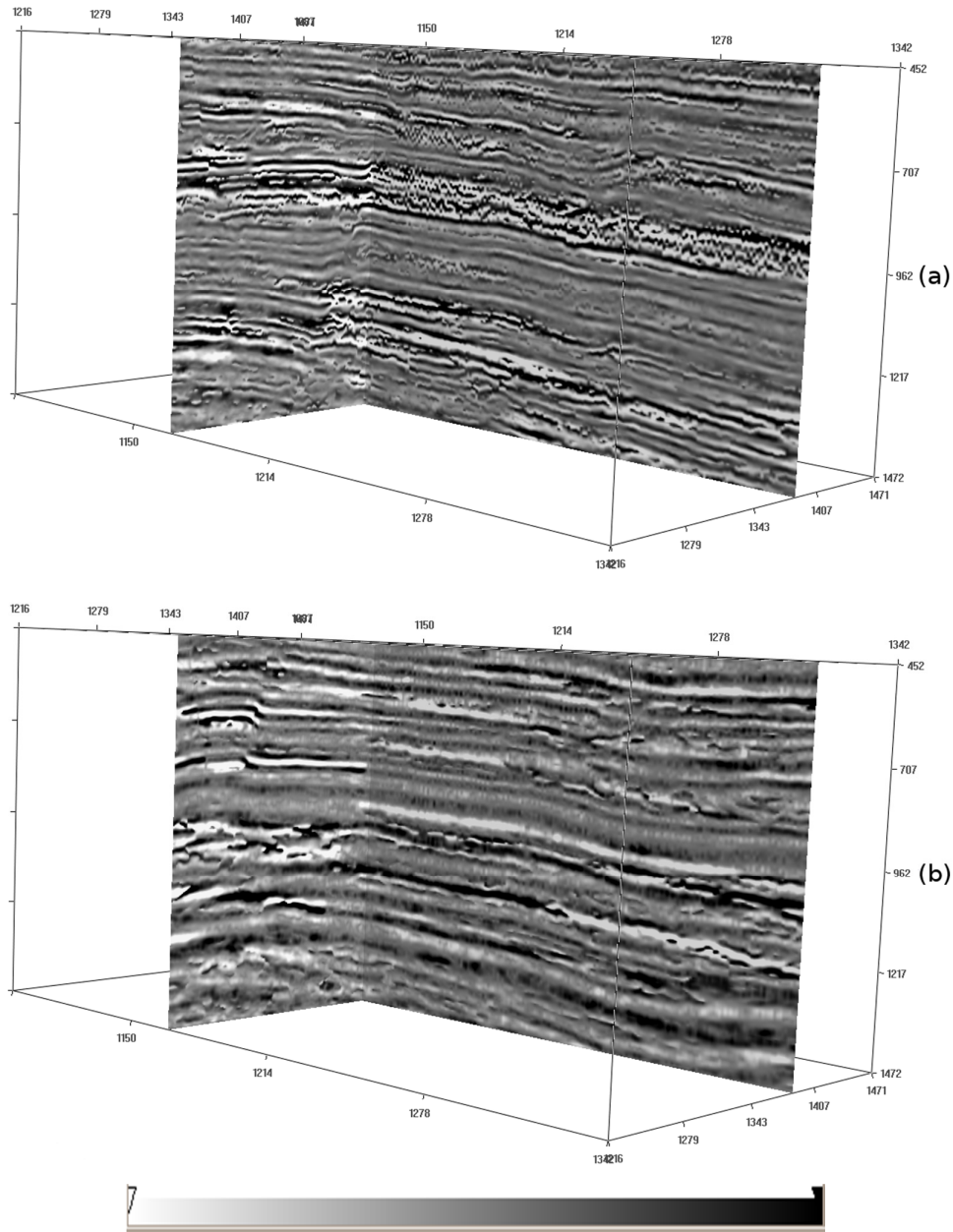


Figura 31 (a) Volume1 reconstruídos, (b) Volume2 reconstruído.

Percebe-se que, assim como ocorre com as imagens do experimento de Oppenheim e Lim, a fase instantânea do dado sísmico carrega a maior parte da informação do dado sísmico. Ao analisar as figuras a seguir, que representam a mesma seção sísmica sobre atributos diferentes, percebe-se que o envelope (figura 33) possui uma variação lateral mais suave que a amplitude sísmica (figura 32). O mesmo ocorre com as imagens dos atributos de fase instantânea (figura 34) e o de frequência instantânea (figura 35), o que indica que estes atributos devem possuir uma taxa de compressão melhor que o atributo de amplitude.

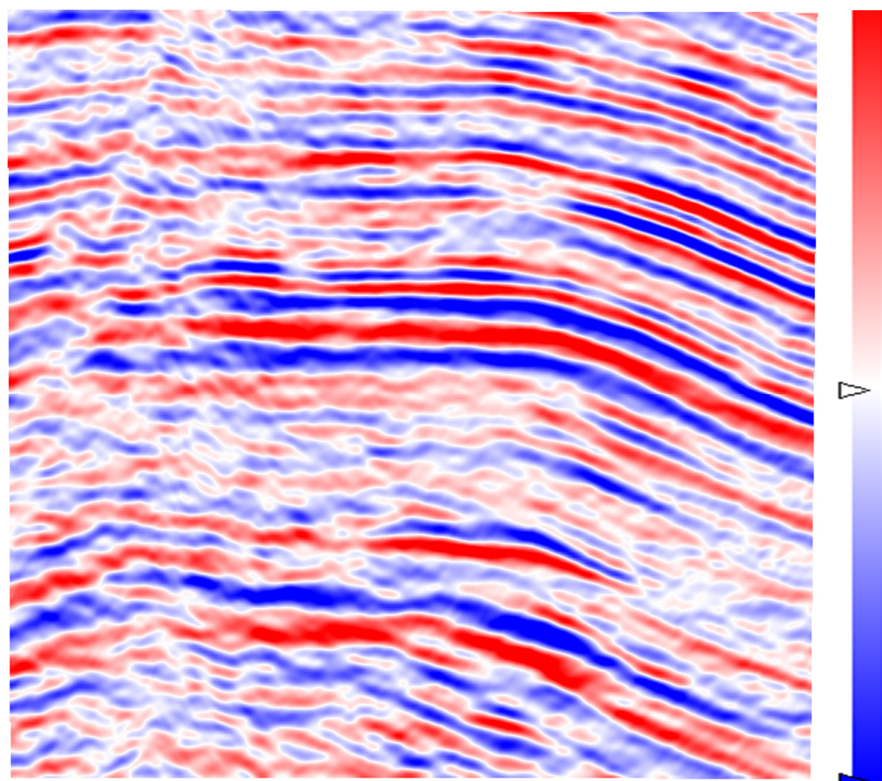


Figura 32 Seção sísmica do atributo de amplitude.

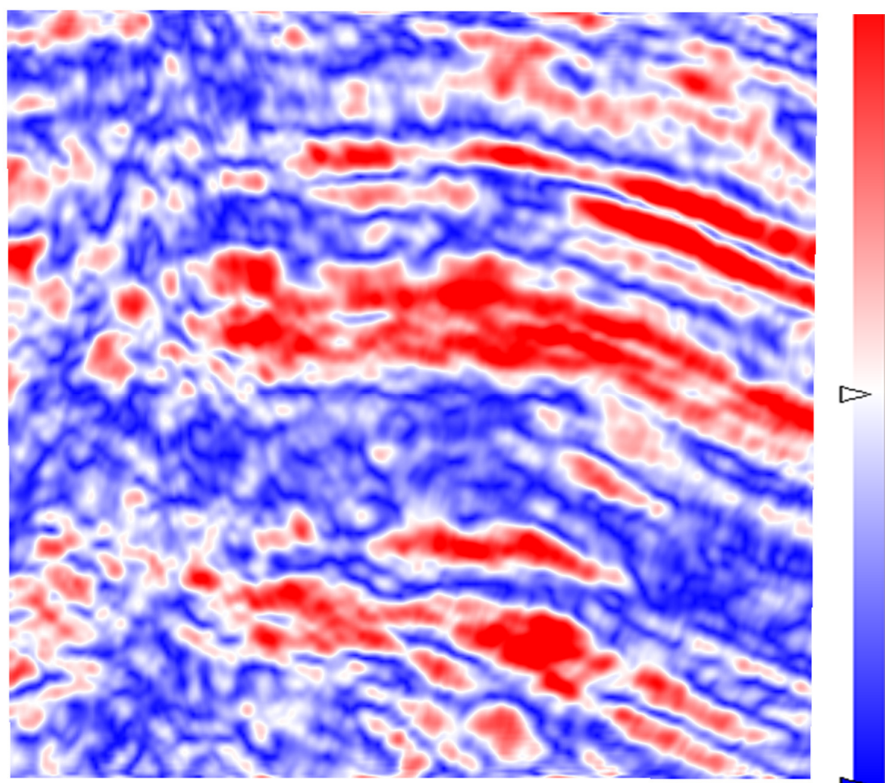


Figura 33 Seção sísmica sobre o atributo de envelope.

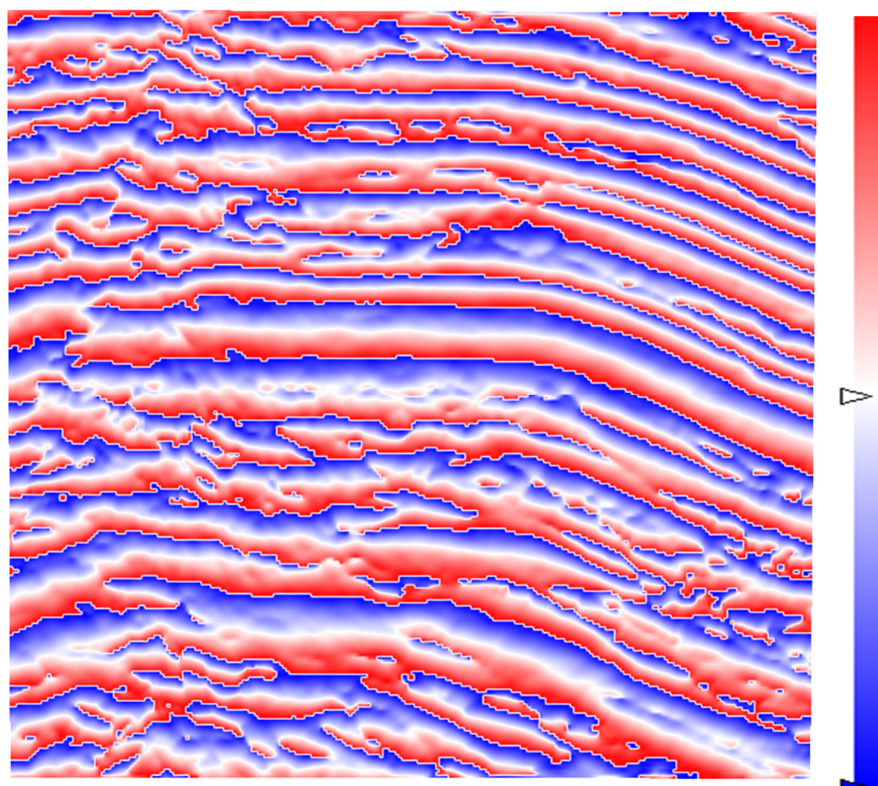


Figura 34 Seção sísmica sobre o atributo de fase instantânea.

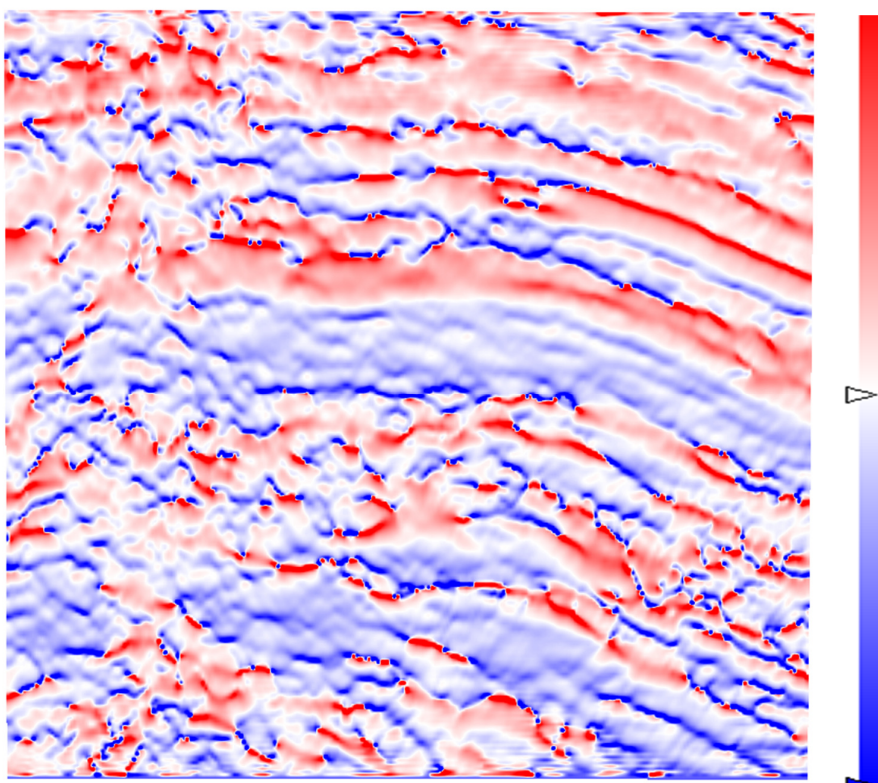


Figura 35 Seção sísmica sobre o atributo de frequência instantânea.

4.2.2.

Compressão dos Atributos Sísmicos

Neste estudo, o atributo de amplitude sísmica será decomposto em dois atributos sísmicos e comprimido. Espera-se que estes dois atributos tenham uma taxa de compressão melhor que a compressão da amplitude sísmica.

Os atributos gerados devem ter como características principais poder reconstruir o atributo original, com a menor introdução de ruído possível. Neste trabalho foram exploradas duas combinações de atributos com estas características, que são: o envelope junto com a fase instantânea e envelope junto com a frequência instantânea. Este dois conjuntos de atributos sísmicos foram escolhidos por, aparentarem, ter um comportamento melhor para a compressão.

O novo fluxo de trabalho para a compressão do dado sísmico passa a ser o representado na figura 36.

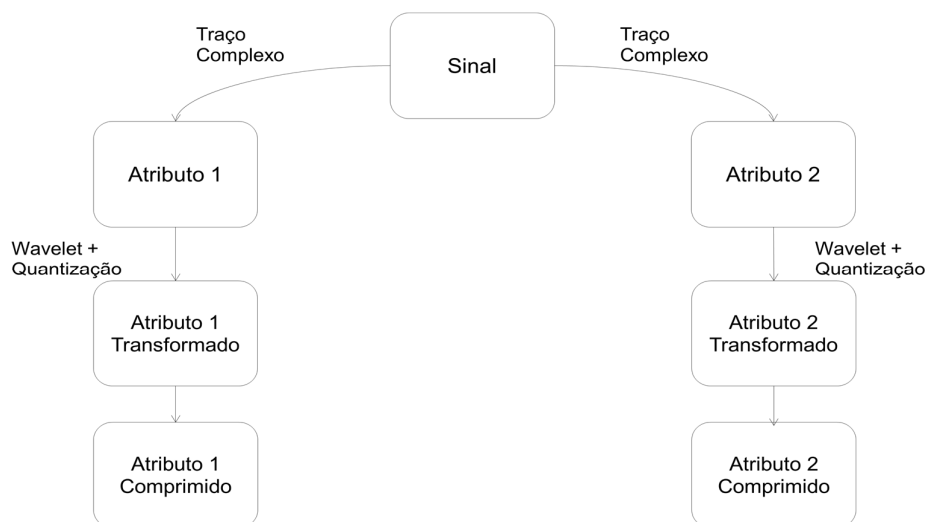


Figura 36 Compressão de dados sísmicos utilizando o traço complexo.

A tabela 3 mostra a entropia dos atributos sísmicos apresentados no capítulo 2.1.1, a compressão máxima desse atributo (tamanho comprimido) e a taxa de compressão equivalente. Todos os arquivos têm tamanho 64,0 MB, tanto o arquivo de amplitude sísmica quanto os arquivos dos atributos (envelope, fase e frequência).

Atributo Sísmico	Entropia ($\mathcal{H}$)	Tamanho comprimido (MB)	Taxa de Compressão
Amplitude Sísmica	12,605	25,21	1:2,53
Envelope	25,190	50,38	1:1,27
Fase instantânea	26,847	53,69	1:1,19
Frequência instantânea	24,158	48,31	1:1,32

Tabela 3 Comparação entre as entropias dos atributos sísmicos.

Percebe-se que os atributos calculados possuem uma taxa de compressão pior que a taxa da amplitude sísmica. Vale lembrar que o cálculo do tamanho comprimido é baseado na entropia encontrada e que este representa o máximo de compressão que o dado pode ter sem perda.

O uso da transformada *wavelet* não melhora a entropia do dado, isto pode ser visto na tabela 4. A segunda coluna da tabela mostra a entropia para o dado sísmico, enquanto que a terceira coluna e a quarta coluna mostram a entropia após a aplicação da transformada *wavelet* 3D e 2D, respectivamente.

Atributo Sísmico	Entropia ($\mathcal{H}$)		
	Dado original	Wavelet 3D	Wavelet 2D
Amplitude Sísmica	12,605	13,563	13,563
Envelope	25,190	24,436	23,649
Fase instantânea	26,847	25,815	25,551
Frequência instantânea	24,158	24,158	23,300

Tabela 4 Comparação entre a entropia do dado original, com o uso das transformadas *wavelet* 3D e *wavelet* 2D.

O uso da transformada *wavelet* se justifica ao aplicar a quantização no dado. A transformada *wavelet* tem como característica gerar coeficientes de baixa magnitude e alguns poucos coeficientes de magnitudes significantes. Ao aplicar a quantização, os coeficientes de baixa magnitude tendem a serem levados para o mesmo valor quantizado. Isto faz com que a redundância do dado seja aumentada. Neste caso, os algoritmos de compressão tendem a apresentar um melhor resultado.

A tabela 5 mostra que o uso da transformada *wavelet* juntamente com a quantização melhora a entropia do dado. Nesta tabela, a quantização utilizada foi a descrita na seção 4.1.2, sendo que neste caso o parâmetro Z e Q tiveram amplitudes iguais.

Atributo Sísmico	Entropia ($\mathcal{H}$)		
	Dado quantizado	Wavelet 3D + quantização	Wavelet 2D + quantização
Amplitude Sísmica	5,230	3,660	3,851
Envelope	4,630	3,710	4,092
Fase instantânea	6,996	4,716	4,976
Frequência instantânea	4,957	3,684	3,599

Tabela 5 Comparação entre a entropia do dado quantizado e o uso da transformada wavelet junto com a quantização.

A tabela 5 mostra apenas a entropia do dado, ou seja, quem teria a maior taxa de compressão sem perda. Porém, ao fazer a quantização, foi introduzido um ruído ao dado sísmico.

Neste caso, somente a taxa de compressão não é conclusiva para saber qual atributo sísmico possui uma melhor compressão. É necessário verificar qual o erro introduzido ao dado em todo o processo. O gráfico 2 mostra as curvas geradas pelos atributos sísmicos ao modificar o parâmetro Z (tamanho do intervalo que contém o zero) da quantização.

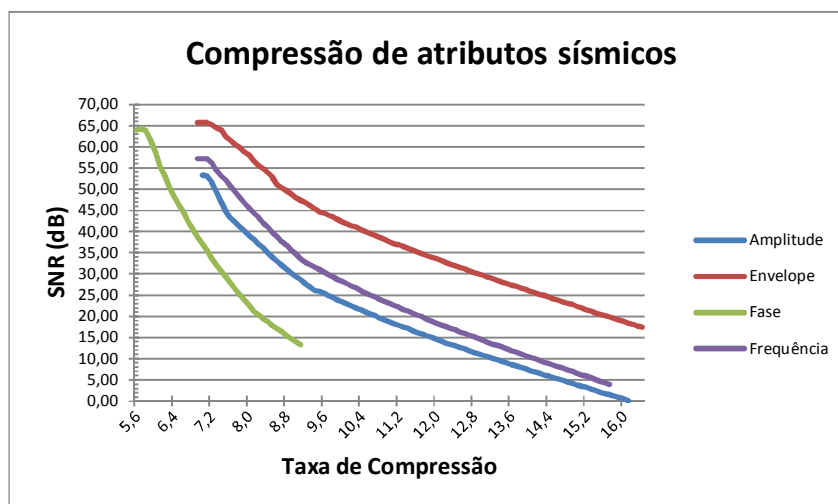


Gráfico 2 Comparação da curva de taxa de compressão x SNR de atributos sísmico. O eixo horizontal representa a taxa de compressão obtida e o eixo vertical o erro da reconstrução do dado.

É importante notar que na curva de compressão da amplitude, o SNR não chega a ter valor zero. Devido a espessura da linha e da escala utilizada no gráfico, o gráfico passa esta impressão, porém o valor é próximo de zero mas nunca é zero.

Para uma taxa de compressão de, por exemplo, 10,6:1 a amplitude sísmica teve o SNR de 20,514, enquanto que o envelope e a frequência instantânea tiveram o SNR de 39,464 e 24,978, respectivamente. Em outras palavras, a introdução de ruído no envelope foi menor que a introdução de ruído nos outros atributos.

É interessante observar o comportamento da fase instantânea no gráfico. Ela é a que possui a menor taxa de compressão e um decaimento muito rápido. Isso já era esperado pois, como foi mostrado no experimento descrito na seção 4.2, a fase carrega a maior parte da informação.

Para poder gerar o atributo original, é necessário primeiro descompactar os dois atributos gerados. Em seguida é necessário desquantizar cada atributo e aplicar a transformada *wavelet* inversa. Neste momento o que se tem são os dois atributos que foram gerados a partir do atributo original antes das transformações. Para gerar o atributo original a partir da combinação da fase instantânea e do envelope, basta utilizar a equação (4.4).

No caso do atributo de frequência instantânea, deve-se utilizar uma variação da fórmula (2.4) apresentada na seção 2.1.1. A frequência instantânea deve ser capaz de reconstruir a fase instantânea, para então reconstruir a amplitude sísmica. Para calcular a frequência instantânea, neste caso, deve-se adotar o valor da primeira amostra de cada traço como sendo o valor da primeira amostra da fase instantânea dos respectivos traços. A i -ésima amostra da frequência no traço será composta pela diferença entre a i -ésima amostra e a $(i-1)$ amostra da fase instantânea.

Como os atributos de fase e frequência instantâneos são calculados traço-a-traço, suponha que $\phi[i]$ represente o i -ésimo elemento da fase instantânea de um determinado traço e $\omega[i]$ represente o i -ésimo elemento da frequência instantânea deste mesmo traço e que o traço possua n amostras. A frequência instantânea será então calculada como:

Para cada traço sísmico faça:

$$\omega[0] = \phi[0];$$

para $i = 1$ até (número de amostras do traço - 1) faça

$$\omega[i] = \phi[i] - \phi[i - 1];$$

Para reconstruir o atributo de amplitude sísmica utilizando a frequência e o envelope, deve-se reconstruir a fase instantânea a partir da frequência e depois, utilizar a equação (4.4) para reconstruir a amplitude sísmica.

Neste caso, a fase deve ser reconstruída fazendo a primeira amostra da fase de cada traço como sendo a primeira amostra da frequência do respectivo traço. A i -ésima amostra da fase instantânea deve ser reconstruída como sendo a i -ésima amostra da frequência instantânea mais a $(i - 1)$ amostra da frequência instantânea. Ficando a reconstrução da fase instantânea

Para cada traço sísmico faça:

$$\phi[0] = \omega[0];$$

para $i = 1$ até (número de amostras do traço - 1) faça

$$\phi[i] = \omega[i] + \omega[i - 1];$$

Para o cálculo dos atributos sísmicos é utilizada a transformada de Hilbert como descrita na seção 2.1.1, que faz uso da transformada de Fourier, por sua vez, faz uso de senos e cossenos. Para calcular a fase é utilizada a função *atan2* do C++. Todas essas funções introduzem um erro numérico ao processo.

Para se ter uma idéia do erro que estas funções introduzem ao processo, foi feita a decomposição da amplitude sísmica do dado *Volume1* nos atributos envelope e fase instantânea e, em seguida, foi feita a reconstrução da amplitude sísmica. O SNR obtido foi de 144,976 dB. Para a combinação de envelope e frequência instantânea foi obtido um SNR de 119,208 dB. Por ser uma derivação da fase instantânea, era esperado que a frequência fosse responsável por uma introdução de erro maior ao processo.

O método apresentado é composto por um conjunto de algoritmos conhecidos. Neste caso, a complexidade do método é dado pela complexidade do maior algoritmo. Como foi dito no capítulo 2, a complexidade da transformada *wavelet* é de $n \times \log(n)$, o algoritmo de *huffman* também possui a complexidade de $n \times \log(n)$. A quantização terá a sua complexidade de acordo com o número de classes escolhida para a quantização. Em geral, a complexidade da quantização será maior que a complexidade da transformada *wavelet* e do algoritmo de *huffman*. Logo, a complexidade do método proposto será a complexidade da quantização escolhida.

Neste capítulo foi descrita a proposta deste trabalho de adotar a transformada *wavelet* 3D para a compressão dos dados sísmicos volumétricos.

Foi apresentado, também, um estudo sobre a inserção do traço complexo ao *pipeline* de compressão de dados.

No próximo capítulo, serão apresentados os resultados obtidos para o uso da transformada *wavelet* 3D e um comparativo com os resultados do uso da transformada 2D.

Quanto ao uso do traço complexo, será comparado o comportamento de cada atributo sísmico descritos nos capítulos anteriores e também comparados com o atributo de amplitude sísmica.