

1. Introdução.....	3
2. Modelo Geológico.....	5
3. Fundamentação Teórica.....	9
3.1 Teorema de Euler.....	9
3.2 Série de <i>Fourier</i>	9
3.3 Correlação cruzada ou <i>Cross</i> -correlação.....	11
3.4 Transformada de <i>Fourier</i> (FT).....	11
3.4.1 Propriedades da Transformada de Fourier.....	12
3.4.2 Transformada inversa de Fourier.....	13
3.5 Convolução.....	13
3.6 Modelo Convolutional.....	14
3.7 Análise em Tempo-frequência.....	17
3.8 Transformada de Fourier Janelada (short-time Fourier Transform (STFT)).....	19
3.9 Transformada wavelet (WT).....	23
3.9.1 Transformada contínua wavelet (CWT).....	25
3.9.2 Escala.....	26
3.9.3 O cômputo da CWT.....	27
3.10 Resolução tempo- frequência.....	28
3.11 Detecção de transições de um sinal utilizando a CWT.....	29
3.12 Resolução vertical.....	30
3.13 Efeito de <i>Tunning</i>	31
4. Modelo Convolutional e Análise em tempo-frequência dos traços sísmicos sintéticos..	32
4.1 Análise em tempo-frequência do modelo cunha.....	33
4.1.2 traço número 150.....	34
4.1.3 traço número 170.....	35
4.1.4 traço número 173.....	36

Figura 1: Esquema de um depósito turbidítico em domínio profundo, com indicação dos níveis da sequência que se depositam em cada zona. Fonte: Dias, 2004.....	7
Figura 2: Sistema turbidítico retirado do trabalho de Santos et al (2000)	7
Figura 3: Linha sísmica cross-line feita no sistema turbidítico da figura 2.	8
Figura 4: perfil velocidade (km/s) X tempo(s).....	15
Figura 5: perfil de densidade (kg/m ³) X tempo(s).....	15
Figura 6: perfil de refletividade X tempo (s).....	15
Figura 7: Pulso de ricker.....	16
Figura 8: Transformada de Fourier da ricker (amplitude X frequência).....	16
Figura 9: modelo convolucional	17
Figura 10: sinal e transformada de <i>Fourier</i>	18
Figura 11: sinal e transformada de <i>Fourier</i>	18
Figura 12: filtro “ <i>Boxcar</i> ”	19
Figura 13: sinal e análise tempo frequência com filtro <i>boxcar</i>	20
Figura 14: sinal e análise tempo frequência com filtro <i>boxcar</i>	20
Figura 15:janela de <i>Hanning</i>	21
Figura 16: sinal e análise tempo frequência com filtro <i>hanning</i>	21
Figura 17: sinal e análise tempo frequência com filtro <i>hanning</i>	21
Figura 18:análise em tempo-frequência usando uma janela de 50 milissegundos.....	22
Figura 19:análise em tempo-frequência usando uma janela de 25 milissegundos.....	22
Figura 20: Gauss2	24
Figura 21:daubechie.....	24
Figura 22: Morlet.....	24
Figura 23:Ricker com diferentes escalonamentos e deslocamentos.....	26
Figura 24:CWT de um sinal teste utilizando a ricker	28
Figura 25:Esquema de resolução em tempo e frequência da WT	29
Figura 26:espessura real X espessura medida	31
Figura 27amplitude X espessura real.....	31
Figura 28: modelo de velocidade e convolucional	32
Figura 29:modelo convolucional e perfil de refletividade do traço número 150 (amplitude X tempo).....	34
Figura 30: análise tempo frequência do traço 150 com janela de 25 milissegundos (frequência(Hz) X tempo (s))	34
Figura 31: CWT com a respectiva linha de máximo módulo (escala X tempo(ms))	34
Figura 32:modelo convolucional e perfil de refletividade do traço número 170 (amplitude X tempo (ms)).....	35
Figura 33: análise tempo frequência do traço 170 com janela de 25 milissegundos (frequência(Hz) X Tempo (s))	35
Figura 34: CWT com a respectiva linha de máximo módulo (escala X tempo(ms))	35
Figura 35:modelo convolucional e perfil de refletividade do traço número 173 (amplitude X tempo(s)).....	36
Figura 36: análise tempo frequência do traço 173 com janela de 25 milissegundos (frequência(Hz) X tempo(s))	36
Figura 37: CWT com a respectiva linha de máximo módulo (escala X tempo(ms))	36
Figura 38: tabela com a separação dos eventos segundo o modelo de velocidade, a STFT e a CWT para os traços com menor separação dos eventos	37

1. Introdução

A geofísica é uma área multidisciplinar do conhecimento que se utiliza de medidas físicas obtidas através de equipamentos com o intuito de entender o interior da Terra, além de outros corpos celestes. Diversas são as técnicas utilizadas para o entendimento em subsuperfície, como por exemplo, a gravimetria, magnetometria, métodos elétricos, eletromagnéticos e sísmicos. Dentre todos os métodos, a sísmica de reflexão se destaca, atualmente, quando se diz respeito a prospecção de hidrocarbonetos, por caracterizar mais detalhadamente os contatos geológicos e propriedades petrofísicas quando comparados com os outros métodos.

As acumulações de óleo e gás são encontradas em rochas de diversas origens geológicas como, por exemplo, siliciclásticas e carbonáticas, e embora o volume total de reservas mundiais esteja distribuída de forma aproximadamente equivalente entre esses dois tipos, no Brasil, atualmente, a maior parte das reservas oficiais se encontra em sistemas siliciclásticos, porém a tendência é mudar, uma vez que as mais recentes descobertas do pré-sal estão localizadas em sistemas carbonáticos.

Os turbiditos, depósitos siliciclásticos, são formados em ambientes sedimentares de leques submarinos, e a inserção destas rochas em bons sistemas petrolíferos resultam rochas reservatórios com grande potencial petrolífero. Entender a geometria e fácies associadas a tais ambientes é de grande importância para a prospecção das jazidas.

Para a localização das jazidas realiza-se a aquisição dos dados sísmicos em áreas enormes para que se possam discriminar locais com maior potencial de exploração. A partir de tal caracterização, estudos para um melhor imageamento, assim como perfurações para estimar viabilidade econômica devem ser feitos para a definição da melhor área a ser explorada.

Para um bom estudo de viabilidade econômica, no entanto, é necessário que o reservatório, como um todo, esteja bem delimitado, algo que muitas vezes não é trivial, pois esses reservatórios podem apresentar geometrias que sugerem áreas com separação entre sua base e topo menor que a resolução sísmica. Desta forma se faz necessário um estudo, assim como o desenvolvimento de técnicas que permitam melhor estimar tais reservas.

Este trabalho tem como objetivos a comparação quantitativa entre duas técnicas para a medição de espessuras, de reservatório com acunhamento, em um modelo sintético que simula, de forma simplificada. Este projeto de monografia está organizado da seguinte forma:

Na primeira parte deste trabalho, capítulo 2, faz-se uma breve introdução de como se formam os depósitos turbidíticos.

No capítulo 3, inicialmente, se introduzirá alguns conceitos básicos e necessários, para o entendimento de conceitos mais apurados, como a *short-time fourier transform* e a *transformada wavelet*.

No capítulo 4, última parte deste trabalho, serão utilizadas as técnicas apresentadas no capítulo anterior nos dados sintéticos gerados, apontando qualitativamente a sensibilidade de cada um para a caracterização do reservatório.

2. Modelo Geológico

O modelo de cunha que será utilizado neste trabalho foi inspirado em feições estratigráficas geradas por deposições de turbidíticas. Tais deposições representam partes significativas dos reservatórios de hidrocarbonetos nas bacias da margem leste brasileira. Tal deposição ocorre devido a um tipo específico de fluxo sedimentar gravitacional.

Hampton e Middleton (1973) definem quatro tipos de fluxo sedimentares gravitacionais como sendo fluxos de sedimento que se deslocam devido à ação da gravidade, sem a influência significativa do meio acima deste, são eles:

- Fluxos granulares – Onde a dispersão dos materiais e a manutenção destes em suspensão é promovida pela colisão entre as partículas, ao se depositarem produzem sequências onde as partículas mais finas se depositam na base e os mais grosseiros no topo. Tais sequências são chamadas de sequências negativamente grano-classificadas. Podem ocorrer nas vertentes inclinadas quando os sedimentos em equilíbrio instável são perturbados, como exemplo devido à atividade biológica, bioturbação.
- Fluxos liquificados (*liquified flows*) – ocorre a perda de contato entre os grãos, sendo dispersos e mantidos em suspensão pelos movimentos ascendentes da água. Ocorrem quando sedimentos não consolidados numa vertente são instabilizados pelas vibrações causadas por um evento sísmico.
- Fluxos detríticos – onde o fluido tem grande quantidade de finos em suspensão, o que propicia o transporte de elementos maiores. Os depósitos correspondentes são, em geral, maciços, heterométricos e não grano-classificados.
- Correntes turbidíticas – onde as misturas turbulentas de água e sedimentos variados que, no conjunto, correspondem a um fluido cuja densidade global é maior do que a água que envolve a corrente. Os fatores responsáveis pelo aumento da densidade global são basicamente três:

- diminuição da temperatura
- Aumento da salinidade
- Maior conteúdo de matéria em suspensão

As correntes turbidíticas não se iniciam sem haver qualquer mecanismo externo que faça com que grande quantidade de sedimento entre em suspensão. O fluido que fica com essa carga sedimentar tem então sua densidade aumentada, e este aumento juntamente com a ação da gravidade provocam um fluxo turbulento que tende a manter o sedimento em suspensão, inibindo assim sua deposição.

Quanto aos mecanismos que induzem tais correntes são variados, podendo ser abalos sísmicos, deslizamentos de terra e grandes temporais dentre outras.

Quanto à hidrodinâmica do fluxo as correntes são compostas por três regiões:

- parte frontal que é em geral a mais turbulenta e a que contém maior carga sedimentar avança para as águas sem ou com pouca carga sedimentar.

- corpo é a que segue a parte frontal onde o fluido apresenta condições mais ou menos uniformes.

- cauda apresenta condições mais ou menos uniformes, onde tanto a espessura quanto a concentração sedimentar vão diminuindo à medida que se afastam da parte frontal.

Quanto à deposição as correntes turbidíticas têm analogia com as correntes geradas pelo fluxo de matérias em zonas continentais emersas. Ambas confinam o material em canais, e à medida que desce modifica e forma novos diques laterais.

Quando começa a perder competência, geralmente ao deixar o confinamento no canal, a deposição sedimentar constrói deltas submarinos, similar a parte terminal de grandes rios.

Os depósitos adquirem características diferenciadas dependendo da parte do turbidito e efetuam-se numa sequência estratigráfica denominada de Bouma.

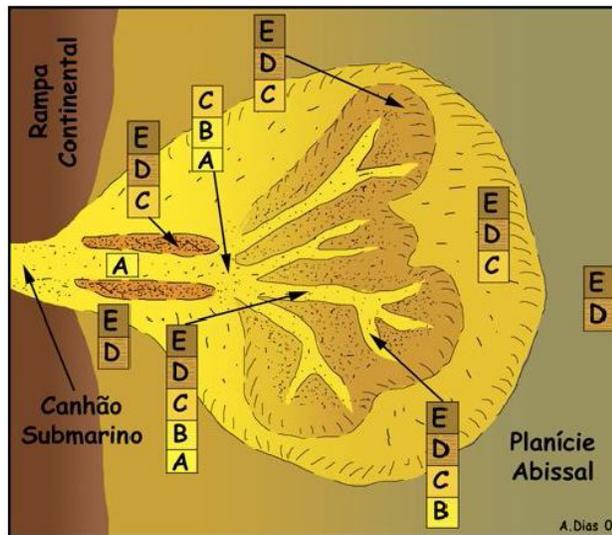


Figura 1: Esquema de um depósito turbidítico em domínio profundo, com indicação dos níveis da sequência que se depositam em cada zona. Fonte: Dias, 2004.

Onde:

- A - Arenito grosso a médio apresentando granodecrescência ascendente, e com feições erosivas na base (marcas de sola).
- B – Arenito com laminação plano-paralela
- C – Laminações cruzadas clino-ascendentes
- D – Silte e argilas depositadas em lâminas paralelas
- E – Argilas correspondentes a acumulação calma e lenta

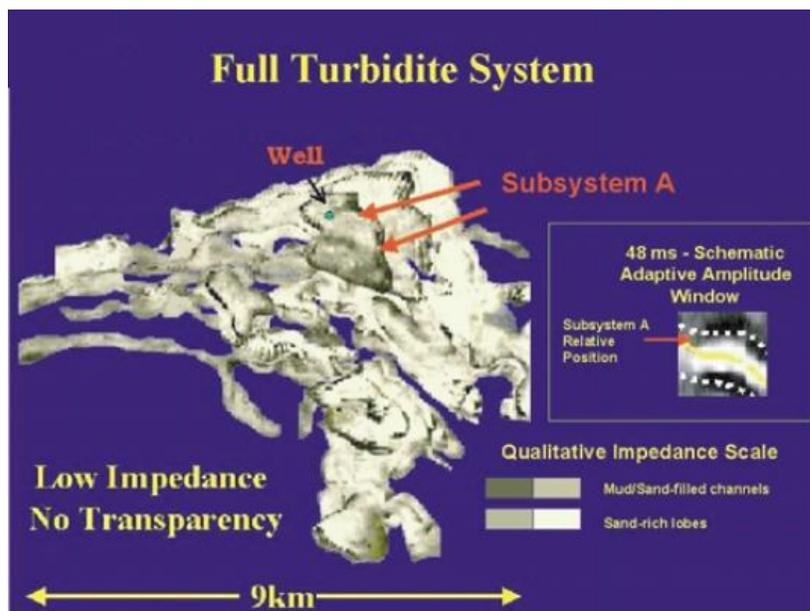


Figura 2: Sistema turbidítico retirado do trabalho de Santos et al (2000)

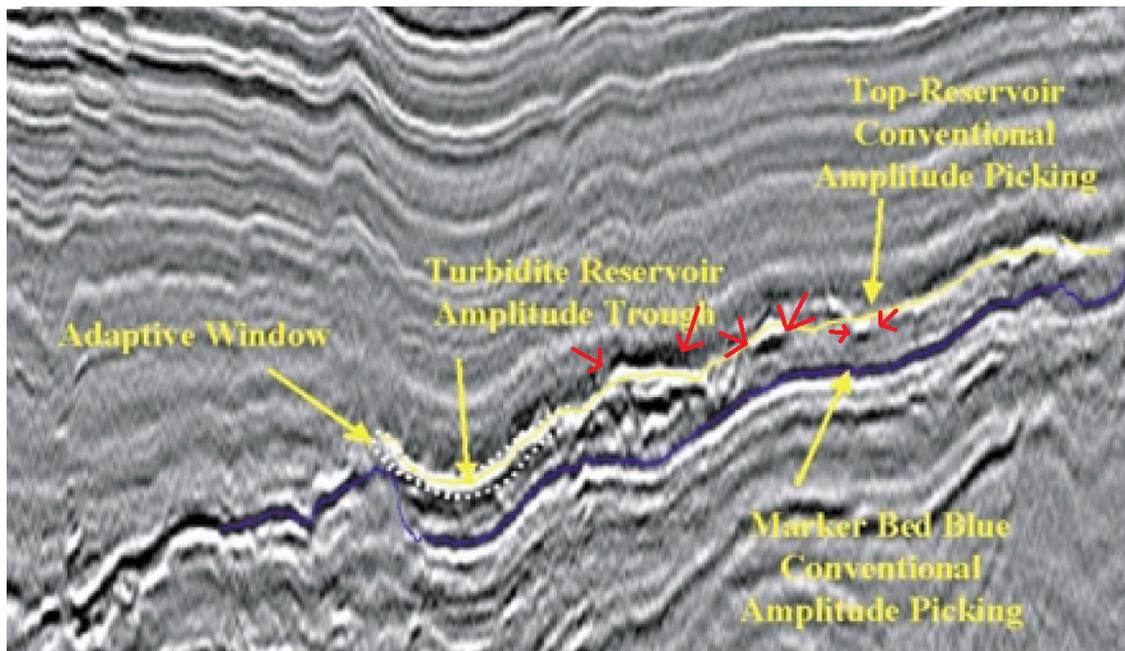


Figura 3: Linha sísmica cross-line feita no sistema turbidítico da figura 2.
 fonte: Santos.2000, Adaptive visualization of deepwater turbidite systems in Campos Basin using 3-D seismic, pag 3.

A partir da Figura 3, um perfil sísmico feito perpendicularmente ao sistema ilustrado na Figura 2, é possível observar diversas regiões com acunhamento, marcadas com setas vermelhas, localizadas nas extremidades dos diversos canais que compõem o sistema turbidítico. Com o intuito de melhor caracterizar tais reservatórios serão apresentados dois métodos, a transformada de *Fourier* janelada e a transformada *wavelet* contínua, para tentar melhor caracteriza-los apontando quantitativamente a diferença dos dois em um modelo sintético que simula tais depósitos.

3. Fundamentação Teórica

Para que se possa entender os conceitos apresentados nesse trabalho, se faz necessário uma pequena introdução dos conceitos: Teorema de Euler, correlação cruzada, convolução e transformada de Fourier. Assim como algumas propriedades de tais conceitos.

3.1 Teorema de Euler

O teorema de Euler estabelece uma relação muito importante entre exponenciais complexas e funções trigonométricas que constituem a base de várias transformadas utilizadas em geofísica.

$$e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x) \quad (1)$$

onde:

$$i = \sqrt{-1}$$

3.2 Série de *Fourier*

A série de *Fourier*, nomeada em homenagem ao físico-matemático francês Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 1830), é uma representação em uma forma de uma soma infinita de senos e cossenos de reconstruir um sinal (função) . Tal série é utilizada no estudo de sinais periódicos.

Seja $f(x)$ uma função periódica de período 2π , a representação em forma de soma infinita de senos e cossenos, série de *Fourier*, para tal função é de acordo com a equação (2).

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi x}{k}\right) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin\left(\frac{2\pi x}{k}\right) \quad (2)$$

Onde:

$$k \in \mathbb{N}^+$$

$$x \in \mathbb{R}$$

a_k, b_k são os coeficientes da série.

Os coeficientes da série podem ser interpretados como sendo a contribuição de cada frequência de seno e cosseno para reconstrução do sinal. Alguns casos especiais facilitam o cálculo dos coeficientes.

- Se $f(x)$ é uma função par, isto é, $f(-x) = f(x)$, os b_k são nulos e a série é uma soma de cossenos.

- Se $f(x)$ é uma função ímpar, isto é, $f(x) = -f(-x)$, os a_k são nulos e a série é uma soma de senos.

- Se $f(x + \pi) = -f(x)$, só existem coeficientes de índice ímpar, reduzindo-se assim pela metade o número de coeficientes necessários para o cálculo.

Porém na prática não é possível trabalhar com um número infinito de coeficientes, desta forma armazenam-se os coeficientes necessários para reconstruir o sinal com uma margem aceitável de erro.

3.3 Correlação cruzada ou Cross-correlação

É a operação matemática que permite descobrir a similaridade entre dois sinais, funções, é definida como:

$$(f * g)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f[m]g[n+m] \quad (5)$$

Por exemplo, considere duas funções reais $f(x)$ e $g(x)$ que diferem apenas por um deslocamento desconhecido no eixo x . É possível utilizando a correlação cruzada descobrir tal valor de forma que ambas as funções se tornem idênticas. A fórmula essencialmente desloca a função g ao longo do eixo x , calculando a integral de seus produtos a cada posição. Quando as funções se sobrepõem, o valor de $f(x) * g(x)$ é máximo. Isto ocorre pois quando os picos se alinham, elas contribuem largamente para o valor da integral.

3.4 Transformada de Fourier (FT)

Como explicado em 3.2 Série de Fourier, um sinal periódico pode ser representado como um somatório infinito de senos e cossenos. Existe uma ferramenta matemática conhecida como transformada de Fourier que possibilita seu estudo em relação a contribuição de cada uma das funções base, senos e cossenos. Em outras palavras a transformada de Fourier é uma operação matemática que permite alterar o domínio de $h = h(t)$ para que se possa estudar seu estudo em função de sua frequência, e está definida de acordo com a equação abaixo:

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

A transformada de uma função $h(t)$ é a função $H(w)$, onde $w \in \mathfrak{R}$, cuja imagem está no conjunto dos números complexos, logo ela pode ser decomposta nas suas partes real e imaginária, ou escrita na sua forma polar.

$$H = H_r + H_i = |H|e^{i\theta} \quad (7)$$

Onde,

$$|H| = \sqrt{H_r^2 + H_i^2}$$

$$\theta = \arctan(H_i/H_r)$$

3.4.1 Propriedades da Transformada de Fourier

Translação no tempo:

Se $H(h) = H[h(t)]$ é a transformada de $h = h(t)$ e a função $h_c = h(t - c)$ representa a translação da função $h = h(t)$ de c unidades para a direita, então:

$$H(h_c) = H[h(t - c)] = e^{-iwc} H(h) \quad (8)$$

Translação na frequência:

Se $H(w) = H[h(t)]$ é a transformada de Fourier de $h = h(t)$ então:

$$H(e^{i\omega_0 t} h(t)) = H(w - w_0) \quad (9)$$

Teorema da convolução:

Se $f(t)$ e $g(t)$ tem suas transformadas $F(w)$ e $G(w)$, respectivamente. Então a convolução, $f(t) * g(t)$, tem como transformada $F(w)G(w)$. O oposto também é verdadeiro, ou seja, o produto, $f(t)g(t)$, tem como transformada $F(w) * G(w)$

3.4.2 Transformada inversa de Fourier

A transformada inversa de Fourier é a operação matemática que permite retornar-se ao domínio original, do tempo, após a transformada de Fourier. Em outras palavras é a síntese do sinal original a partir do seu espectro de frequências, e está definido de acordo com a equação abaixo.

$$H^{-1}(g(w)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(w)e^{iwt} dw \quad (10)$$

3.5 Convolução

O produto das transformadas de Fourier de duas funções não é igual a produto de suas transformadas, isto é:

$$H(f.g) \neq H(f)H(g) \quad (11)$$

Porém tal desigualdade passa a ser uma igualdade quando substituimos o sinal \cdot pelo $*$, esse operador significa a convolução dos sinais, e é definido matematicamente como:

$$(f * g)(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x-w)g(w)dw = \int_{-\infty}^{\infty} f(w)g(x-w)dw \quad (12)$$

3.6 Modelo Convolutacional

O sinal sísmico pode ser aproximado como sendo a convolução da função refletividade com a fonte.

$$S(t) = R(t) * W(t) + r(t) \quad (13)$$

Onde:

$S(t)$ – sinal sísmico

$R(t)$ – Função refletividade

$W(t)$ – fonte sísmica

$r(t)$ – ruído

A função refletividade é obtida através do conhecimento das velocidades e densidades das camadas geológicas. Por isso se faz necessário um bom conhecimento da geologia para que se possa construir um bom modelo de velocidade e densidade.

A refletividade é definida matematicamente como a equação (14), considerando-se a incidência normal da onda sísmica. Tal refletividade nada mais é do que a porção de energia que retorna da interface, e é definida de acordo com:

$$R = \frac{V_2 \rho_2 - V_1 \rho_1}{V_2 \rho_2 + V_1 \rho_1} \quad (14)$$

Onde:

V_n = Velocidade da camada n

ρ_n = Densidade da camada n

$V_n \rho_n$ = Impedância acústica da camada n

As figuras 4, 5 e 6 mostram um modelo de velocidade, densidade e refletividade, respectivamente.

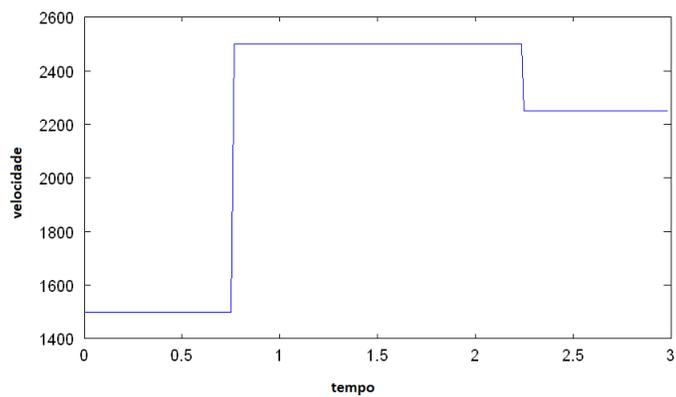


Figura 4: perfil velocidade (km/s) X tempo(s)

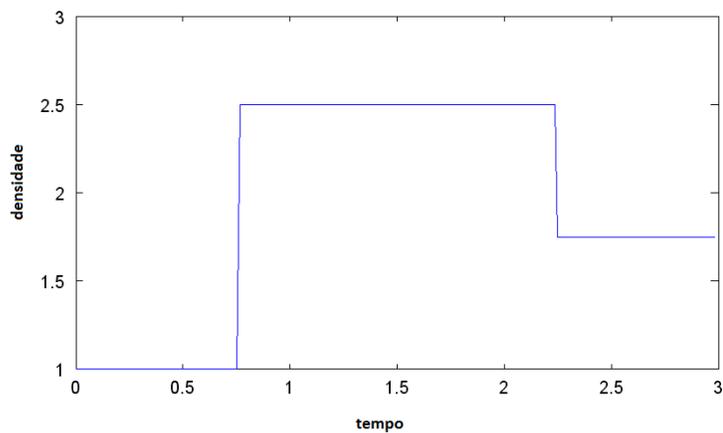


Figura 5: perfil de densidade (kg/m³) X tempo(s)

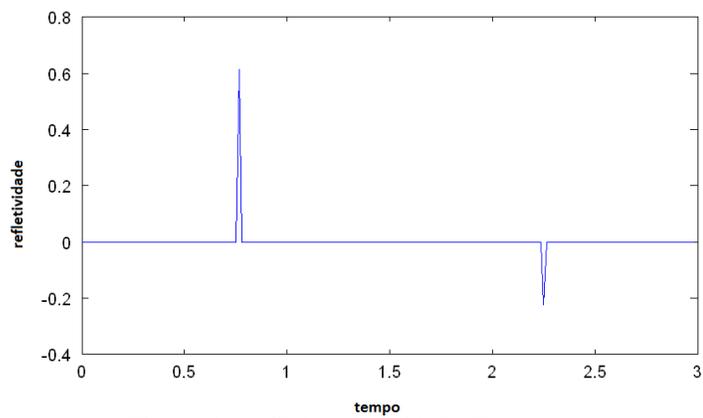


Figura 6: perfil de refletividade X tempo (s)

Os valores utilizados são valores reais referentes a um modelo contendo camadas de água, folhelho e arenito com gás, respectivamente. (Telford *et al* , 1990)

A fonte é a perturbação que impomos ao meio para que o pulso se propague. Na sísmica a fonte pode ter diversas origens: canhões de ar, dinamites e caminhões com massas vibrantes (Vibroseis). A fonte pode ser matematicamente descrita com um sinal de energia finita e com um espectro de frequência finito. Neste trabalho será utilizada a fonte de Ricker e a equação abaixo a descreve.

$$f(t) = 1 - 2(\pi ft)^2 \exp(-\pi ft)^2 \quad (15)$$

Onde f é a frequência central da ricker. Na sísmica tal frequência é em torno de 30 Hz e esta será a frequência utilizada neste trabalho.

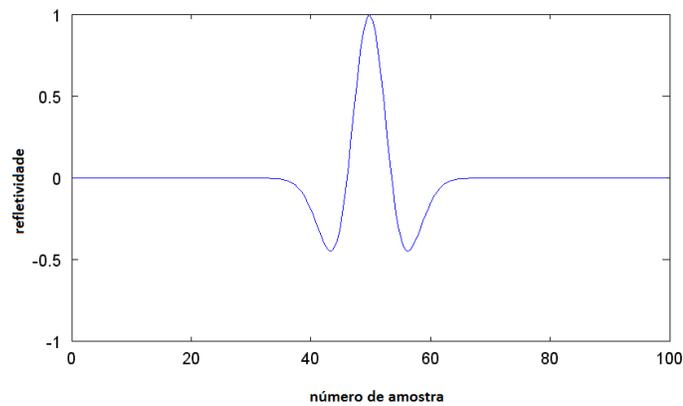


Figura 7: Pulso de ricker

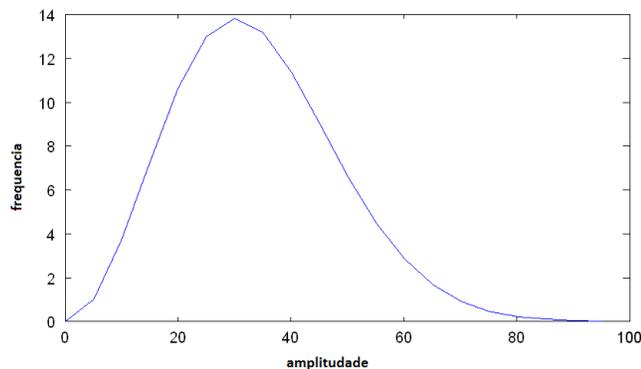


Figura 8: Transformada de Fourier da ricker (amplitude X frequência)

A Figura 7 mostra a Ricker, pulso com frequência e duração finitos no tempo, com frequência central, taxa de amostragem e duração no tempo iguais a 30 Hertz, 1 milissegundo e 200 milissegundos, respectivamente. Logo após na Figura 8 está representado o espectro de frequência do referido pulso.

O ruído que é toda informação que não representa o sinal. E neste trabalho será adicionado apenas o ruído branco, cujo o espectro contém todas as frequências.

A Figura 9 mostra o modelo Convolutacional utilizando os exemplos de refletividade e fonte apresentados anteriormente. Note-se que a diferença de fase entre as wavelets ocorreu devido à escolha das velocidades do modelo. Este modelo com as *wavelets* com sinal invertido será a utilizada no capítulo 5 deste trabalho por melhor representar uma camada de areia contida em um folhelho.

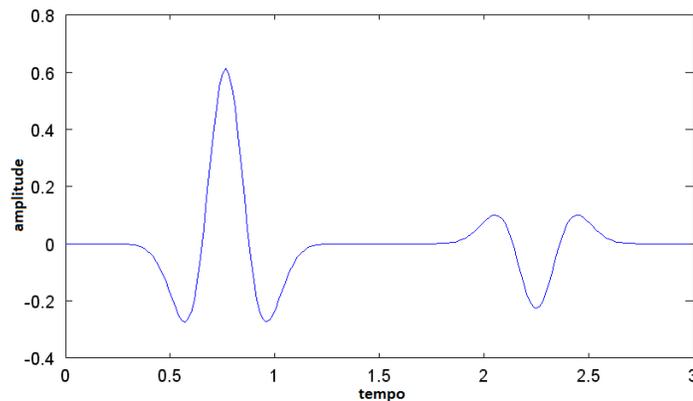


Figura 9: modelo convolutacional

3.7 Análise em Tempo-frequência

A análise no domínio da frequência através do espectro de potência é bastante utilizada na interpretação sísmica, principalmente para detecção de camadas delgadas (Partyka et al., 1999) (Mafurt & Kirilin, 2001). Entretanto, o espectro de potência não revela como o conteúdo de frequência varia ao longo do tempo e muito menos a localização das transições do sinal. Assim, para auxiliar a caracterização das propriedades das diversas camadas da sub-superfície, deve-se

utilizar algoritmos para a análise da variação conjunta do comportamento de sinais em tempo e em frequência que enfatizem características específicas da superfície.

Para exemplificar este problema, considere o sinal das Figuras 10 e 11, observe que a transformada de Fourier, não fornece informações sobre a localização das frequências. Também é possível observar que tampouco ilustra a região de encontro das mesmas. Fazendo uma analogia para a sísmica, a transformada de Fourier não seria a melhor ferramenta para separar os refletores, frequências, no tempo, visto que sinais diferentes podem possuir um mesmo espectro de frequências.

Faz-se necessário então a utilização de uma ferramenta que permita a visualização da distribuição das frequências no tempo. Uma ferramenta que pode ser utilizada é a transformada de *Fourier* Janelada.

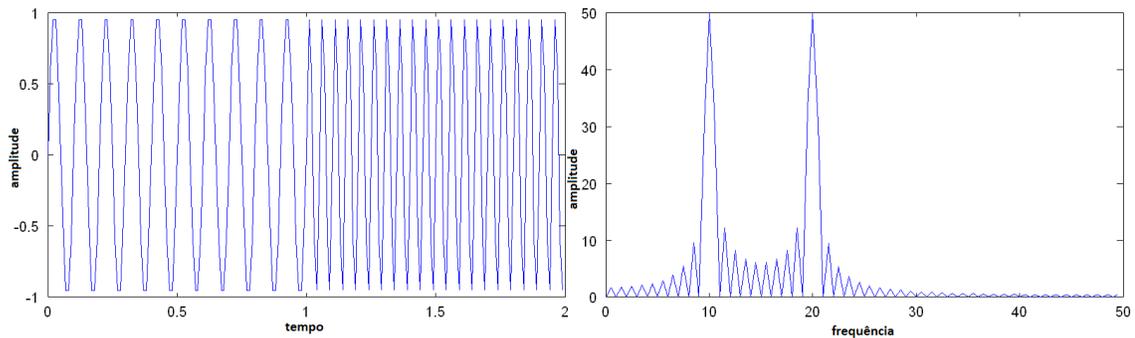


Figura 10: sinal e transformada de *Fourier*

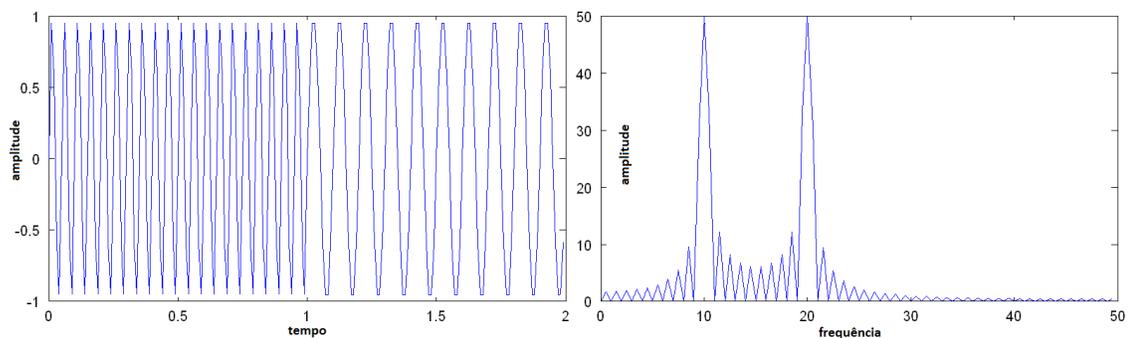


Figura 11: sinal e transformada de *Fourier*

3.8 Transformada de Fourier Janelada (short-time Fourier Transform (STFT))

Os sinais geofísicos em sua maioria são séries-temporais estacionárias, cujos seus momentos estatísticos como a média, variância e outros, não variam ao longo do tempo (Morettin, 1999). Sendo assim a transformada de *Fourier* não é uma ferramenta adequada para fornecer informações de como as frequências se comportam ao longo do tempo. Gabor (1946) percebeu esse problema e modificou a transformada utilizando o seguinte mecanismo: Ele dividiu a série temporal em vários seguimentos de igual tamanho e aplicou a transformada de *Fourier* e cada um dos seguimentos. Este processo ficou conhecido como a transformada de *Fourier* janelada.

Para exemplificar este princípio utilizou-se os sinais das Figuras 9 e 10 aplicou-se a transformada de *Fourier* janelada, utilizando primeiramente o filtro “*boxcar*” com tamanho igual a um segundo (Figura 12). As Figuras 12 e 13 mostram o resultado de tal transformada.

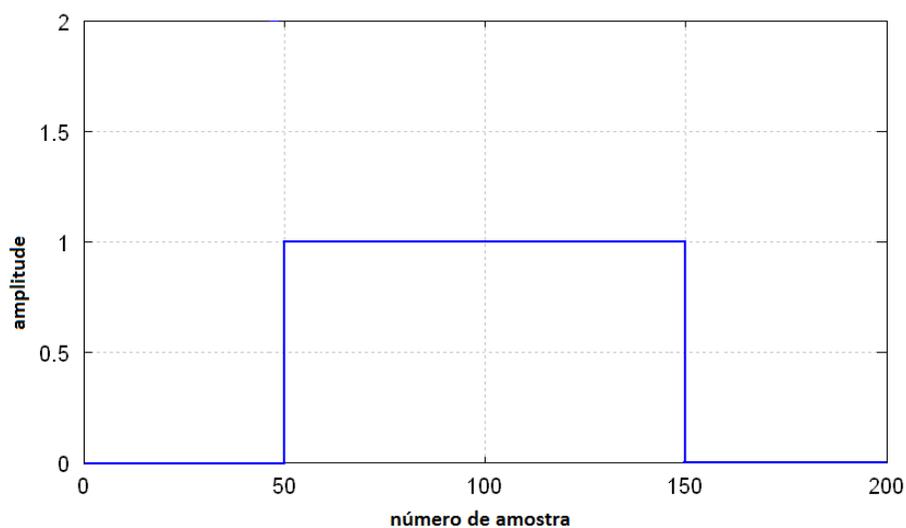


Figura 12: filtro “*Boxcar*”

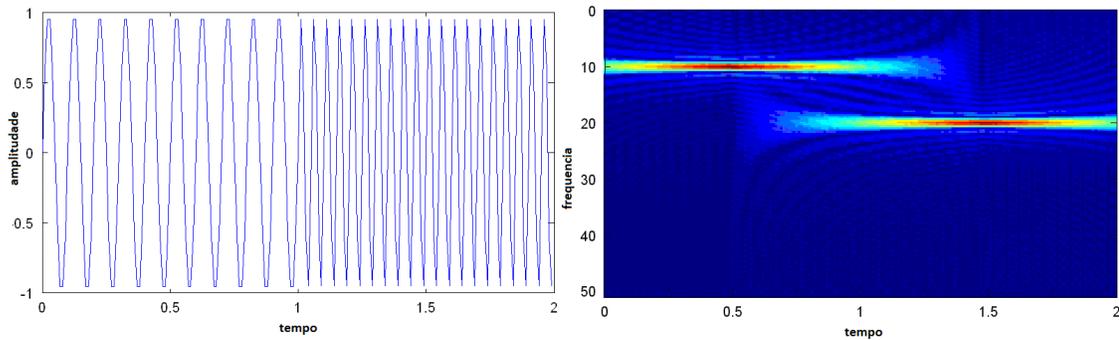


Figura 13: sinal e análise tempo frequência com filtro *boxcar*

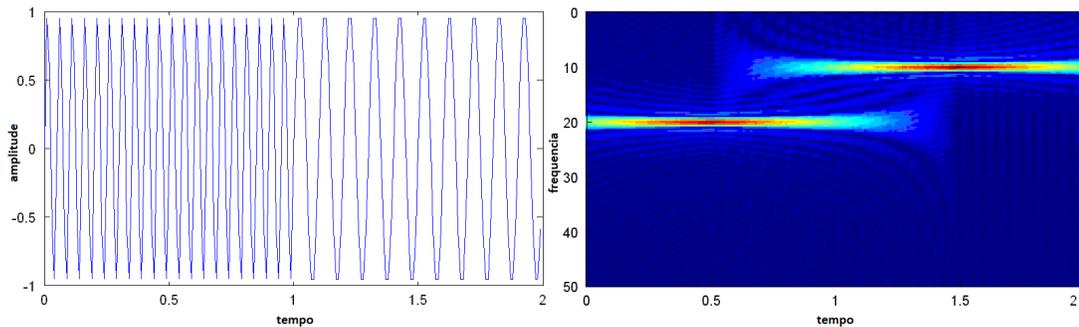


Figura 14: sinal e análise tempo frequência com filtro *boxcar*

Nas Figuras 13 e 14, o eixo horizontal representa o tempo, em segundos, e o vertical a frequência, em Hertz. A tabela de cores representa a amplitude das frequências, cores avermelhadas representam valores maiores. Percebe-se que através desta ferramenta já é possível discriminar a distribuição das frequências de 10 e 20 Hertz, ao longo do tempo.

No entanto observando-se os gráficos em tempo-frequência, percebe-se a presença de *ripples*. Este fenômeno é conhecido como efeito de Gibbs (Bracewell, 1965) e ocorreu devido à característica do filtro *Boxcar* apresentar variações extremamente bruscas em suas bordas. Para minimizar tal problema foi utilizada uma janela que apresenta uma variação mais suave em suas bordas. Tal janela é chamada de janela de Hanning, Figura 15, e observa-se nas Figuras 16 e 17, uma sensível melhora devido à alteração da janela, diminuindo a presença de tais *ripples*.

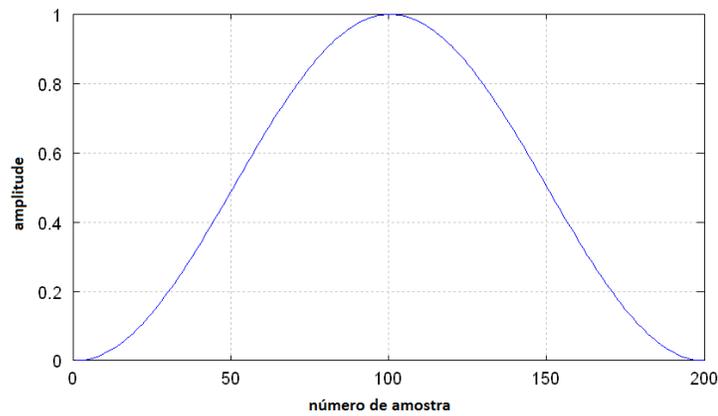


Figura 15: janela de *Hanning*

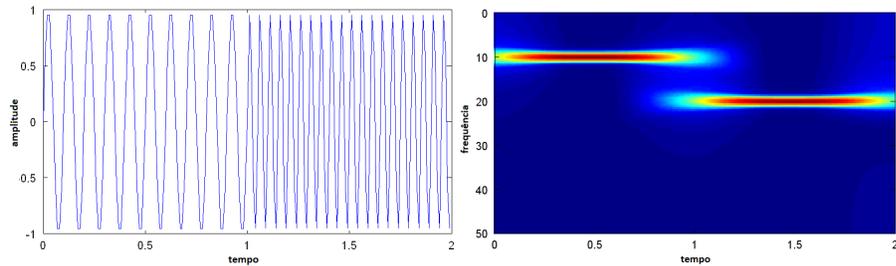


Figura 16: sinal e análise tempo frequência com filtro *hanning*

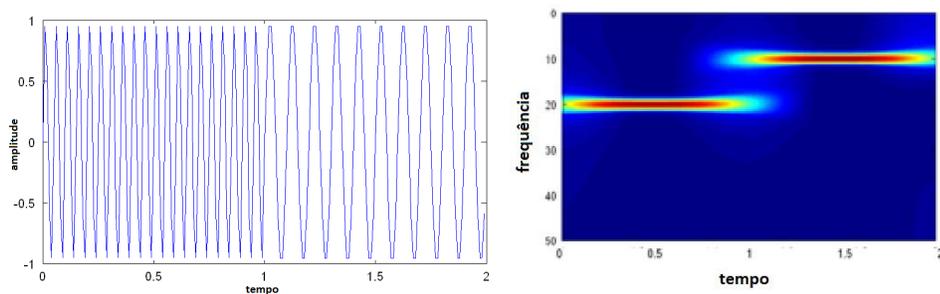


Figura 17: sinal e análise tempo frequência com filtro *hanning*

Nas Figuras 16 e 17 o encontro das frequências não fica bem definido entre 0.8 e 1.2 segundos, isso ocorreu devido ao tamanho da janela. Porém é de suma importância a localização temporal das referidas frequências. Utilizando-se janelas menores é possível enxergar os limites entre as duas frequências de forma mais localizada no tempo. Observar-se nas Figuras 18 e 19 que à medida que se localiza melhor no tempo perde-se localização em frequência, esse fenômeno é análogo ao principio da incerteza Heisenberg, que diz que o produto da incerteza no tempo pela incerteza na energia deve ser maior ou igual a metade da constante de Planck normalizada. Tais figuras mostram a análise do sinal da Figura 17, utilizando-se

janelas com tamanhos de 50 e 25 milissegundos. Fica claro a partir da comparação entre as Figuras 13,14,15,16 e 17 que à medida que se diminui o tamanho da janela a localização temporal das frequências fica melhor definida.

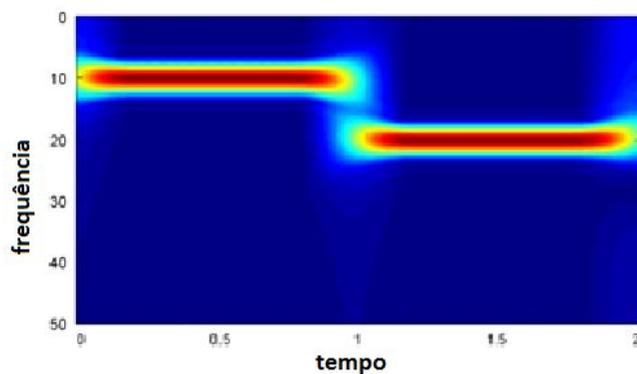


Figura 18:análise em tempo-frequência usando uma janela de 50 milissegundos

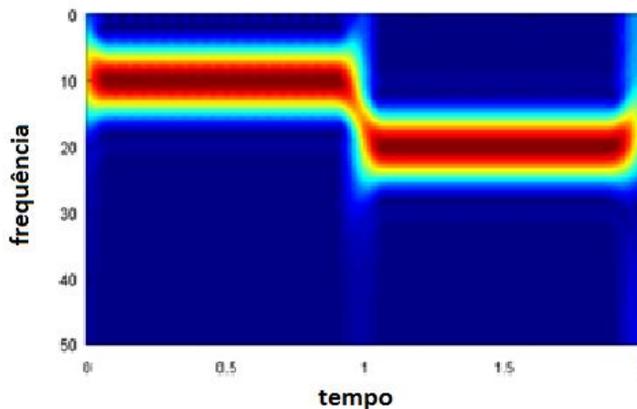


Figura 19:análise em tempo-frequência usando uma janela de 25 milissegundos

A localização temporal de eventos através de ferramentas de análise tempo-frequência é o foco principal deste trabalho. Pois é possível associar o transiente do espectro com os eventos geológicos.

3.9 Transformada wavelet (WT)

Os problemas relacionados à FT e STFT quando aplicadas a sinais não-estacionários são basicamente dois:

- As funções bases (seno e cosseno) possuem energia de menos infinito até mais infinito, ou seja, energia não localizada no tempo.
- O tamanho da janela utilizada para na STFT permite a análise do sinal apenas em uma resolução de tempo e de frequência.

Para resolver estes problemas a transformada wavelet utiliza outras funções bases, as wavelets e permite ainda a análise em multi-resolução, como será explicado nesta sessão.

Diferente da TF, cuja as funções base são os senos e cossenos, na WT as funções bases são as *wavelets*, conhecida também como ondeletas. Tais wavelets são funções ortogonais que possuem energia localizada em um determinado instante de tempo. Esta característica possibilita uma melhor análise de sinais não-estacionários.

Na literatura é possível encontrar uma grande variedade de wavelets. As Figuras 20, 21 e 22 ilustram algumas das wavelets usualmente utilizadas na literatura. Cada função, wavelet, apresenta características próprias e conseqüente diferença e suas transformadas, cabe ao interprete a escolha adequada da função.

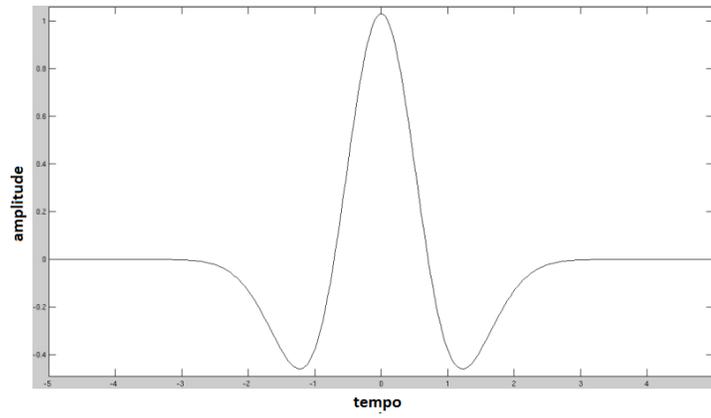


Figura 20: Gauss2

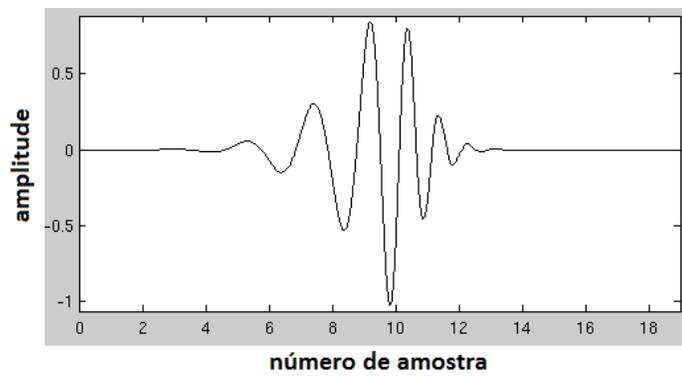


Figura 21: daubechie

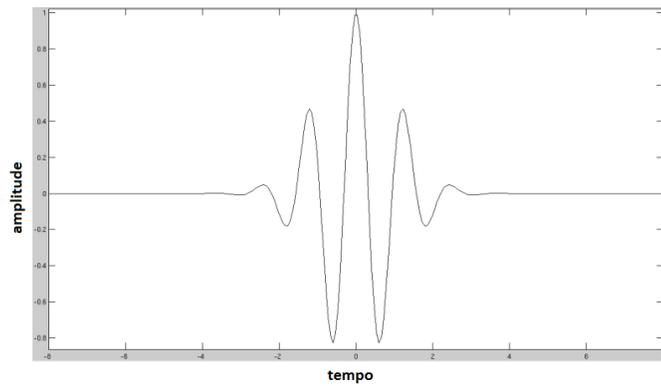


Figura 22: Morlet

3.9.1 Transformada contínua wavelet (CWT)

Como foi explicado na sessão anterior é necessário, inicialmente, escolher a wavelet principal, ou *wavelet mãe*, que será a função principal utilizada durante a transformada wavelet contínua e discreta, esta última será explicada na próxima sessão. A partir da *wavelet* mãe serão geradas todas as funções escalas, também conhecidas na literatura como *wavelets* filha, a partir do escalonamento e deslocamento da função principal.

A fórmula de cada função escala a partir da *wavelet* mãe é da forma:

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (16)$$

onde:

$\psi_{u,s}(t)$ = função escala

u = deslocamento da função

s = escalonamento da função

$\frac{1}{\sqrt{s}}$ = normalização da função

ψ = wavelet mãe

Na equação acima o termo $\frac{1}{\sqrt{s}}$ serve para normalizar a energia as *wavelets* em diferentes escalas.

Com o cálculo das funções escalas, a cwt de uma função $x(t)$ é da forma:

$$CWT_{u,s}^{\psi} = \frac{1}{\sqrt{s}} \int x(t) \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (17)$$

Na equação acima o termo referente a translação, τ , tem o mesmo significado no utilizado na STFT, localização da janela a medida que está se desloca pelo sinal. Este termo corresponde a informação temporal no domínio da transformada. Porém diferente da STFT não existe o parâmetro frequência do domínio da CWT. Ao invés disso aparece o termo escala que representa faixas de frequências, onde escalas maiores representam baixas frequências e vice-versa.

3.9.2 Escala

O parâmetro escala na análise wavelet é similar a escala utilizada em mapas. No caso dos mapas grandes escalas correspondem a análise global não detalhada da região, enquanto pequenas escalas a análise detalhada da região. De forma similar, em termos de frequência, baixas frequências (altas escalas) correspondem a informação global do sinal, enquanto que altas frequências (pequenas escalas) correspondem a informações detalhadas do sinal.

A Figura 23 mostra um exemplo da wavelet "gaus2", também conhecida como chapéu mexicano com várias escalas e escalonamentos. Todas as funções estão normalizadas pelo fator $\frac{1}{\sqrt{s}}$.

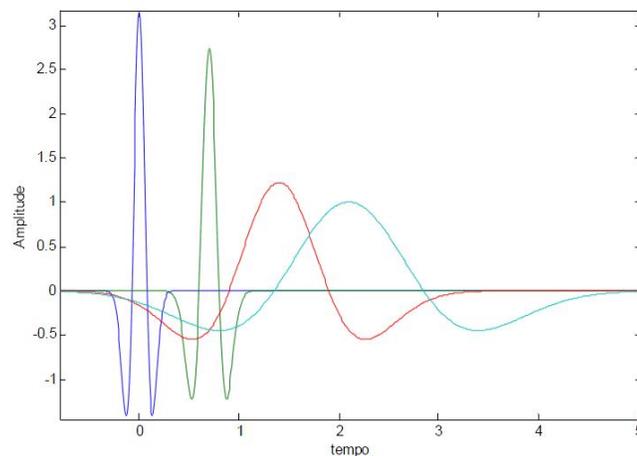


Figura 23: Ricker com diferentes escalonamentos e deslocamentos

Em termos matemáticos, o escalonamento serve para comprimir ou dilatar um dado sinal ,função, ou seja dado uma função $x(t)$, $x(s.t)$ será uma forma comprimida de $x(t)$ se $s > 1$, e uma forma dilatada da mesma função se $s < 1$. Porém devido ao fator de escala s estar localizado no denominador da equação (17), o inverso ocorre, ou seja, para $s > 1$ ocorre a compressão do sinal e para $s < 1$ ocorre a dilatação do mesmo.

3.9.3 O cômputo da CWT

Primeiramente defini-se o sinal que será analisado. Em seguida escolhe-se a wavelet mãe que será utilizada para o estudo. Esta servirá de protótipo para todas as janelas utilizadas no processo. Todas as janelas utilizadas serão versões comprimidas e dilatadas da *wavelet* mãe. Inicia-se o processo com $s = 1$ e $u = 0$, que corresponde ao *tempo* = 0, a wavelet é multiplicada pelo sinal e depois integrada por todo o tempo. O resultado da integração é em seguida multiplicado pelo fator $\frac{1}{\sqrt{s}}$ de forma que a energia de todas as escalas seja igual, como explicado na sessão anterior. A wavelet para a escala $s = 1$ é então deslocada para a direita por um valor u e encontra-se o valor da transformada para $s = 1$ e $u = u$ no plano tempo-escala. O processo se repete até que todo o sinal seja percorrido, e desta forma o valor da transformada para $s = 1$ é obtido.

Em seguida o valor de s é acrescido de um valor suficientemente pequeno, e novamente a transformada é calculada percorrendo esta nova janela pelo sinal. Nota-se nesta parte o fato de ser chamada de contínua se deve pelo fato dos valores de s poderem ser quaisquer números reais, limitados apenas pela capacidade de cálculo do computador utilizado. Após o cálculo para todos os s a transformada CWT estará calculada.

A Figura 24 mostra os mesmos sinais testes utilizados na análise com a transformada de *Fourier* janelada, percebe-se uma sensível melhora quanto a caracterização da transição das frequências, na região próxima a 1 segundo.

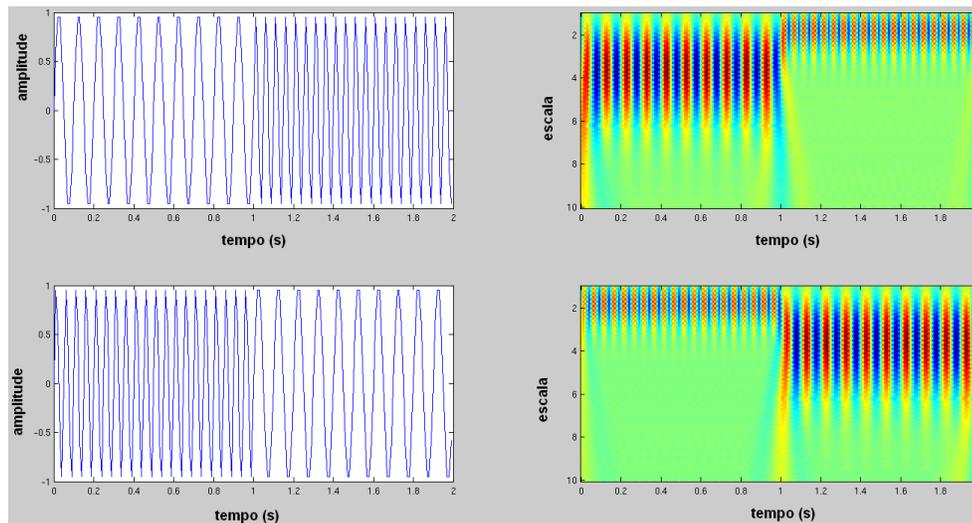


Figura 24:CWT de um sinal teste utilizando a ricker

3.10 Resolução tempo- frequência

A resolução tempo-frequência é o principal motivo para a alteração ente a STFT e a transformada wavelet. A Figura 25 mostra uma forma de como a resolução em tempo e frequência deve ser interpretada.

Cada retângulo na Figura 25 representa o valor da transformada wavelet. Nota-se que para baixas frequências a altura dos retângulos é menor enquanto possui comprimento maior, o que representa uma melhor resolução em frequência e uma pior resolução em tempo. Em contra partida altas frequências apresentam maior altura e menor comprimento, o que representa pior resolução em frequência e melhor resolução em tempo.

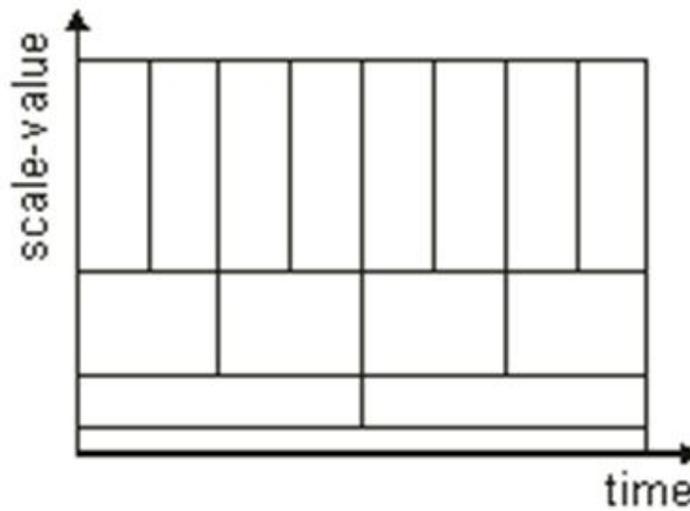


Figura 25:Esquema de resolução em tempo e frequência da WT

No caso da STFT ambas as resoluções em tempo e frequência são constantes e neste caso a Figura 25 se reduz a quadrados de mesma área.

3.11 Detecção de transições de um sinal utilizando a CWT

Utilizando a CWT é possível retirar atributos que serão utilizados para a caracterização do sinal, primeiramente suaviza-se o sinal para então, utilizando-se um script, retirar-se os máximos locais da transformada. Estes podem ser relacionados com os refletores sísmicos. E ligando-se os máximos locais em diferentes escalas é possível caracterizar as transições do sinal em diferentes escalas (Matos, 2004).

Na sessão 4 deste trabalho esta técnica será utilizada para separação de refletores sísmicos.

3.12 Resolução vertical

Para duas reflexões, uma no topo e outra na base de uma dada camada geológica existe um limite de até onde as camadas conseguem ser separadas. Tipicamente a resolução vertical utilizada é um quarto do comprimento de onda dominante (Yilmaz,1985), λ_d , onde:

$$\lambda_d = v/f_d \quad (18)$$

A frequência dominante, f_d , depende da profundidade de investigação pois as altas frequências são absorvidas mais rapidamente pela Terra, logo eventos mais profundos não conseguem ser tão bem separados. Ao se adotar $f_d = 50Hz$ e $v = 2000m/s$, valores típicos para refletores rasos, camadas a partir de 10 metros de espessura poderão ser resolvidas em uma sessão sísmica. No entanto utilizando $f_d = 15Hz$ e $v = 4500m/s$, valores típicos para refletores mais profundos, camadas a partir de 75m de espessuras podem ser resolvidas. Os valores utilizados como exemplo tornam evidentes as limitações do método sísmico, pois muitas feições estratigráficas importantes assim como muitos reservatórios de hidrocarbonetos são mais delgados que o limite imposto a grandes profundidades (com a perda de energia das altas frequências, a frequência dominante, aquela com maior energia, passa a diminuir. Analisando-se este fenômeno juntamente com a equação (18), percebe-se que o comprimento de onda dominante irá aumentar e isto dificultará ainda mais a análise de reservatórios delgados).

3.13 Efeito de *Tunning*

Ao se analisar traços muito próximos da região onde os refletores se aproximam, percebe-se que a separação das camadas parece não variar a partir de certo ponto. O gráfico da Figura 26 mostra um *crossplot* da espessura real pela espessura medida, para o modelo de velocidade mostrado na Figura 28 observa-se que quando a espessura da camada é inferior a 16 milissegundos (aproximadamente 1/4 do comprimento de onda dominante) o modelo convolucional não consegue separar os eventos, como se as camadas não se encontrassem, tal efeito é chamado de efeito *tunning*.

O gráfico na Figura 27 mostra o comportamento da amplitude da onda para diferentes espessuras, para o modelo de velocidade mostrado na Figura 28. Nota-se que tal amplitude se mantém constante quando a camada tem espessura suficiente, porém à medida que a espessura diminui a interferência entre o topo e a base da camada afeta construtivamente a amplitude da onda, até um máximo, chamado ponto de *tunning*, onde a amplitude decai até zero rapidamente.

Quando o modelo de velocidade faz com que as *wavelets* estejam em fase, Figura 28, ocorre uma diferença no gráfico de amplitude X espessura real. À medida que a espessura da camada diminui, a amplitude alcança o ponto de *tunning*, marcado por uma barra vermelha no mínimo do gráfico, aumentando em seguida.

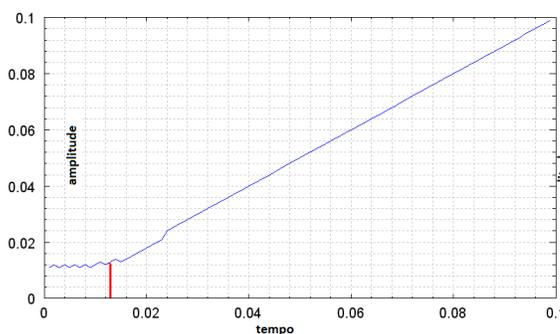


Figura 26: espessura real X espessura medida

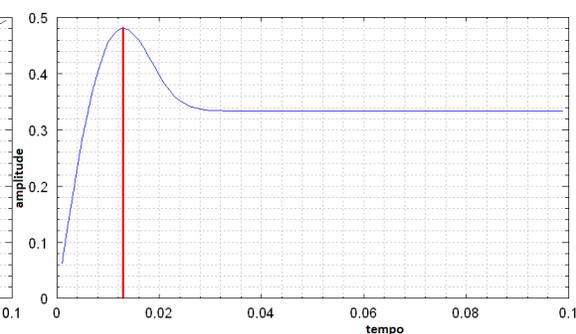


Figura 27 amplitude X espessura real

4. Modelo Convolutacional e Análise em tempo-frequência dos traços sísmicos sintéticos

Utilizando com inspiração o modelo de deposição turbidítica apresentado na parte de geologia deste trabalho e os conceitos apresentados nas sessões anteriores, foi criado um modelo para que se possam estudar os traços sísmicos em tempo-frequência. Por razões didáticas as refletividades serão respectivamente 1 e -1 para simular uma camada de areia entre uma camada de folhelho.

A Figura 28 mostra um modelo de velocidade, em tempo, adotado neste trabalho, a partir dele e da ricker apresentada parte de convolução deste trabalho, gerou-se os perfis sintéticos.

Para tal modelagem foi utilizada uma matriz 200x200 e em ambos os perfis será adotado a densidade iguais a 1 g/cm³. Para efeito didático a refletividade possui valores 1 e -1 respectivamente.

Na Figura 28 no eixo vertical representa o tempo, variando de 0 até 0.2 segundos, e o eixo horizontal representa os duzentos traços sísmicos.

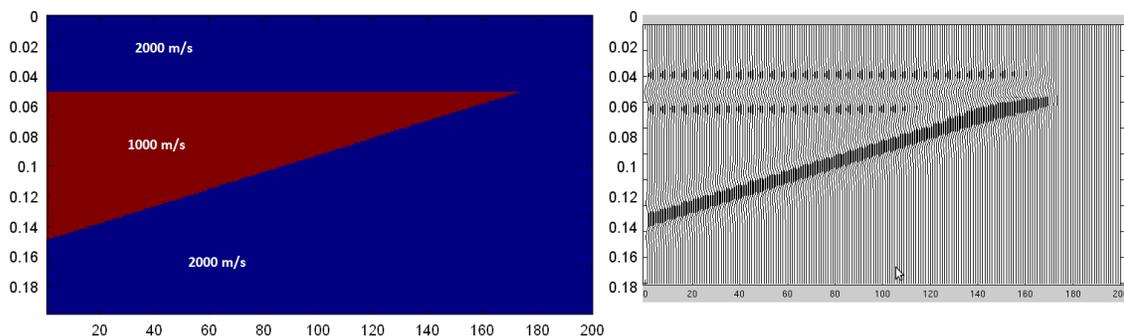


Figura 28: modelo de velocidade e convolutacional

A partir do modelo convolutacional, representado na Figura 28, e utilizando a STFT e a CWT, apresentada na seção 3.8 Transformada de Fourier Janelada (short-time Fourier Transform (STFT)) e 3.9 Transformada wavelet (WT), se realizará a análise em tempo-frequência com o objetivo quantificar-se a separação de contatos geológicos, comparando valor obtido com os dois modelos de velocidade adotados(Figura 28).

Através da análise referida também tem como objetivo avaliar a ferramenta utilizada em relação à capacidade de localização, em tempo, dos refletores em profundidade.

Para ambas as análises serão utilizadas três traços sísmicos, sua respectiva STFT e CWT com o objetivo de demonstrar e quantificar as diferenças com as respectivas refletividades.

4.1 Análise em tempo-frequência do modelo cunha

Nesta sessão irá se utilizar as duas ferramentas apresentadas neste trabalho, a STFT e a CWT com o objetivo de comparação das duas ferramentas quanto a capacidade de separação dos refletores sísmicos.

Utilizou-se três traços sintéticos como exemplos e no final gerou-se uma tabela com a separação dos vinte três traços com menor separação dos eventos.

Em cada exemplo apresenta-se o traço sísmico em questão, o modelo de reflexão que gerou o traço, a STFT com janela igual a 25 ms, a CWT com as 50 primeiras escalas e finalmente as linhas de máximo módulo da CWT.

4.1.2 traço número 150

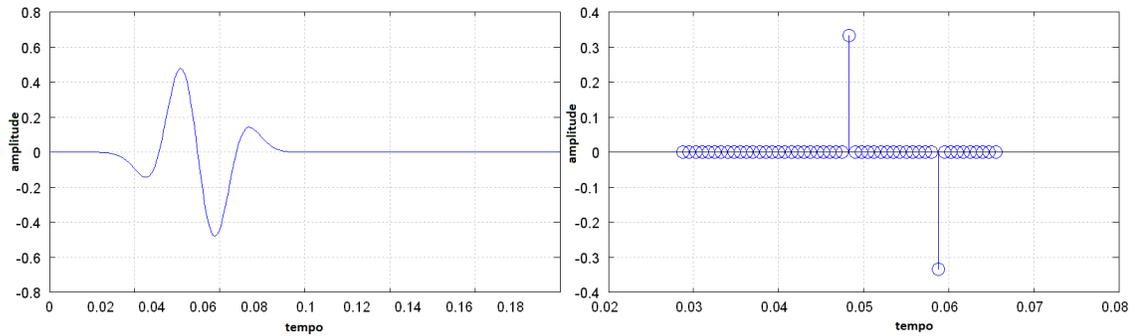


Figura 29: modelo convolucional e perfil de refletividade do traço número 150 (amplitude X tempo)

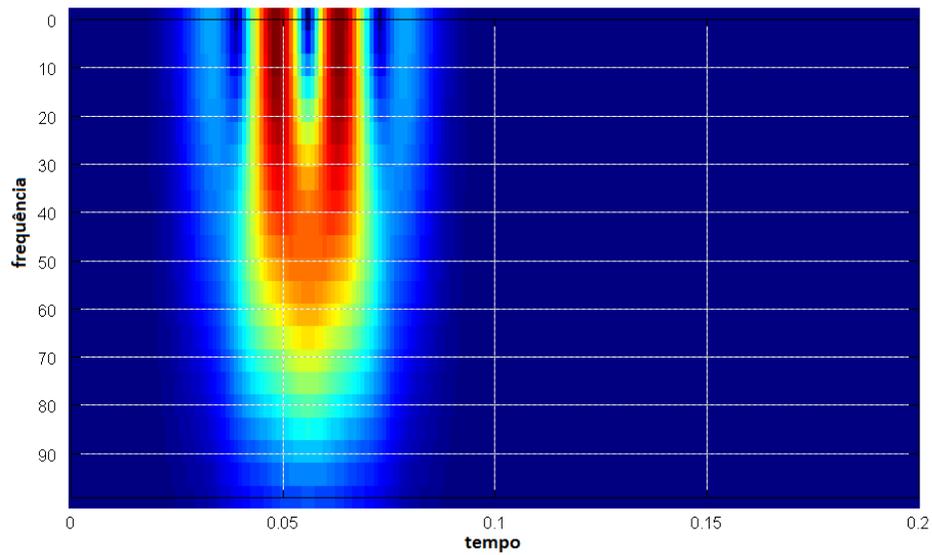


Figura 30: análise tempo frequência do traço 150 com janela de 25 milissegundos (frequência(Hz) X tempo (s))

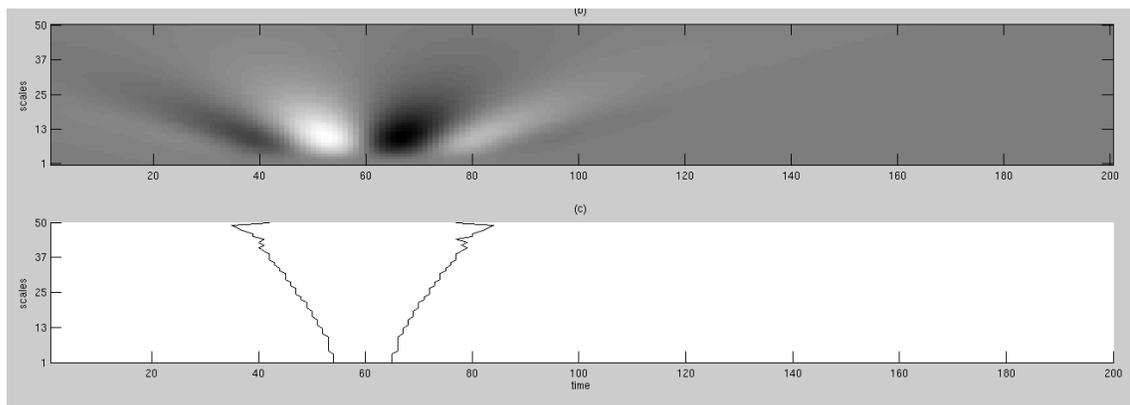


Figura 31: CWT com a respectiva linha de máximo módulo (escala X tempo(ms))

4.1.3 traço número 170

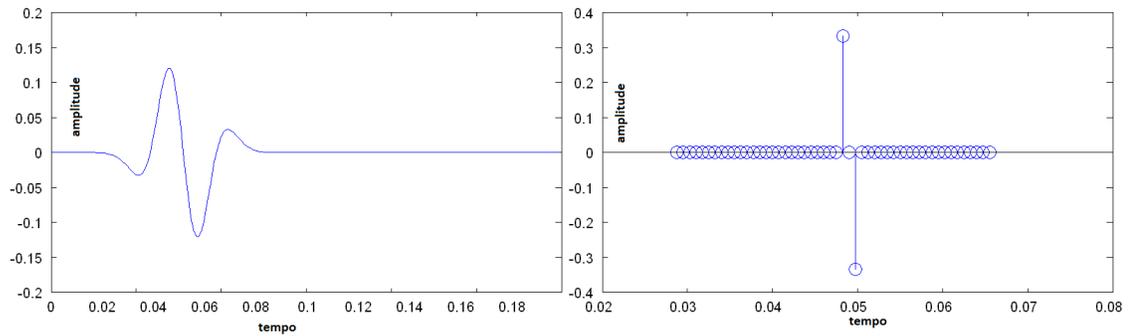


Figura 32: modelo convolucional e perfil de refletividade do traço número 170 (amplitude X tempo (ms))

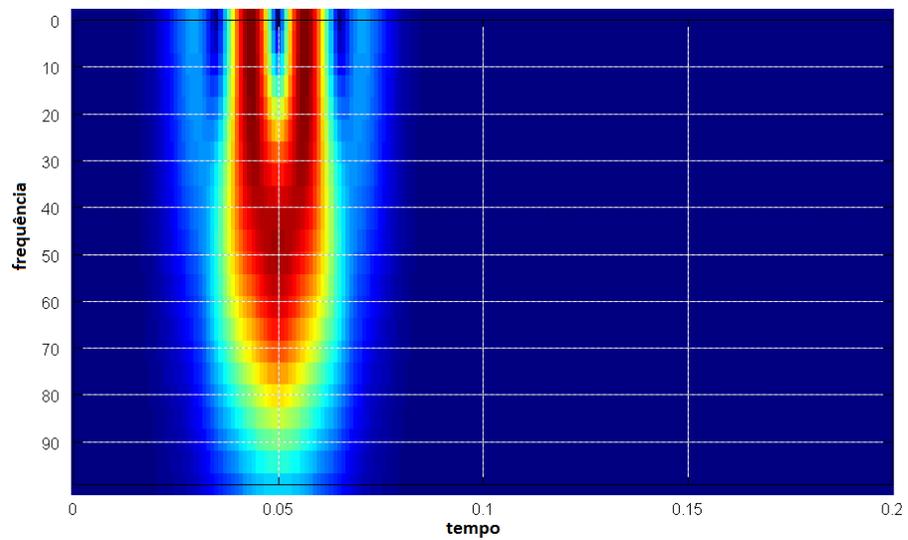


Figura 33: análise tempo frequência do traço 170 com janela de 25 milissegundos (frequência(Hz) X Tempo (s))

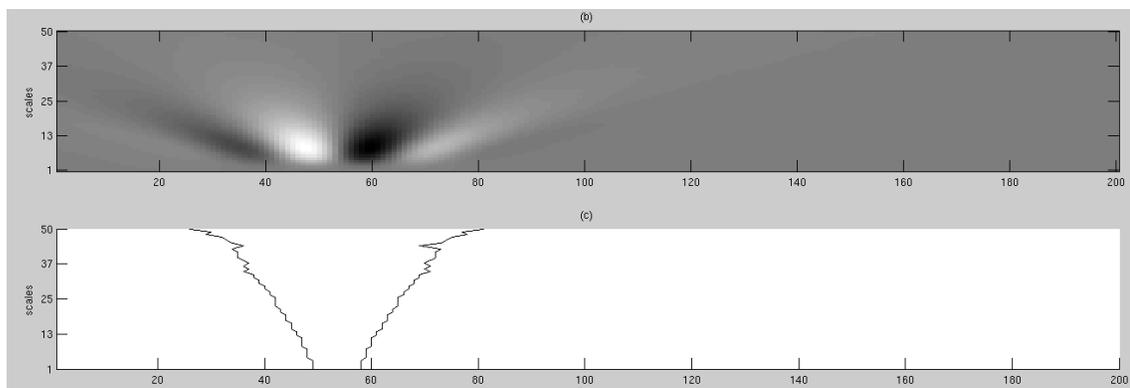


Figura 34: CWT com a respectiva linha de máximo módulo (escala X tempo(ms))

4.1.4 traço número 173

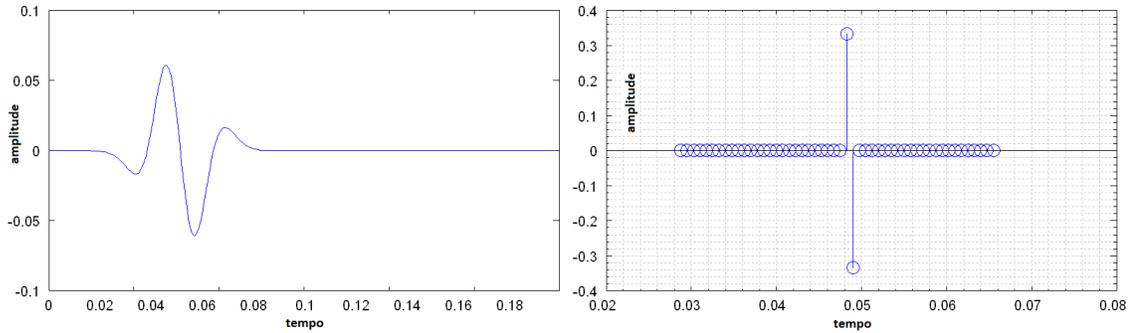


Figura 35: modelo convolucional e perfil de refletividade do traço número 173 (amplitude X tempo(s))

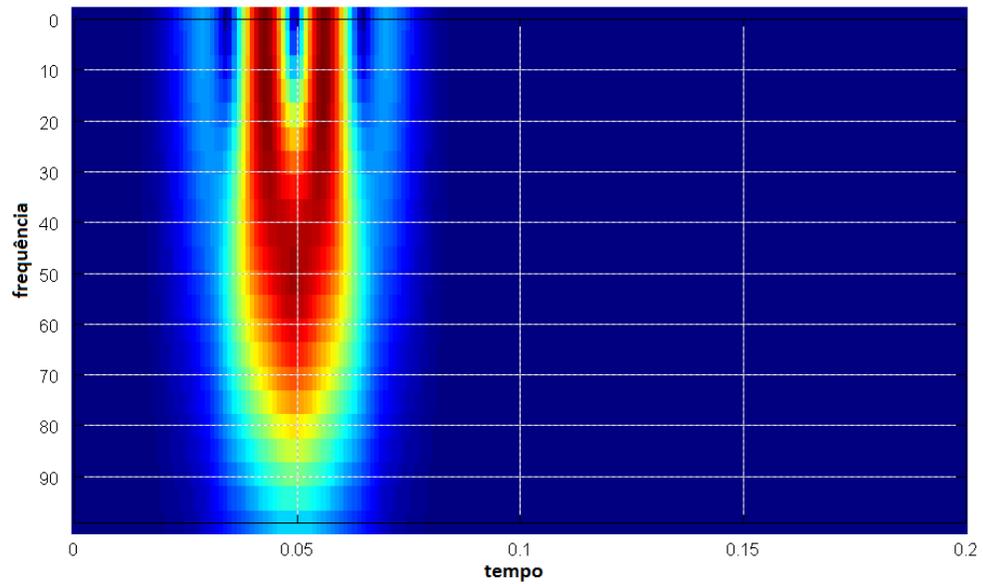


Figura 36: análise tempo frequência do traço 173 com janela de 25 milissegundos (frequência(Hz) X tempo(s))

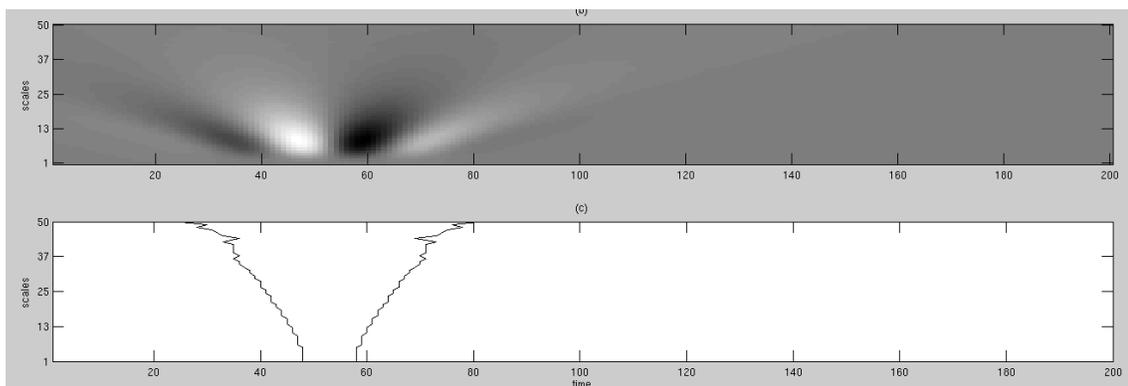


Figura 37: CWT com a respectiva linha de máximo módulo (escala X tempo(ms))

A tabela a seguir é o resultado da comparação entre os dois métodos. Na coluna referente a STFT os valores obtidos através de uma análise visual da transformada, enquanto que a CWT foi utilizado um *script* para a obtenção dos valores. Observa-se que para os traços analisados a STFT não consegue caracterizar separações menores do que 19ms enquanto que utilizando a CWT é possível caracterizar separações de até 10ms, o que mostra a melhor capacidade do método em caracterizar reservatórios delgados.

traço	modelo (ms)	STFT (ms)	CWT (ms)
150	13	19	13
151	13	19	13
152	13	19	12
153	12	19	12
154	12	19	12
155	11	19	11
156	10	19	10
157	10	19	10
158	9	19	10
159	9	19	10
160	8	19	10
161	8	19	10
162	7	19	10
163	6	19	10
164	6	19	10
165	5	19	10
166	4	19	10
167	4	19	10
168	4	19	10
169	3	19	10
170	2	19	10
171	2	19	10
172	1	19	10
173	1	19	10

Figura 38: tabela com a separação dos eventos segundo o modelo de velocidade, a STFT e a CWT para os traços com menor separação dos eventos

CONCLUSÃO

O presente trabalho utilizou-se de um modelo sintético que simula depósitos turbidíticos e analisou a eficácia de dois métodos distintos para estimar a separação das litofácies

A STFT mostrou que é possível delimitar contatos até uma certa resolução. Porém quando a cunha é muito próxima, fica difícil caracterizar o reservatório. No modelo utilizado a resolução máxima alcançada foi de 19ms. Isto muitas vezes não é suficiente para delimitar reservatórios delgados.

Utilizou-se posteriormente a CWT que devido as suas características conseguiu delimitar separações de 10ms. Mostrando assim que ela é mais eficiente do que a STFT para caracterização destes reservatórios.

Para trabalhos futuros propõe-se a avaliação do método em modelos com diferentes níveis de ruído, assim como com diferentes *wavelets*

Referências

Butko, E. 1968. Física Matemática, St John University, New York

Castro de Matos, M. 2004. Reconhecimento de Padrões Sísmicos Utilizando Análises Tempo-Frequência , Tese de Doutorado – PUC, Rio de Janeiro.

Cohen, L.1995. Time-frequency analysis: Prentice-Hall PTR.

Dias, J.A. 2004. Correntes Turbidíticas. Disponível em: <http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks/Turbiditos.pdf>. Acesso em: 05/04/2010

Gregory, A. P.2001. Seismic Thickness Estimation: Three Approaches, Pros and Cons,BP.

Ribeiro, H.2001. Estratigrafia de Sequências – fundamentos e aplicações. São Leopoldo, Editora. Unisinos. Cap 2, 3 e 4

Santos R.A.2000. Adaptive visualization of deepwater turbidite systems in Campos Basin using 3-D seismic, The leading Edge.

Suguio, K.2003. Geologia Sedimentar. Editora Edgard Blücher, São Paulo. Cap 3 e 4.

Telford, W.M. 2004. Applied Geophysics – Second edition, Cambridge University Press. Cap 4

Yilmaz, O.1987. Seismic Data Processing, Society of Exploration Geophysicists-SEG, Tulsa. Cap 1,2 e 3.