

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE MATEMÁTICA, ESTATÍSTICA E COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA

PROJETO SUPERVISIONADO

MEDIDAS DE COERÊNCIA

Orientador: Prof. Dr. Lúcio Tunes dos Santos

Aluna: Cristina Teruko Ota

Campinas, 2013

1 Introdução

Na exploração sísmica procura-se, a partir dos eventos de reflexão, deduzir informações sobre o comportamento das rochas e como estas estão dispostas na subsuperfície, a partir da observação dos tempos de trânsito das ondas sísmicas, além das variações na amplitude, frequência e forma de onda.

Um importante passo no processo de empilhamento é encontrar curvas ou superfícies que melhor se ajustam ao tempo de trânsito da reflexão. De maior importância temos a determinação mais precisa dos parâmetros que definem a curva ou superfície com melhor ajuste, uma vez que estas transmitem informações mais relevantes a serem extraídas dos dados sísmicos. Com a presença de ruídos, esta tarefa pode se tornar muito difícil.

No processo de Análise de Velocidades (VELAN) através do método CMP (do inglês “Common Midpoint”), para cada evento selecionado, a correspondente velocidade é estimada através de um processo de ajuste dos tempos de trânsito a uma certa curva hiperbólica. Dessa maneira, é necessária uma medida para decidir se uma certa curva se ajusta aos tempos de trânsito. Uma possibilidade para tal medida é o grau de alinhamento ou coerência dos traços sísmicos ao longo da curva a ser ajustada, sendo então estudadas duas medidas quantitativas de coerência, a *semblance* e a *varimax*.

Com isso foi estudada a função *semblance*, fazendo-se a comparação da *semblance* de ordem 2, mais comum, e a de ordem mais elevada, de ordem 4. Nesta comparação foi observada que a função de ordem mais elevada apresentava maior valor de coerência, mesmo com o aumento de ruído nos dados sísmicos.

O mesmo ocorre com a comparação entre a função *semblance* e a medida *varimax* local, em que a primeira apresenta valor de coerência mais elevado em relação ao segundo.

2 Função semblance

Como medida de coerência, a função *semblance* é a mais utilizada para dados de cobertura múltipla ou com ruídos, pois estabelece um critério para identificar os modelos corretos, ou mais próximos do real. Esta função caracteriza-se por ajustar uma hipérbole definida pela equação do tempo de trânsito, no caso deste estudo na configuração CMP, nos eventos de reflexões. Fisicamente a função *semblance* mede a relação entre a energia do sinal resultante do empilhamento com respeito à energia total antes do empilhamento.

Para traços vizinhos ao ponto ξ_0 onde queremos simular o traço de afastamento nulo, podemos considerar que a amplitude do evento considerado é praticamente constante. Podemos denotar as amostras sobre a hipérbole que descreve o tempo de trânsito de uma seção sísmica por $u_i = u(h_i, T(h_i))$, em que $i = 1, 2, \dots, N$, com N sendo o número de traços e h_i e $T(h_i)$ representam, respectivamente, os traços (meio afastamento entre fonte e receptor) e os tempos de trânsito, determinados por

$$T^2(h) \approx T_0^2 + \frac{4h^2}{v^2}. \quad (1)$$

Tomando como referência o vetor $e = (1, 1, \dots, 1)$, uma boa medida para saber se a função que aproximamos está próxima da verdadeira é verificando se o ângulo entre esse

vetor e o vetor u_i está próximo de zero, com

$$\cos\theta = \frac{\sum_{i=1}^N 1 \cdot u_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N 1^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2}} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{\sqrt{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2}}, \quad (2)$$

em que N é o número de traços da seção CMP.

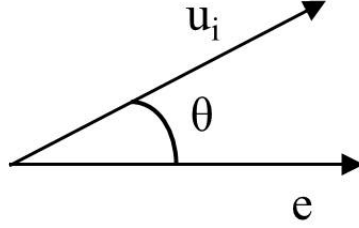


Figura 1: Ângulo entre os vetores \mathbf{u}_i e \mathbf{e}

2.1 Semblance de ordem 2

Matematicamente a função semblance de ordem 2 é definida pelo quadrado da equação (2), considerando-se eventuais erros na seleção do local de interesse

$$S = \frac{\left(\sum_{i=1}^N u_i\right)^2}{N \sum_{i=1}^N u_i^2}. \quad (3)$$

Pode-se também considerar o empilhamento para várias amostras de tempo (índice k) em dada janela de tempo de tamanho $2\omega+1$, o qual deve estar relacionado ao comprimento do sinal da onda do evento. O somatório aumenta a razão sinal-ruído do empilhamento. Podemos reformular a função *semblance* de ordem 2 como

$$S_2 = \frac{\sum_{k=-\omega}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^N u(h_i, T(h_i) + k\Delta t)\right)^2}{\sum_{k=-\omega}^{\omega} N \sum_{i=1}^N u^2(h_i, T(h_i) + k\Delta t)}, \quad (4)$$

onde k representa a discretização da janela ao redor de $T(h_i)$.

Essa janela (ω) pode ser observada na Figura 2.

Podemos notar que a Semblance está normalizada com respeito ao número de canais N , com $0 \leq S \leq 1$. Logo, pela equação (2) quanto maior o seu valor, maior é a coerência dos tempos aproximados em relação aos valores reais.

Nos casos em que os tempos calculados coincidem com os tempos de chegada das reflexões das ondas sísmicas, temos que a coerência entre os registros é máxima, pois não

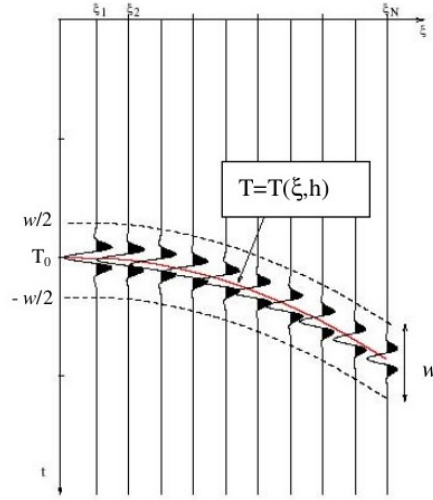


Figura 2: Princípio da função Semblance

há defasagem do sinal sísmico e, portanto, o modelo utilizado é representativo do modelo real.

Podemos descrever a relação entre *semblance* local S_2 e quantidades estatísticas considerando-se o momento de ordem m , μ_m , definido por

$$\mu_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

O momento de primeira ordem μ_1 é a média. Com isso, a *semblance* local S_2 da equação (3) pode ser reformulado como

$$S_2 = \frac{\mu_1^2}{\mu_2}. \quad (6)$$

Para uma generalização da *semblance* local em quantidades de ordens mais elevadas, introduzimos o momento central de ordem m

$$\sigma_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \mu_1)^m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

em que σ_2 é a variância, que pode ser reescrita como

$$\sigma_2 = \mu_2 - \mu_1^2. \quad (8)$$

As quantidades de σ_m medem diferentes atributos de dispersão sobre a média. A variância traz informações sobre a concentração da amostra em algum intervalo ao redor da média. Um valor alto indica distribuição dispersa. Valores baixos significam que os dados estão agrupados perto da média.

A *semblance* local S_2 também pode ser relacionada com os momentos de segunda ordem pela relação

$$\sigma_2 = \mu_2 - \mu_1^2 = \mu_2 \left(1 - \frac{\mu_1^2}{\mu_2}\right) = \mu_2(1 - S_2) \quad \text{ou}$$

$$S_2 = 1 - \frac{\sigma_2}{\mu_2}.$$

2.2 Função semblance de ordem 4

A função *semblance* de ordem 4, em comparação com a de ordem 2 (convencional), é menos dependente no comprimento da janela e no nível de ruído, resultando em estimativas mais confiáveis da inclinação local mais frequente que quando utilizada a função *semblance* convencional.

Analogamente à *semblance* de ordem 2, temos que a generalização da *semblance* local de ordem par é dado por

$$S_m = 1 - \frac{\sigma_m}{\mu_m}. \quad (9)$$

Logo, temos que a medida de coerência de ordem 4 é dada por

$$S_4 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (u_i - \mu_1)^4}{\sum_{i=1}^N u_i^4} \quad \text{ou} \quad (10)$$

$$S_4 = 1 - \frac{\sum_{k=-\omega}^{\omega} \sum_{i=1}^N (u(h_i, T(h_i) + k) - \mu_1)^4}{\sum_{k=-\omega}^{\omega} \sum_{i=1}^N (u(h_i, T(h_i) + k\Delta t))^4}. \quad (11)$$

3 Função *varimax*

Uma outra medida de detectar a velocidade espacial variável necessária para o realce de diferentes eventos é a norma da *varimax*, definida como

$$\phi = \frac{N \sum_{i=1}^N s_i^4}{\left(\sum_{i=1}^N s_i^2\right)^2}, \quad (12)$$

em que s_i são as amplitudes do sinal sísmico dentro de uma janela de tamanho N .

Ao invés de trabalhar com janelas de dado, foi focado no atributo de variável contínua utilizando a técnica de atributos locais. Notando que o coeficiente de correlação de duas

séries a_i e b_i é definido como

$$c[a, b] = \frac{\sum_{i=1}^N a_i b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N a_i^2 \sum_{i=1}^N b_i^2}} \quad (13)$$

e a correlação de a_i com a constante unitária é

$$c[a, 1] = \frac{\sum_{i=1}^N a_i}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N a_i^2}}. \quad (14)$$

Podemos interpretar a medida *varimax* na função (12) como o inverso do quadrado do coeficiente da correlação entre s_i^2 e a constante 1, ou seja, $\phi = 1/(c[s^2, 1])^2$. Sinais bem ajustados tem baixa correlação com uma constante e correspondentemente alta *varimax*.

O quadrado do coeficiente de correlação pode ser representado como o produto de duas quantidades $c[s^2, 1] = pq$, em que

$$p = \frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{N}, \quad q = \frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{\sum_{i=1}^N s_i^4}. \quad (15)$$

Além disso, p é a solução do problema de minimização de quadrados mínimos

$$\min_p \sum_{i=1}^N (s_i^2 - p)^2 \quad (16)$$

e q é a solução da minimização dos quadrados mínimos

$$\min_q \sum_{i=1}^N (1 - qs_i^2)^2. \quad (17)$$

Isto nos permite definir um atributo de variável contínua ϕ_i utilizando quantidades de variáveis contínuas p_i e q_i , as quais são definidas como soluções dos problemas de otimização regularizadas

$$\min_{p_i} \left(\sum_{i=1}^N (s_i^2 - p)^2 + R[p_i] \right), \quad (18)$$

$$\min_{q_i} \left(\sum_{i=1}^N (1 - qs_i^2)^2 + R[q_i] \right), \quad (19)$$

em que R é o operador de regularização designado a evitar soluções triviais forçando um comportamento desejado, tal como suavização, e N se refere ao número total de pontos de amostragem.

Como as quantidades p e q são soluções de problema de minimização, então $\phi = 1/(pq)^2$ se torna solução de problema de maximização. Podemos observar pela Figura 3 que pela função *varimax* da forma como foi apresentada não há como encontrarmos facilmente os picos das medidas de coerência em certos intervalos de tempo. Para isso é considerado o sinal de s_i no termo quadrático, ficando

$$\tilde{\phi} = \frac{\left(\sum \text{senal}(s_i) \cdot s_i^2\right)^2}{N \sum s_i^4}. \quad (20)$$

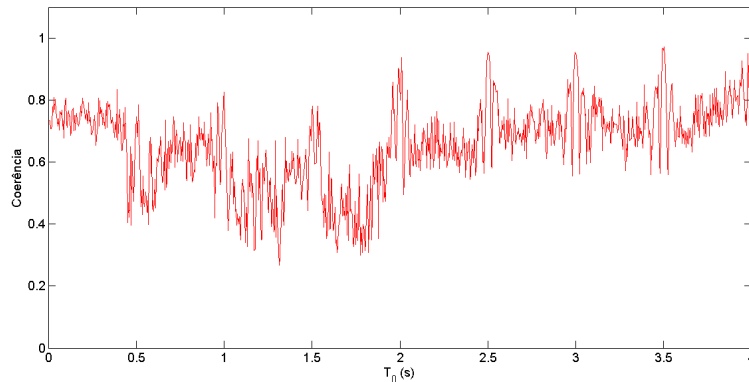


Figura 3: Representação da função *varimax*

4 Implementação computacional

4.1 Comparação da *semblance* de ordem 2 e de ordem 4

Nesta seção foi implementado um programa para compararmos as funções *semblance* de ordem 2 e de ordem 4, com a finalidade de estudar as vantagens e desvantagens na utilização de cada uma.

Para isso, foi utilizado um dado sintético, gerado pelo programa GêBR (Biloti, 2012), de camadas estratificadas com refletores horizontais e velocidades constantes.

Em um gráfico foram plotados a seção sísmica e em outro os maiores valores da *semblance* obtidos em todos os tempos iniciais.

Seção sísmica sem adição de ruído

Sem a adição de ruído, utilizando a função *semblance* de ordem 2 e 4, sem uso de janela temporal, temos a seção sísmica na Figura 4 e o comportamento mostrado na Figura 5.

Sem a adição de ruído, utilizando a função *semblance* de ordem 2 e 4, com janela temporal de comprimento 11, temos o comportamento mostrado na Figura 6.

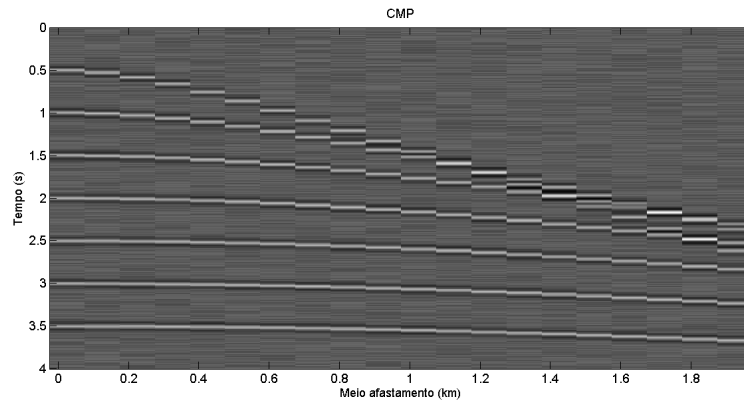


Figura 4: Dado sísmico sem adição de ruído

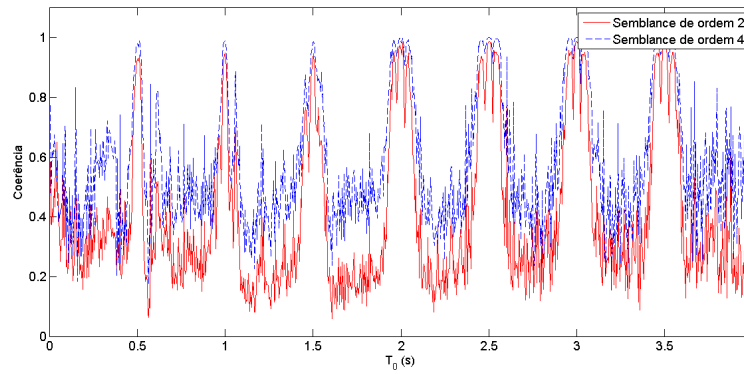


Figura 5: Valores de coerência sem adição de ruído

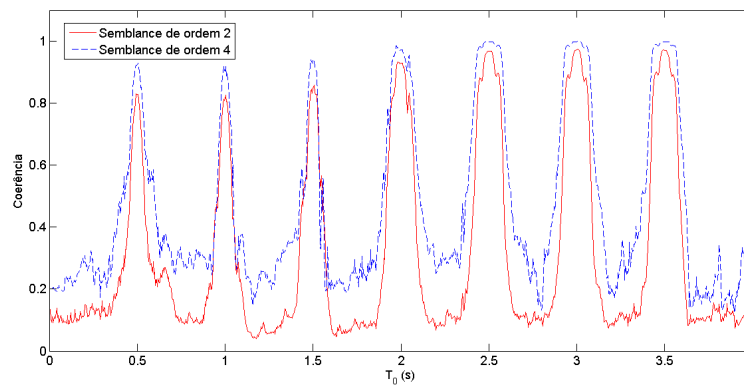


Figura 6: Valores de coerência sem adição de ruído, com janela temporal de comprimento 11

Seção sísmica com adição de 15% de ruído

Com a adição de 15% de ruído, utilizando a função *semblance* de ordem 2 e 4, temos o comportamento mostrado na Figura 7.

Com a adição de 15% de ruído, utilizando a função *semblance* de ordem 2 e 4, com

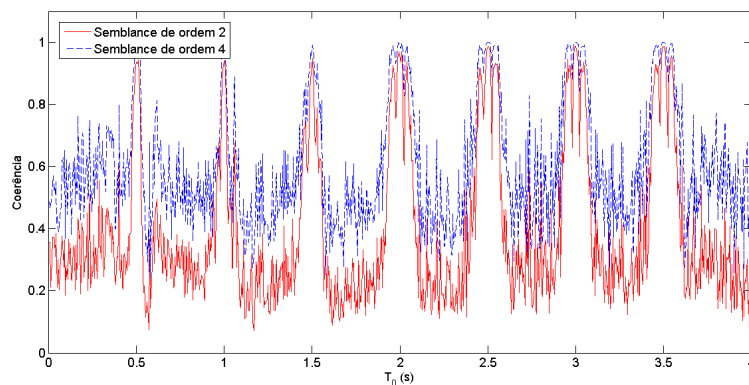


Figura 7: Valores de coerência com adição de 15% de ruído

janela temporal de comprimento 11, temos o comportamento mostrado na Figura 8.

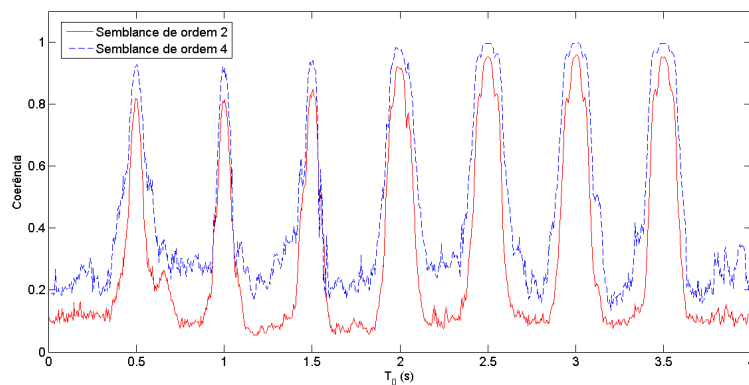


Figura 8: Valores de coerência com adição de 15% de ruído, com janela temporal de comprimento 11

Através desses gráficos apresentados nesta subseção, podemos observar que os valores de coerência da *semblance* de ordem 4 são mais elevadas em relação aos de ordem 2, tanto com o aumento do ruído quanto com o aumento de janelas temporais. Além disso, com o aumento de janelas temporais, percebemos uma maior amenização dos valores de coerência nos tempos iniciais distintos aqueles que possuem os picos de coerência.

Como comparação das velocidades obtidas a partir da *semblance* de ordem 2 e de ordem 4, temos a Figura 9.

Neste caso podemos observar que as velocidades NMO obtidas pelas duas funções são idênticas e bastante próximas do esperado. As velocidades intervalares, como consequência, são idênticas também.

4.2 Comparação da *semblance* de ordem 4 com a *varimax*

Pelos resultados apresentados anteriormente, pela comparação da *semblance* de ordem 2 e de ordem 4, faremos a comparação da *semblance* de ordem 4, que apresentou maiores valores de coerência em todos os casos, pela *varimax*.

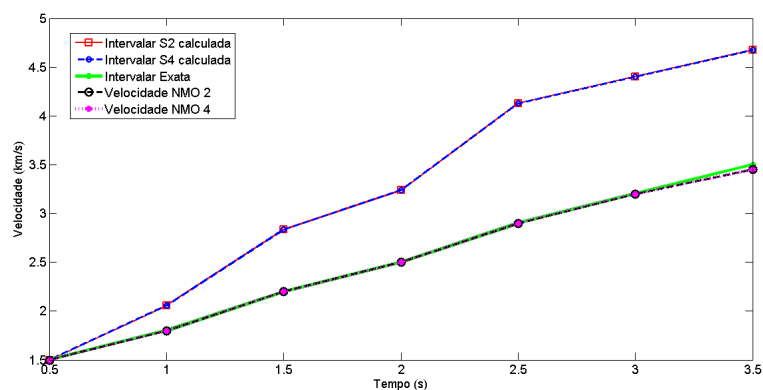


Figura 9: Comparação das velocidades das funções *semblance* de ordem 2 e de ordem 4

Como na subseção anterior, para verificarmos o comportamento da função *varimax*, foi utilizado um dado sintético de camadas estratificadas com refletores horizontais e velocidades intervalares constantes, apresentado na Figura 4.

Da fórmula (20) temos o comportamento apresentado na Figura 10, que apresenta comportamento mais parecido com a *semblance*, com valores de coerência entre 0 e 1, além de podermos identificar os picos das medidas de coerência a partir da função *varimax*.

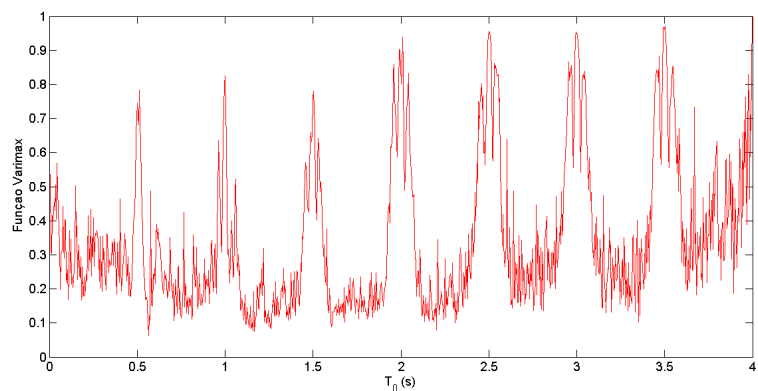


Figura 10: Representação da função *varimax* modificada

Para a comparação dos valores de coerência das funções *semblance* e *varimax*, temos a Figura 11, onde podemos observar que o valor de coerência da *semblance* de ordem 4 é mais elevada em relação ao valor de coerência da *varimax*.

Como comparação das velocidades obtidas a partir da *semblance* e da *varimax*, temos a Figura 12.

A partir das velocidades intervalares obtidas, foi observado que a *semblance* apresentou valores mais próximos ao esperado.

5 Considerações Finais

Com o auxílio dos gráficos de coerência, podemos analisar que os valores da *semblance* de ordem 4 são mais elevados quando comparados aos de ordem 2.

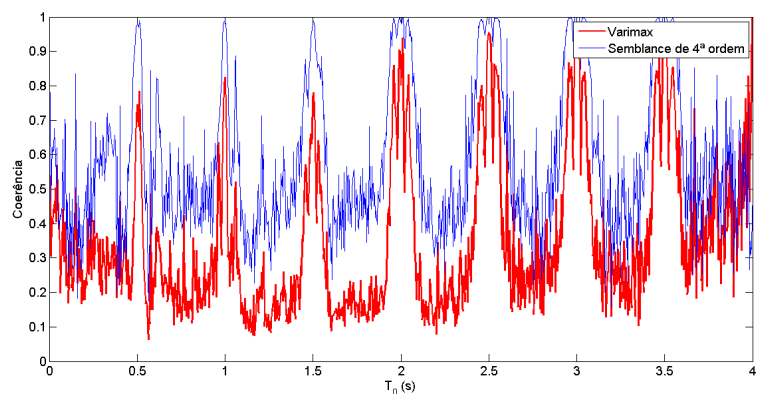


Figura 11: Comparação das funções *varimax* modificada e *semblance*

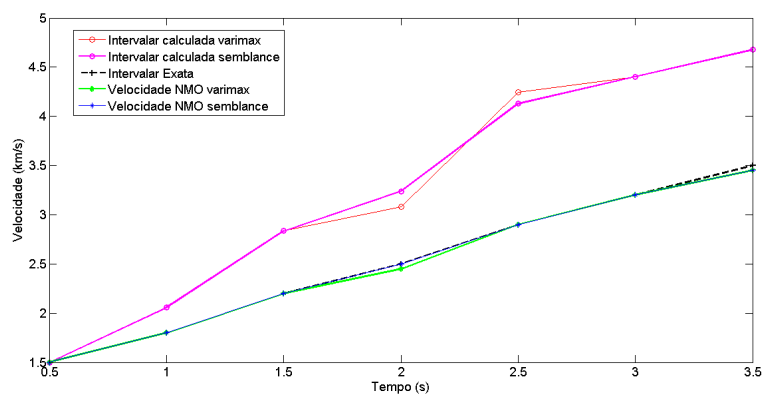


Figura 12: Comparação das velocidades das funções *varimax* modificada e *semblance*

Ao aumentar a quantidade de janela temporal, foi observado que os valores da *semblance*, tanto de ordem 2 quanto de ordem 4 em tempos distintos dos “picos” foram amenizados, resultando em uma acentuação dos tempos com maiores valores de coerência.

Com o aumento do ruído e da janela temporal foi possível perceber pelos gráficos que os valores de coerência diminuem e os valores da *semblance* de ordem 4 continuam sendo maiores em comparação aos de ordem 2, o que demonstra que a *semblance* de ordem 4 é menos dependente ao nível de ruído e à abertura da janela temporal.

A medida de coerência utilizando a *varimax* mostra qual velocidade melhor converge na subsuperfície, assim como com a *semblance*. Pela análise feita pode ser observado que o uso da *varimax* apresenta velocidades NMO bastante próximas das obtidas pela *semblance*. No entanto, temos que os valores de medida de coerência da *semblance* de ordem 4 são mais elevados em relação aos da *varimax*.

6 Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Lúcio Santos pela oportunidade de estudo sobre a área de geofísica e pelo ensino.

Ao CnPq pelo fomento.

Referências

- [1] S. FOMEL, L. LANDA, and M.T. TANER. Poststack velocity analysis by separation and imaging of seismic diffractions. *Geophysics*, 72(6):U89–U94, 2007.
- [2] E. LIMA, L.T. SANTOS, J. SCHLEICHER, and M. TYGEL. A comparison of semblances of different order in common-reflection-surface parameter estimation. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2011.
- [3] R.T. NEWRICK and L.R. LINES. *Fundamentals of Geophysical Interpretation*. SEG, 2004.
- [4] R.S. NUNES. *Obtenção de modelo de velocidades pelo método CRS*. Dissertação de Mestrado, FEM-IG/UNICAMP, 2005.