

Caracterização de Reservatórios Fraturados Através de Dados de Ondas qP em Levantamentos VSP Walkaway

Saulo da Costa e Silva¹ (UFPA), Ellen de Nazaré Souza Gomes² (UFPA), Ivan Pšenčík, (Charles University, República Tcheca)

¹ saulocpp@gmail.com

² ellensg@ufpa.br

Apresentamos um método para determinar orientação de fratura através da estimativa dos parâmetros WA (fracamente anisotrópicos, que descrevem as propriedades elásticas de um meio), com dados de polarização e vagarosidade medidos em experiências de VSP Walkaway. A metodologia mostra a relação entre os parâmetros elásticos, A_{ij} , e os parâmetros WA para estimar o mergulho do meio, e conseqüentemente, o mergulho da fratura. As simulações numéricas foram realizadas em meios sintéticos com anisotropia fraca e moderada, onde a propagação de onda da fonte para o sensor, feita com traçamento de raio, fornece os dados de polarização e vagarosidade necessários para a inversão linear estimar a rotação do meio. As tabelas mostram como as estimativas se comportaram quando diferentes níveis de ruído foram aplicados aos meios, e as figuras ilustram os desvios entre as informações sintéticas e observadas.

1 Introdução

O trabalho tem como objetivo estimar a orientação de fratura de um meio TI fracamente anisotrópico. Para tanto, são utilizados dados de polarização e vagarosidade de ondas qP em levantamentos VSP walkaway.

Estudos mostram que meios que possuem fraturas paralelas em regime quase estático apresentam comportamento efetivamente anisotrópico (Hudson, 1982, Schoenberg & Sayers, 1995). Aliado às novas técnicas de aquisição de dados em 3-C (três componentes), modelos que incorporam anisotropia têm sido empregados em experimentos de VSP walkaway, onde utiliza-se as medidas de polarização e vagarosidade para a caracterização de reservatórios fraturados (Horne & Leaney, 2000).

Como os reservatórios de hidrocarbonetos são, em geral, encontrados em meios naturalmente fraturados, a orientação das fraturas determina a direção preferencial de permeabilidade do reservatório, isto é, os hidrocarbonetos tendem a escoar para as áreas de menor pressão. Sendo assim, o estudo desses meios é de grande interesse na prospecção sísmica.

2 Metodologia

Zheng & Pšenčík (2002) apresentaram uma relação linear entre a polarização, vagarosidade e os parâmetros fracamente anisotrópicos (parâmetros WA, weak anisotropy, que estão relacionados com os parâmetros elásticos, A_{ij} , do meio), e uma estimativa da anisotropia em torno do geofone. Entretanto, no caso da forma linearizada para os dados de VSP walkaway de uma onda qS, existem ainda alguns problemas a serem resolvidos no que se refere à escolha do vetor frente de onda S no meio de referência. Isso se deve ao fato de modelos interpretativos que admitem anisotropia apresentam expressões analíticas da polarização e vagarosidade, que dependem de forma não linear dos parâmetros elásticos do meio, o que torna a análise destas expressões bastante complexa e, devido a esta dificuldade, faz-se necessária a utilização de formas linearizadas.

O vetor de polarização, g_i , e a componente vertical do vetor de vagarosidade, p_z , de uma onda qP gerada em experimentos de VSP walkaway estão relacionados com os parâmetros fracamente anisotrópicos (WA) de um meio anisotrópico arbitrário através da equação:

$$(\alpha^2 - \beta^2)^{-1} B_{13} \epsilon |n_1| - \frac{1}{2} \alpha^{-1} B_{33} \epsilon n_3 = |n_1| g_i e_i^{(1)} + \alpha \Delta \eta \quad (1)$$

Temos que: α e β são as velocidades das ondas P e S no meio de referência; $\Delta \eta$ é a diferença entre a componente vertical do vetor de vagarosidade da onda qP no meio fracamente anisotrópico e a componente vertical do vetor de vagarosidade no meio isotrópico, de forma que $\Delta \eta = s_i^z - s_i^{z(iso)}$, e $s_i^{z(iso)} = \frac{n_3}{\alpha}$; n_i é o vetor unitário normal à frente de onda P no meio de referência; $e_i^{(1)}$ é um vetor unitário perpendicular a n_i . Tanto n_i quanto $e_i^{(1)}$ estão situados em um plano contendo o poço e as fontes.

As quantidades $B_{1n}(\epsilon)$ são elementos da matriz de fraca anisotropia que depende linearmente dos parâmetros WA e dos parâmetros do meio de referência (α, β, n_i).

Para um experimento de VSP walkaway em um único perfil, $B_{1n}(\epsilon)$ depende somente de cinco parâmetros WA:

$$\epsilon_x = \frac{A_{11} - \alpha^2}{2\alpha^2}, \quad \epsilon_z = \frac{A_{33} - \alpha^2}{2\alpha^2}, \quad \delta_x = \frac{A_{13} + 2A_{55} - \alpha^2}{\alpha^2}, \quad \epsilon_{15} = \frac{A_{15}}{\alpha^2}, \quad \epsilon_{35} = \frac{A_{35}}{\alpha^2} \quad (2)$$

Os parâmetros WA foram estimados através dos dados de polarização e vagarosidade a partir da minimização da função Ψ :

$$\Psi = \sum_{i=1}^{Nobs} (Y_i - M_{ij}m_j)^2 \quad (3)$$

Sendo que $M_{ij}m_j = Y_i$. Tem-se: a matriz M_{ij} é dada pelo lado esquerdo da equação (1) a menos dos parâmetros WA; Y_i é o vetor das observações, dado pelo lado direito da equação (1) com o vetor de parâmetros m_j organizado na forma $m_1 = \epsilon_x, m_2 = \epsilon_z, m_3 = \delta_x, m_4 = \epsilon_{15}, m_5 = \epsilon_{35}$; o subscrito i está relacionado ao número de parâmetros e, j , ao número de observações.

Para determinar a equação (3) é necessário conhecer os parâmetros do meio de referência. Gomes (2003) mostra as formas para se obter tais parâmetros. Neste trabalho, α é estimado a partir das componentes verticais dos vetores de polarização e vagarosidade, β , pela relação de Poisson e, n_i , escolhido paralelo ao vetor de polarização (p_i) do meio anisotrópico.

Essa aproximação é razoável considerando-se meios fracamente anisotrópicos. Estimados os parâmetros WA, os parâmetros elásticos A_{ij} são determinados através das relações em (2). Para caracterização da fratura, pressupõe-se que:

Um conjunto de fraturas orientado é representado efetivamente por um meio transversalmente isotrópico (TI), esse problema consiste então em estimar a orientação do eixo de simetria.

Se o eixo de simetria não está alinhado com um dos eixos coordenados, então o plano de simetria que contém o referido eixo de simetria forma um ângulo com o eixo x_1 . Esse ângulo pode ser determinado através da relação:

$$\tan 2\phi = \frac{2(A_{16} + A_{26})}{A_{22} - A_{11}} \quad (4)$$

Rotacionando o eixo de simetria com o eixo x_1 , o ângulo de mergulho é determinado pela relação:

$$\tan 2\theta = \frac{2(A_{15} + A_{35})}{A_{11} - A_{33}} \quad (5)$$

É possível afirmar que existe ambigüidade nas relações (4) e (5), já que 2ϕ e $2\phi + \pi$ possuem valor numérico igual, assim como 2θ e $2\theta + \pi$. Essas ambigüidades podem ser removidas se informação geológica *a priori* for adicionada ao processo de inversão, ou, se na estimativa dos parâmetros WA forem utilizados dados de VSP walkaway multiazimutal.

3 Simulações Numéricas

Os testes foram feitos em dois meios sintéticos, um com anisotropia fraca e outro com anisotropia moderada, girados de 30° e 60°, com azimute igual a zero, já que a simulação é para apenas 1 perfil. A geometria do levantamento é a seguinte: tem-se 250 fontes espalhadas no perfil; a distância entre as fontes é de 50m, com a primeira localizada na posição -6,14km e a última, em 6,36km, totalizando uma cobertura de 12,5km; o poço está na origem do sistema, com 1 geofone situado a 3,212km de profundidade nesse poço.

As observações foram obtidas através do programa de traçamento de raio ANRAY, sendo contaminadas com ruído Gaussiano no parâmetro $\alpha\Delta\eta$ no programa de inversão, com desvio padrão de 10%, 20% e 30% da maior observação. Utilizamos ondas do tipo *down* (diretas) e *up + down* (refletidas e diretas). Para os testes, iremos nos referir ao modelo de anisotropia fraca como Modelo 1, enquanto que o de anisotropia moderada será Modelo 2.

Ao fim, as tabelas mostram as médias das estimativas do mergulho e suas respectivas variações em cada meio, com os dois mergulhos e nos diferentes níveis de ruído. Os resultados dos testes com ondas diretas e refletidas estão ao

lado dos resultados para apenas ondas diretas, a fim de se observar mais facilmente a influência das ondas refletidas nas estimativas. As figuras mostram o ajuste do parâmetro $\alpha\Delta\eta$ calculado a partir dos dados de vagarosidade e polarização dos meios sintéticos contaminados com ruído.

4 Conclusão

As informações obtidas das ondas Up diminuem a oscilação na estimativa do ângulo de mergulho em todos os casos, especialmente quando a experiência é contaminada com níveis maiores de ruído (20% e 30%).

O modelo de fraca anisotropia teve comportamento bastante sensível a ruído, principalmente com 30%, onde a oscilação chegou a 19° no meio mergulhado de 60° (ver Tabela 1). Entretanto, considerando as observações de ondas refletidas, a oscilação diminuiu consideravelmente. Observando a Tabela 1 novamente, considerando o mergulho de 30°, tem-se um erro de +17,7% na estimativa do mergulho em relação ao valor exato, variando 4,8° com ruído de 10%, enquanto que a 30% de ruído o erro foi de +24,1% do valor exato, com variação de 13,4°. A Tabela 2 mostra a contribuição das ondas refletidas nas estimativas: o erro na estimativa do mergulho foi de +18,3% com variação de 3,6° a 10% de ruído, enquanto que com 30% de ruído o erro foi de +20,8%, variando 9,9°. De fato, o uso de dados conjuntos de ondas diretas e refletidas resulta em estimativas mais estáveis.

Para o meio com anisotropia moderada, os resultados são razoáveis, especialmente com o mergulho de 60°. Nos testes apenas com ondas diretas e com 10% de ruído, o erro na média da estimativa foi de -9,5% do mergulho exato, com variação de 3,3°. No maior nível de ruído, 30%, o erro da estimativa foi de -10,6% do mergulho exato, variando 9,6° (ver Tabela 3). Considerando as informações das ondas refletidas conjuntamente com as diretas (ver Tabela 4), os resultados são mais estáveis: a 10% de ruído, o erro na estimativa do mergulho foi de -8,3% do valor exato, com variação de 2,2°, e aplicando 30% de ruído, o erro na estimativa foi de -8,9% do valor exato, variando 6,3°.

Para os meios com anisotropia moderada vistos em Thomsen (1986), a metodologia apresentou bons resultados, entretanto, o objetivo é recuperar o mergulho em meios fracamente anisotrópicos, sendo assim, as boas estimativas podem não se repetir em outros meios com anisotropia moderada.

É possível ver também a contribuição das ondas refletidas quando utilizadas com as ondas diretas, os resultados são estimativas mais estáveis, com menor oscilação. Em pequenos modelos, o custo computacional para se processar as ondas refletidas é baixo, e os resultados mais do que justificam sua utilização. Para um conjunto maior de dados, toda observação extra deve ser considerada, a fim de se obter melhores estimativas.

Como os experimentos foram feitos em 1 perfil, apenas 5 parâmetros WA podem ser estimados. Para se conseguir uma melhor observação da subsuperfície, isto é, recuperar um número maior de parâmetros para uma estimativa mais precisa, é necessário fazer o levantamento em mais perfis. No caso do presente estudo, levantamentos VSP walkaway multiazimutal. Esse assunto será abordado em trabalhos futuros.

5 Agradecimentos

Agradecemos ao PRH-06 da Universidade Federal do Pará e ao seu coordenador, professor André Andrade, pela concessão da bolsa de estudos ao aluno Saulo da Costa e Silva, mestrando em Geofísica, ao consórcio SW3D e ao projeto GA AV CR nº A3012309 pelo suporte financeiro.

6 Referências Bibliográficas

- GAJEWSKI, D. & PŠENČÍK, I. Vertical seismic profile synthetics by dynamic ray tracing in laterally varying layered anisotropic structures. **J. Geophys. Res.**, v.95, p.11301-11315, 1990.
- GOMES, E. N. S. Estimativa de parâmetros elásticos em meios anisotrópicos. Tese de Doutorado. **Curso de Pós-Graduação em Geofísica**. Universidade Federal do Pará - UFPA, 2003.
- GOMES, E. N. S.; ZHENG, X.; PŠENČÍK, I.; HORNE, S. A.; LEANEY, W. S. Local determination of weak anisotropy parameters from a walkaway VSP qP-wave data in the Java sea region. **Stud. Geophys. Geod.**, v.48, p.215-231, 2004.
- HORNE, S. A. & LEANEY, W. S. Polarization and slowness component inversion for TI anisotropy. **Geophysical Prospecting**, v.48, p.779-788, 2000.

- HUDSON, J. A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. **Geophys. J. R. astr Soc.**, v.64, p.133-150, 1982.
- SCHOENBERG, M. & SAYERS, C. M. Seismic Anisotropy of Fractures. **Geophysics**. Society of Exploration Geophysicists. v.60, p.204-211, 1995.
- THOMSEN, L. Weak elastic anisotropy. **Geophysics**. Society of Exploration Geophysicists. v.51, p.1954-1966, 1986.
- ZHENG, X. & PŠENČÍK, I. Local determination of weak anisotropy parameters from qP-wave slowness and particle motion measurements. **Pure and Applied Geophysics**. v.159, p.1881-1905, 2002.

Fractured Reservoir Characterization Through qP Waves Data Measured in VSP Walkaway Surveys.

We present a method to determine fracture orientation through the estimative of the WA parameters (weak anisotropy, which describes elastic properties of a medium), with polarization and slowness data measured in VSP Walkaway experiences. The methodology shows the relation between the elastic parameters, A_{ij} , and the WA parameters to estimate the medium dip, and consequently, the fracture dip. The numerical simulations were carried out on weakly and moderately anisotropic synthetic media, where the wave propagation from source to sensor, done with ray tracing, yields the polarization and slowness data needed for the linear inversion to estimate the medium rotation. The tables show how the estimatives behaved when different noise levels were applied to these media, and the figures pretty much illustrate the deviations between the synthetic and the observed information.

VSP Walkaway, Weak Anisotropy, Reservatórios Fraturados, Inversão Linear, Meios Transversalmente Isotrópicos.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.

θ (exato)	Ruído	$\tilde{\theta}$ (estimado)	Oscilação
30°	10%	35,318°	4,864°
	20%	36,229°	9,444°
	30%	37,252°	13,428°
60°	10%	65,607°	6,591°
	20%	63,075°	13,694°
	30%	60,342°	19,621°

Tabela 1: Modelo 1, resultados dos testes apenas com ondas down para mergulhos de 30° e 60°.

θ (exato)	Ruído	$\tilde{\theta}$ (estimado)	Oscilação
30°	10%	35,518°	3,615°
	20%	35,837°	6,959°
	30%	36,268°	9,918°
60°	10%	65,540°	5,109°
	20%	64,091°	10,363°
	30%	62,565°	14,764°

Tabela 2: Modelo 1, resultados dos testes com ondas up e down para mergulhos de 30° e 60°.

θ (exato)	Ruído	$\tilde{\theta}$ (estimado)	Oscilação
30°	10%	37,991°	3,094°
	20%	38,359°	6,095°
	30%	38,803°	8,898°
60°	10%	54,352°	3,389°
	20%	54,086°	6,634°
	30%	53,666°	9,634°

Tabela 3: Modelo 2, resultados dos testes apenas com ondas down para mergulhos de 30° e 60°.

θ (exato)	Ruído	$\tilde{\theta}$ (estimado)	Oscilação
30°	10%	38,470°	2,087°
	20%	38,547°	4,128°
	30%	38,653°	6,076°
60°	10%	55,075°	2,128°
	20%	54,925°	4,251°
	30%	54,675°	6,330°

Tabela 4: Modelo 2, resultados dos testes com ondas up e down para mergulhos de 30° e 60°.

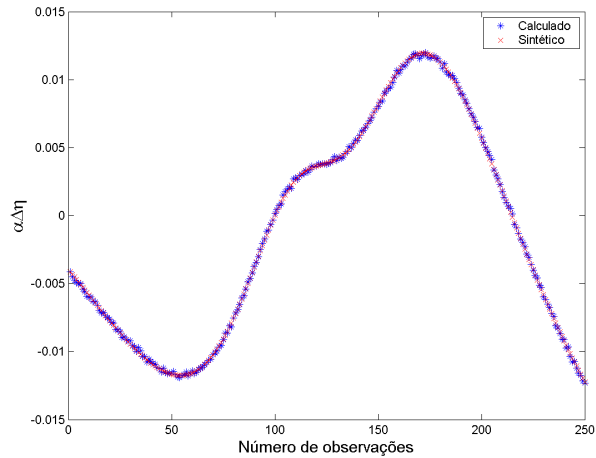


Figura 1: Modelo 1, mergulho de 30°, ondas down com 10% de ruído.

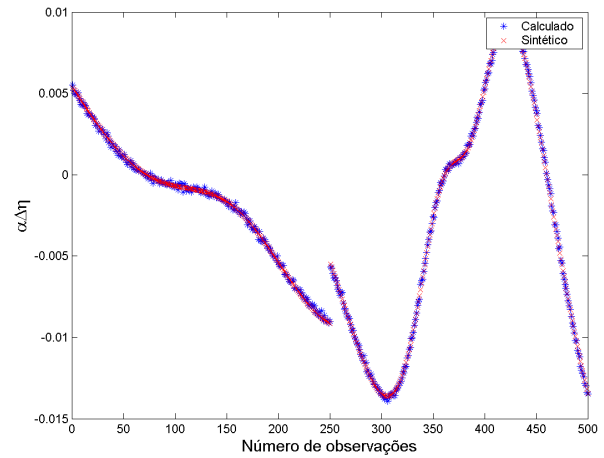


Figura 2: Modelo 1, mergulho de 30°, ondas up e down com 10% de ruído.

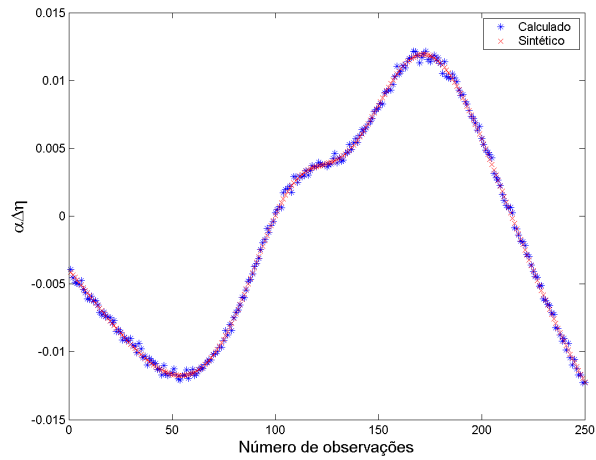


Figura 3: Modelo 1, mergulho de 30°, ondas down com 20% de ruído.

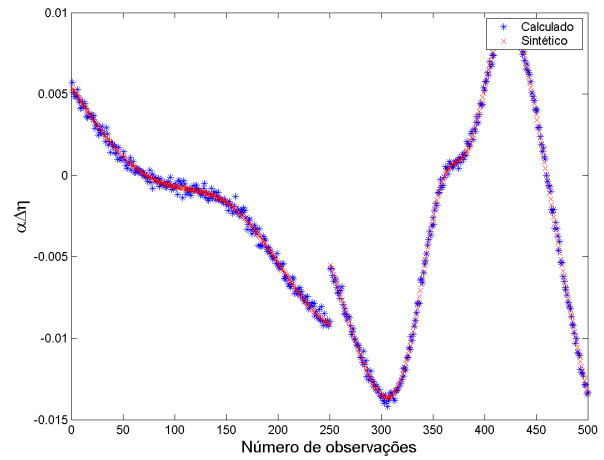


Figura 4: Modelo 1, mergulho de 30°, ondas up e down com 20% de ruído.

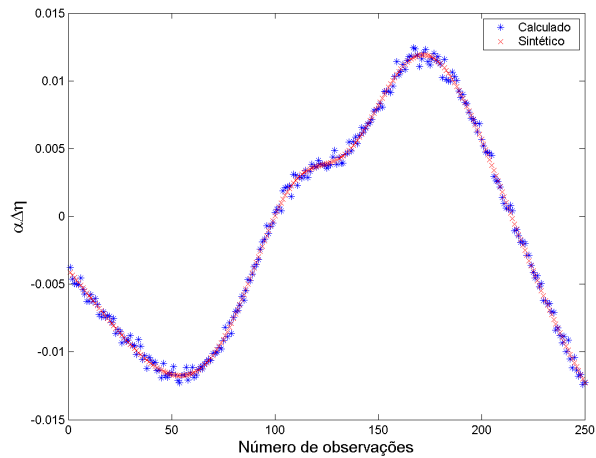


Figura 5: Modelo 1, mergulho de 30°, ondas down com 30% de ruído.

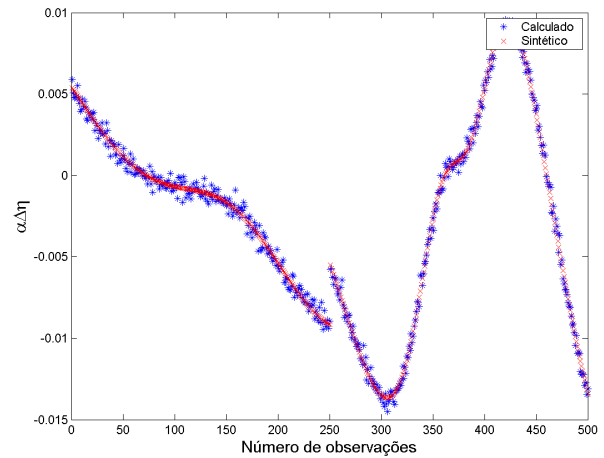


Figura 6: Modelo 1, mergulho de 30°, ondas up e down com 30% de ruído.

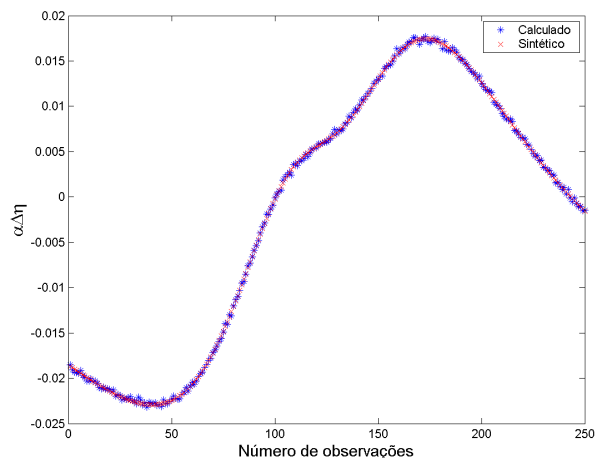


Figura 7: Modelo 1, mergulho de 60°, ondas down com 10% de ruído.

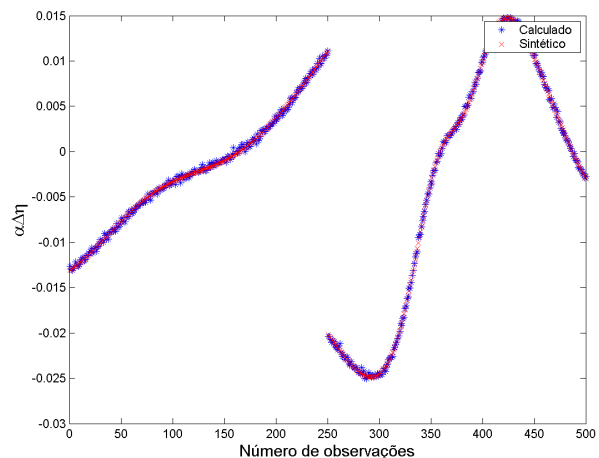


Figura 8: Modelo 1, mergulho de 60°, ondas up e down com 10% de ruído.

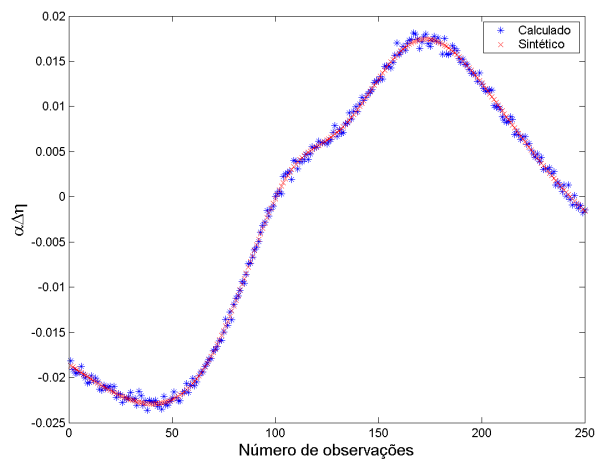


Figura 9: Modelo 1, mergulho de 60°, ondas down com 20% de ruído.

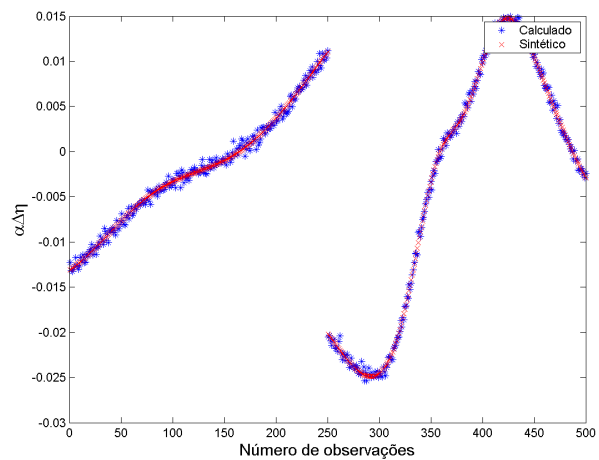


Figura 10: Modelo 1, mergulho de 60°, ondas up e down com 20% de ruído.

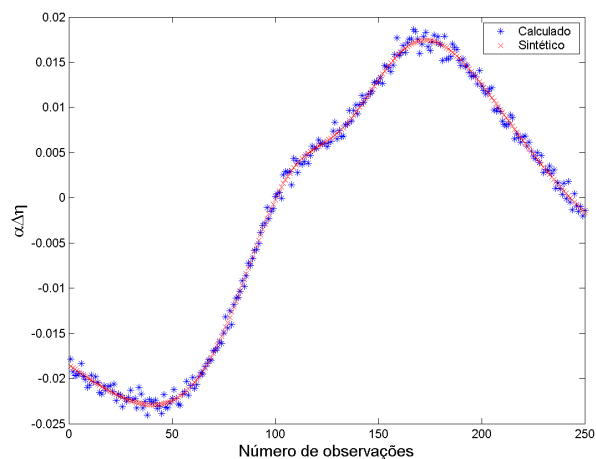


Figura 11: Modelo 1, mergulho de 60°, ondas down com 30% de ruído.

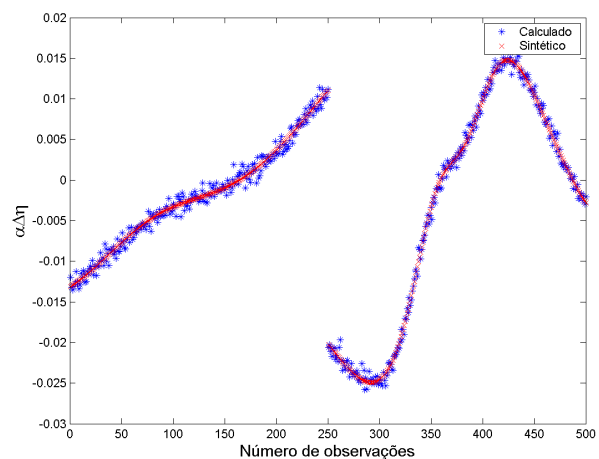


Figura 12: Modelo 1, mergulho de 60°, ondas up e down com 30% de ruído.

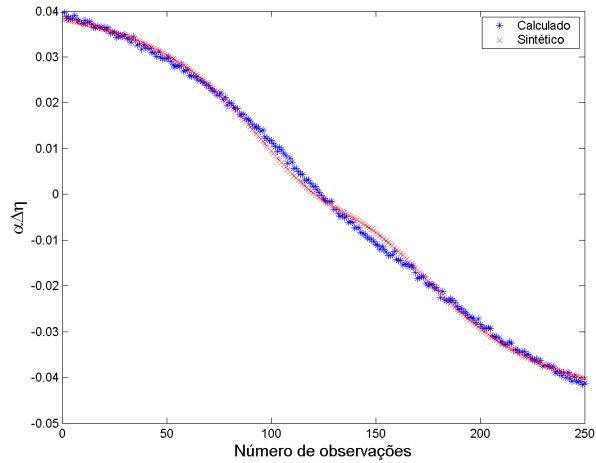


Figura 13: Modelo 2, mergulho de 30°, ondas down com 10% de ruído.

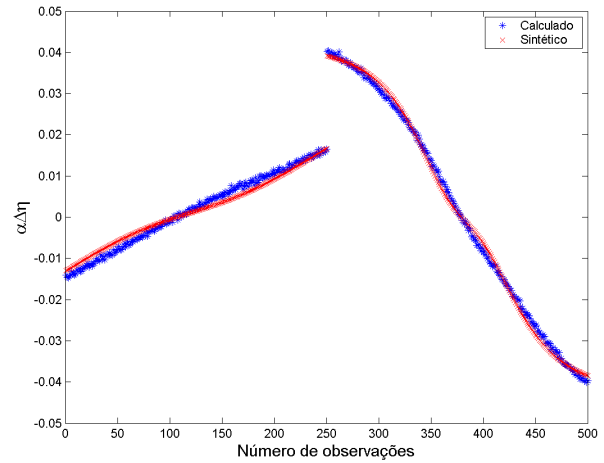


Figura 14: Modelo 2, mergulho de 30°, ondas up e down com 10% de ruído.

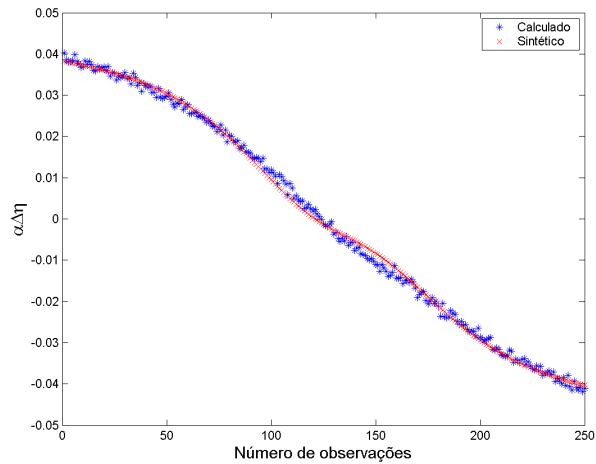


Figura 15: Modelo 2, mergulho de 30°, ondas down com 20% de ruído.

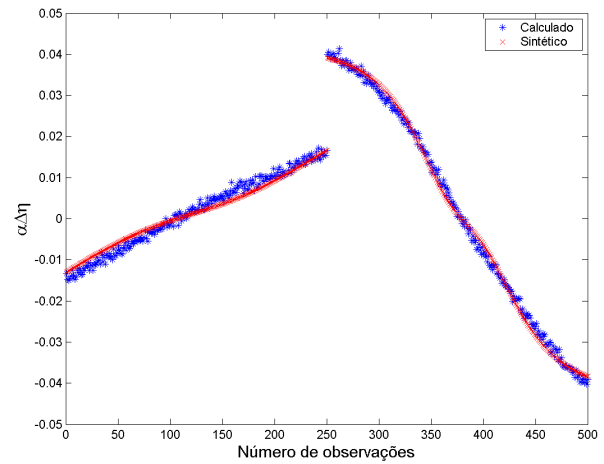


Figura 16: Modelo 2, mergulho de 30°, ondas up e down com 20% de ruído.

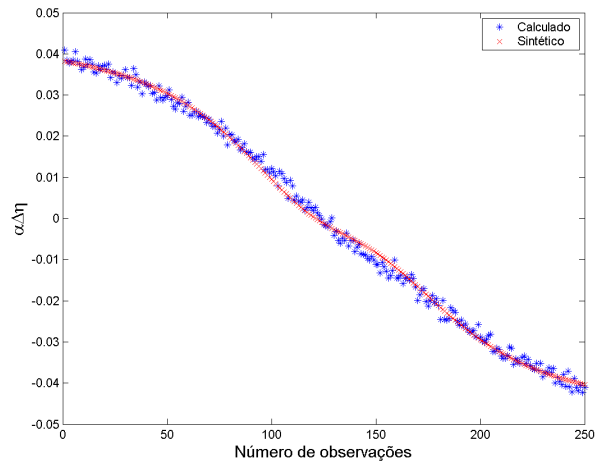


Figura 17: Modelo 2, mergulho de 30°, ondas down com 30% de ruído.

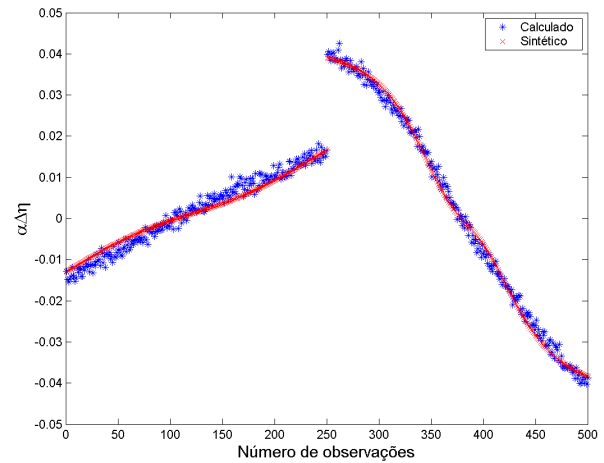


Figura 18: Modelo 2, mergulho de 30°, ondas up e down com 30% de ruído.

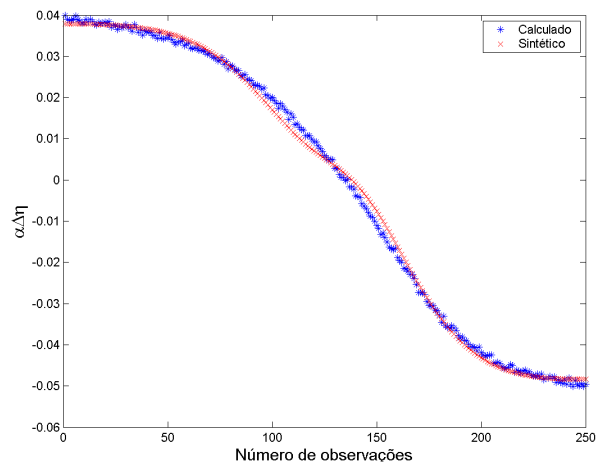


Figura 19: Modelo 2, mergulho de 60°, ondas down com 10% de ruído.

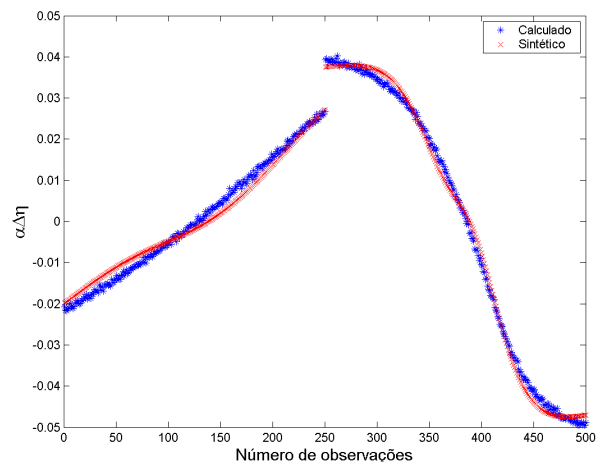


Figura 20: Modelo 2, mergulho de 60°, ondas up e down com 10% de ruído.

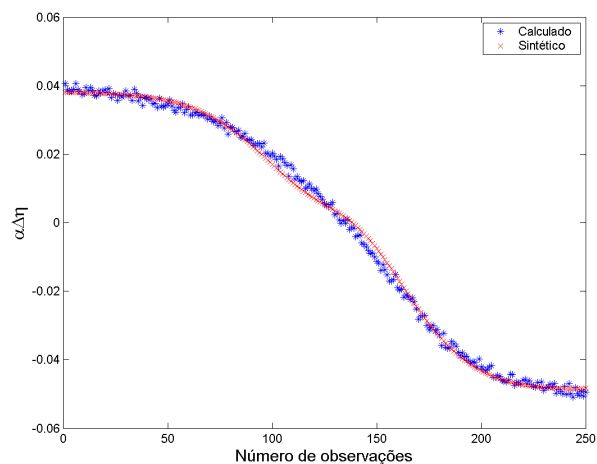


Figura 21: Modelo 2, mergulho de 60°, ondas down com 20% de ruído.

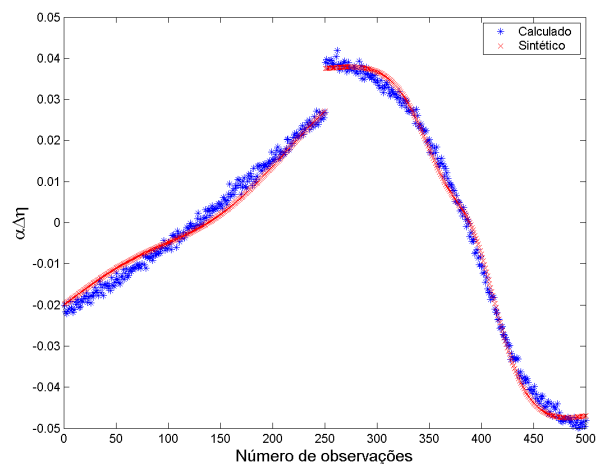


Figura 22: Modelo 2, mergulho de 60°, ondas up e down com 20% de ruído.

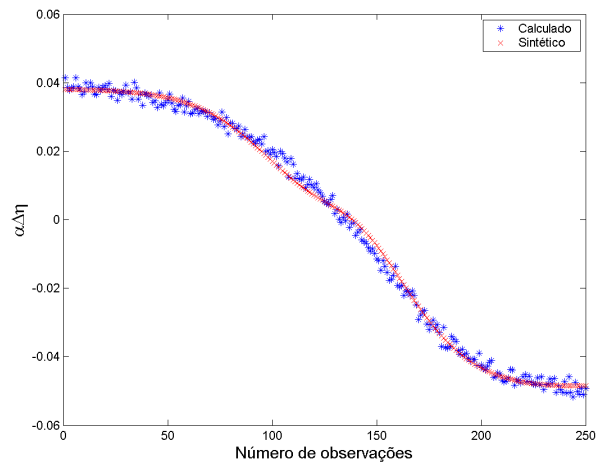


Figura 23: Modelo 2, mergulho de 60°, ondas down com 30% de ruído.

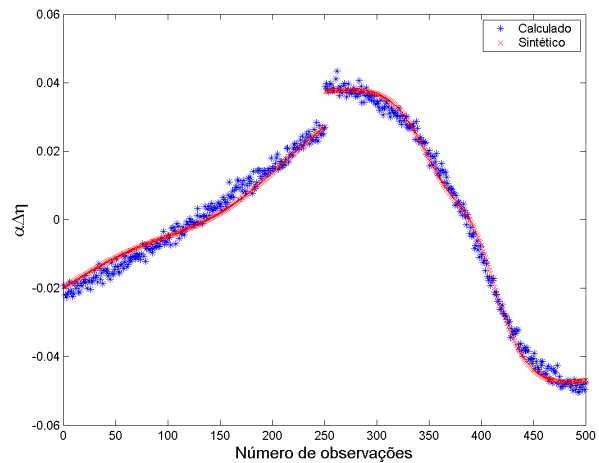


Figura 24: Modelo 2, mergulho de 60°, ondas up e down com 30% de ruído.