

ANÁLISE DO SINAL SÍSMICO

Segunda Edição



André L. Romanelli Rosa



Sociedade Brasileira de Geofísica

ANÁLISE DO SINAL SÍSMICO

Segunda Edição

André Luiz Romanelli Rosa

Sociedade Brasileira de Geofísica – SBGf
Rio de Janeiro RJ

Título: Análise do Sinal Sísmico
Primeira edição: 2010
Segunda edição: 2018
©2018 Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf)

Arte da capa: Márcia Uchoa, José Sergival da Silva
Revisão ortográfica: Leda M. da Costa
Comissão editorial: Ricardo A. Rosa Fernandes, Adriana Reis Xavier e Luiz Fernando S. Braga

R788a

Rosa, André Luiz Romanelli.

Análise do Sinal Sísmico.-2.ed./ André Luiz Romanelli Rosa.
Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf),
2018.

713p. il. cm.

Apêndice, bibliografia e índice.

ISBN: 978-85-88690-23-3

1. Sismologia. 2. Geofísica de Exploração. 3. Petróleo.
I - Sociedade Brasileira de Geofísica. II - Título.

CDU-550.34

Agência Brasileira do ISBN

ISBN 978-85-88690-23-3



Sociedade Brasileira de Geofísica – SBGf
Av. Rio Branco 156, Sala 2509
CEP 20040-901 Rio de Janeiro RJ Brasil
<http://www.sbgf.org.br>
e-mail: sbgf@sbgf.org.br

Prefácio

A primeira edição deste livro foi publicada pela SBGf em 2010. O objetivo principal desta edição, uma evolução da primeira, continua o mesmo: o de preencher a lacuna, frequentemente observada, entre os textos teóricos publicados e a atividade rotineira dos geofísicos da indústria do petróleo. Nesse sentido, busca auxiliar os atuais e futuros profissionais a entender, de forma mais direta, como os problemas práticos podem ter importantes vínculos com a teoria, independentemente de sua área de atuação — Geofísica de Exploração ou de Reservatório. O enfoque usado foi baseado na ideia de prover uma visão objetiva dos fundamentos físicos e matemáticos que suportam esses vínculos.

A forma com que o texto foi elaborado possibilita diferentes níveis de leitura, desde a mais básica, de caráter eminentemente intuitivo, até a que favorece, em alguns casos, a elaboração de programas de computador. Assim, por exemplo, um leitor que deseja se prender a uma análise global do método sísmico pode passar sucessivamente pelos seguintes itens e subitens: 2.1, 2.2, 2.3, 2.4.1, 2.5, 2.6, 2.8, 2.9, 2.10, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5.5, 3.6.1, 3.7, 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. Já um leitor interessado em aprofundar seus conhecimentos a respeito da migração de dados sísmicos pode estudar, sucessivamente, os itens 1.2, 2.2, 2.3, 2.4, 2.7, 3.4, 3.5 e 3.6. Deconvolução é um assunto que exige a leitura do Capítulo 1 e dos itens 2.9, 2.10, 3.1, 3.2 e 3.3.

Para quem deseja explorar de forma abrangente o livro, uma advertência: os exercícios apresentados ao fim de cada capítulo não são meros mecanismos de memorização, mas, sim, instrumentos de estudo dirigido. Por essa razão, vários deles visam a fazer com que o leitor, ao invés de simplesmente resolver questões bem definidas, seja instado a induzir, ou a descobrir, os conceitos envolvidos, parte dos quais não faz parte do texto precedente. Nesse sentido, compreender a própria questão é uma parte importante do problema.

A versão original do livro foi escrita na forma de uma apostila em 1980, juntamente com José Tassini. Na época, o texto tinha como objetivo apoiar um curso interno da Petrobras, voltado para o processamento e a interpretação de seções de pseudoimpedâncias acústicas. A forma atual resultou de uma evolução que espelha o que aconteceu com o conhecimento desde os anos 1980, não somente o conhecimento aplicado ao método sísmico, mas, também, à edição de textos. No que diz respeito ao método sísmico, o próprio livro deverá ser suficiente para que o leitor avalie essa evolução. Quanto à edição de textos, convém relatar o que houve, no mínimo como curiosidade. Antes disso, um alerta para o leitor: *na apresentação de valores decimais, adotou-se o padrão inglês, ou seja, vírgulas foram substituídas por pontos*. Similarmente, vários termos técnicos são apresentados em conjunto com seus equivalentes na língua inglesa.

A primeira versão do texto foi datilografada em uma máquina de escrever IBM. Para facilitar o trabalho da datilógrafa [evitando a troca das esferas que permitiam incluir símbolos], usamos fórmulas simplificadas, na forma de texto. Em 1985, já sem a participação de Tassini, a apostila foi datilografada em um microcomputador de uso doméstico,

um Microengenho II (*clone* brasileiro do Apple IIe), onde permaneceu sendo alterada por dois anos. Foi depois transferida, também através de datilografia, para um editor de texto instalado em um microcomputador da linha IBM. Até então, por causa das limitações dos dois editores usados, as fórmulas eram representadas na forma de texto.

Já no final dos anos 1980, a apostila sofreu a maior evolução, ao ser transcrita eletronicamente para o *mainframe* IBM 3090. O editor de textos disponível, semelhante ao \TeX , possibilitou a fácil introdução de fórmulas e símbolos gráficos, assim como figuras. Alguns anos depois, tomei uma decisão errada, ao passar a utilizar um editor de textos comercial, do tipo *what you see is what you get* (“o que você vê é o que você obtém”), basicamente por causa da aparente facilidade de uso que o caracterizava. Daquela época até meados de 2001, sofri bastante com o tratamento das figuras e, principalmente, com a edição e apresentação das equações, até o ponto de me sentir pouco incentivado a introduzir modificações extensas no texto.

Para me ajudar a resolver essas dificuldades, a Petrobras forneceu condições para converter todas as equações para o formato \LaTeX . Ao executar o trabalho de reformatação, percebi que os programas convencionais de edição de texto ainda não podem ser caracterizados como processadores de texto. São apenas integradores de ferramentas que permitem a elaboração de documentos de forma confortável se o número de equações e figuras for relativamente pequeno.

A sensação que senti, ao penetrar no mundo \LaTeX , foi a de liberdade, uma vez que passei a ter controle quase absoluto do processo. Apesar de o \LaTeX não se enquadrar no modelo *what you see is what you get*, ele possibilita introdução e modificação estruturada de praticamente todos os elementos do texto, características estas que, combinadas com uma apresentação final de melhor qualidade, tornam-no altamente indicado para um trabalho profissional. Este é também o caso do *software* livre Plotmtv, de Kenny Toh, com o qual foram geradas mais de 80% das figuras do livro.

Esse era o quadro por ocasião da publicação da primeira edição deste livro. A partir de 2011, o texto continuou a ser melhorado, em função de seu contínuo uso nos cursos internos da Petrobras. Adicionalmente, a geração da versão em inglês — conduzida a partir de uma sugestão de Fred Hilterman — levou à descoberta de diversos pontos de melhoria. Como disse o escritor Monteiro Lobato, os erros se escondem atrás das letras enquanto um livro está sendo escrito e somente aparecem após a publicação. Espero que, nesta edição, meus erros tenham aprendido a lição e tenham se decidido a aparecer apenas enquanto o livro estava sendo aprimorado.

Inúmeras pessoas deram importantes contribuições para a geração deste livro. Um deles é Paulo Siston, anteriormente Gerente de Geofísica da Petrobras, que incentivou e apoiou a publicação. No que diz respeito ao texto, eu gostaria de destacar José Tassini, que foi o responsável pela primeira versão de vários trechos. A revisão passou por diversos colegas de trabalho, entre os quais estão Carlos Cunha Filho, Carlos Lopo Varela, Adelson Oliveira, Paulo Carvalho, Eduardo Lopes de Faria e Vandemir de Oliveira, além das dezenas de profissionais que, durante os cursos internos da Petrobras, descobriram uma grande quantidade de pequenos erros.

De fundamental importância para a empreitada foi a contínua troca de ideias com Carlos Cunha Filho, Carlos Lopo Varela e Osvaldo Duarte, que ajudaram a direcionar melhor meus esforços. Cunha Filho teve um papel decisivo nas discussões e no desenvolvimento de ideias, especialmente em temas relacionados a velocidade, migração e aniso-

tropia. No que diz respeito às velocidades de empilhamento, recebi também o apoio de Antônio Bugginga Ramos e Gerson Ritter. Na mudança para o formato L^AT_EX, contei com a colaboração de Carlos Eduardo Theodoro e Adelson Oliveira. A elaboração de parte das figuras teve a participação de César Fraga, Haroldo Ramos, Orlando Aquino, Mário Alves e José Sergival da Silva. Na etapa de publicação, contei com a valiosa ajuda do pessoal da SBGf, em especial Adriana Reis Xavier e Ricardo Rosa Fernandes.

Este livro não teria sido escrito sem o apoio da Petrobras, que forneceu os recursos necessários, incentivou a publicação das duas edições e, principalmente, criou todas as condições possíveis para o aprimoramento de minha formação. Contei também com a compreensão e o apoio de minha família, mesmo nas ocasiões em que valorizei excessivamente o trabalho. Por essa razão, minha mulher, Denise, e meus filhos, Túlio e Cristina, merecem um agradecimento especial.

André
Rio de Janeiro
7 de maio de 2018

Índice

1	INTRODUÇÃO AO TRATAMENTO DE SINAIS	1
1.1	Conceitos básicos	1
1.1.1	Amostragem	1
1.1.2	Transformada Z	5
1.1.3	Sistemas lineares	6
1.1.4	Convolução	8
1.1.5	Correlação cruzada	11
1.2	Transformada de Fourier	13
1.2.1	Definições	13
1.2.2	Teoremas da transformada de Fourier	20
1.2.3	Funções especiais	26
1.2.4	Aplicações	31
1.3	Propriedades das séries de tempo	40
1.3.1	Características de fase dos sinais amostrados	40
1.3.2	As séries aleatórias	45
1.4	O filtro Wiener-Hopf-Levinson	51
1.4.1	O filtro Wiener-Hopf	51
1.4.2	Aplicando o filtro Wiener-Hopf	53
1.4.3	A recursão Levinson	57
1.5	Fatoração espectral	63
1.5.1	O método das raízes de polinômios	63
1.5.2	O <i>cepstrum</i>	64
1.5.3	O método Kolmogoroff	66
1.5.4	O método Toeplitz	68
1.6	Fontes de consulta	71
1.7	Exercícios	71
2	DAS ROCHAS PARA OS DADOS SÍSMICOS	77
2.1	Introdução	77
2.1.1	Das partículas de rocha para as ondas sísmicas	77
2.1.2	A energia das ondas e as interfaces geológicas	85
2.1.3	Fundamentos geométricos da propagação de ondas	89
2.1.4	A função refletividade e o modelo convolucional	96
2.1.5	Distorções inerentes ao método sísmico	99
2.1.6	A técnica CDP	102
2.2	O princípio de Huygens e o método sísmico	104

2.2.1	A geometria das reflexões e o refletor explosivo	104
2.2.2	As reflexões e a interferência de ondas acústicas	108
2.2.3	Uma descrição algébrica do princípio de Huygens	117
2.2.4	O conceito de recursão	128
2.3	A influência do afastamento fonte-receptor	131
2.3.1	A geometria das difrações	131
2.3.2	Uma simplificação do caso tridimensional	137
2.3.3	A interferência de sinais	141
2.4	A equação da onda	147
2.4.1	Ondas acústicas	147
2.4.2	Ondas elásticas em um corpo sólido	157
2.4.3	A influência dos fluidos	164
2.5	O tempo e a amplitude ao longo do raio	179
2.5.1	Noções básicas de teoria do raio	179
2.5.2	Estimativas de tempo de trânsito	188
2.5.3	Anisotropia	200
2.5.4	Espalhamento geométrico	215
2.6	Partição de energia nas interfaces	223
2.6.1	Partição da energia acústica	223
2.6.2	Partição da energia elástica	225
2.6.3	Análise da influência das propriedades elásticas	228
2.6.4	Impedância e refletividade	238
2.7	Extrapolação de campos de ondas	243
2.7.1	O sismograma unidimensional	243
2.7.2	O algoritmo de deslocamento de fase	251
2.7.3	As diferenças finitas	255
2.7.4	A integral de Kirchhoff	261
2.7.5	A aproximação Kirchhoff	276
2.8	Absorção	283
2.8.1	Teoria	284
2.8.2	Aplicação	291
2.9	Múltiplas e reverberações	295
2.9.1	Conceitos básicos	295
2.9.2	As múltiplas e a aproximação Kirchhoff	303
2.9.3	O filtro estratigráfico	309
2.10	O pulso sísmico e seus componentes	319
2.10.1	Assinatura da fonte	319
2.10.2	Instrumento e receptores	322
2.10.3	Os fantasmas	326
2.10.4	Arranjos de tiro e receptor	333
2.10.5	O pulso sísmico e as convenções de polaridade	335
2.11	Fontes de consulta	335
2.12	Exercícios	336
3	DOS DADOS SÍSMICOS PARA AS ROCHAS	341
3.1	Introdução	341

3.1.1	O condicionamento dos dados sísmicos	341
3.1.2	A multiplicidade e as velocidades sísmicas	348
3.2	A deconvolução da assinatura sísmica	366
3.2.1	Estimativas do pulso sísmico	367
3.2.2	Deconvolução determinística	372
3.2.3	Deconvolução de fase mínima	379
3.2.4	Deconvolução estatístico-determinística	384
3.2.5	Deconvolução de fase nula	389
3.2.6	Deconvolução iterativa	392
3.2.7	Técnicas baseadas em dados de poços	398
3.2.8	A restauração da cor da função refletividade	399
3.3	Correção dos fatores de propagação	401
3.3.1	Atenuação de múltiplas e reverberações	402
3.3.2	Compensação Q	413
3.3.3	Deconvolução estratigráfica	418
3.4	O princípio de Huygens e a migração	419
3.4.1	Migração geométrica em duas dimensões	419
3.4.2	A migração e a interferência de ondas acústicas	424
3.4.3	A álgebra da versão inversa do princípio de Huygens	430
3.4.4	Migração por soma de difrações	434
3.4.5	Migração em tempo versus profundidade	436
3.4.6	Introdução à migração recursiva	440
3.5	Algoritmos de migração	446
3.5.1	Migração Kirchhoff	446
3.5.2	Técnicas espectrais	456
3.5.3	Diferenças finitas	460
3.5.4	Técnicas complementares	474
3.5.5	Um pouco mais de detalhe	478
3.6	Migração pré-empilhamento	481
3.6.1	Introdução à migração pré-empilhamento	482
3.6.2	A correção de DMO	499
3.6.3	Algoritmos de migração pré-empilhamento	504
3.6.4	Limitações da migração pré-empilhamento	520
3.7	Técnicas de inversão	521
3.7.1	Limitações e possibilidades da inversão	522
3.7.2	Parâmetros de AVO	529
3.7.3	Inversão acústica	533
3.7.4	Inversão elástica	537
3.8	Fontes de consulta	542
3.9	Exercícios	543
4	EXTRAINDO VALOR DO SINAL SÍSMICO	549
4.1	Introdução	549
4.1.1	Calibração dos dados sísmicos	549
4.1.2	A representação sísmica da geologia	554
4.2	Conceitos de petrogeofísica	561

4.2.1	A elasticidade e os meios porosos	563
4.2.2	O controle da velocidade e da razão de Poisson	570
4.2.3	Modelagem petrogeofísica com a equação de Gassmann	577
4.3	Indicadores sísmicos de petróleo e litologia	585
4.3.1	<i>Bright spots, flat spots, dim spots</i> e AVO	587
4.3.2	Análise de AVO	589
4.3.3	Aspectos práticos da análise de AVO	609
4.4	Quantificação sísmica	618
4.4.1	Resolução sísmica	618
4.4.2	Previsão de atributos geológicos	631
4.5	Fontes de consulta	641
4.6	Exercícios	641
APÊNDICE		645
A.1	A equação da difusão	645
A.2	A aproximação de fase estacionária	647
A.3	Empilhamento oblíquo	649
A.4	Técnicas de compensação Q	653
A.5	Melhorando o algoritmo implícito	656
A.6	Obtenção dos parâmetros de AVO	661
A.7	Modelos de pulso sísmico	665
A.8	Respostas dos exercícios	667
BIBLIOGRAFIA		689
ÍNDICE REMISSIVO		705