UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

JONATAN DE OLIVEIRA DIAS

MODELAGEM E PROCESSAMENTO SÍSMICO PARA DIFERENTES ESTRUTURAS GEOLÓGICAS PRESENTES NAS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS

Niterói

JONATAN DE OLIVEIRA DIAS

MODELAGEM E PROCESSAMENTO SÍSMICO PARA DIFERENTES ESTRUTURAS GEOLÓGICAS PRESENTES NAS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Programa de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense como requisito final para a obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientador:

Marco Antônio Cetale Santos

Niterói

JONATAN DE OLIVEIRA DIAS

MODELAGEM E PROCESSAMENTO SÍSMICO PARA DIFERENTES ESTRUTURAS GEOLÓGICAS PRESENTES NAS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS

Banca Examidora:

Marco Antônio Cetale Santos, D.Sc.

Rogério de Araújo Santos, D.Sc.

Jorge Leonardo Martins, D.Sc.

Denis Lage Ferreira da Silva, M.Sc.

Niterói

MODELAGEM E PROCESSAMENTO SÍSMICO PARA DIFERENTES ESTRUTURAS GEOLÓGICAS PRESENTES NAS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS

JONATAN DE OLIVEIRA DIAS

RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo realizar análises, observações e comparações das respostas sísmicas obtidas através de modelos geológicos sintéticos utilizando a variação das velocidades de onda P nas camadas geológicas. Dessa forma, comparar as respostas sísmicas sintéticas com seções sísmicas reais e alcançar familiarização com as técnicas de processamento sísmico e de modelagem.

A técnica de modelagem de Traçamento de Raio foi utilizada para modelar contextos geológicos distintos nos modelos geológicos sintéticos. Como por exemplo: Banco de Carbonatos, Almofada de Sal, Depósito Turbidítico, Trapa Estratigráfica e Derrames Basálticos. Sendo assim, aplicando as técnicas do processamento sísmico convencional foi possível obter as respostas sísmicas dos modelos geológicos através do *Software Seismic Unix*.

Foi possível observar diferentes comportamentos das respostas sísmicas provenientes dos modelos geológicos criados através do *Seismic Unix*. Além disso, foram realizadas comparações e análises das respostas sísmicas sintéticas com seções sísmicas reais.

MODELLING AND SEISMIC PROCESSING FOR DIFFERENT GEOLOGICAL STRUCTURES PRESENT ON BRAZILIAN SEDIMENTARY BASINS

JONATAN DE OLIVEIRA DIAS

ABSTRACT

The main objective of the present work is to perform analysis, observations and compares of the seismic responses obtained through synthetic geological models using wave P velocity variations in geological layers. In this regard, synthetic seismic responses were compared with real seismic sections in order for a familiarity with seismic processing and modelling techniques to be achieved.

The modelling technique known as Ray Tracing was used to model distinct geological contexts on the synthetic geological models. For instance: Carbonate Banks, Salt pillow, Turbidite deposits, Pinch out and deposit of Basaltic flows. Therefore, through the application of conventional seismic processing techniques it has been possible to obtain seismic responses of the geological models on the software *Seismic Unix*.

It has also been possible to note different behaviours of the seismic responses arising from the geological models created on Seismic Unix. Additionally, compares and analysis of the synthetic seismic responses with real seismic sections have been performed.

Sumário

1)	Introdução	8
2)	Modelagem Sísmica e Processamento Sísmico no Seismic Unix	11
2	2.1) Modelagem Sísmica no <i>Seismic Unix</i>	12
2	2.2) Ordenação do <i>Shot gather</i> para o CMP <i>gather</i>	14
	2.3) Análise de Velocidade	18
	2.4) Cobertura - <i>Fold</i>	20
	2.5) Correção NMO	21
	2.6) Empilhamento	23
3) Análise do Efeito de Pull-up em um Modelo Geológico Sintético com Almofada de Sal – Estudo de Caso: Bacia de Campos		
	3.1) Almofada de Sal na Bacia de Campos	26
	3.2) Modelo Multicamadas I e Modelo com Almofade de Sal	28
	3.2.1) Modelo Multicamadas I	29
	3.2.2) Modelo com Almofada de Sal	35
4	3.3) Resultados e Discussões do Capítulo	41

4) Análises das Respostas Sísmicas Sintéticas de Diferentes Hipóteses Geológicas – Estudos de Caso: Campo de Marlim – Bacia de Campos e Bacia de Sergipe - Alagoas		
4.1) Campo de Marlim na Bacia de Campos43		
4.1.1) Comparação da Seção Sísmica do Campo de Marlim com a Resposta Sísmica do Modelo Geológico com Depósito Turbidítico44		
4.2) Análises e Comparações dos Modelos Geológicos Sintéticos com Depósito Evaporítico e com Derrame Basáltico 46		
4.3) Resultados e Discussões do Capítulo49		
5) Análise do Efeito de <i>Pull-up</i> em um Modelo Geológico Sintético com Banco de Carbonatos – Estudo de Caso: Bacia do Espírito Santo		
5.1) Banco de Carbonatos na Bacia do Espírito Santo		
5.2) Modelo com Banco de Carbonatos		
5.3) Resultados e Discussões do Capítulo57		
6) Conclusões		
7) Referências Bibliográficas		

1) Introdução

O método geofísico mais largamente utilizado hoje na indústria do petróleo para investigação de hidrocarbonetos em bacias sedimentares é a sísmica de reflexão, tanto para investigação de bacias nos continentes quanto as bacias que estão imersas nos oceanos.

A sísmica de reflexão consiste na emissão de ondas elásticas que se propagam através das estruturas geológicas. No método sísmico a medida realizada é o tempo de percurso da onda (Viagem entre a fonte e o receptor). A sísmica de reflexão para investigação de bacias sedimentares na exploração de hidrocarbonetos pode ser dividida em três partes, e elas são: Aquisição, Processamento e Interpretação.

Os levantamentos sísmicos de reflexão podem ser realizados tanto em ambientes terrestres quanto em ambientes marinhos. Os levantamentos terrestres podem ocorrer com um *Vibroseis*, explosões planejadas de dinamite, marretas especiais, entre outros. Os levantamentos marinhos podem ser realizados com diversos equipamentos, dentre eles, têm-se: Canhões de ar, Canhões de água, Centelhadores e *Boomers* (Kearey *et al.*, 2009).

Durante várias décadas a eliminação dos ruídos em relação à energia refletida e captada pelos receptores sempre foi o maior objetivo do processamento sísmico (Yilmaz, 2001). O processamento sísmico consiste em uma série de técnicas que são utilizadas para a correção dos dados brutos que são adquiridos através da aquisição sísmica.

A interpretação sísmica é um passo essencial que é responsável pela interpretação do contexto geológico do dado sísmico processado. O conjunto Aquisição, Processamento e Interpretação sísmica levará ao conhecimento da bacia sedimentar através das seções sísmicas que foram adquiridas, processadas e interpretadas.

A Modelagem Sísmica é uma ferramenta vastamente utilizada no mundo da geofísica do petróleo, e principalmente na sísmica. A modelagem é de grande interesse para as empresas porque permite tanto o planejamento adequado para uma eficiente campanha de aquisição quanto permite também a sua utilização

como uma ferramenta muito útil na interpretação sísmica. Devido à necessidade cada vez maior de descobrir acumulações de hidrocarbonetos em situações mais complexas, a modelagem tem tido sua importância reconhecida tanto na aquisição quanto na interpretação sísmica. Muitas das acumulações de petróleo recentemente descobertas encontram-se em situações de difícil imageamento, onde as principais rochas geradoras e reservatórios estão sob uma espessa camada de sal, como é possível observar na Margem Leste Brasileira (Carminatti, Wolff e Gamboa, 2008).

O principal objetivo deste trabalho é a realização de análises e comparações das respostas sísmicas obtidas através da variação das velocidades de onda P nas camadas dos modelos geológicos. Dessa forma, comparar as respostas sísmicas sintéticas com seções sísmicas reais e alcançar familiarização com as técnicas de processamento sísmico e de modelagem.

Foram modelados e processados: modelo com almofada de sal, modelo com bancos de carbonatos, modelo com trapa estratigráfica, modelo com turbiditos e modelo com derrames basálticos.

Com o presente trabalho foi possível obter respostas sísmicas sintéticas para diversas realidades geológicas. Algumas respostas sísmicas sintéticas obtidas através dos modelos geológicos criados pelo *Software Seismic Unix* foram comparadas com seções sísmicas reais das bacias sedimentares brasileiras. Alcançou-se ótimos resultados fazendo a comparação entre dados sintéticos e reais.

O Capítulo 2 deste trabalho é responsável por descrever a técnica de modelagem que foi utilizada para construção dos modelos geológicos através do *Seismic Unix* e juntamente com está técnica, apresentar todas as técnicas do processamento sísmico que foram utilizadas nos modelos geológicos.

No Capítulo 3 foi possível fazer um estudo de caso sobre a Bacia de Campos para apresentar similaridades entre dados sintéticos e seções sísmicas reais. Sendo assim, foram feitas correlações do efeito de *pull-up* de uma seção sísmica real com respostas sísmicas sintéticas obtidas através da modelagem e do processamento dos modelos geológicos criados pelo *Seismic Unix*.

Através do Capítulo 4 realizou-se um estudo de caso do Campo de Marlim na Bacia de Campos. Dessa forma, foi possível fazer comparações da seção sísmica real da Bacia de Campos com um modelo geológico e sua respectiva resposta sísmica sintética. Além disso, foram feitas análises, observações e comparações entre respostas sísmicas de modelos sintéticos utilizando a variação das velocidades de onda P.

No Capítulo 5 o efeito de *pull-up* produzido através de uma estrutura geológica de alta velocidade de um modelo geológico sintético foi comparada com o efeito de *pull-up* de uma seção sísmica real.

Por fim, no Capítulo 6 deste trabalho serão apresentadas as conclusões finais.

2) Modelagem Sísmica e Processamento Sísmico no Seismic Unix

Neste capítulo será descrita a metodologia utilizada para modelar e processar os modelos geológicos que serão apresentados. Traçamento de Raios foi a técnica de modelagem utilizada para modelar os modelos geológicos sintéticos. Os modelos geológicos foram processados através das técnicas do processamento sísmico convencional.

O Seismic Unix consegue realizar modelagens tanto pelo método de Diferenças Finitas quando pelo método de Traçamento de Raios. A escolha pela técnica de Traçamento de Raios foi devido ao menor custo computacional e porque muitos modelos foram modelados e processados.

As técnicas do processamento sísmico que foram aplicadas nos modelos geológicos foram as seguintes: Ordenação CMP, Análise de Velocidade, Cobertura, Correção NMO e Empilhamento.

Primeiramente será explicado um pouco mais sobre a Modelagem Sísmica e a respeito da técnica de Traçamento de Raios, com a apresentação da Equação da Onda Acústica. Juntamente com a técnica de modelagem também será abordado os tipos de geometrias de aquisição utilizadas e qual arranjo foi predominante para gerar as aquisições dos modelos sintéticos.

Após a explicação sobre a Modelagem Sísmica será possível fazer uma descrição mais detalhada das técnicas de processamento sísmico.

2.1) Modelagem Sísmica no Seismic Unix

O Seismic Unix (SU) é um software que possibilita a criação de grande variedade de modelos como poderá ser visto nos capítulos finais deste trabalho. Apesar de ser possível a atribuição de densidades para as camadas dos modelos geológicos, não pertence ao escopo deste trabalho a utilização de tal parâmetro. Considerou-se apenas camadas isotrópicas e homogêneas nos modelos geológicos.

Através do *SU* é possível a criação de geometrias de aquisição. Nos modelos geológicos marinhos processados foi predominante a utilização do arranjo *Split-spread* com aquisições de 40 e 170 tiros. O espaçamento entre fonte de 50 m e o espaçamento entre hidrofones de 50 m, foi predominante.

Apesar do arranjo *End-on* ser o padrão para levantamentos sísmicos marinhos reais, quando o autor desta obra adquiriu as geometrias de aquisição na literatura só foi possível encontrar as geometrias de aquisição com o arranjo *Split-spread*. Por isso, todas as geometrias de aquisição que foram utilizadas nos modelos geológicos deste trabalho apresentam o arranjo *Split-spread*.

Tendo falado um pouco sobre o software e a respeito das geometrias de aquisição que vão ser utilizadas nos modelos geológicos, agora; será possível detalhar um pouco mais sobre a técnica de modelagem de Traçamento de Raios.

A modelagem consiste na simulação de fenômenos físicos. Quando almejase o estudo de algum fenômeno físico, na maioria das vezes, faz-se a utilização da modelagem.

Neste trabalho foi realizada a modelagem, ou seja, a simulação de um fenômeno físico: propagação de Onda P. Sendo assim, diversos modelos geológicos foram criados adotando-se diferentes velocidades de onda P nas camadas geológicas.

A onda P, também chamada de onda primária é um tipo de onda elástica. A velocidade de onda P em um meio isotrópico e homogêneo é dada pela equação (1.0):

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (1.0)$$

Sendo K o módulo Volumétrico, μ o módulo de cisalhamento e ρ a densidade do material por onde a onda se propaga.

Os modelos geológicos presentes neste trabalho foram gerados a partir da Técnica de Traçamento de Raios. O princípio de funcionamento desta técnica é a equação da Onda Acústica, como pode ser vista na equação (2.0):

$$\frac{\partial^2 U}{\partial^2 t} = c^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 z} \right)$$
(2.0)

Na equação (2.0), têm-se que: U é o campo de pressão, c é a velocidade de ondas primárias no meio e x, y, z e t são as dimensões espaciais e temporais. Através da solução da equação da onda acústica (2.0) pode-se simular a propagação da onda P e estudar o efeito de uma aquisição sísmica.

A técnica de modelagem por traçamento de raios pode ser dividida em duas partes: cinemática e dinâmica. Neste trabalho foi utilizada a técnica de modelagem por traçamento de raios no contexto cinemático, que consiste no cálculo dos tempos de trânsito, frentes de onda e dos raios sísmicos para modelos isotrópicos e homogêneos.

Não pertence ao escopo deste trabalho a solução da equação da onda acústica e todo fundamento matemático que envolve a equação (2.0) com a técnica de modelagem por traçamento de raios. Miqueles (2007) apresenta de forma bem didática o fundamento matemático da Teoria dos Raios tanto para o sistema de traçamento cinético quanto para o sistema de traçamento dinâmico.

2.2) Ordenação do Shot gather para o CMP gather

Os dados adquiridos em uma aquisição sísmica possuem coordenadas que relacionam a posição da fonte e as posições dos hidrofones/geofones (*Shot gather*). Esse não é formato de coordenadas ideal para o dado ser processado porque as técnicas de processamento sísmico como: Análise de Velocidade, Correção NMO, Empilhamento e Migração só são aplicadas se o dado for ordenado no domínio CMP. Dessa forma, é necessário fazer a transformação das coordenadas fonte-receptor para coordenadas ponto médio – receptor (CMP *gather*).

Uma família CMP é definida pelos pares de fonte e receptor que possuem um ponto médio comum. Na Figura 1 é possível observar as posições das Fontes e dos Receptores e o ponto médio comum entre eles. Os sucessivos pares de fonte – receptor da Figura 1 com todos os raios incidindo no mesmo ponto refletor foram utilizados parar gerar o sismograma (CMP gather) presente na figura.



Figura 1: Ilustração da formação de um CMP gather.

Fonte: EAGE, Learning Geoscience Online. Site: www.learninggeoscience.net

Na Figura 2 é possível fazer a ilustração de um levantamento sísmico sintético com arranjo *Split-spread*. A fonte centralizada é representada pelo quadrado e os respectivos receptores são representados pelos círculos lateralmente posicionados.



Figura 2: Ilustração de um levantamento sísmico sintético sendo realizado

Fonte: (Forel et al., 2005)

Na Figura 3 é possível através de cálculos deduzir uma equação que correlaciona o tempo de chegada de uma onda sísmica e o afastamento entre fonte e receptor em um sismograma de família CMP. Esta equação é chamada de equação do tempo hiperbólico e é ilustrada a seguir (3.0):

$$t^2 = t_0^2 + x^2 / V^2$$
 (3.0)

Sendo *t* o tempo de chegada da onda sísmica, *to* é o tempo de chegada da onda sísmica para afastamento igual a zero (*zero offset-time*), x é o afastamento entre fonte e receptor e v é a velocidade de propagação da onda sísmica.



Figura 3: Reflexão em um Refletor Plano (S=Fonte e R=Receptor)

Fonte: Gadallah (1994)

Nos próximos itens deste capítulo serão analisados os CMP *gathers* dos modelos geológicos sintéticos. Dessa forma, será possível visualizar as reflexões, ou seja, as hipérboles nos sismogramas. Essas reflexões são chamadas de hipérboles devido a equação (3.0) que produz o gráfico da Figura 4:



Figura 4: Gráfico da equação do Tempo Hipérbolico

O gráfico da Figura 4 representa a hipérbole da equação (3.0). Como a velocidade e a altura são constantes na equação (3.0), a curva do gráfico é simétrica em relação ao eixo do tempo de propagação da onda refletida.

Nas Figuras 5 e 6, a seguir, será possível ilustrar melhor a ordenação CMP de um dado sísmico sintético no *SU*.

Fonte: Dourado (2007)



Figura 5: Shot gather gerado através de um modelo sintético no Seismic Unix.



Figura 6: Ordenação CMP de um dado no Seismic Unix.

Fonte: Ambas as Figura 5 e 6 foram criadas pelo o autor no Seismic Unix.

2.3) Análise de Velocidade

A Análise de Velocidade é essencial no processamento sísmico. Nesta técnica é possível fazer a escolha das velocidades para a correção das hipérboles no sismograma. O sismograma (CMP *gather*) é composto de dois eixos: A abscissa é o eixo da distância e a ordenada é o eixo do tempo como pode ser visto na Figura 6.

Nesta técnica, através do CMP *gather* obtido, é criado um *semblance*. O *semblance* é um gráfico com diferentes densidades de energia que consegue esclarecer quais serão as melhores estimativas das velocidades para a horizontalização das hipérboles do sismograma.

O Semblance é composto por dois eixos: o eixo das ordenadas é representado pelos valores de tempo de reflexão no zero offset do CMP gather e o eixo das abscissas é representado pelas velocidades que são estimadas e estão dentro do range de possibilidades para correção das hipérboles. Utiliza-se uma escala de cores e energia para ilustrar as melhores velocidades. Na Figura 7 é possível ilustrar o semblance do CMP gather da Figura 6.



Figura 7: Semblance do CMP gather da Figura 6.

Fonte: Dado gerado pelo próprio autor no Seismic Unix.

Os pontos do Semblance que tiverem maior densidade energia são os pontos que devem ser marcados pois eles representam as melhores estimativas das velocidades para correção das hipérboles. Em contrapartida, os pontos com menor densidade de energia são os pontos que não demonstram ser boas estimativas porque não irão representar uma boa horizontalização das reflexões.

É possível observar no *semblance* da Figura 7 que os pontos de maior energia estão representados pela cor vermelha, os pontos de média energia pela cor verde e os pontos de baixa energia são representados pela cor azul.

Como têm-se três reflexões no CMP *gather* utilizado da Figura 6, representado pelas três hipérboles, será necessária a marcação de três velocidades no *Semblance*, que devem ser utilizadas posteriormente na técnica de Correção NMO. (Vide: Figura 7).

A Análise de Velocidade de uma seção sísmica não é realizada só com um CMP *gather*, quanto mais CMPs utilizados melhor será interpolação dos dados que irão gerar a resposta sísmica. Nos dados processados neste trabalho aplicou-se a Análise de Velocidade com o padrão de intercalação de 5 em 5 CMPs para aquisições de 40 tiros e padrão de intercalação de 20 em 20 CMPs para a aquisição de 170 tiros.

2.4) Cobertura – Fold

A Técnica de Cobertura é de suma importância para o processamento sísmico e principalmente para a interpretação sísmica. O *fold* (Cobertura) é obtido através de informações que são geradas das ordenações CMP que são realizadas nos *shot gathers*.





Fonte: (Forel et al., 2005)

É possível observar na Figura 8, os CMP *gathers* que estão com cobertura completa. Estes serão os dados que melhor irão representar a subsuperfície na resposta sísmica que será obtida. O gráfico também apresenta os CMP *gathers* que não possuem uma boa cobertura.

Através do gráfico da Figura 8, é possível concluir que entre o CMP *gather* 60 e o CMP *gather* 400 aproximadamente, obteve-se uma cobertura completa, ou seja, todos os CMPs apresentam os 30 traços. Dessa forma, se o objetivo da aquisição estiver nestes CMP *gathers*, maiores são as chances de conseguir imagear a subsuperfície com mais acurácia.

Sempre no início e no final das aquisições, ou seja, os primeiros e os últimos CMP *gathers* não apresentam uma boa cobertura. Por isso, se faz necessário antes da aquisição real, planejar qual será o objetivo em subsuperfície, realizar modelagens e testar geometrias de aquisição.

2.5) Correção NMO

As velocidades escolhidas na técnica Análise de Velocidade são posteriormente utilizadas pela Correção NMO. A Correção NMO é a técnica responsável por horizontalizar as hipérboles dos CMP *gathers*.

No Seismic Unix, as velocidades que são obtidas através da Análise de Velocidade são postas em um *script*, com os seus respectivos valores de tempo (tnmo) e velocidade (vnmo) como pode-se ilustrar na Figura 9:



Figura 9: Script da Correção NMO de vários CMP gathers no Seismic Unix.

Fonte: Foto gerada pelo próprio autor no Linux.

Está técnica é de suma importância para o processamento sísmico porque tendo horizontalizado as hipérboles dos sismogramas, os CMP *gathers* estarão prontos para a técnica de empilhamento.

Nas Figuras 10 e 11 é possível ilustrar a real função e importância da Correção NMO para o CMP *gather*.



Figura 10: CMP gather de um modelo com 4 camadas.



Figura 11: CMP gather da Figura 10 com Correção NMO.

Fonte: Figuras 10 e 11 foram geradas pelo próprio autor no Software Seismic Unix

2.6) Empilhamento

A técnica de empilhamento no processamento sísmico é de extrema relevância para uma melhor relação Sinal/Ruído do dado sísmico. Através do empilhamento de todos os CMP gathers é possível gerar a seção sísmica. O empilhamento no software Seismic Unix é realizado através de um simples comando.

Cada CMP *gather* representa apenas um ponto em subsuperfície, ou seja, cada CMP *gather* é representado por diversos traços que representam um mesmo lugar. Sendo assim, ao empilharmos um CMP passamos a obter um traço que representa todo o CMP *gather*.



Figura 12: Visualização dos traços empilhados.

Fonte: http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/c/common_midpoint.aspx

Na Figura 12 é possível resumir os passos já anteriormente mencionados. Primeiramente, têm-se os *raypaths* de uma geometria *Common Mid Point*, em seguida, apresenta-se o CMP *gather*. Logo depois, o CMP é corrigido através da Correção NMO e em seguida observa-se o traço empilhado ou na versão em inglês *stacked trace*.

Neste capítulo foi apresentada a Metodologia que foi utilizada durante o trabalho através do *Seismic Unix.* Nos próximos 3 capítulos serão feitas análises, observações e comparações a respeito dos modelos geológicos e suas respectivas respostas sísmicas sintéticas com seções sísmicas reais. Todos os modelos geológicos sintéticos passaram pelas etapas do processamento sísmico convencional, ou seja, foram aplicadas as técnicas de Ordenação CMP, Cobertura, Análise de Velocidade, Correção NMO e Empilhamento.

Todos os modelos analisados foram criados através do Software *Seismic Unix*. Alguns modelos foram obtidos na literatura e outros foram criados pelo próprio autor, da mesma forma, as geometrias de aquisição aplicadas nestes modelos foram também adquiridas na literatura.

Os modelos analisados são constituídos de camadas isotrópicas e homogêneas tratando-se apenas da variação de velocidades de onda P nas camadas sedimentares dos modelos geológicos. Não pertence ao escopo deste trabalho a atribuição de densidades para as camadas dos modelos porque demandaria um alto custo computacional e tornar-se-ia inviável levando-se em conta que muitos modelos foram utilizados, criados e processados.

3) Análise do Efeito de *Pull-up* em um Modelo Geológico Sintético com Almofada de Sal – Estudo de Caso: Bacia de Campos

O objetivo principal deste capítulo é comparar, analisar e observar o efeito de *pull-up* na resposta sísmica que foi obtida através do Modelo com Almofada de Sal.

Para melhor demonstração e ilustração do efeito de *pull-up* utilizou-se dois modelos geológicos sintéticos com variação de velocidades de onda P. O Modelo Multicamadas I não possui o efeito de *pull-up* e apresenta uma resposta sísmica fidedigna ao seu respectivo modelo geológico. No entanto, o Modelo com Almofada de Sal apresenta um comportamento anômalo (*Pull-up*) que será melhor explicado nos próximos itens.

No item 3.1, será apresentada uma seção sísmica da Bacia de Campos com a presença de uma almofada de sal. O principal propósito de apresentar essa sísmica é a ilustração da almofada de sal em um contexto geológico real e sua semelhança com o modelo geológico sintético.

No item 3.2 deste capítulo serão apresentadas as técnicas de processamento utilizadas e as diferentes respostas sísmicas dos modelos geológicos propostos. Além disso, será demonstrado um exemplo do efeito de *pull-up* em uma seção sísmica real de uma bacia situada no Estado de Louisiana no EUA. Essa seção sísmica real servirá como parâmetro de comparação com a resposta sísmica sintética que foi obtida através modelo geológico com Almofada de Sal.

No final será feita a descrição dos resultados a respeito das análises, observações e comparações que foram obtidas no decorrer deste capítulo.

3.1) Almofada de Sal na Bacia de Campos

A Bacia de Campos está localizada no Sudeste do Brasil, e se limita a norte com a Bacia do Espírito Santo, e a sul, pela Bacia de Santos. Segundo Rangel *et al.*, (1994) o arcabouço tectono-sedimentar da Bacia de Campos pode ser dividido por três megassequências distintas. Têm-se a Megassequência Continental associada à Fase Rift; a Megassequência Transicional associada ao início da Fase Drift e a Megassequência Marinha associada à Fase de Margem Passiva.



Figura 13: Seção sísmica da Bacia de Campos com a presença de uma almofada de sal

Fonte: Tectônica e Recursos Minerais do Brasil, CPRM (2003).

Na Figura 13 é possível observar a almofada de sal na seção sísmica da Bacia de Campos que está presente na Megassequência Transicional da bacia. Segundo Grassi *et al.*, (2004) a Megassequência Transicional inclui a parte superior da Formação Lagoa Feia, sendo composta principalmente por um espesso pacote de conglomerados e folhelhos avermelhados de idade aptiana na base e evaporitos do Neoaptiano no topo, marcando a passagem de ambientes continentais para marinhos.

Segundo Mohriak (2003), a tectônica de sal nas bacias marginais brasileiras é caracterizada por domínios tectônicos distintos ao longo da margem, com feições extensionais na plataforma e compressionais em águas profundas. Sendo assim, pode-se concluir que devido à tectônica gravitacional, têm-se as almofadas de sal nas partes proximais das bacias devido ao movimento horizontal do sal, enquanto nas partes distais das bacias sedimentares é comum a movimento vertical do sal, formando muralhas, diápiros, entre outros.

3.2) Modelo Multicamadas I e Modelo com Almofade de Sal

Agora serão apresentados os modelos sintéticos que foram modelados e processados através do *Seismic Unix*. Os modelos que serão apresentados a seguir são bem similares, algumas das características que coincidem nos dois é o mesmo comprimento de 6 km, e a mesma profundidade, de 2 km. Sendo assim, quase todas as camadas apresentam a mesma velocidade de onda P, e a geometria de aquisição que será mostrada abaixo, também foi a mesma para ambos.

Neste capítulo, dois modelos similares foram processados para que fosse possível observar mais didaticamente a diferença das respostas sísmicas entre eles. No Modelo Multicamadas I adotou-se uma velocidade de 2500 m/s na quarta camada e no Modelo com Almofada de Sal adotou-se a velocidade de 4472 m/s.

3.2.1) Modelo Multicamadas I

A Figura 14 é representativa do Modelo Multicamadas I, e as características da geometria de aquisição utilizada estão explicitadas abaixo:

- > 40 tiros (Posição dos Tiros: 2 km até 3.95 km)
- > O intervalo de espaçamento dos tiros utilizado foi de 50 metros
- > O arranjo de aquisição utilizado foi o Split-spread
- > 60 hidrofones e 50 metros de espaçamento entre eles
- O offset varia de -1475 m até 1475 m



Figura 14: Modelo Multicamadas I – Velocidades de Onda P – Modelo Isotrópico e Homogêneo

Com o modelo da Figura 14 e a aquisição mencionada acima foi possível gerar os *shot gathers*, fazer a ordenação CMP, e aplicar as outras técnicas de processamento que já foram mencionadas no escopo desse trabalho. Agora, será mostrada algumas das etapas utilizadas no processamento sísmico deste modelo geológico sintético. Posteriormente, será feita uma comparação entre o Modelo Multicamadas I e o Modelo com Almofada de Sal.



Figura 15: Primeiro Shot Gather do Modelo Multicamadas I



Figura 16: Último shot gather do Modelo Multicamadas I

Nas Figuras 15 e 16 é possível observar uma anomalia na terceira hipérbole. Fica claramente perceptível o deslocamento lateral e o comportamento anômalo que a terceira reflexão apresenta. Esse efeito ocorre porque o modelo tem uma protuberância central na quarta camada. Também é possível perceber que a última reflexão é mais atenuada que as primeiras. Este é um fator recorrente em levantamentos sísmicos reais que é a perda de energia da onda de acordo com a profundidade, segundo o conceito de divergência esférica.



Figura 17: Gráfico da cobertura dos CMP gathers do Modelo Multicamadas I



Figura 18: CMP gather 60 do Modelo Multicamadas I com 30 traços - Cobertura Completa

Na Figura 18 foi possível visualizar um CMP gather com cobertura completa. Através da análise da Figura 17 é possível saber quais CMP gathers apresentam boas coberturas e quais não apresentam. O intuito desta técnica (Cobertura) é obter os dados que vão melhor representar a geologia de subsuperfície.

Em levantamentos reais, a cobertura tem grande importância porque pode-se verificar qual ponto em subsuperfície será imageado com mais acurácia. No caso proposto, o objetivo foi a protuberância central do modelo da Figura 14, que pôde ser bem definida através da boa escolha da aquisição utilizada.



Figura 19: Análise de Velocidade realizada no CMP gather 60 do Modelo Multicamadas I

Após a ordenação CMP, é necessária a aplicação da Análise de Velocidade para que seja possível horizontalizar as reflexões na Correção NMO.

Através do Semblance da Figura 19 foi possível escolher os pontos com alta densidade de energia que são representados pelas regiões que estão com cores predominantemente vermelhas. No entanto, outro fator utilizado para a escolha dos pontos, aliado às zonas alta energia, é a utilização do CMP *gather* para correlacionar os tempos de *zero-offset* das reflexões com o *Semblance*. Os pontos escolhidos na Figura 19 são representativos das velocidades corretas que vão ser utilizadas para horizontalização das hipérboles na Correção NMO.



Figura 21: Modelo Multicamadas I empilhado no formato Wiggle





Figura 22: Modelo Multicamadas I empilhado no formato Grayscale

Na Figura 20 é possível a visualização do CMP *gather* 60 horizontalizado pela correção NMO. Em seguida, temos o Modelo Multicamadas I empilhado no formato *wiggle* na Figura 21, e no formato *grayscale* na Figura 22.

No topo da sísmica empilhada na Figura 22 é possível perceber as laterais que não foram bem imageadas. Este efeito ocorre devido a aquisição utilizada e os primeiros e os últimos CMP *gathers* não apresentarem boas coberturas. Como só foram utilizados os CMPs com cobertura completa na Análise de Velocidade, os que não apresentavam boas coberturas foram descartados. Por esse motivo, as bordas desse modelo não foram bem imageadas.

3.2.2) Modelo com Almofada de Sal

Agora será apresentado o Modelo com Almofada de Sal que tem poucas diferenças em relação ao Modelo Multicamadas I. Ambos possuem o mesmo número de camadas, e utilizou-se a mesma geometria de aquisição para ambos. Foram realizadas as mesmas técnicas de processamento. Porém, neste item não será explicitado o passo-a-passo do processamento do Modelo com Almofada de Sal como foi realizado anteriormente.

Na Figura 23, o modelo geológico é apresentado com as alterações que foram realizadas; como o aumento de espessura da quarta camada e o seu respectivo aumento de velocidade. Em seguida, será apresentado o modelo empilhado e serão feitas comparações entre os resultados das respostas sísmicas empilhadas do Modelo Multicamadas I e do Modelo com Almofada de Sal.



Figura 23: Modelo com Almofada de Sal - Velocidades de Onda P - Modelo Isotrópico e Homogêneo



Figura 24: Primeiro e último Shot gathers do Modelo com Almofada de Sal



Figura 26: Modelo com Almofada de Sal empilhado no formato Wiggle



Figura 27: Modelo Multicamadas I empilhado no formato Grayscale



Figura 28: Modelo com Almofada de Sal empilhado no formato Grayscale

Na Figura 24 é possível observar o primeiro e o último *shot gathers* do modelo geológico da Figura 23. As Figuras 25, 26, 27 e 28 servem como uma visão geral das respostas sísmicas. A Figura 29 é uma demonstração mais didática do efeito de *pull-up*.

Analisando e comparando as respostas sísmicas empilhadas tanto no modo *wiggle* quanto no modo *grayscale* é perceptível o efeito de *pull-up* na resposta sísmica do Modelo com Almofada de Sal. O *pull-up* se faz presente com uma subida relevante da camada sotoposta à camada de sal na resposta sísmica. Dessa forma, a resposta sísmica não representa a geologia do modelo porque a última camada no modelo geológico se apresenta reta e não com uma elevação central como as Figuras 23 e 28 demonstram.



Figura 29: Efeito de pull-up.

Graças a comparação dos Modelo Multicamadas I e o Modelo com Almofada de Sal foi possível constatar que o *pull-up* ocorre devido à alta velocidade de onda P que a camada geológica no segundo modelo assumiu.

O efeito de *pull-up* em respostas sísmicas reais também ocorre, como é possível observar na Figura 30. A Figura 30 apresenta a resposta sísmica de uma bacia sedimentar localizada no Estado de Louisiana, no EUA. É possível observar na seção sísmica da Figura 30 uma subida relevante das camadas sotopostas à estrutura evaporítica presente na bacia.

Observando as Figuras 29 e 30 percebe-se o que ocorreu no modelo sintético também acontece em respostas sísmicas reais.



Figura 30: Efeito de Pull-up na seção sísmica de uma bacia sedimentar localizada em Louisiana, EUA.

Fonte: http://homepage.ufp.pt/biblioteca/Seismic/Pages/Page15.htm

Concluiu-se que o *pull-up* se fez presente nas seções sísmicas reais e nas respostas sísmicas sintéticas devido às altas velocidades que as ondas P assumiram nas estruturas evaporíticas.

Foi possível observar no trabalho de conclusão de curso de Ferreira (2012) o sucesso na utilização da Migração Kirchhoff pós e pré-empilhamento em tempo para correção de efeitos de *pull-up* e *pull-down* em seções sísmicas reais da Bacia do Amazonas.

3.3) Resultados e Discussões do Capítulo

Através deste Capítulo foi possível observar os seguintes resultados a respeito das observações, análises e comparações do Efeito de *Pull-up* e os aspectos geológicos demonstrados:

- A utilização de dois modelos geológicos para demonstrar mais didaticamente o efeito de *pull-up* nas respostas sísmicas foi de grande valia. Graças a utilização desses dois modelos foi possível observar a diferença das respostas sísmicas devido a variação de velocidade de onda P; Vide: Figuras 25, 26, 27, 28 e 29.
- O modelo geológico sintético com Almofada de Sal conseguiu representar bem uma realidade geológica que pode ser observada na seção sísmica da Bacia de Campos; Vide: Figuras 13 e 14.
- O efeito de *pull-up* da resposta sísmica do modelo geológico sintético com almofada de sal apresentou similaridades com a seção sísmica da bacia sedimentar do Estado de Louisiana no EUA; Vide: Figuras 27, 28, 29 e 30.

4) Análises das Respostas Sísmicas Sintéticas de Diferentes Hipóteses Geológicas – Estudos de Caso: Campo de Marlim – Bacia de Campos e Bacia de Sergipe - Alagoas

Neste capítulo através de um único modelo geológico sintético será possível considerar 3 hipóteses geológicas distintas variando-se a velocidade de onda P. Serão considerados as seguintes hipóteses geológicas: Depósito Turbidítico (Trapa Estratigráfica), Depósito Evaporítico e Depósito com Derrame Basáltico.

No item 4.1 deste capítulo será apresentada uma seção sísmica da Bacia de Campos onde está localizado o Campo de Marlim. Esta seção sísmica será comparada com o modelo geológico sintético supondo a hipótese de um depósito turbidítico associado a uma trapa estratigráfica. Sendo assim, serão realizadas análises e observações entre a resposta sísmica sintética e a seção sísmica real a respeito do contexto geológico.

No item seguinte (4.2) serão realizadas análises, observações e comparações entre as respostas sísmicas dos modelos sintéticos supondo as hipóteses com depósito evaporítico e depósito com derrame basáltico.

No final será feita a descrição dos resultados alcançados através das análises, comparações e observações que foram obtidas durante este capítulo.

4.1) Campo de Marlim na Bacia de Campos

A Bacia de Campos está localizada no Sudeste do Brasil, e se limita a norte com a Bacia do Espírito Santo, e a sul, pela Bacia de Santos. Segundo Rangel *et al.*, (1994) o arcabouço tectono-sedimentar da Bacia de Campos pode ser dividido por três megassequências distintas. Têm-se a Megassequência Continental associada à Fase Rift; a Megassequência Transicional associada ao início da Fase Drift e a Megassequência Marinha associada à Fase de Margem Passiva.



Figura 31: Seção Sísmica do Campo de Marlim, Bacia de Campos (mod. De Cândico e Corá, 1990)

Fonte: Tectônica e Recursos Minerais do Brasil, CPRM (2003)

Na Figura 31 é possível observar a seção sísmica interpretada com uma almofada de sal a oeste e o Campo de Marlim a Leste. Segundo Milani e Araújo (2003): O reservatório de Marlim consiste em uma série de lobos submarinos coalescentes, não-confinados, resultando em um vasto corpo arenoso maciço e relativamente homogêneo que abriga petróleo de densidade entre 17° e 21° API.

4.1.1) Comparação da Seção Sísmica do Campo de Marlim com a Resposta Sísmica do Modelo Geológico com Depósito Turbidítico

Neste item será demonstrado nas Figuras 32 e 33, o Modelo geológico sintético com depósito turbidítico e a sua respectiva resposta sísmica. Posteriormente serão feitas comparações entre a seção sísmica real na Figura 31 da Bacia de Campos onde está presente o Campo de Marlim e a resposta sísmica sintética da Figura 33.



Figura 32: Modelo com Depósito Turbidítico (Trapa Estratigráfica) – Velocidades das camadas: 1508 m/s (água), 1581 m/s, 1826 m/s (Depósito Turbidítico), 2236 m/s (Velocidades de Onda P) – Modelo Isotrópico e Homogêneo – (Forel *et al.*, 2005)



Figura 33: Modelo Empilhado com Depósito Turbidítico – Estrutura geológica lateral com velocidade de 1826 m/s – Obteve-se boa resposta sísmica em relação ao modelo geológico proposto.

O modelo geológico que contém o depósito turbidítico é apresentado na Figura 32. O depósito turbidítico é representado pela estrutura sedimentar que está na parte Leste do modelo geológico. É facilmente perceptível o afinamento lateral da estrutura sedimentar representativa do depósito turbidítico para oeste na resposta sísmica, o que nos faz lembrar da seção sísmica real da Figura 31 que demonstra o Campo de Marlim.

Segundo Milani e Araújo (2003): O Campo de Marlim foi trapeado estratigraficamente no sentido oeste, norte e sul, dado pelo *pinch out* dos reservatórios contra os folhelhos que envolvem o depósito arenoso como é possível observar na Figura 31 no item 4.1.

Assim como foi possível observar o trapeamento estratigráfico do campo de Marlim, pode-se observar também um trapeamento estratigráfico na resposta sísmica sintética apresentada. Concluindo dessa forma, a similaridade entre a reposta sísmica sintética com a resposta sísmica de um contexto geológico real. Para uma melhor ilustração dessa similaridade, pode-se observar as Figuras 34 e 35:



Figura 34: Aproximação do Campo de Marlim da Figura 31



Figura 35: Aproximação do Depósito Turbidítico da resposta sísmica sintética da Figura 33

4.2) Análises e Comparações dos Modelos Geológicos Sintéticos com Depósito Evaporítico e com Derrame Basáltico

Agora será realizada a comparação entre 2 modelos que são muito similares, a única diferença entre eles é a variação da velocidade de onda P na estrutura lateral do modelo geológico.

Neste item, só será apresentado um modelo geológico, dispensando a necessidade de botar dois modelos sabendo que a única diferença de um para o outro é a velocidade da estrutura sedimentar lateral a leste. As velocidades utilizadas nas estruturas geológicas dos modelos foram as seguintes: 4500 m/s e 5500 m/s.



Figura 36: Modelo Base para Ilustração das Hipóteses Geológicas – Velocidades das camadas: 1508 m/s (água), 1581 m/s, 4500 m/s (Velocidade da estrutura geológica lateral que será alterada), 2236 m/s (Velocidades de Onda P) – Modelo Isotrópico e Homogêneo – (Forel *et al.*, 2005)

Como é possível observar no modelo geológico na Figura 36, têm-se uma estrutura lateral da qual foi possível variar sua velocidade. A primeira resposta sísmica empilhada que será mostrada foi adotando uma velocidade de 4500 m/s (Depósito Evaporítico), a segunda resposta sísmica será para uma velocidade 5500 m/s (Depósito com Derrame Basáltico).

Na bacia do Paraná têm-se a Formação Serra Geral, um derrame basáltico de grandes proporções, que está associado à abertura do Oceano Atlântico Sul no Neocomiano. Segundo Milani (2003), mais de 100 milhões de



anos já se passaram e ³⁄₄ dessa estrutura ígnea permanecem na bacia mesmo com todos os processos erosivos que ocorreram desde o Mesozóico

Figura 37: Modelo Empilhado com Depósito Evaporítico – Estrutura geológica lateral com velocidade de 4500 m/s – Não obteve-se uma representação fidedigna do modelo geológico proposto, não imageando de forma fiel o depósito evaporítico e gerando ondulações na camada basal.



Figura 38: Modelo empilhado com Derrame Basáltico – Estrutura geológica lateral com velocidade de 5500 m/s - Novamente, não obteve-se um bom imageamento da estrutura ígnea proposta, não representando fielmente o modelo geológico proposto – Grande semelhança das respostas sísmicas das Figuras 37 e 38.

Nas figuras 37 e 38 fica clara a semelhança entre as respostas sísmicas devido à similaridade da velocidade de onda P. Na primeira resposta sísmica, a onda P assume uma velocidade de 4500 m/s, não sendo possível obter uma visualização com detalhes e fidelidade do depósito evaporítico representado no modelo geológico da Figura 36.

As respostas sísmicas das Figura 37 e 38 não só ficaram mal imageadas como também foi possível afetar a camada basal de ambas as repostas sísmicas devido às altas velocidade de onda P utilizadas. Se compararmos as respostas sísmicas das Figuras 37 e 38 com a resposta sísmica da Figura 33 do item 4.1 fica clara a diferença que é ocasionada devido a variação de velocidade de onda P.

É perceptível quase nenhuma diferença entre a resposta sísmica do modelo geológico com velocidade de 4500 m/s (Depósito Evaporítico) e a resposta sísmica do modelo geológico com a velocidade de onda P de 5500 m/s (Derrame Basáltico). Este efeito ocorre devido à proximidade das velocidades de onda acústica P que foram adotadas nos modelos geológicos.

Pôde ser constatado nas Figuras 37 e 38 uma ambiguidade das respostas sísmicas. Trazendo essa ambiguidade para o aspecto geológico, em seções sísmicas reais há uma certa dificuldade na interpretação sísmica de identificar estruturas ígneas e evaporíticas quando ambas estão muito próximas.

Na Bacia de Sergipe-Alagoas, na Margem Sudeste Brasileira, no segmento transversal, segundo Pontes *et al.*, (1991) e Mohriak (1995b) é possível encontrar: Intrusões ígneas em águas profundas com altos vulcânicos associados, assim como feições diapíricas que podem estar relacionadas à tectônica de sal.

4.3) Resultados e Discussões do Capítulo

Através deste capítulo foi possível obter os seguintes resultados a respeito das observações, análises e comparações que foram realizadas:

- Foi possível através da resposta sísmica do modelo geológico sintético com depósito turbidítico alcançar similaridades com seção sísmica real da Bacia de Campos onde está presente o Campo de Marlim; Vide: Figuras 31,32, 33, 34 e 35.
- Através da variação da Onda P nos modelos geológicos com Depósito Evaporítico e com Derrame Basáltico foi possível perceber a similaridade das respostas sísmicas dessas duas estruturas devido à proximidade da velocidade de onda P que elas apresentam; Vide: Figuras 37 e 38.
- Sabendo-se da ambiguidade que é encontrada em respostas sísmicas com estruturas evaporíticas e ígneas próximas, pode-se citar o exemplo da Bacia de Sergipe-Alagoas, onde essas estruturas se fazem presentes em águas profundas e podem gerar problemas na interpretação devido às suas similares respostas sísmicas.

5) Análise do Efeito de *Pull-up* em um Modelo Geológico Sintético com Banco de Carbonatos – Estudo de Caso: Bacia do Espírito Santo

O objetivo deste capítulo é muito similar ao do Capítulo 3, uma das diferenças é que agora será observado o efeito de *pull-up* através de um modelo com um banco de carbonatos enquanto anteriormente foi observado o mesmo efeito em um Modelo com Almofada de Sal.

A principal proposta deste capítulo continua sendo a realização de comparações, análises e observações do efeito de *pull-up* na resposta sísmica que foi obtida através do Modelo Geológico com Banco de Carbonatos.

Neste capítulo, no item 5.1, será apresentada uma seção sísmica da Bacia do Espírito Santo com a presença marcante dos bancos de carbonatos albianos. O motivo pelo qual essa seção sísmica está sendo demonstrada e discriminada é de apresentar a ilustração de bancos de carbonatos em contextos geológicos reais. Sendo assim, demonstrar a similaridade da estrutura geológica do modelo sintético com o que pode ser encontrado em subsuperfície em contextos geológicos reais.

No item 5.2 deste capítulo serão apresentados o Modelo Geológico Sintético com Banco de Carbonatos e a sua respectiva resposta sísmica com a presença do efeito de *pull-up*. Dessa forma, serão realizadas comparações do efeito de *pull-up* em uma seção sísmica real de uma bacia sedimentar situada na Indonésia com a resposta sísmicas sintética do modelo geológico proposto.

No final será feita a descrição dos resultados obtidos a respeito das análises, observações e comparações que foram alcançadas durante este capítulo.

5.1) Banco de Carbonatos na Bacia do Espírito Santo

A Bacia do Espírito Santo está localizada na Margem Sudeste Brasileira, e se limita a norte com a Bacia de Cumuruxatiba, e a sul, com a Bacia de Campos. Segundo Biassusi *et al.*, (1990) e Vieira *et al.*, (1994) a evolução tectono-sedimentar da bacia está associada a três megassequências deposicionais. Têm-se a Megassequência Continental associada à Fase Rift; a Megassequência Transicional associada ao início da Fase Drift e a Megassequência Marinha associada à Fase de Margem Passiva.



Figura 39: Seção sísmica da Bacia do Espírito Santo com a presença do Banco de Carbonatos Albianos.

Fonte: Tectônica e Recursos Minerais do Brasil, CPRM (2003).

Na Figura 39 é claramente perceptível os bancos de carbonatos albianos delimitados pela cor azul escuro na seção sísmica da bacia do Espírito Santo. Esses carbonatos foram formados quando a Megassequência Marinha, na Fase Drift, foi depositada. Segundo Cainelli e Mohriak (1998), a Megassequência Marinha pode ser dividida em duas super-sequências, uma transgressiva e outra

regressiva. Sendo assim, essa plataforma carbonática foi formada na supersequência transgressiva.

França e Tokukake (2004) afirmam, que na Fase Drift, no albiano; o domínio marinho foi se impondo cada vez mais, evidenciado por um aumento gradativo da espessura dos carbonatos até seu completo domínio, com a implantação de uma plataforma carbonática, onde predominam calcarenitos de alta energia.

5.2) Modelo com Banco de Carbonatos

No item anterior foi possível realizar a apresentação da Bacia do Espírito Santo e o contexto geológico do banco de carbonatos presente na Megassequência Marinha da Fase Drift da Bacia.

Agora será apresentado o Modelo Geológico sintético que foi modelado e processado através do Seismic Unix. Este modelo apresenta 10 km de largura e 4 km de profundidade.

Na Figura 40 é representado o Modelo com Banco de Carbonatos e será possível observar novamente o efeito de *pull-up* na resposta sísmica desse modelo. Assim como foi possível observar anteriormente o efeito de *pull-up* na resposta sísmica do Modelo com Almofada de Sal na Figura 29.

Este modelo foi gerado a partir de uma aquisição de 170 tiros e processado com o processamento sísmico convencional, seu modelo geológico e sua resposta sísmica serão analisados nas Figuras 40 e 41 respectivamente:



Figura 40: Modelo com Banco de Carbonatos – Velocidades das camadas: 1508 m/s (água), 1666 m/s, 1767 m/s, 1643 m/s, 4100 m/s (Banco de Carbonatos) e 3015 m/s - (Velocidades de Onda P) – Modelo Isotrópico e Homogêneo - Fonte: <u>www.ensiklopediseismik.blogspot.com.br</u>

Foi possível observar na Figura 40, além do banco de carbonatos presente na quinta camada do modelo geológico, o afinamento lateral das camadas superiores para leste. Foi adotada uma velocidade de aproximadamente 4100 m/s para o banco de carbonatos.

Na Figura 41, têm-se a resposta sísmica do modelo geológico que foi explicitado acima na Figura 40 com algumas considerações que devem ser feitas nos aspectos geológicos.



Figura 41: Resposta sísmica do modelo geológico da Figura 40 empilhado – Observa-se certa fidelidade nas camadas superiores excetuando-se a proximidade demasiada das camadas sedimentares que se encontram na parte leste do modelo.

Na resposta sísmica da Figura 41 é perceptível o bom imageamento das primeiras camadas que estão presentes no modelo geológico exceto uma aproximação demasiada que foi feita nas camadas na parte leste do modelo.

No modelo geológico apresentado na Figura 40, abaixo do banco de carbonatos têm-se uma camada horizontal que em um registro fidedigno deveria apresentar-se horizontal. Mas, como foi possível perceber na resposta sísmica, é como se essa camada simplesmente não existisse.

Se esse mesmo modelo fosse processado com uma velocidade menor na quinta camada que neste capítulo está sendo representada pelo banco de carbonatos o efeito de *pull-up* não ocorreria. Sendo assim, a resposta sísmica seria mais fidedigna ao modelo geológico e não apresentaria o efeito de *pull-up* que foi possível observar na Figura 41.

Apesar deste capítulo não apresentar mais de um modelo para uma melhor ilustração do efeito de *pull-up* como foi possível observar no capítulo 3, a resposta sísmica da Figura 41 deixa claro como a camada sotoposta ao banco de carbonatos foi afetada devido à alta velocidade da onda P na quinta camada.

Na Figura 42 é possível a visualização de um tímido efeito de *pull-up* em uma bacia sedimentar localizada na Indonésia associada a bancos carbonáticos.



Figura 42: Efeito de *Pull-up* em uma seção sísmica de uma bacia sedimentar localizada na Indonésia.

Fonte: http://homepage.ufp.pt/biblioteca/Seismic/Pages/Page15.htm

No Capítulo 3, foi possível observar na Figura 30 o efeito de *pull-up* muito mais presente devido ao corpo salino do que na Figura 42 associado ao banco de carbonatos. Dessa forma, percebe-se as diferentes situações e contextos geológicos que esse efeito pode ocorrer tanto para estruturas evaporíticas, quanto para estruturas carbonáticas. Segundo Eiras e Filho (2002), o efeito de *pull-up* também ocorre em estruturas ígneas.

Através dos Capítulos 3 e 5 foi possível perceber como o *pull-up* se faz presente em contextos geológicos reais. Pode-se imaginar os danos e prejuízos que este efeito pode causar para interpretação das seções sísmicas caso não sejam corrigidos. Segundo Eiras e Filho (2002), diques, soleiras de diabásio e derrames de basalto deterioram a qualidade das seções sísmicas porque causam perda do sinal, formação de múltiplas e divergência esférica, e podem prejudicar a interpretação dos dados pela formação de falsas estruturas devido ao efeito de *pull-up*.

Foi possível observar no trabalho de conclusão de curso de Ferreira (2012) o sucesso na utilização da Migração Kirchhoff pós e pré-empilhamento em tempo para correção de efeitos de *pull-up* e *pull-down* em seções sísmicas reais da Bacia do Amazonas.

5.3) Resultados e Discussões do Capítulo

Através deste capítulo foi possível obter os seguintes resultados a respeito das observações, análises e comparações do efeito de *pull-up* e os aspectos geológicos demonstrados:

- Através da resposta sintética do Modelo Geológico com Banco de Carbonatos foi possível observar claramente o efeito de *pull-up*. No entanto, se o Banco de Carbonatos do modelo geológico apresentasse uma velocidade bem abaixo de 4100 m/s, não ocorreria o *pull-up*. Mais uma vez comprovando-se que este efeito ocorre devido às altas velocidades que as ondas P assumem nas camadas geológicas em subsuperfície; Vide: Figuras 40 e 41.
- O Modelo Geológico Sintético com Banco de Carbonatos conseguiu representar bem uma realidade geológica que pode ser observada na seção sísmica da Bacia do Espírito Santo. O banco de carbonatos do modelo sintético apresenta uma similaridade muito grande com o formato do banco de carbonatos albiano da seção sísmica real da Bacia do Espírito Santo; Vide: Figuras 39 e 40.
- Mais uma vez comprovou-se o efeito de *pull-up* em bacias sedimentares reais, como foi possível observar o exemplo da Bacia Sedimentar da Indonésia. Demonstrando, que este efeito pode acontecer em diferentes contextos geológicos. Vide: Figuras 41 e 42.

6) Conclusões

Neste trabalho foram utilizados modelos geológicos simplistas para ilustração de realidades geológicas complexas. No entanto, foi possível adotar grandes variações de velocidades de onda P nas camadas dos modelos geológicos com geometrias não triviais e obter respostas sísmicas sintéticas coerentes com seções sísmicas reais.

Diversas limitações foram encontradas devido a simplicidade dos modelos geológicos utilizados. Entretanto, foi possível encontrar ótimas conclusões a respeito das análises e comparações das respostas sísmicas sintéticas obtidas com a variação das velocidades de onda P. Além disso, obteve-se ótimos resultados nas comparações das respostas sísmicas sintéticas com seções sísmicas reais.

As respostas sísmicas obtidas através da variação única e particular desse parâmetro (Velocidade de Onda P) em modelos isotrópicos e homogêneos simplistas, nos remete a pensar nas infinitas possibilidades que são encontradas em subsuperfície em situações reais. Em contextos geológicos reais, são considerados muito mais parâmetros, como densidade, onda S, entre outros, que são levados em conta. Mesmo assim, foi possível alcançar diversos resultados de qualidade com os modelos geológicos propostos, com as respostas sísmicas obtidas e as comparações realizadas.

Obter respostas sísmicas sintéticas consistentes e coerentes de modelos geológicos também sintéticos, mas tentando sempre a representação real de ambientes e estruturas sedimentares já estudados pela indústria e academia, é de suma importância para o estudante de graduação e pós-graduação. Sabendo-se de tais resultados é possível ampliar o entendimento a respeito das respostas sísmicas que são geradas através de estruturas geológicas reais.

Todos os resultados obtidos neste trabalho através das respostas sísmicas foram coerentes e consistentes com o que é e foi encontrado e já estudado pela indústria e pela academia há bastante tempo, como por exemplo:

- Pode-se citar a atenuação das ondas sísmicas de acordo com a profundidade de penetração da onda, entendendo-se que a onda se atenua e dispersa com maiores profundidades de penetração. Sendo assim, o sinal captado não terá mais uma resolução tão boa quanto se tem nos primeiros refletores; Vide: Figuras 15, 16 e 24.
- Distorção das hipérboles nos CMP gathers devido as diferentes geometrias que as estruturas geológicas apresentam em subsuperfície; Vide: Figuras 15, 16 e 24.
- O efeito de *pull-up* tanto em seções sísmicas reais como em respostas sísmicas sintéticas, tanto para estruturas evaporíticas quanto para estruturas carbonáticas; Vide: Figuras 29, 30, 41 e 42.
- O não imageamento total de subsuperfície, principalmente das bordas superiores dos modelos, devido à escolha dos melhores CMP gathers na técnica de cobertura para serem utilizados nas técnicas de Análise de Velocidade e Correção NMO; Vide: Figuras 27, 28, 37 e 38.
- O aspecto ambíguo que é gerado devido à proximidade das velocidades de onda P de estruturas ígneas e evaporíticas quando interpreta-se seções sísmicas onde essas estruturas sedimentares se fazem presentes; Vide: Figuras 37 e 38.

7) Referências Bibliográficas

FOREL, David; BENZ, Thomas; PENNINGTON, Wayne. Seismic Data Processing with Seismic Unix, Michigan Technological University, 2005.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **Geofísica de Exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

YILMAZ, O. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data: 2nd (Second) Edition. 2001.

CARMINATTI, M.; WOLFF; GAMBOA L.A.P. New exploratory frontiers in **Brazil.** In: 19th World Petroleum Congress, Expanded Abstracts, 2008.

RANGEL, H. D.; MARTINS, F.A.L.; ESTEVES, F.R.; FEIJÓ, F.J. Bacia de Campos. Boletim de Geociências da Petrobras, 1994.

MILANI, Edison José.; ARAÚJO, Laury Medeiros de. **Tectônica e Recursos Minerais do Brasil.** CPRM, p. 565 – 566, 2003.

MOHRIAK, W.U. Elusive salt tectonics in the deep-water region of the Sergipe-Alagoas basin: evidence from deep seismic reflection profiles. In: SBGf, International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, p. 51 – 54, 1995b.

MOHRIAK, W.U. Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. CPRM, p. 155, 2003.

PONTES, C.E.S.; CASTRO, F.C.C.; RODRIGUES, J.J.G.; ALVES, R.R.P.; CASTELANNI, R.T.; SANTOS, S.F.; MONIS, M.B. **Reconhecimento Tectônico e Estratigráfico da Bacia de Sergipe-Alagoas em Águas Profundas.** In: SBGf, Congresso Brasileiro de Geofísica, 2, Salvador, BA, Boletim de Resumos Expandidos, 1991.

BIASSUSI, A.S.; MACIEL, A.A.; CARVALHO, R.S. Bacia do Espírito Santo: o "estado da arte" da exploração. Boletim de Geociências da Petrobras, 1990.

VIEIRA, R.A.B.; MENDES, M.P.; VIEIRA, P.E.; COSTA, L.A.R.; TAGLIARI, C.V.; BACELAR, L.A.P.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Espírito Santo e Mucuri. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, 1994.

CAINELLI, C.; MOHRIAK, W.U.; **Geology of Atlantic Eastern Brazilian Basins.** In: AAPG, International Conference & Exhibition Short Course – Brazilian Geology Part II, Rio de Janeiro, 1998.

FRANÇA, Rosilene Lamounier; TOKUTAKE, Lucio Riogi. **Bacias** Sedimentares Brasileiras – Bacia do Espírito Santo. Fundação Paleontológica Phoenix, Ano 6, Número 69, Setembro/2004.

FERREIRA, Daniel Galvão. Processamento de Dados Sísmicos Reais da Bacia do Amazonas utilizando as migrações de Kirchhoff pós e préempilhamento em tempo. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, 2012.

EIRAS, Jaime Fernandes; FILHO, Joaquim Ribeiro Wanderley. **Sistemas Petrolíferos Ígneos-Sedimentares.** 2° Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2002.

MIQUELES, Eduardo Xavier. **Modelamento Sísmico em Meios Analíticos.** 2006. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná, 2006.

YILMAZ, O. Seismic Data Processing. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists – SEG, 1987.

GADALLAH, M. R.; FISHER, R. L. Applied Seismology: A Comprehensive Guide to Seismic Theory and Application. p. 473.

DOURADO, João Carlos. Sísmica de Reflexão – Parte I. 2007. Notas de Aula.

GRASSI, Alexandre de Azevedo.; CASTRO, Alvaro Henrique Arouca de.; ALBERTÃO, Gilberto Athayde. **Bacias Sedimentares Brasileiras – Bacia de Campos.** Fundação Paleontológica Phoenix, Ano 6, Número 65, Maio/2004.

MILANI, Edison José. Bacias Sedimentares Brasileiras – Bacia do Paraná. Fundação Paleontológica Phoenix, Ano 7, Número 83, Novembro/2005.