



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ELIAS PEREIRA NASCIMENTO

MODELAGEM 3-D DE ESTRUTURAS GEOLÓGICAS COMPLEXAS

BELEM

2009



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ELIAS PEREIRA NASCIMENTO

MODELAGEM 3-D DE ESTRUTURAS GEOLÓGICAS COMPLEXAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Geofísica da Universidade Federal do
Pará, para obtenção do título de Graduado
em Geofísica.

Orientador: Dr. Pedro Chira Oliva

BELEM-PA
2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

Nascimento, Elias Pereira

N244m Modelagem 3-D de estruturas geológicas complexas /
Elias Pereira Nascimento. – 2009
60f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em
Geofísica) – Faculdade de Geofísica, Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Segundo
Semestre de 2008.

Orientador, Pedro Chira Oliva.

1. Modelagem geológica 3D. 2. Modelagem de estruturas
complexas. 3. Modelagem utilizando o GOCAD. I.
Universidade Federal do Pará. II. Chira Oliva, Pedro, Orient.
III. Título.

CDD 20º ed.: 551.801118

ELIAS PEREIRA NASCIMENTO

MODELAGEM 3-D DE ESTRUTURAS GEOLÓGICAS COMPLEXAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geofísica
do Instituto de Geociências da
Universidade Federal do Pará, em
cumprimento às exigências para
obtenção de grau de bacharel em
Geofísica.

Defendido e aprovado em: ____/____/____

Conceito: Bom

Banca examinadora:

Prof. Dr. Pedro Chira Oliva - Orientador
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. João Carlos Ribeiro Cruz - Membro
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Marcos Welby Correa Silva - Membro
Universidade Federal do Pará

Em memória aos meus pais, Raimundo Xavier
e Nazaré Nascimento.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido a vida e permitido que chegasse a esse momento depois de muita luta e perseverança.

A minha família por toda a ajuda e incentivo que recebi durante esses anos.

A Universidade Federal do Pará.

Ao professor Dr. Pedro Chira por toda a orientação e atenção no desenvolvimento deste trabalho e durante o período que passei em Bragança e pela ajuda financeira através da bolsa de estudos .

A Faculdade de Geofísica.

Ao projeto "Estudo dos habitats dos peixes no estuário do rio Caeté (Bragança-Pará), aprovado pelo Edital MCT/CNPq 15/2007 - Universal sobre a coordenação do professor Dr. Pedro Chira Oliva", que disponibilizou a utilização do software GOCAD e possibilitou a construção deste trabalho.

Ao consórcio GOCAD (França) pela utilização do software.

A Carla Patrícia minha amiga de todos os momentos, em tudo que preciso.

Aos amigos Herbert, Thiago Santa Rosa, Ana Carolina, Larissa, Roberta, Kivia e Benildes.

A todos os meus professores e amigos que construí durante esses anos.

RESUMO

Em áreas da subsuperfície a presença de estruturas geológicas complexas (e.g. falhas, dobras, diques, soleiras de diabásio, domos de sal, etc) reduz a qualidade do imageamento sísmico devido a falsas estruturas geradas. Isto dificulta o êxito na busca por petróleo e na recuperação de poços existentes. Novas tecnologias (e.g. modelagem e visualização) estão sendo cada vez mais utilizadas como ferramentas para incrementar a habilidade em encontrar novas reservas de hidrocarbonetos e melhorar a eficiência na exploração de gás e petróleo. Com os levantamentos sísmicos e estudos geofísicos completos, os geólogos constroem um geomodelo 3-D digital da subsuperfície para auxiliar na toma de decisões para desenvolver um campo de petróleo ou gás. A Geomodelagem é uma ferramenta vital para minimizar riscos na indústria do petróleo e gás. Na indústria do petróleo e gás os modelos 3-D em subsuperfície são cruciais para a toma de decisões e outros propósitos: verificar a consistência entre as estruturas geológicas, planejar a trajetória dos poços não verticais, monitorar os reservatórios (sísmica 4-D), construção de modelos de reservatórios, inversão sísmica e análise de velocidades. Neste trabalho foi usada a modelagem 3-D como uma ferramenta para modelar estruturas geológicas complexas. Os modelos correspondem a modelos 3-D simples e complexos. Os tipos de modelos foram: estrutural, estratigráfico e de velocidades. Imagens adicionais têm sido geradas para visualizar a estrutura interna das estruturas geológicas estudadas. Isto é muito importante para o estudo das propriedades petrofísicas e o fluxo de fluidos no interior dos reservatórios determinados.

ABSTRACT

In areas of the subsurface the presence of complex geological structures (e.g. faults, recumbent folds, dikes, diabase sills, salt domes, etc) reduces the seismic imaging quality due to false structures. This difficult the success of finding oil and recovering greater amount from existing wells. New technologies (e.g. modeling and visualization) are being more and more used as a tool to increase the ability to find new hydrocarbon reserves and improves the efficiency of oil and gas exploration. With the seismic surveys and geophysical studies complete, geologists build a digital 3-D geomodel of the subsurface to help decide whether to develop an oil or gas field. Geomodeling is a vital risk-minimizing tool. In the oil and gas industry 3-D earth models are crucial decision making and other purposes: to check the consistency between geological objects, to plan the path of non-vertical wells, to monitor the reservoir (4-D seismic), for the reservoir model construction, seismic inversion and velocity analysis. In this work was used the 3-D modeling as tool to modeling complex geological structures. The models correspond to complex and synthetic 3-D models. The types of models were: structural, stratigraphic and velocity. Additionally images had been generated to visualize the structure internal of the studied geological structures. That is very important for the study of the petrophysical properties and the fluid flow in the interior of one determined reservoir.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Os corpos rochosos tornam-se deformados, quando submetidos a forças de compressão, extensão e cisalhamento com orientação horizontal.....	15
Figura 2	Presença de fraturas nas rochas.....	16
Figura 3	Uma exposição de camadas de rochas, originalmente horizontais, dobradas por forças tectônicas compressivas.....	17
Figura 4	Elementos geométricos de uma dobra: anticlinal e sinclinal.....	18
Figura 5	Presença de falhas nas estruturas rochosas.....	19
Figura 6	Principais elementos geométricos das falhas.....	20
Figura 7	As falhas normais, reversas e horizontais	22
Figura 8	Fluxograma da construção do modelo estrutural 3-D.....	32
Figura 9	Fluxograma da construção do modelo estratigráfico. 3-D.....	34
Figura 10	Modelo estrutural 3-D correspondente ao modelo 1 (Figuras a até c) representam os horizontes do modelo com dobras.....	38
Figura 11	Modelo Estratigráfico 3-D correspondente ao modelo 1. É apresentada a estratigrafia correspondente as camada 2, 3, 4, 5 e 6. Figuras (a até d).....	39
Figura 12	Modelo de velocidades correspondente ao modelo 1. Visualização dos slices ou cortes feitos ao cubo de velocidades (a, b, c, d, e, f)...	40
Figura 13	Modelo estrutural 3-D correspondente ao modelo 2 (Figuras a até c). (a) e (b) representam os horizontes do modelo falhado (superfície amarela e vermelha). (c) Falha normal que interrompe os horizontes que limitam as camadas do modelo (superfície em azul).....	42
Figura 14	Modelo Estratigráfico 3-D correspondente ao modelo 2. É apresentada a estratigrafia correspondente à 2ª camada deslocada por falha normal planar (a até c).....	43
Figura 15	Modelo de velocidades correspondente ao modelo 2. Visualização dos slices ou cortes feitos ao cubo de velocidades (a até d).....	44

Figura 16	Modelo estrutural 3-D correspondente do modelo 3. São apresentados os horizontes (superfícies de cor verde e azul) interrompidos por uma falha inversa (superfície de cor azul claro) (Figuras a até c).....	46
Figura 17	Modelos Estratigráficos 3-D do modelo 3. É representada a camada intermediária interrompida pela falha reversa. Figuras c até f mostram características da estrutura interna da referida camada.....	47
Figura 18	Modelo de velocidades correspondente ao modelo 3 sendo (a) visualização externa, (b) e (c) visualização interna com cortes e seções.....	48
Figura 19	Modelo estrutural 3-D correspondente ao modelo 4. São mostradas as seqüências dos horizontes interrompidos pela falha normal (Figuras a até f).....	50
Figura 20	Modelo Estratigráfico 3-D do modelo 4. Estruturas que apresentam três camadas (branco, azul e vermelho) interrompidas por falha normal (Figuras a até c).....	51
Figura 21	Modelo de velocidades correspondente ao modelo 4. sendo: (a) visualização externa, (b) e (c) visualização interna.....	52
Figura 22	Diversos pontos de visualização do modelo estrutural correspondente ao modelo 5. São mostrados as seqüências dos horizontes interrompidas pelas falhas normais (Figuras a até f).....	54
Figura 23	Modelo Estratigráfico 3-D correspondente ao modelo 5. Estruturas apresentando camadas interrompidas pelas falhas normais. As Figuras (a até c) mostram uma visualização externa do modelo estratigráfico. As Figuras (d até i), mostram a visualização interna através de cortes e seções (slices).....	55
Figura 24	Modelo de velocidades correspondente ao modelo 5. É apresentada às visualizações externa (a) e interna através de cortes e seções (b até f).....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	13
2.1	PRINCIPIOS BASICOS DE GEOLGIA	13
2.1.1	Geologia estrutural	13
2.1.1.1	Deformação	13
2.1.1.2	Fraturas	16
2.1.1.3	Dobras	16
2.1.1.4	Falhas	18
2.1.2	Estratigrafia	24
2.1.2.1	Elementos da estratigrafia	25
2.2	MODELAGEM	27
2.2.1	Modelagem sísmica	27
2.2.3	Modelagem e visualização 3-D	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	MODELAGEM 3-D DE ESTRUTURAS GEOLOGICAS COMPLEXAS	30
3.2	MODELO GEOLÓGICO 3-D	31
3.2.1	Modelo estrutural 3-D	31
3.2.2	Modelo estratigráfico 3-D	32
3.3	MODELO GEOFÍSICO 3-D	34
3.3.1	Modelo de velocidade 3-D	35
4	RESULTADOS	37
4.1	MODELO 1	37
4.2	MODELO 2	41
4.3	MODELO 3	45
4.4	MODELO 4	49
4.5	MODELO 5	53
5	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS E PERSPECTIVAS	59

1 INTRODUÇÃO

Devido às reservas de petróleo no mundo se tornarem cada vez mais escassas, a indústria petrolífera enfrenta o desafio de aumentar o sucesso na procura por petróleo e na recuperação de poços existentes. Então, as novas tecnologias com a ajuda da realidade virtual estão sendo usadas como ferramentas para aumentar a habilidade de encontrar novas reservas de hidrocarbonetos e de melhorar a eficiência na exploração de petróleo e de gás. Entre essas ferramentas destacam-se a modelagem e visualização 3-D que facilita muitas fases do processo da interpretação. Os métodos práticos de visualização do volume 3-D foram desenvolvidos para direcionar problemas estruturais complexos da interpretação.

Existem dois tipos gerais de visualização: *superfície* e *volume*. A visualização de *Superfície* é a utilização das superfícies, ou de uma superfície baseada em objetos no espaço 3-D. A visualização do *Volume* é um processo de aplicar a opacidade (transparência) a um subconjunto de dados sísmicos 3-D sísmicos extraídos do volume geral para revelar suas características internas (KIDD e MONTILLA, 2003).

Os métodos de modelagem sísmica têm por objetivo produzir imagens ou volumes das regiões de interesse em subsuperfície, mapeando estruturas geológicas e estudando o comportamento físico mecânico destas estruturas através da aquisição dos dados relativos à área de estudo. Isto ajuda, por exemplo, a reduzir os riscos na interpretação e também contribui para gerar modelos de velocidades que possam ser utilizados no processamento sísmico.

Antunes et al. (2004) construíram modelos 3-D em algumas bacias sedimentares brasileiras. Os resultados foram passos fundamentais para o estudo mecânico e térmico do comportamento dessas bacias.

De Lima et al. (2005) modelaram e visualizaram o reservatório Mossoró (Natal-Brasil) a partir de dados obtidos a partir de algoritmos de percolação. Isto é importante no estudo da injeção alternativa de água e gás na recuperação de petróleo.

Chira Oliva et al. (2008) modelaram e visualizaram as soleiras de diabásio

presentes numa determinada área da bacia sedimentar paleozóica Amazonas. Eles construíram vários modelos (estrutural, estratigráfico e de velocidades) para entender e qualificar riscos associados à exploração e produção de hidrocarbonetos nas regiões onde existem diabásio.

Neste trabalho foram modeladas tridimensionalmente estruturas geológicas complexas, utilizando dados sintéticos simples e complexos que podem fazer parte de bacias sedimentares e de zonas que apresentam estruturas propícias para acumulação de hidrocarbonetos. Adicionalmente, foram geradas imagens para visualizar a estrutura interna das estruturas geológicas estudadas. Isto é muito importante para o estudo das propriedades petrofísicas e do fluxo do fluido no interior de um determinado reservatório.

Como resultados serão apresentados quatro modelos com estruturas geológicas complexas. O software utilizado para a geração destes modelos foi o GOCAD (*Geological Object Computer Aided Desing*). Todos os modelos são compostos por: um modelo estrutural, um modelo estratigráfico e por um modelo de velocidades. Esses modelos ajudam a compreender e qualificar riscos associados às regiões onde existem estruturas complexas.

Este trabalho compreende os seguintes capítulos:

- Capítulo 1: breve introdução sobre a modelagem e visualização e sobre o trabalho desenvolvido.
- Capítulo 2: apresentação de uma revisão teórica sobre conceitos básicos das principais estruturas geológicas que compõem os modelos deste trabalho. Também são tratados conceitos básicos referentes à modelagem.
- Capítulo 3: breve explicação sobre as etapas compreendidas na construção dos modelos geológicos e geofísicos.
- Capítulo 4: resultados obtidos com a construção dos modelos.
- Capítulo 5: conclusões e perspectivas referentes à modelagem 3-D.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Será apresentado neste capítulo uma revisão teórica sobre conceitos básicos das principais estruturas geológicas que podem ser encontradas na subsuperfície com destaque para as consideradas neste trabalho. Também são tratados conceitos básicos referentes à modelagem.

2.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE GEOLOGIA

Na construção de um modelo geológico (exemplo, estrutural e estratigráfico) devemos entender as principais estruturas que fazem parte de um determinado modelo. A geologia nos ajudará a determinar os princípios básicos para a construção dos modelos apresentados neste trabalho.

Entre alguns dos ramos da Geologia que ajudam a entender os conceitos básicos para a construção dos modelos geológicos destacam-se: a Geologia Estrutural e a Estratigrafia.

2.1.1 Geologia estrutural

A Geologia Estrutural descreve a geometria de estruturas geológicas e sua respectiva interpretação, a análise cinemática e a relação entre ambas (CAPUTO, 1990). Estuda a forma, atitude e o modo anatômico dos corpos rochosos na crosta terrestre que podem se apresentar segundo diversas configurações. Entre outras palavras, estuda a forma geométrica externa e interna dos corpos rochosos e suas estruturas (LOCZY e LADEIRA, 1980).

Entre os principais conceitos estruturais temos:

2.1.1.1 Deformação

Uma deformação é definida como uma alteração no pacote sedimentar como resultado das tensões que ultrapassa a resistência de um determinado

pacote sedimentar, na localização, orientação e forma.

As rochas, também se deformarão de diferentes modos, em função das suas propriedades físicas e da natureza das forças aplicadas.

As rochas sofrem deformações através do tempo geológico, isso é facilmente observado em rochas antes soterradas e que passaram a aflorar mostrando-se frágil, quebradiças e até mesmo friável. Podemos dizer que as rochas possuem características elásticas e plásticas capazes de possuir flexibilidade para se dobrarem sem romperem-se.

Analisando e investigando as massas rochosas vemos que a estrutura de cada cristal que compõem um determinado tipo de rocha avalia-se, mede-se a maneira com que ela se deforma sob os esforços de distensão ou tração, compressão, torção etc. (CAPUTO, 1990).

O estudo do comportamento dos materiais submetidos a esforços, deformações e fluxos de material é chamado de *reologia* e apresenta as seguintes condições físicas para o material:

- 1) pressão hidrostática/litoestática e temperatura, que dependem da profundidade de ocorrência da deformação.
- 2) Condições termodinâmicas.
- 3) esforços aplicados à rocha.

Nessas condições as deformações podem ser rúpteis ou dúcteis podendo ocorrer respectivamente, quebra ou descontinuidade (falhas) ou apenas deformações plásticas mantendo a continuidade (dobras).

Um corpo pode sofrer deformação elástica, isso ocorre quando um corpo sofre contrações ou resfriamento quando submetidos a esforços, porém quando esses esforços são retirados, o corpo torna a sua posição de original.

Se a deformação do corpo for restituída apenas parcialmente ou não restituir a deformação é dita plástica.

Entre os principais tipos de processos que conduzem à deformação dos corpos rochosos destacam-se:

Força

Força é a quantidade vetorial definida que produz uma mudança no movimento ou alteração nas dimensões ou na forma de um corpo. Para se conhecer a força é preciso determinar sua magnitude, direção e sentido. Esse

conceito é característico das rochas.

As forças tectônicas que deformam as rochas podem ser de três tipos: forças compressivas, que apertam e encurtam um corpo; forças extensionais, que alongam um corpo e tendem a segmentá-lo; e forças de cisalhamento, que empurram cada um dos dois lados de um corpo em direções opostas (PRESS et al., 2006, Figura 1).

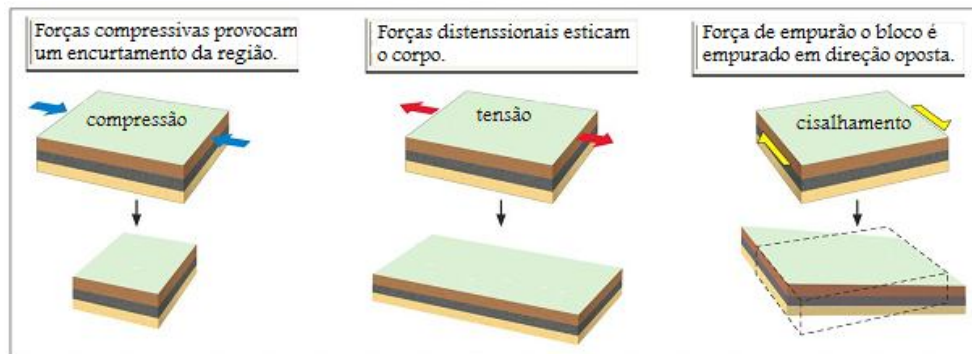


Figura 1 – Os corpos rochosos tornam-se deformados, quando submetidos a forças de compressão, extensão e cisalhamento com orientação horizontal

Fonte: adaptada de Press et al. (2006).

Tensão

A tensão é a força por unidade de área que tende a deformar um corpo em uma direção dada (LOCZY e LADEIRA, 1980).

Um corpo ao receber uma força externa manifesta uma reação oposta, através da força interna, esse corpo tende a manter ou restaurar a sua forma de origem. Dessa forma o corpo se encontra em um estado de tensão (LOCZY e LADEIRA, 1980).

Torção

É o resultado da aplicação de duas forças opostas, simultâneos em planos paralelos as extremidades de uma peça prismática ou cilíndrica.

Flexão

É uma curvatura ou argumento imposto a um corpo por solicitação de forças verticais, perpendiculares ao eixo ou a superfície desse corpo.

Flambagem

Quando um objeto, uma barra, por exemplo, sofre a ação de uma força P. Se essa força P aumenta atingindo o limite para o equilíbrio estável encurva-se e volta a ficar estável. A passagem da primeira forma estável para a segunda

forma estável é chamada de flambagem. Esse tipo de deformação é comum em dobras.

2.1.1.2 Fratura

Fratura é uma superfície de descontinuidade física das rochas em que não se verifica deslocamento dos dois lados da rocha como nas falhas (Figura 2).



Figura 2 - Presença de fraturas nas rochas
Fonte: adaptada de Press et al.(2006).

Em muitos casos as rochas rompem-se por meio de fraturas ou lascas paralelas a clivagem de fraturas e ao eixo de compressão. Essas fraturas podem ser de extensão ou alívio.

As fraturas podem ter origem tectônica, sendo a mais comum onde uma tensão origina planos quase ortogonais e origens associadas a outras fraturas.

2.1.1.3 Dobras

A dobra é uma feição estrutural de encurvamento de camadas ou bandas rochosas originadas por esforços tectônicos (Figura 3). Esta curva pode ser côncavo ou convexo em relação à linha do horizonte. Também se defini uma

dobra como uma deformação homogênea, no entanto, uma dobra poderá resultar da modificação através de uma deformação heterogênea.



Figura 3 – Uma exposição de camadas de rochas, originalmente horizontais, dobradas por forças tectônicas compressivas.

Fonte: adaptada de Press et al.(2006).

As geometrias fundamentais de uma dobra são: sinclinal e anticlinal (Figura 4):

- **Sinclinal:** dobra com convexidade para baixo, sendo conhecidas suas relações estratigráficas. As rochas mais novas encontram-se no seu núcleo
- **Anticlinal:** dobra com convexidade para cima, sendo conhecidas suas relações estratigráficas. As rochas mais antigas encontram-se no seu núcleo.

Uma dobra é caracterizada por uma geometria específica que contém vários elementos que a descrevem. As mudanças possíveis na geometria destes elementos podem mudar o estilo da dobra. Estes elementos são descritos abaixo:

- **Ponto de charneira:** onde a dobra atinge sua máxima curvatura,
- **Linha de charneira:** união dos diversos pontos de charneira,
- **Ponto de crista:** ponto mais alto da dobra em relação a uma

superfície horizontal,

- **Linha de crista:** união dos diversos pontos de crista,
- **Ponto de calha:** ponto mais baixo da dobra em relação a uma superfície horizontal,
- **Eixo:** linha geratriz da dobra, quando movimentada paralelamente à linha de charneira,
- **Plano ou Superfície Axial:** a superfície que une os pontos de charneira das dobras (CAPUTO, 1990).

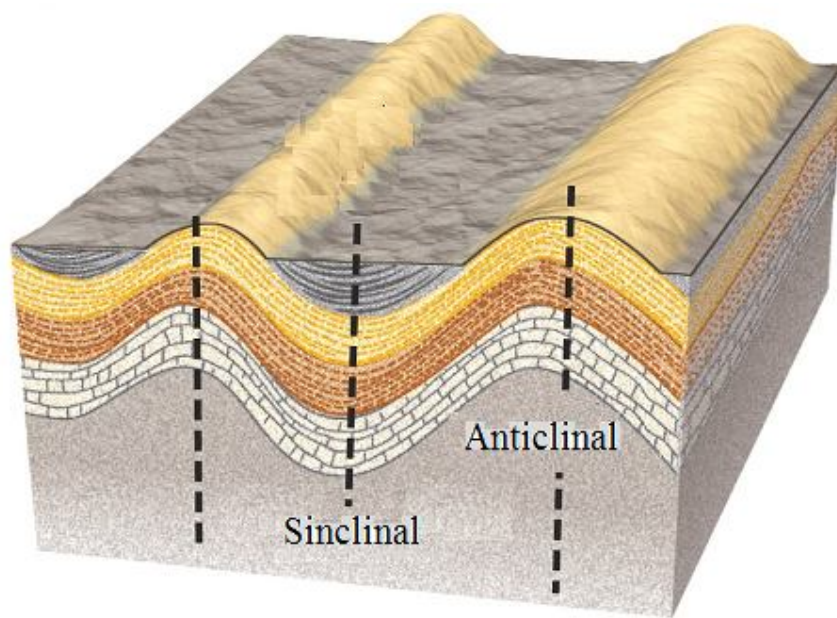


Figura 4- Elementos geométricos de uma dobra: anticlinal e sinclinal

Fonte: adaptada de Press et al. (2006).

2.1.1.4 Falhas

Uma falha é uma fratura com movimento relativo das rochas em ambos os lados paralelos à fratura (PRESS et al., 2006).

As falhas resultam de deformações rúpteis nas rochas da crosta terrestre. São expressas por superfícies descontínuas com deslocamento diferencialmente de poucos cm a dezenas e centenas de Km, sendo essa a ordem de grandeza para grandes falhas

Um falhamento é o processo geológico em que se produz uma

determinada falha (ex. falha de são Andrés, Califórnia, USA). As falhas são fraturas nas rochas, nas quais, ocorre deslocamento perceptível entre as partes (Figura 5). Várias são as causas que podem produzir falhas nas rochas e, de acordo com os processos, distinguimos dois grupos de causas: esforços atectônicos e por esforços tectônicos.

- *Esforços atectônicos*: são menos freqüentes, de menor amplitude e formam-se por desabamentos resultantes da dissolução de rochas de subsuperfície ou por colapso de rochas nas proximidades de cones vulcânicos; podem, também, resultarem da acomodação de camadas de sedimentos.
- *Esforços tectônicos*: são mais freqüentes e surgem principalmente pela ação da tensão resultante de movimentos epirogenéticos ou de dobramentos. Em alguns casos, podem surgir quando ocorrem intrusões magmáticas e, eventualmente, por compressão (geralmente tangencial à superfície da Terra) (CAPUTO, 1990).

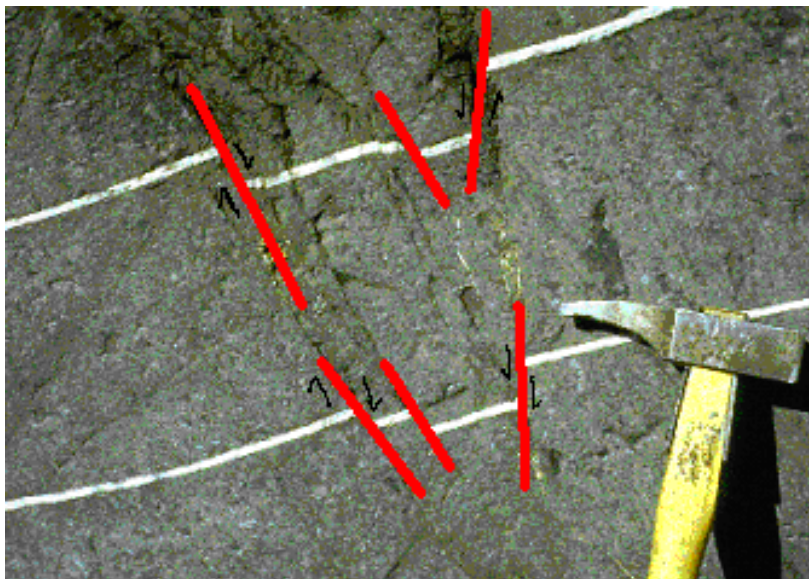


Figura 5 - Presença de falhas nas estruturas rochosas.

Fonte: adaptada de Caputo. (1990).

Classificação das falhas

As falhas são classificadas com base em elementos geométricos e mecânicos que formam as rochas.

Classificação geométrica

A posição no espaço de uma superfície de uma falha é fundamental para a sua classificação geométrica (Figura 6).

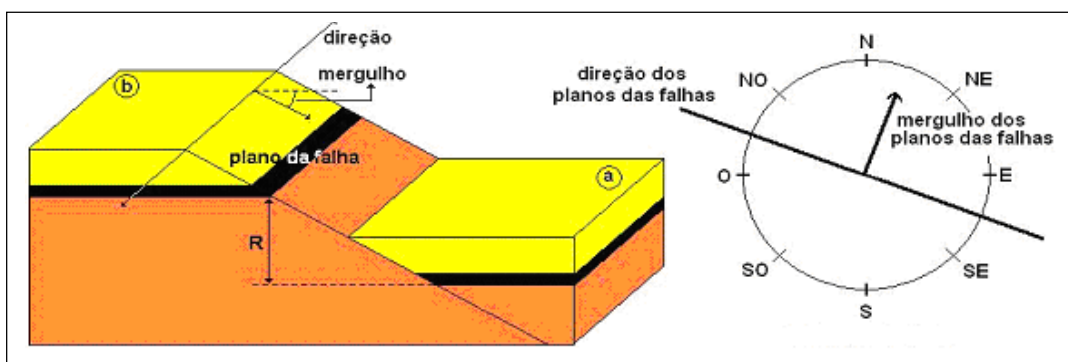


Figura 6 - Principais elementos geométricos das falhas.

Fonte: adaptada de Vallera. (2008).

Os principais elementos geométricos de uma falha são:

- **Plano da falha:** é o plano que melhor aproxima a superfície de fratura ao longo do qual ocorre deslocamento, superfície segundo a qual se dá o deslocamento relativo entre os blocos a e b (Figura 3).
- **Rejeito (R):** medida do deslocamento linear resultante do movimento, quando é possível, avaliar a direção e o mergulho do plano de falha, que ajudam na determinação das direções dos esforços que a geraram.

Além desses elementos podemos citar: os blocos de falhas: muro ou lapa e teto ou capa e escarpa.

- **A lapa** corresponde ao bloco que está abaixo do plano de falha, e a **capa** corresponde ao bloco situado acima. Permite-se classificar as falhas com base no seu movimento devido à existência de um nível de referência em ambos os blocos como será visto adiante.

- **A escarpa** é a parte exposta da falha na topografia.

A classificação geométrica também leva em consideração:

- **A direção** (strike) de uma camada: é a orientação em relação ao norte de uma linha resultante da interseção da superfície ou plano da camada com o plano horizontal imaginário. O *strike* é a direção perpendicular ao mergulho da falha (Figura 6).
- **O mergulho** (dip) de uma camada: é o ângulo diedro entre o plano da camada e um plano horizontal. É a superfície de fratura de rochas em que ocorre deslocamento relativo entre os dois blocos de um lado e de outro desta superfície que, muitas vezes, é plana (LOCZY e LADEIRA, 1980). O *dip* é o ângulo de declividade máxima de uma superfície em relação ao plano horizontal (Figura 6).

Essa classificação é simples e divide as falhas em dois grupos. Diz que a falha é de alto ângulo quando o mergulho do plano de falha é superior a 45° e falhas de baixo ângulo quando é inferior a 45°.

Uma falha é planar, podendo ser vertical ou inclinada, quando a variação da direção da superfície encontra-se próximo dos 5°.

As falhas curvas são denominadas falhas lítricas, que se relacionam a regimes distensivos. Variam de alto grau até baixo grau podendo se horizontalizar.

Classificação mecânica

Essa classificação considera o quadro de tensões que produz a falha e distingue três tipos: normal, reversa e transcorrente. Na falha normal o esforço principal é vertical enquanto que nas falhas reversas e transcorrentes é horizontal. A diferença está na orientação do esforço à direção da falha, enquanto na reversa ele é ortogonal, na transcorrente ele é oblíquo, com um ângulo inferior a 45° a direção da falha.

Principais tipos de falhas

Os três tipos de falhas que serão descritos correspondem aos sistemas de falhas mais encontradas na crosta terrestre. Cada um deles é caracterizado por sua orientação e movimento ao longo da superfície da falha e campo de tensões distensivos.

Na Figura 7 a seguir estão representadas as falhas do tipo normal, reversa (ou de empurrão) e horizontal (ou transcorrente). As setas indicam as direções dos movimentos relativos dos blocos.

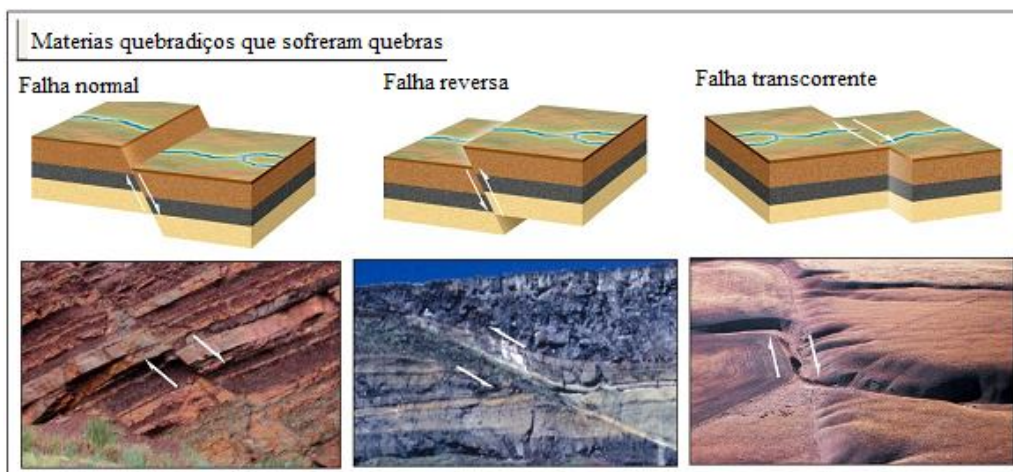


Figura 7 - As falhas normais, reversas e horizontais.
Fonte: adaptada de Press et al. (2006).

Falhas normais

Nas falhas normais, um dos blocos se abate na mesma direção na qual mergulha o plano da falha. Esse tipo de falha resulta de forças de tensão (tração) e, com elas, há uma tendência de aumento da superfície da crosta. Como há infinitas possibilidades de movimentos relativos entre os blocos, em Geologia trabalha-se apenas com o rejeito normal, isto é, medido na vertical (o único constatável no campo, de modo geral).

As falhas normais geralmente estão inseridas em zonas onde há alívios das tensões. Apresentam mergulhos, em geral, entre 30° e 70° e podem se estender na profundidade até 15 km e adentrar no domínio dúctil, onde se tornam mais largas. Geometricamente podem se encurvar, até uma falha única onde se caracteriza a zona de descolamento. A existência de um sistema normal pode ser explicada pela reativação de zonas de fraqueza pré-existent.

Falhas normais geralmente ocorrem em locais onde a litosfera está estirada ou afinada. São as principais componentes estruturais de muitas das bacias riftes, onde possuem maior significado para a exploração de

hidrocarbonetos, também podem ocorrer em deltas, em porções das cadeias onde há grandes escorregamentos (RAJA GABRIGA, 1990). Por esse fato a falha normal se torna importante no estudo de modelagem de estruturas geológicas complexas.

Com o desenvolvimento de uma série de falhas normais há desenvolvimento de estruturas geológicas associadas como bacias sedimentares de pequeno e grande porte, por exemplo, através de riftes, onde a sedimentação é variada em termos composicionais.

Falhas reversas

Nas falhas reversas ou de empurrão, um bloco é empurrado por sobre o outro, cavalcando-o. Esse tipo de falha é resultante de esforços de compressão e, com ela, há uma tendência de diminuição da área da crosta.

Empurrões e cavalgamentos são definidos por superposição vertical de duas séries de estratos cuja sucessão não é normal. Portanto há contato inverso, onde estratos mais novos podem recobrir os mais antigos ou um horizonte de um estrato qualquer pode estar justaposto a si mesmo.

No caso de rochas sedimentares se tratará de uma sucessão que não se encontra conforme as leis da estratigrafia: a série superior está formada por rochas mais antigas que a série inferior. No caso de rochas cristalinas, como o diagnóstico é mais difícil já que a sucessão normal dos tipos de rochas é complexa, depende freqüentemente das hipóteses existentes a respeito de sua gênese.

Em função de o teto deslocar-se, em movimento relativo para cima do muro, a maior parte das falhas mostra rochas mais velhas sobre as mais novas (CAPUTO, 1990).

Falhas transcorrentes ou horizontais

Nas falhas horizontais ou transcorrentes, o deslocamento relativo dos blocos ocorre na horizontal, não havendo rejeito normal.

Alguns autores consideram as falhas transcorrentes com uma ramificação

das falhas direcionais.

As falhas transcorrentes caracterizam-se por ter o componente principal de deslocamento segundo a direção do plano de falha, com a movimentação entre os blocos adjacentes sendo essencialmente horizontal com mergulho do plano de falha vertical e subvertical, possuindo rejeito em falhas maiores cerca de dezenas a centenas de Km.

Outra característica das falhas transcorrentes é a possibilidade de servirem de descontinuidade para novos movimentos, causados por outros esforços semelhantes ou diferentes dos originais, fazendo com que se reative. Esta reativação pode ocorrer com mudanças ou não no tipo de movimento da falha. Assim, falhas originalmente transcorrentes podem ser reativadas tectonicamente como falhas normais, com abatimento de blocos associados. (TEIXEIRA et al., 2000).

2.1.2. Estratigrafia

A estratigrafia estuda a gênese, a sucessão, no tempo e no espaço, e a representatividade lateral e vertical das camadas e seqüências de rochas de uma região ou local, buscando-se determinar os eventos, processos e ambientes geológicos associados, o que inclui, entre outros, a determinação de fases de erosão ou de ausências de deposição.

A estratigrafia objetiva organizar o conhecimento geológico através da caracterização das unidades estratigráficas com suas abrangências verticais e laterais, estabelecerem correlações geológicas entre regiões diferentes e servir de fundamento para o estabelecimento da história da evolução geológica local e regional (CARL O, 1979).

A estratigrafia tem significado bem mais amplo, pois envolve a determinação da sucessão geral das rochas de uma região, incluindo acontecimentos que modificaram a forma ou estruturas e a natureza dos pacotes de rochas, tais como: metamorfismo e tectonismo das rochas, intrusão de corpos magmáticos, intrusão de domos de sal.

2.1.2.1 Elementos da estratigrafia

Entre os principais elementos da estratigrafia destacam:

Discordância

Discordância é uma superfície que separa unidades estratigráficas de idades significativamente diferentes e que representa um grande período de não deposição ou de erosão das camadas abaixo e acima desta superfície de discordância.

A discordância pode ser paralela, angular ou inconforme com relação à estruturação das rochas acima e abaixo da superfície de discordância. A própria superfície de discordância pode ser irregular (disconformidade), plana ou paralela aos estratos (paraconformidade).

Hiato

Hiato é o intervalo de tempo referente a uma descontinuidade de sedimentação por não deposição e/ou por erosão de camadas já depositadas. Também é a representação de tempo da falta de registro geológico correspondente a uma discordância.

Estratificação

Estratificação é uma estrutura originada pela acumulação progressiva de qualquer material (partículas clásticas, precipitação química ou decantação de colóides floculados, cristais em suspensão no magma), tendendo a formar estratos ou camadas definidas por descontinuidades físicas e/ou por passagens bruscas ou transicionais de mudanças de textura, estrutura ou quimismo (KARL BEURLIN, 1964).

Formação

A unidade litoestratigráfica fundamental é a formação. Formação é um corpo de rocha de considerável espessura com características que a distinguem de unidades de rochas adjacentes.

Horizonte

Horizonte é um termo estratigráfico descritivo usado para uma determinada camada dentro de uma seqüência de rochas sedimentares, como, por exemplo, uma camada guia composta de estrato delgado e persistente com alguma particularidade marcante.

Interface

Interface é um plano separador de duas unidades litológicas como formações ou outras unidades litoestratigráficas.

Intervalo

Intervalo estratigráfico é um corpo de estratos entre dois marcos estratigráficos.

Marco

Marco é uma camada facilmente reconhecível, tendo características distintivas suficientes para servir como referência ou *datum* ou ser traçada por longas distâncias, especialmente em subsuperfície, poços e minas; seria o mesmo que camada (CAPUTO, 1990).

2.2 MODELAGEM

Modelagem é o conjunto de métodos matemáticos usados para produzir um modelo de topografia, geometria e propriedades petrofísicos de um objeto geológico em estudo, tendo em conta todos os tipos de dados relativos a esses objetos. Permite ver partes internas de uma determinada estrutura, gerando uma imagem de um possível reservatório geralmente enterrado milhares de metros abaixo da superfície e que muitos limites são desconhecidos (MALLET et al., 2008).

Em uma modelagem podemos simular os efeitos a partir de um modelo físico ou matemático, ou utilizar um modelo físico correspondente aos efeitos observados. Os modelos podem ser de dois tipos: analógico e digital.

Modelagem Analógica: modelagem na qual um objeto em estudo é reproduzido com matérias substitutas e freqüentemente em escala diferente da original. Em geofísica são micros-levantamentos feitos sobre um modelo físico em escala reduzida.

Modelagem computacional ou digital: são processos matemáticos feitos geralmente com auxílios de computadores e softwares por meio do qual se procura sintetizar a seção sísmica correspondente a um modelo geológico (modelo direto) ou modelo geológico correspondente aos dados sísmicos (modelo inverso), de um sistema, estrutura, entre outros, e constituído por camadas sob postas, além de fazer uso das técnicas de modelagem acústica e elástica que utilizam as ondas P e ondas P e S em seus modelos, respectivamente.

2.2.1 Modelagem sísmica

A modelagem sísmica é gerada a partir de um modelo que possibilite representar uma provável situação de estruturas complexas no ambiente geológico em estudo. A finalidade é testar a eficiência dos métodos convencionais assim como de novas metodologias.

Com essa finalidade é possível determinar uma estratégia utilizando parâmetros, atribuindo, hipóteses e um novo algoritmo, em que, esses dados sísmicos do modelo mostrarão sua competência para realizar pesquisas e

obter resultados satisfatórios com a criação do modelo, fazendo assim da modelagem uma importante ferramenta, principalmente na geofísica, na obtenção de estruturas significativas na exploração de hidrocarboneto.

2.2.3 Modelagem e visualização 3-D

Em subsuperfície as estruturas geológicas complexas (como por exemplo, falhas, diques, soleiras, dobras, domos de sal, etc) são difíceis de serem imageados pela sísmica e em muitos casos reduzem a qualidade do imageamento sísmico. Essa dificuldade se dá pelo fato de que nas estruturas complexas as ondas sísmicas se difratam produzindo imagens distorcidas, mesmo que se apliquem técnicas avançadas de migração em seu processamento.

Existem vários processos e metodologias para melhorar o imageamento sísmico e reduzir os freqüentes problemas encontrados na exploração petrolífera nas bacias sedimentares. A modelagem pertence a esse grupo de metodologias.

A modelagem de situações geológicas complexas permite uma melhor compreensão das mesmas, e conseqüentemente, desenvolverem tecnologias e metodologias que minimizem seus efeitos nas diversas fases da indústria do petróleo e de gás.

Nos últimos anos, diversas técnicas de modelagem e visualização têm aparecido, ganhando assim, uma nova importância na resolução de problemas encontrados na exploração de hidrocarbonetos.

A modelagem 3-D constitui-se numa ferramenta importante para auxiliar na interpretação geológica e sísmica e ajudar a identificar possíveis reservatórios ou áreas de aprisionamento de hidrocarbonetos em uma bacia sedimentar de modo que essa visualização seja possível em todos os pontos, tornando-se um processo específico que mostrará o que está por trás do volume de dados para serem interpretados. Através da modelagem 3-D e da construção de modelos de estruturas geológicas complexas que representam uma área em estudo podemos testar nestes modelos das situações geológicas complexas, a eficiência de técnicas e metodologias sísmicas e contribuir para

minimizar seus efeitos nas diversas fases da indústria do petróleo e gás.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo iremos explicar de maneira resumida a metodologia utilizada e as etapas que proporcionaram a construção dos modelos geológico e geofísico.

3.1 MODELAGEM 3-D DE ESTRUTURAS GEOLOGICAS COMPLEXAS

Neste trabalho foi utilizado o software GOCAD (Geological Object Computer Aided Desing) que faz parte do consórcio GOCAD (França). É um software de modelagem computacional utilizada na geofísica e na geologia com o caráter de ajudar a direcionar e facilitar a interpretação relacionada com as estruturas geológicas complexas como falhas, dobras, domos, soleiras etc. São diversas as aplicações deste software na geologia e na geofísica como, por exemplo, modelagem de estruturas complexas, modelagem de bacias sedimentares, etc (CHIRA OLIVA, 2007).

O GOCAD possui um conjunto de módulos em que podem ser modeladas várias estruturas como a modelagem estrutural, assim como realizar a modelagem estratigráfica, modelagem de velocidades e reservatórios, interpretação sísmica e geológica, etc. Neste trabalho serão construídos modelos geológicos, (estruturais e estratigráficos), e geofísicos (modelos de velocidades).

Vários são os autores que utilizaram o GOCAD em seus trabalhos para a construção de modelagem e visualização (entre eles ANTUNES et al, 2004 e CHIRA OLIVA et al 2008). Devido às vantagens do software e que será utilizado para modelar as estruturas geológicas complexas e construir modelos de velocidades correspondentes a uma determinada área. Os dados utilizados foram sistéticos

3.2 MODELO GEOLÓGICO 3-D

O modelo geológico corresponde aos modelos estrutural e estratigráfico. O modelo estrutural constitui em construir os horizontes (interfaces) e respectivas falhas da estrutura e já o modelo estratigráfico correspondem é a construção de camadas. A construção do modelo estratigráfico só é possível a partir da construção do modelo estrutural. Apresentaremos agora as etapas de construção dos modelos (GOCAD, 2008).

3.2.1 Modelo estrutural 3-D

Nesta etapa foi utilizado o módulo “*Building a Structural Framework*”. Este módulo é utilizado para construção de modelos estruturais com o objetivo de realizar simulações de uma determinada área que possuam estruturas geológicas falhadas.

Para a construção do modelo estrutural 3-D serão consideradas as seguintes etapas:

- Importar arquivos com dados dos horizontes e dados das falhas.
- Criar superfícies dos horizontes e falhas
- Caracterizar cada estrutura (falha e horizonte estratigráfico)
- Construção do modelo estrutural.

A Figura 8 mostra um fluxograma para a construção dos modelos estruturais para cada modelo.

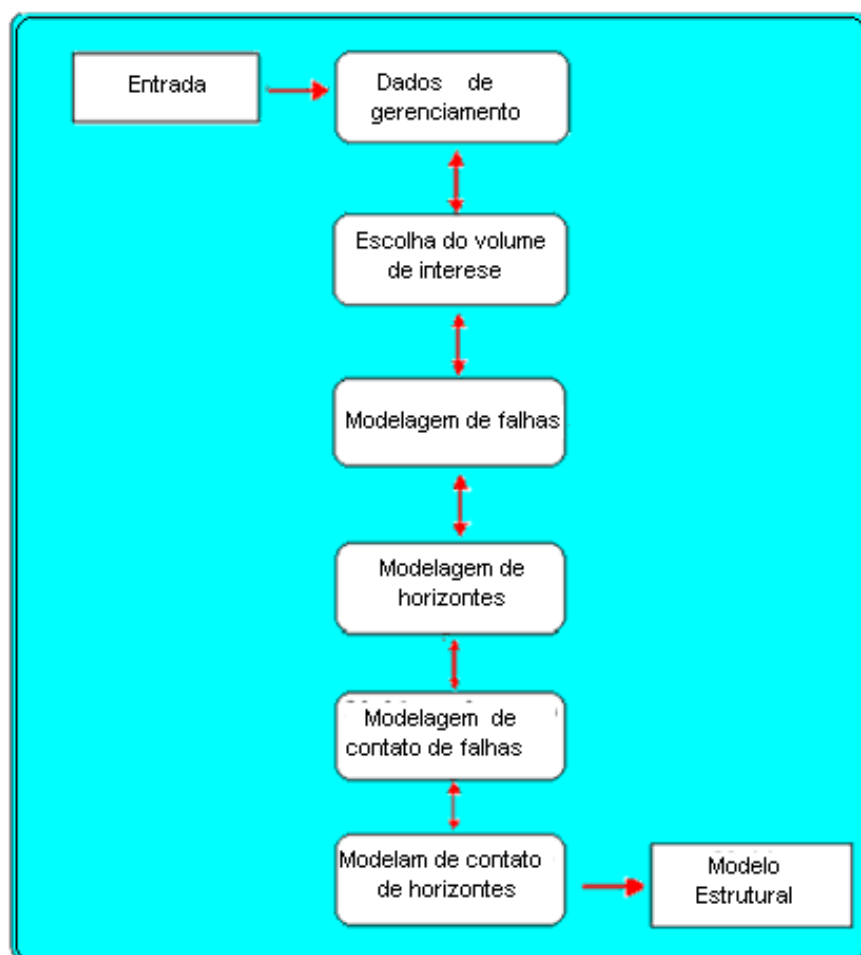


Figura 8 – Fluxograma da construção do modelo estrutural 3-D.

3.2.2 Modelo estratigráfico 3-D

Para a construção do modelo estratigráfico foi utilizado o módulo “3-D reservoir grid builder”. Este módulo facilita a construção de modelos estratigráficos, também chamados de malhas estratigráficas ou malhas de reservatórios 3-D.

O módulo para construção de reservatórios 3-D apresenta duas opções antes de editar ou atualizar a malha para construir os modelos: construção das interfaces e usando malhas 2-D.

Para a construção dos modelos estratigráficos foram realizadas em duas etapas: a construção das superfícies e edição ou atualização das malhas.

A primeira etapa é controlada pelas estruturas do topo e da base. Essas malhas são construídas com a finalidade de distribuir as propriedades do

reservatório e realizar uma simulação do fluxo dos fluidos. Para sua construção utilizaremos dados do modelo estrutural.

As etapas para a construção de um modelo estratigráfico são as seguintes:

- Selecionar o método para construir as malhas do reservatório.
- Selecionar o topo e a base dos horizontes do reservatório.
- Selecionar o método para construir a malha.
- Preparar os horizontes topo e base.
- Associar os horizontes topo e base.
- Criar a malha da área de estudo.
- Definir as unidades estratigráficas intermediárias.
- Construir a malha do reservatório.
- Definir as camadas dentro das unidades estratigráficas.
- Construir a malha do reservatório propriamente dito.

A Figura 9 mostra o fluxograma da construção dos modelos estratigráficos para cada modelo.

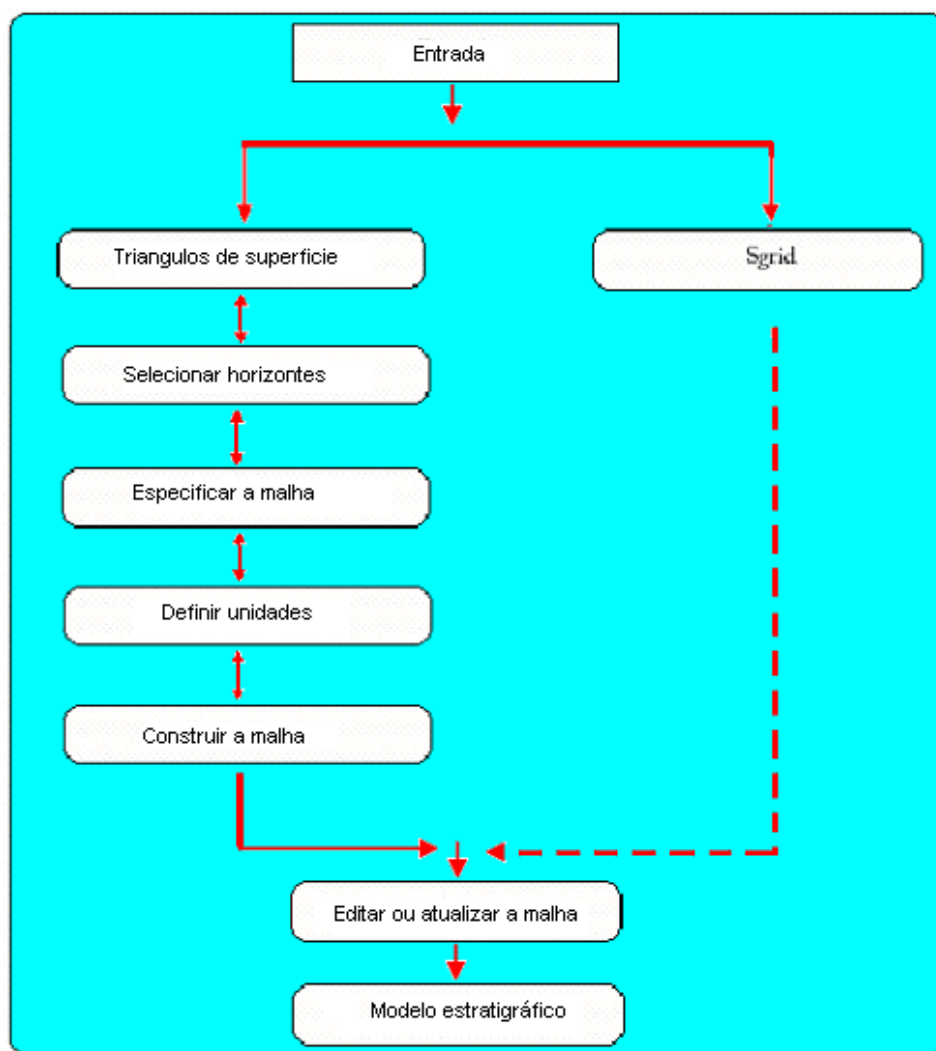


Figura 9 – Fluxograma da construção do modelo estratigráfico 3-D.

3.3 MODELO GEOFISICO 3-D

O modelo geofísico corresponde ao modelo de velocidades que é construído a partir dos modelos geológicos. Neste modelo é adicionado aos modelos geológicos, mais precisamente para cada camada, um valor de velocidade. A seguir são mostradas as etapas de construção do modelo de velocidades.

3.3.1 Modelo de Velocidades 3-D

Para a construção do modelo de velocidade foi utilizado o módulo “*Velocity Modeling*”. Este módulo permite construir malhas 2-D e 3-D e realizar conversões tempo-profundidade através da modelagem da coluna geológica completa, localizando exatamente reservatórios e delimitando importantes perfurações de risco na cobertura. Modelos de velocidades exatos melhoram a qualidade de imagem e melhoram os resultados de perfuração em ambientes com desafios sob a orientação de modelos 3-D específicos.

O software GOCAD define duas formas para construir modelos de velocidades 3-D: Voxet Model e 3-D model. O Voxet model é um volume com uma malha que está confinada a uma malha do voxet. Este modelo é um volume limitado que consiste de sub-volumes com malhas chamados de camadas.

A forma usada para construir o modelo de velocidade de foi o Voxet Model. Pode ser útil construir um Voxet Model para verificar a validade das camadas em vez de construir um 3-D model. Em um voxet model, o voxet deve ser menor que todas as superfícies que cortarão as paredes do voxet, gerando camadas (GOCAD, 2008).

Para verificar a consistência das velocidades, podem ser mostradas seções transversais através do cubo de velocidades com horizontes sísmicos. Este cubo de velocidades apresenta um grid retangular tridimensional.

As etapas para a construção do modelo de velocidades são as seguintes:

- Criar um Voxet a partir dos vértices ou vetores,
- Adicionar o especificar as superfícies que serão incluídas em um Voxet Model,
- Construir o Voxet Model,
- Criar um modelo com a propriedade (neste caso, a velocidade).
- Determinar os valores da propriedade para as diversas camadas que constituem o modelo de velocidades.
- Visualização do modelo.

Em um ambiente geológico a velocidade varia segundo o meio em que suas ondas se propagam. É possível criar valores de velocidades levando em consideração vários fatores entre eles a litologia da região com suas propriedades físicas e petrofísicas e compactação da rocha podendo fazer estimativa de parâmetros a partir de valores de velocidades já conhecidos.

Para os modelos que serão apresentados foram criados modelos de velocidades que correspondem a litologías das rochas que compõem um ambiente sedimentar, sendo que esses valores de velocidades das rochas aumentam à medida que as rochas vão ficando mais profundas, levando em consideração o fator da compactação das rochas. Os modelos representam assim um ambiente geológico em que os valores de velocidades passam a crescer com a profundidade.

4 RESULTADOS

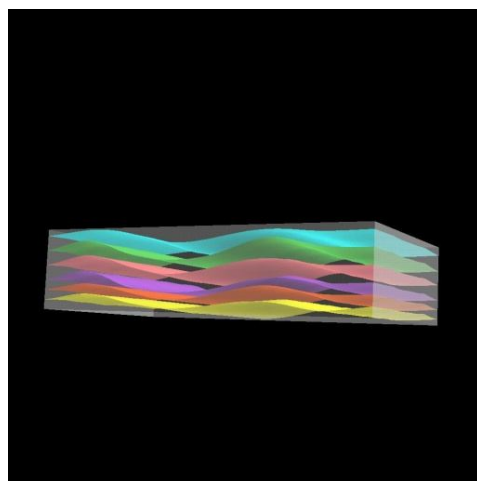
As etapas de construção dos modelos permitiram que fossem criados os seguintes modelos com base em dados sintéticos de uma determinada área que apresentam estruturas geológicas complexas.

4.1 MODELO 1

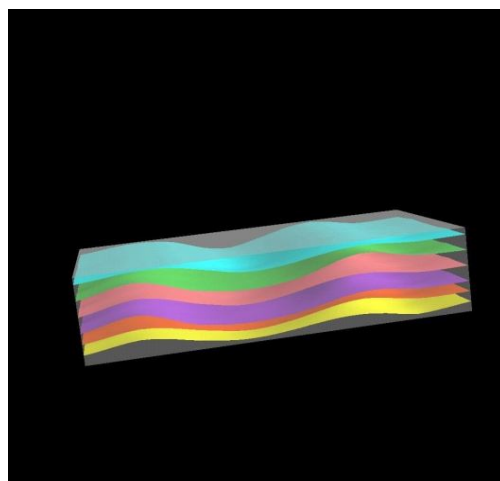
Este modelo 3-D está constituído por seis camadas sob um semi-espço. Cada camada é separada por interfaces curvas. O modelo de dobras apresenta as seguintes dimensões: 3,5 km de largura, 2 km de comprimento e 0,8 km de profundidade.

A Figura 10 representa o modelo estrutural do modelo 1 constituído por atributos sinclinal e anticlinal.

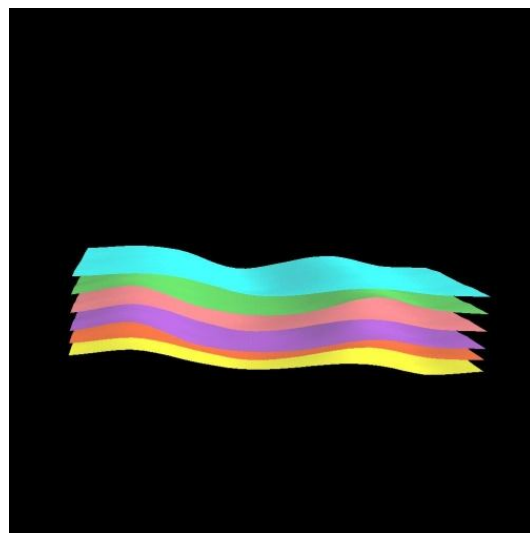
A partir do modelo estrutural foi possível construir o modelo estratigráfico (Figura 11). O modelo estratigráfico corresponde às camadas 2, 3, 4, 5 e 6 do modelo 1.



(a)

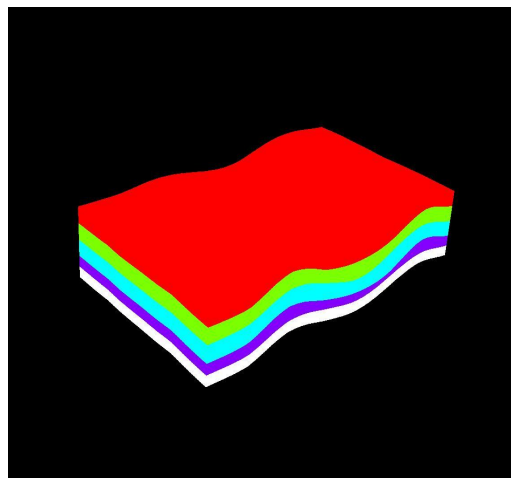


(b)

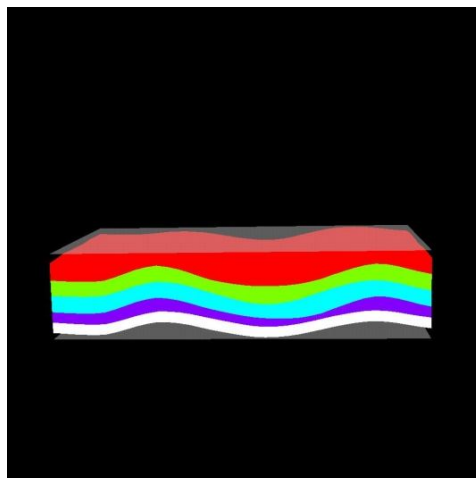


(c)

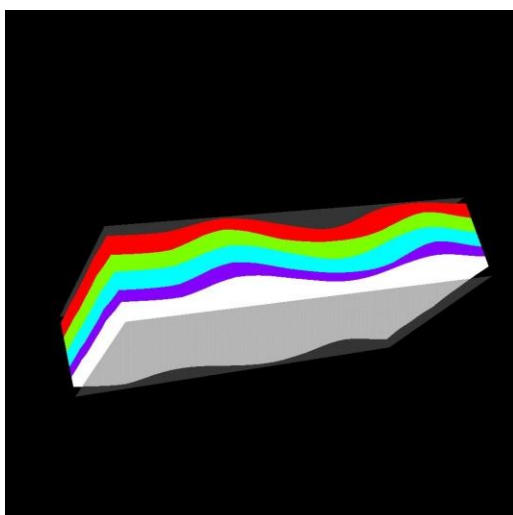
Figura 10 - Modelo estrutural 3-D correspondente ao modelo 1 (Figuras a até c) representam os horizontes do modelo com dobras.



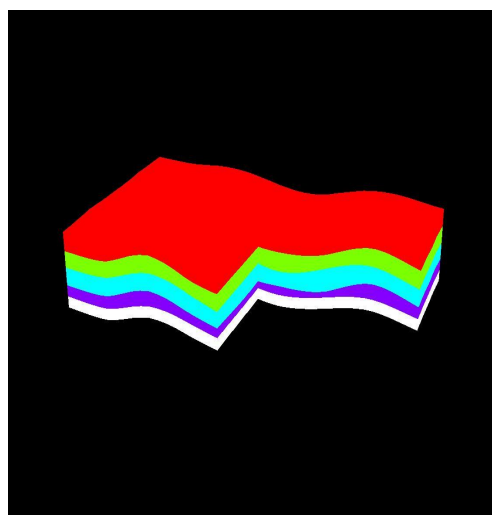
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 11 – Modelo Estratigráfico 3-D correspondente ao modelo 1. É apresentada a estratigrafia correspondente às camadas 2, 3, 4, 5 e 6. Figuras (a até d).

Na Figura 12 é representado o modelo de velocidades do modelo 1. Este modelo foi gerado a partir dos modelos geológicos. Foram atribuídos os respectivos valores de velocidades para as camadas do topo até a base. Os valores de velocidades para cada camada foram baseados nos valores de velocidades das seguintes litologias: arenito 2.0 km/s, siltito 2.8 km/s, calcário 3.6 km/s, folhelho 4.3 km/s, arenito 4.5 km/s, evaporitos 5.0 km/s e embasamento 5.3 km/s. O modelo de velocidades apresenta visualização do modelo através de seções e cortes (slices).

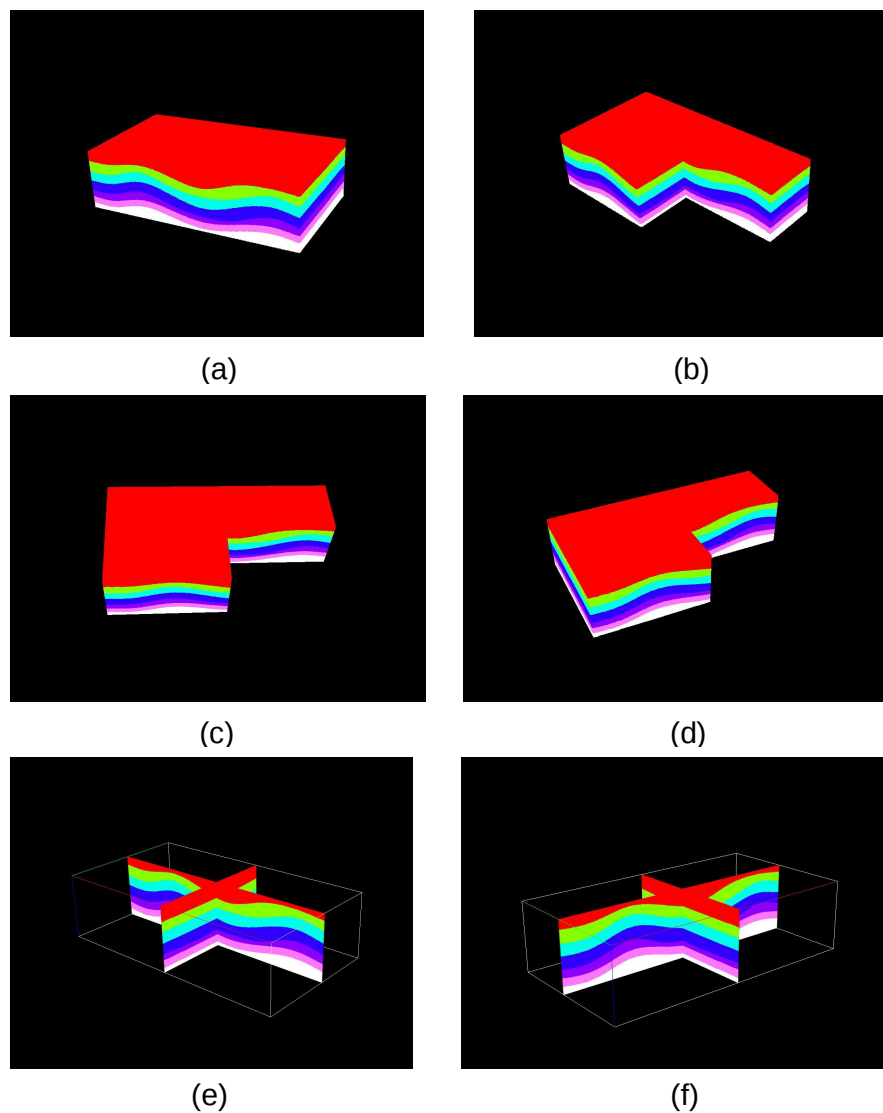


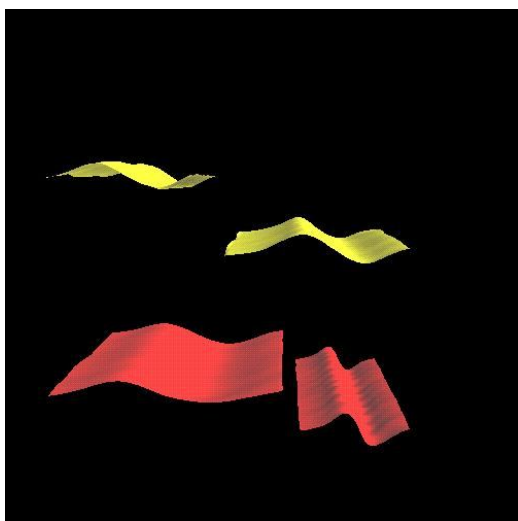
Figura 12 - Modelo de velocidades correspondente ao modelo 2. Visualização dos slices ou cortes feitos ao cubo de velocidades (a até f).

4.2 MODELO 2

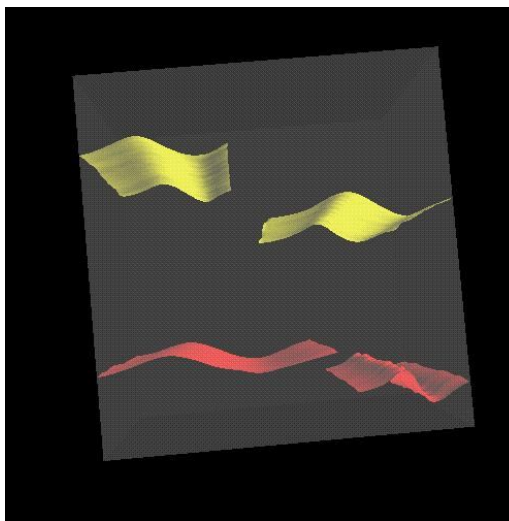
Este modelo 3-D está constituído por duas camadas sob um semi-espaço. Cada camada é separada por interfaces curvas. O modelo apresenta as seguintes dimensões: 5 km de largura, 5 km de comprimento e 5 km de profundidade.

A Figura 13 representa o modelo estrutural do modelo 2 constituído por dois horizontes estratigráficos interrompidos por uma falha normal planar, cujo mergulho é aproximadamente de 65° , classificando a falha como de alto ângulo.

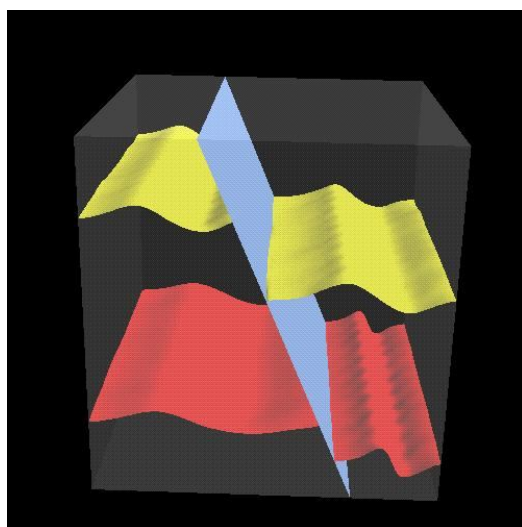
A partir do modelo estrutural utilizando os horizontes e a falha foi possível construir o modelo estratigráfico (Figura 14). O modelo estratigráfico corresponde à segunda camada do modelo.



(a)

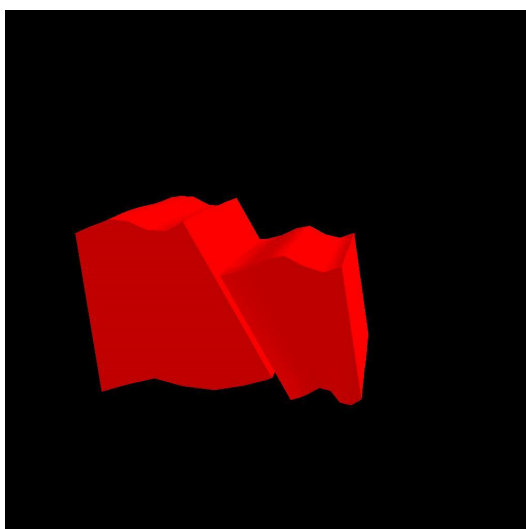


(b)

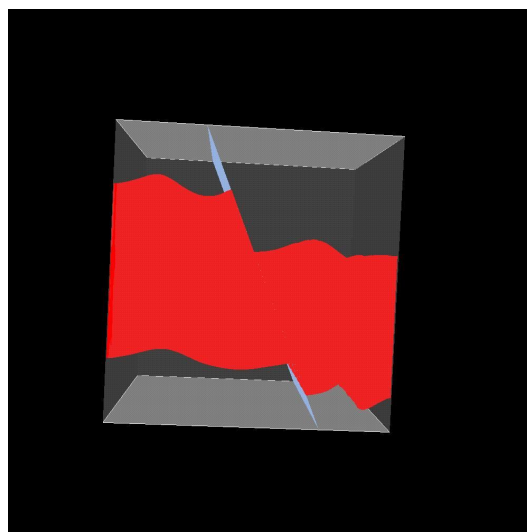


(c)

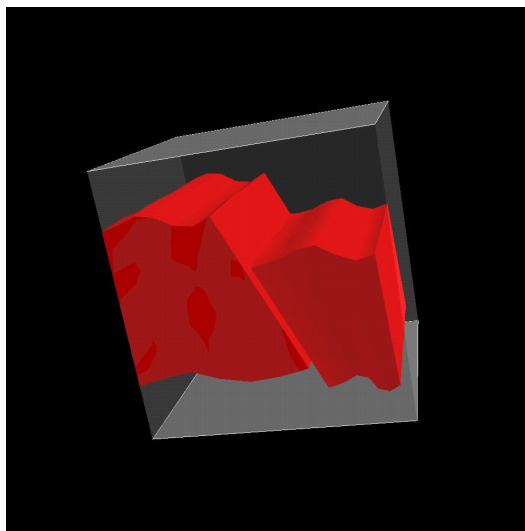
Figura 13 - Modelo estrutural 3-D correspondente ao modelo 1 (Figuras a até c). (a) e (b) representam os horizontes do modelo falhado (superfície amarela e vermelha). (c) Falha normal que interrompe os horizontes que limitam as camadas do modelo (superfície em azul).



(a)



(b)



(c)

Figura 14 – Modelo Estratigráfico 3-D correspondente ao modelo 2. É apresentada a estratigrafia correspondente à 2ª camada deslocada por falha normal planar (a até c).

Na Figura 15 é representado o modelo de velocidades do modelo 2. Este modelo foi gerado a partir dos modelos geológicos. Foi atribuído o respectivo valor de velocidade para as camadas do topo até a base. Os valores para cada camada foram: 2.5 km/s para a camada superior; 3.0 km/s para a camada intermediária e 3.5 km/s para a camada inferior. O modelo de velocidades é representado através de volume com seções e cortes (slices).

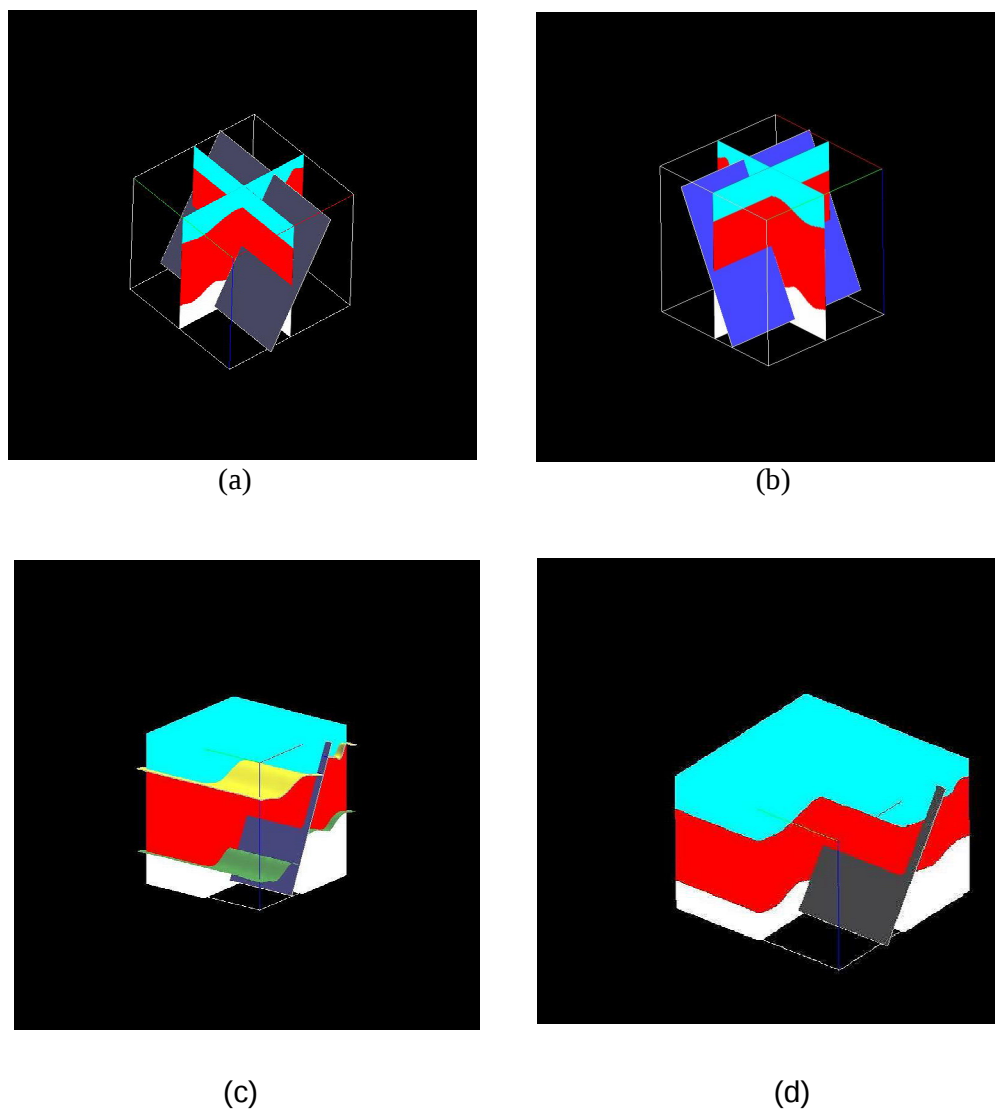


Figura 15 – Modelo de velocidades correspondente ao modelo 2. Visualização dos slices ou cortes feitos ao cubo de velocidades (a até d)

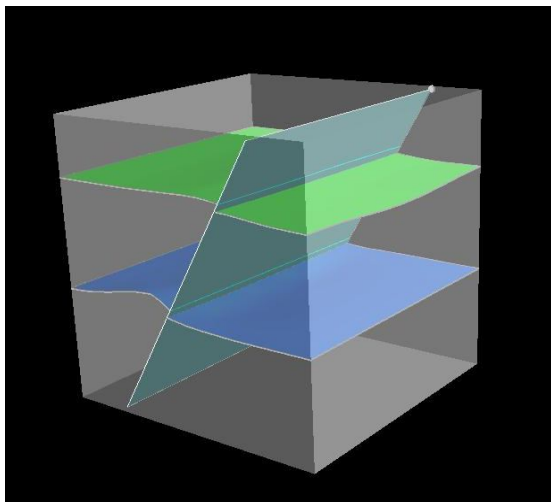
4.3 MODELO 3

O modelo 3-D está constituído por duas camadas sob um semi-espço. Cada camada é separada por interfaces com curvas suaves. O modelo apresenta as seguintes dimensões: 5 km de largura, 5 km de comprimento e 5 km de profundidade.

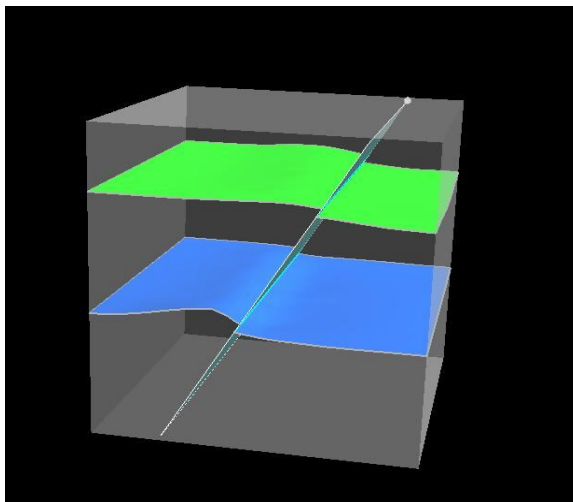
A Figura 16 representa o modelo estrutural que corresponde a dois horizontes estratigráficos interrompidos por uma falha reversa planar, apresentando um pequeno rejeito. O mergulho da falha é aproximadamente de 65° , classificando a falha como de alto ângulo.

A partir do modelo estrutural utilizando horizontes e a falha reversa foi possível construir o modelo estratigráfico (Figura 17). O modelo estratigráfico corresponde à segunda camada do modelo.

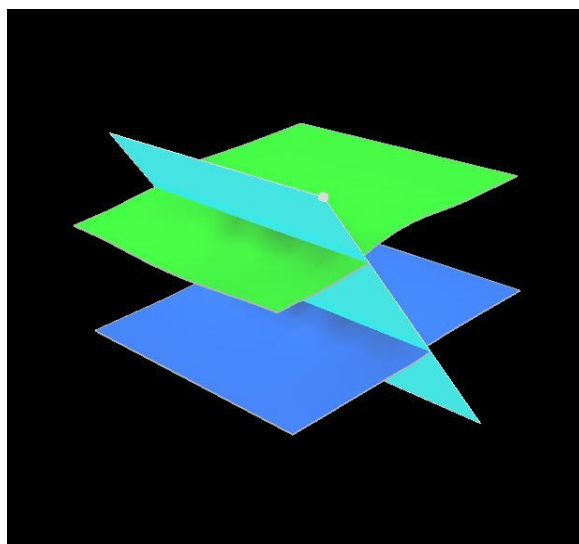
Também nesse modelo foi possível mostra estruturas internas da malha que constituem esta camada. Essa malha é importante no estudo das propriedades físicas da rocha (porosidade e permeabilidade entre outros), pois é possível mostra em vários pontos do reservatório detalhes do estudo que possibilita mostrar o fluxo do fluido no reservatório.



(a)

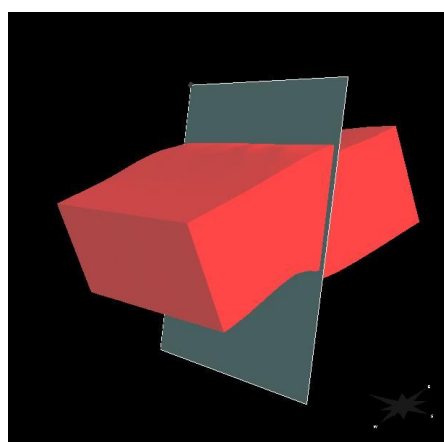


(b)

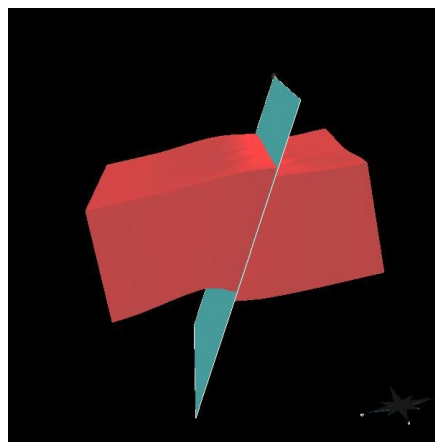


(c)

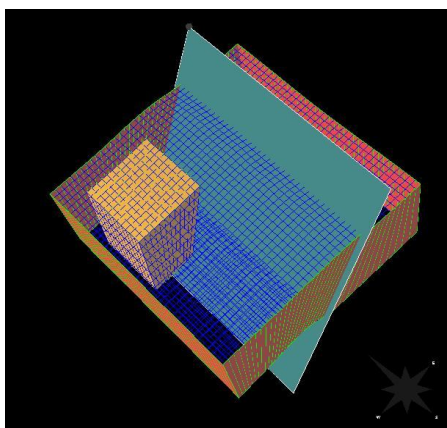
Figuras 16 - Modelo estrutural 3-D correspondente do modelo 3. São apresentados os horizontes (superfícies de cor verde e azul) interrompidos por uma falha reversa (superfície de cor azul claro) (Figuras a até c).



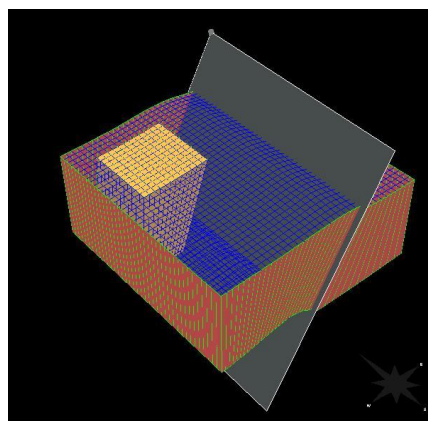
(a)



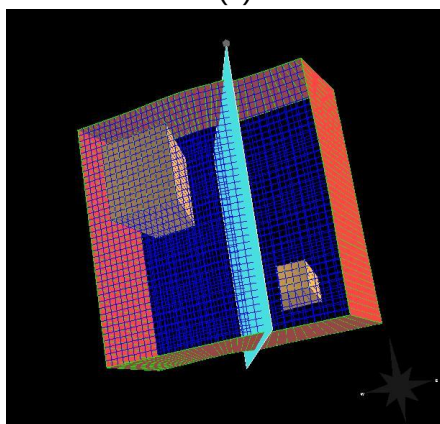
(b)



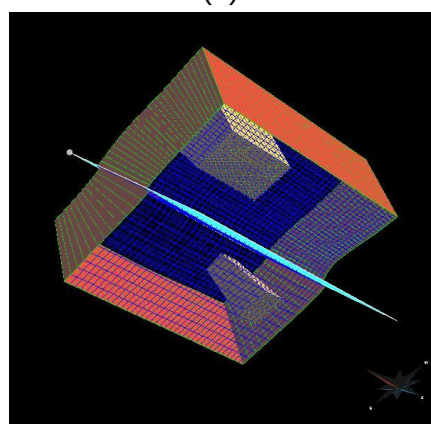
(c)



(d)



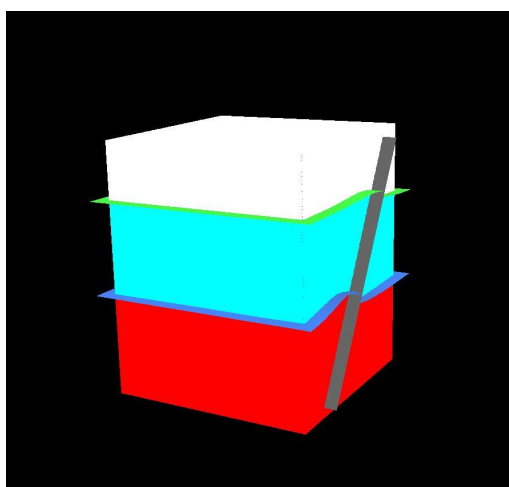
(e)



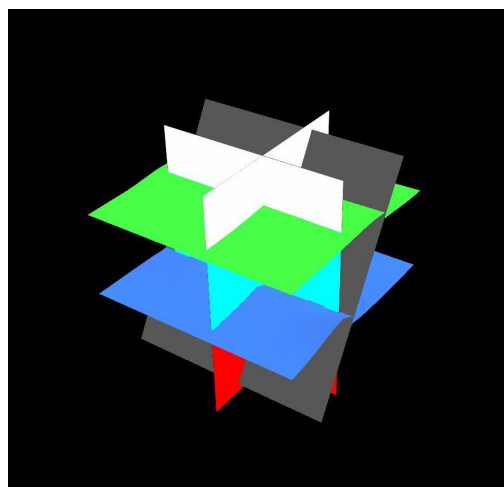
(f)

Figura 17 - Modelos Estratigráficos 3-D do modelo 3. É representada a camada intermediária interrompida pela falha reversa. Figuras c até f mostram características da estrutura interna da referida camada.

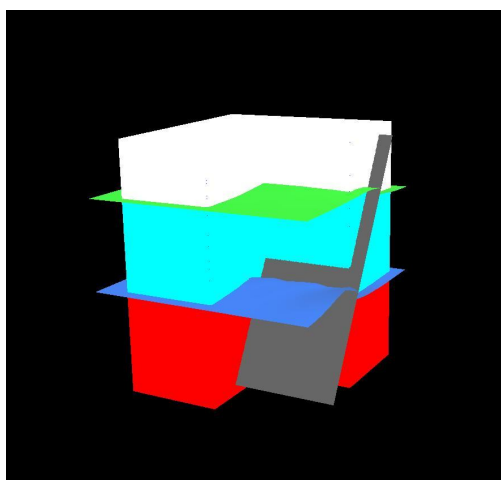
A Figura 18 representa o modelo de velocidades. Este modelo foi gerado a partir dos modelos geológicos. Foram atribuídos os seguintes valores de velocidade para as camadas desde o topo até a base. Os valores de velocidade aumentam com a profundidade e foram distribuídos da seguinte maneira: 3.0 km/s para a camada superior; 3.5 km/s para a camada intermediária e 4.5 km/s para a camada inferior. O modelo de velocidades apresenta visualizações através de seções e cortes.



(a)



(b)



(c)

Figura 18 - Modelo de velocidades corresponde ao modelo 3 sendo (a) visualização externa, (b) e (c) visualização interna com seções e cortes.

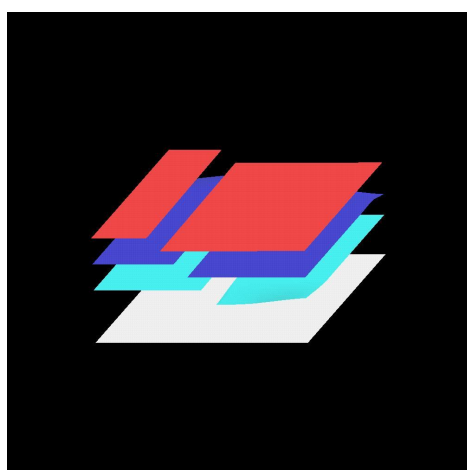
4.4 MODELO 4

Este modelo está constituído por três camadas sobre um semi-espço. Cada camada é separada por interfaces planas e curvas. O modelo apresenta as seguintes dimensões: 8 km de largura, 16 km de comprimento e 4 km de profundidade.

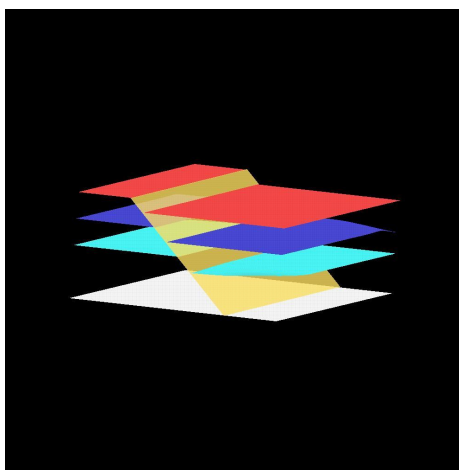
A figura 19 representa o modelo estrutural que corresponde a quatro horizontes estratigráficos, sendo que os três primeiros são interrompidos por uma falha normal planar, cujo mergulho da falha é aproximadamente de 60° , classificando a falha como de alto ângulo.

A partir do modelo estrutural (Figura 20) utilizando horizontes e a falha foi possível construir um modelo estratigráfico.

A Figura 20 representa o modelo estratigráfico que corresponde as camadas 2, 3 e ao semi-espço do modelo.



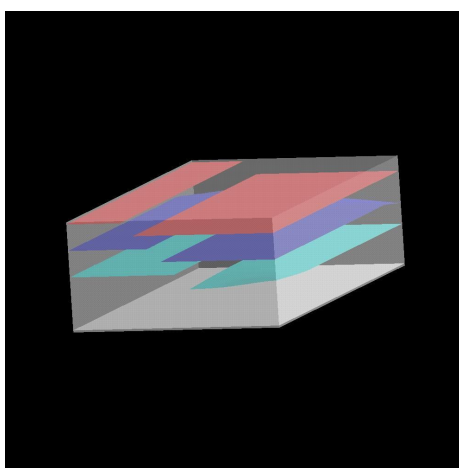
(a)



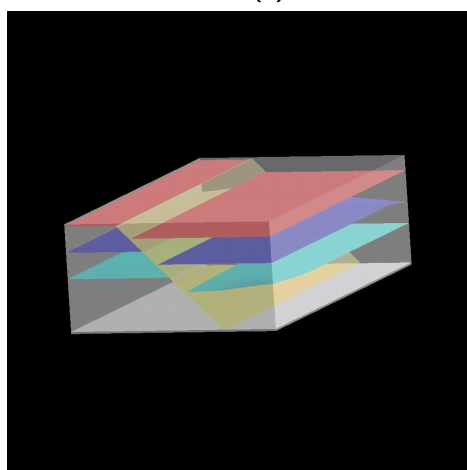
(b)



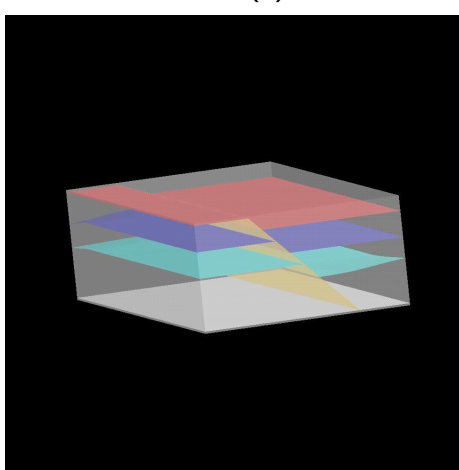
(c)



(d)

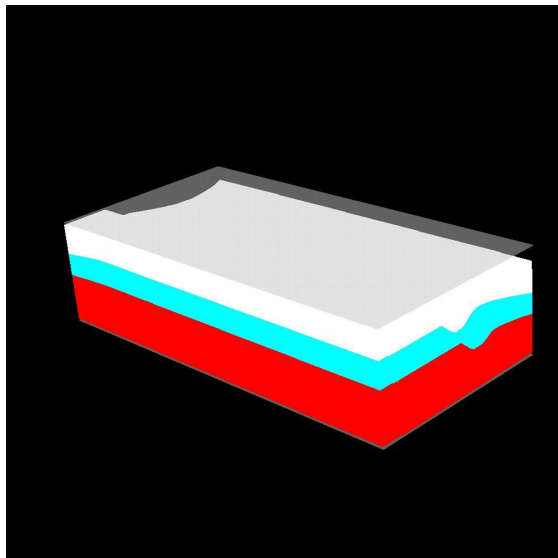


(e)

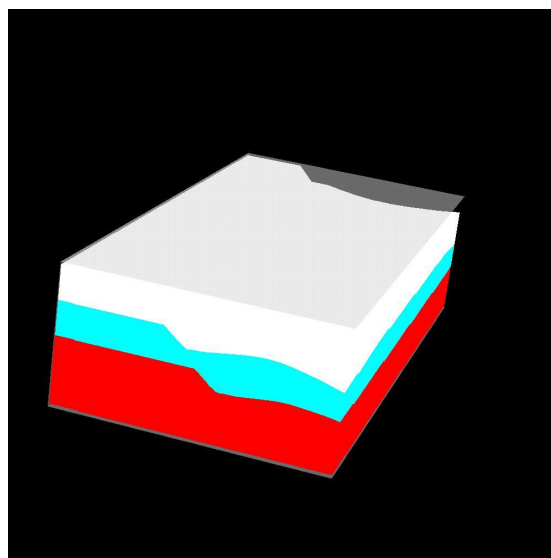


(f)

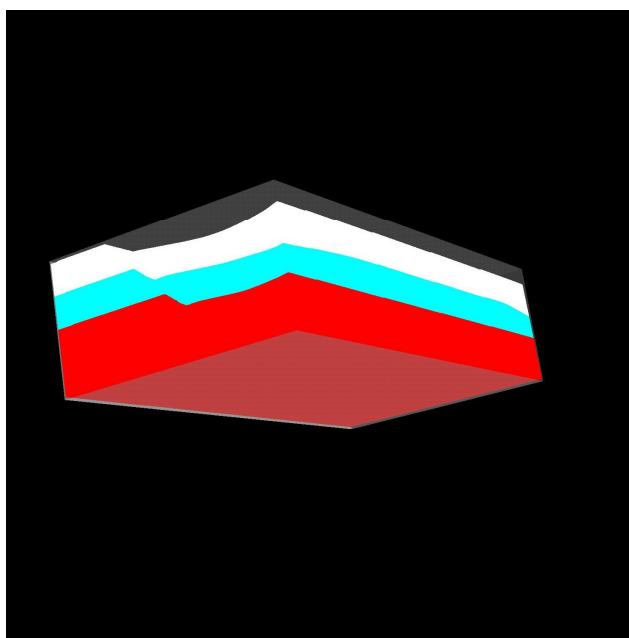
Figura 19 – Modelo estrutural 3-D correspondente ao modelo 4. São mostradas as seqüências dos horizontes interrompidos pela falha normal (Figura a até f).



(a)



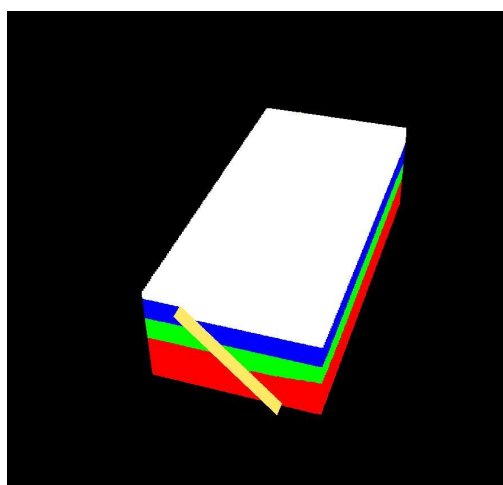
(b)



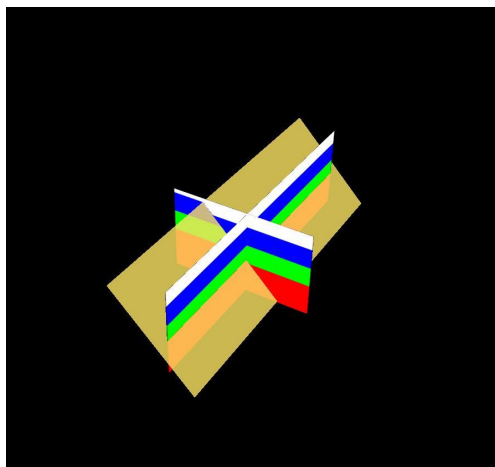
(c)

Figura 20 - Modelo Estratigráfico 3-D do modelo 4. Estruturas que apresentam três camadas (branco, azul e vermelho) interrompidas por falha normal (Figuras a até c).

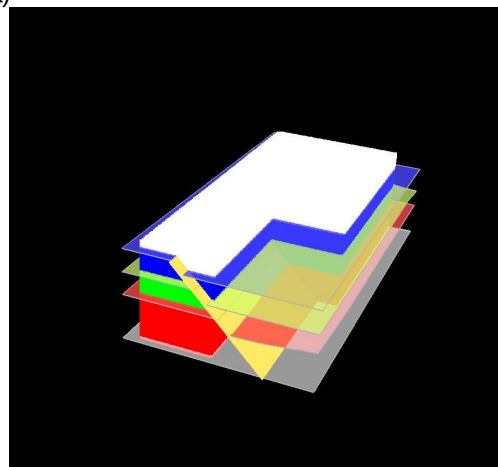
A Figura 21 representa o modelo de velocidades. Este modelo foi gerado a partir do modelo estrutural (Figura 17) e do modelo de estratigráfico (Figura 16). Foram atribuídos os seguintes valores de velocidades para as camadas desde o topo até a base. Os valores de velocidade aumentam com a profundidade e foram distribuídos da seguinte maneira: 2.5 km/s para a 1ª camada, 3.0 km/s para a 2ª camada, 3.5 km/s para a 3ª camada e 4.5 km/s para o semi-espaço. O modelo é visto internamente na Figura abaixo através de seções e cortes.



(a)



(b)



(c)

Figura 21 - Modelo de velocidades correspondente ao modelo 4 sendo: Figuras (a) visualização externa, (b) e (c) visualização interna.

4.5 MODELO 5

O modelo está constituído por nove camadas sob um semi-espço. As camadas são separadas por interfaces curvas. O modelo apresenta as seguintes dimensões: 6 km de largura, 4 km de comprimento e 4 km de profundidade.

A figura 22 representa o modelo estrutural que corresponde a dez horizontes estratigráficos interrompidos por duas falhas normais curvas, cujos mergulhos das falhas normais são aproximadamente de 60° para a falha a direita (superfície de cor amarela) e de 55° para a falha a esquerda (superfície de cor verde), classificando as falhas como de alto ângulo. As estruturas verticalizadas estão dispostas: a direita uma falha normal que intercepta os horizontes 2, 3, 4, 5 e 6, e a esquerda, outra falha normal que intercepta os horizontes 5, 6, 7 e 8 do modelo.

Com os horizontes e as falhas do modelo estrutural (Figura 22), pode ser gerado um modelo estratigráfico.

A Figura 23 representa o modelo estratigráfico que corresponde às oito camadas e ao semi-espço do modelo interrompido pelas falhas normais que estão comumente associados à formação de grabens (blocos rebaixados) e horsts (blocos elevados) (modelo estratigráfico).

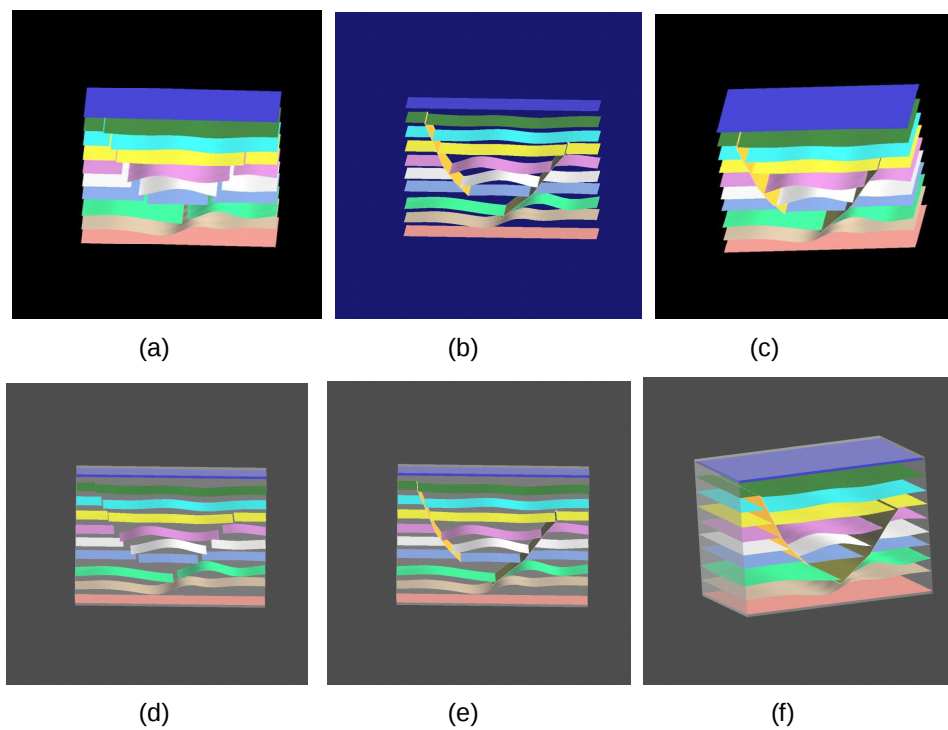


Figura 22 – Diversos pontos de visualização do modelo estrutural correspondente ao modelo 5 mostrando as seqüências dos horizontes interrompidas pelas falhas normais, (Figuras a até f).

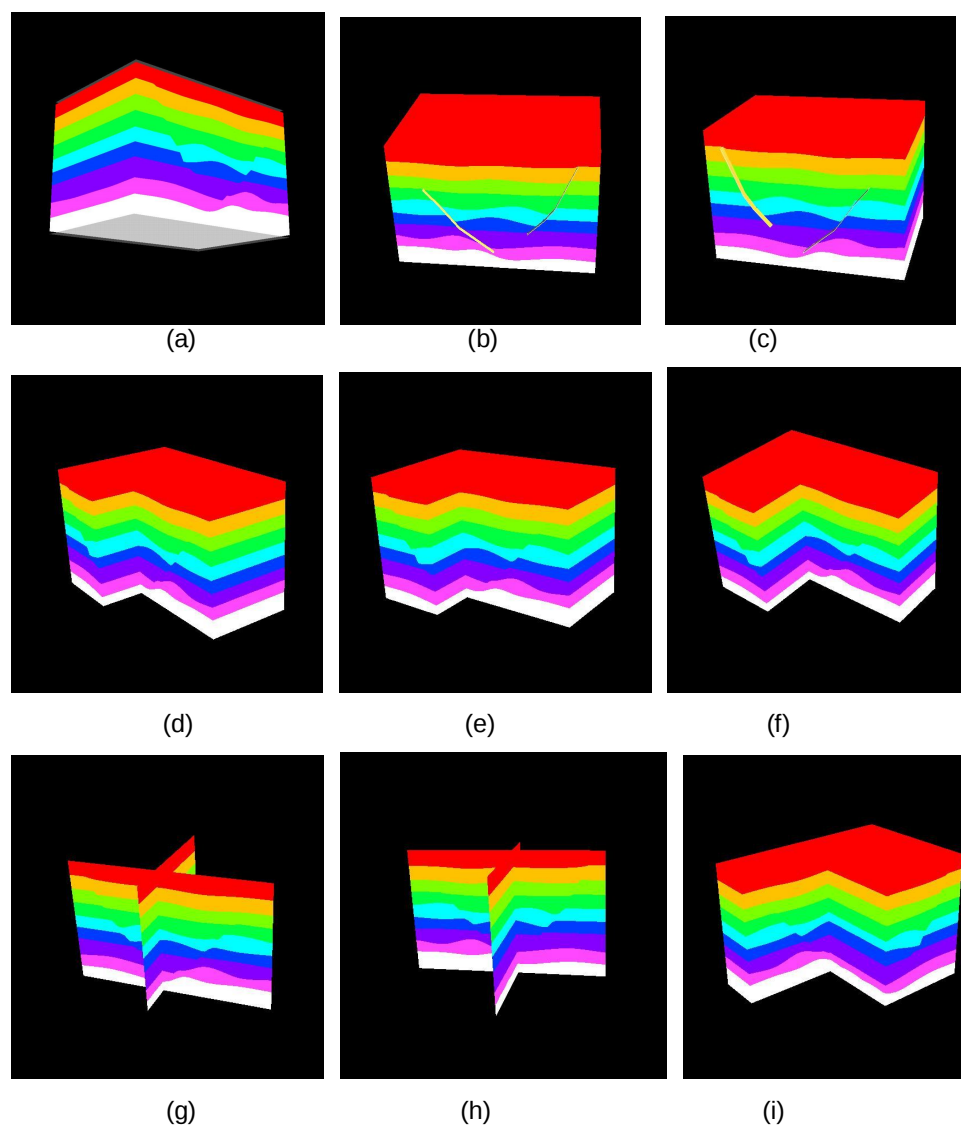


Figura 23 - Modelo Estratigráfico 3-D correspondente ao modelo 5. Estruturas apresentando camadas interrompidas pelas falhas normais. As Figuras (a até c) mostram uma visualização externa do modelo estratigráfico. As Figuras (a até i) mostram a visualização interna através de cortes e seções (slices).

A Figura 24 representa o modelo de velocidades. Este modelo foi gerado a partir do modelo estrutural (Figura 22) e do modelo de estratigráfico (Figura 23). Foi atribuído o seguinte valor de velocidade para as camadas do topo até a base. Os valores de cada camada foram: 1.5 km/s para a 1ª camada, 2.0 km/s para a 2ª camada, 2.5 km/s para a 3ª camada, 3.0km/s para a 4ª camada, 3.5 km/s para a 5ª camada, 4.0 km/s para a 6ª camada, 4.5 km/s para a 7ª camada, 5.0 km/s para a 8ª camada, 5.5 km/s para a 9ª camada e 6.0 para o sub-espço do modelo 4.

A visualização do modelo de velocidade e feita de maneira externa e internamente através de cortes nas estruturas e seções.

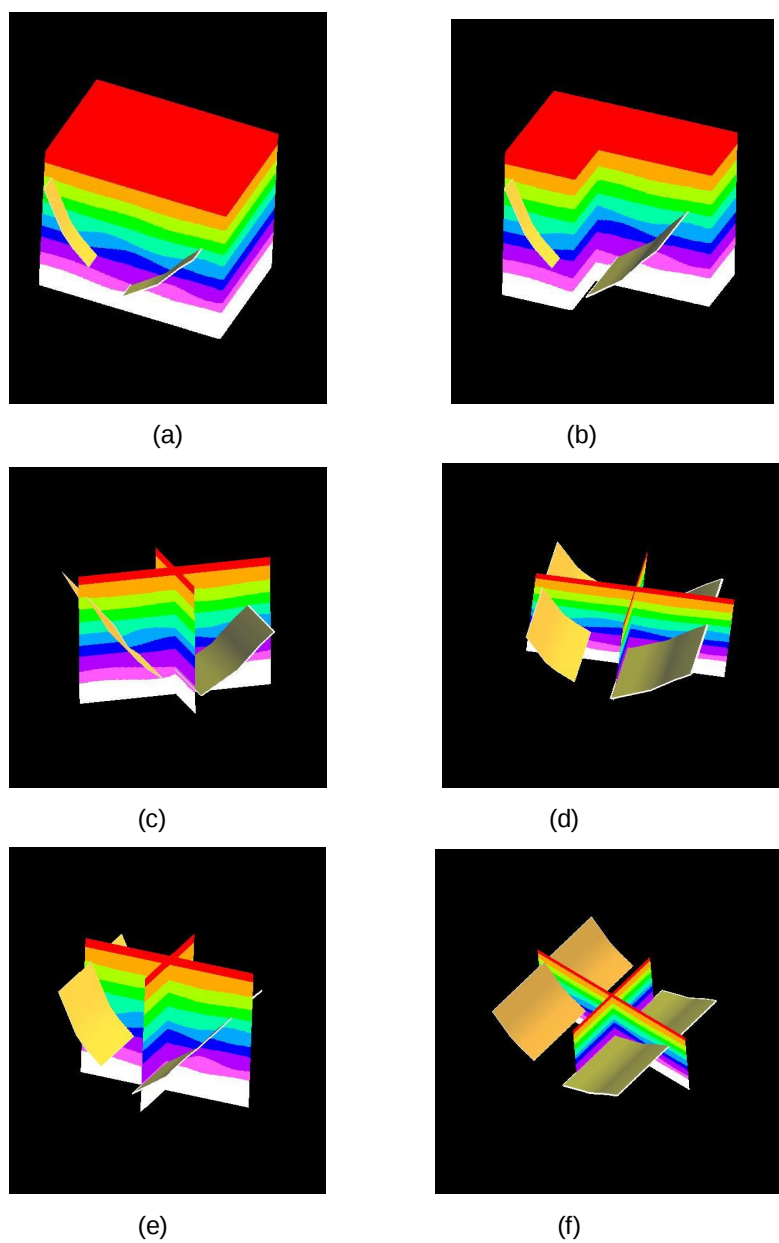


Figura 24 - Modelo de velocidades correspondente ao modelo 5. É apresentada às visualizações externa (a) e interna através de cortes e seções (b até f).

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVA

Destacam-se as seguintes:

A modelagem 3-D ajuda no estudo e entendimento de estruturas geológicas falhadas que possam estar presentes em subsuperfície. Especialmente as falhas normais que são as principais componentes estruturais de muitas das bacias de riftes, e, portanto possuem maior significado para a exploração de hidrocarbonetos.

O entendimento destas estruturas contribuirá para melhor compreensão e resolução dos problemas relacionados à presença das mesmas em bacias sedimentares e em zonas propícias a acumulação de hidrocarbonetos, assim como de estudos petrofísicos, melhorando o estudo do fluxo de fluidos nos reservatórios. Desta maneira, contribui a diminuir os riscos e a tomar decisões nas diversas fases da exploração petrolífera.

O modelo de velocidades pode ser usado para reforçar a qualidade das imagens e melhorar os resultados de perfuração de uma determinada área. A partir desse modelo podem ser criados outros modelos de velocidades como, por exemplo, velocidade RMS, velocidade intervalar, velocidade média.

Devido aos resultados satisfatórios obtidos na aplicação da metodologia e nos seus resultados, é importante o seguinte:

Ressaltar uma perspectiva natural em relação à aplicação dados reais, para regiões que apresentam falhas ou outros tipos de estruturas geológicas complexas, em bacias sedimentares e regiões de acúmulo de hidrocarbonetos.

Realizar imageamento sísmico ou aplicar qual quer outra técnica de processamento sísmico a partir destes modelos 3-D contendo estruturas complexas para testar a eficácia destas técnicas e métodos de imageamento sísmico na presença deste tipo de estruturas.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, P. D. T. S., BENGALY, A. P., CONCEIÇÃO, D. L. R., LANDAU, L.; BEDREGAL, R. P. **Three - dimensional Geometric Modeling of Sedimentary Basins using GOCAD**. In: GOCAD MEETING, 24th 2004, France.

CAPUTO, M. V.; SILVA, O.B. **Geotectônica e Geologia estrutural**. [S.l. : s.n.], 1990.

CARL, O. D. RODGENS J. **Princípios da estratigrafia**, [S.l. : s.n.], 1979.

CHIRA OLIVA, P. **Minicurso sobre GOCAD**. Instituto de Estudos Costeiros – Campus Bragança (UFPA), 2007.

CHIRA OLIVA et al. **3-D velocity and structural modeling of Brazilian Amazonas paleozoic basin**. In: GOCAD MEETING, 28th 2008, França.

DE LIMA , C. M., BEZERRA, S. J., DE FREITAS, J. E.; CHIRA OLIVA, P. **Visualização 3D utilizando GOCAD em ambiente imersivo Reality Center**. In: WORKSHOP DA REDE COOPERATIVA DE PESQUISA EM RISCO EXPLORATÓRIO EM PETRÓLEO E GÁS, 2., 2005, Belém.

GOCAD. **Gocad 2.1.4. user's guide**.: GOCAD consortium, [S.l. : s.n.], 2008.

KARL, B. **Introdução a estratigrafia geral e comparada**, [S.l. : s.n.], 1964.

KIDD, G. D.; MONTILLA, G. J. T. **Practical volume visualization methods for imaging complex structures**. In, INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8., 2003, North Eastern Venezuela.

LIMA, C. C. A. **Um novo algoritmo para a implementação do método de empilhamento SRC 3D e modelagem sísmica da Bacia do Amazonas**. 2006. 89 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2006.

LOCZY, LOUIS DE; LADEIRA E. A. **Geologia estrutural e introdução a geotectônica**, [S.l. : s.n.], 1980.

MALLET, J.-L. Geomodeling: helping to make decisions. In: ANDRÉINI, J.-C., BARD, E., BAUQUIS, P.-R., BÉRAUD, J.-F., BITEAU, J.-J., BLAZY, P., CASES, J.-M., CHAUSSIDON, M., GIAFFERI, J.-L., MALLET, J.-L., MARCHAND, A., MARTY, B., MASSET, J.-M., POIRIER, J.-E., POINTET, T., RICOUR, J., SAMAMA, J.-C. TISOT, J.-P. **Understanding the future**. [S.l. : s.n.], 2008.

PRESS, F., SIEVER, R., GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para entender a Terra**. 4. ed. Tradução Rualdo Menegat e colaboradores. [S.l.]: Editora Bookman, 2006.

RAJA GABALGLIA, G. P. MILANI, E.J (Ed.). **Origem e evolução das Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1990. pg 77, 169-193.

TEIXEIRA, W. TOLEDO, M. C. M. FAIRCHID, T. R. TAIOLI, F; **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos., 2001.

VARELLA, P. G, **A cratera da colônia**, In: BIBLIOTECA do Observatório Céu Austral, disponível em: <www.ceuaustral.pro.br/falhas.gif>. Acesso em: nov. 2008.