



**COPPE/UFRJ**

## GERAÇÃO DE MALHAS 3D PARA DADOS SÍSMICOS

José Marcos Pilato Jr.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientador: Paulo Roma Cavalcanti

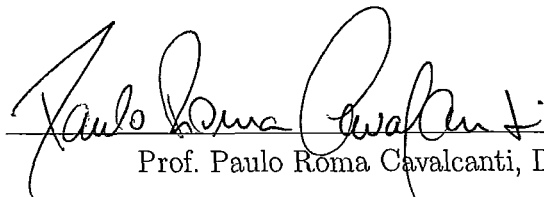
Rio de Janeiro  
Setembro de 2009

# GERAÇÃO DE MALHAS 3D PARA DADOS SÍSMICOS

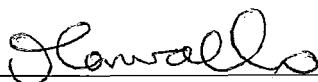
José Marcos Pilato Jr.

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

  
Prof. Paulo Roma Cavalcanti, D.Sc.

  
Prof. Antonio Alberto Fernandes de Oliveira, D.Sc.

  
Prof. Paulo Cezar Pinto Carvalho, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2009

Pilato Jr., José Marcos

Geração de Malhas 3D para Dados Sísmicos/José Marcos Pilato Jr.. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XII, 63 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Paulo Roma Cavalcanti

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 59 – 63.

1. Geração de Malhas.      2. Métodos Sísmicos.
3. Malhas Atômicas.      I. Roma Cavalcanti, Paulo.
- II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

*À minha família.*

# Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço à Deus por permitir que mais uma etapa seja alcançada.

Agradeço àquelas pessoas que, mesmo diante das dificuldades, mesmo quando o sonho parecia distante, sempre estiveram ao meu lado me incentivando: Minha esposa e meu pai.

Meu muito obrigado também para a turma do Laboratório Virtual do LNCC, cujo o exemplo de dedicação e trabalho foram essenciais para essa caminhada.

Agradeço aos professores do Laboratório de Computação Gráfica: Ao Prof. Cláudio Esperança pelas fantásticas aulas, onde o mais complexo torna-se simples como um passe de mágica; Ao Prof. Antonio Oliveira, exemplo de educação e humildade, cujo o aprendizado ultrapassa as matérias da classe e invadem as matérias da vida;

Ao Prof. e orientador Paulo Roma, agradeço pelas inúmeras oportunidades dadas a mim ao longo desses 3 anos. Agradeço também pela paciência e confiança que a conclusão deste trabalho seria mesmo possível. Meu muito obrigado!

Agradeço à Petrobras pelo suporte financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## GERAÇÃO DE MALHAS 3D PARA DADOS SÍSMICOS

José Marcos Pilato Jr.

Setembro/2009

Orientador: Paulo Roma Cavalcanti

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Este trabalho estende para o espaço tridimensional a metodologia conhecida como *Improved Atomic Meshes*, com a finalidade de criar malhas numéricas a partir de dados sísmicos tridimensionais. O principal objetivo é produzir malhas numéricas a partir de imagens sísmica “diretamente”, sem a necessidade de qualquer etapa de segmentação na imagem.

Tradicionalmente, os dados sísmicos primeiro devem ser examinados por geólogos e geofísicos, que, por sua vez, os modelam como formas geométricas fundamentais, ou seja, horizontes e falhas. Este modelo pode então ser usado para gerar malhas discretas para vários tipos de simulações numéricas. A técnica proposta gera malhas tetraédricas diretamente a partir de imagem de dados sísmicos, combinando técnicas de processamento de imagens e modelagem física. Em vez de ser obtida a partir de um modelo geométrico intermediário, horizontes e falhas são extraídos e visualizados diretamente a partir da malha tridimensional.

O método proposto inicia com uma distribuição inicial de pontos (átomos) sob o domínio do modelo. Após isso, os átomos são projetados até as características de interesse e uma energia potencial é associada aos pixels da imagem e ao conjunto de átomos. Finalmente, os átomos são movidos para uma configuração de um energia potencial mínima, e uma malha é gerada através de uma Triangulação de Delaunay.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## 3D MESH GENERATION FOR SEISMIC DATA

José Marcos Pilato Jr.

September/2009

Advisor: Paulo Roma Cavalcanti

Department: Systems Engineering and Computer Science

This work extends to 3D the “Improved Atomic Meshes” methodology, which creates numerical meshes from 3D seismic data. The main goal is to produce numerical meshes from image data “directly”, bypassing any image segmentation step.

Traditionally, seismic data must first be examined by geologists and geophysicists who, in turn, model the fundamental geometric shapes, i.e., horizons and faults. This model can then be used to generate discrete meshes for several kinds of numerical simulations. The implemented technique generates tetrahedral meshes directly from the seismic image datasets, by combining image processing and physical modeling. Instead of being obtained from an intermediate geometrical model, horizons and faults are extracted and visualized directly from the 3D mesh.

The proposed method begins by generating an initial distribution of points (atoms) over the domain of the model. Afterwards, the atoms are projected onto perceived features and a potential energy is assigned to the image pixels and to the set of atoms. Finally, the atoms are moved to a configuration of minimum potential energy, and a mesh is generated by means of a Delaunay triangulation.

# Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
<b>1</b> Introdução	<b>1</b>
<b>2</b> Revisão Bibliográfica	<b>5</b>
2.1 Métodos Sísmicos . . . . .	5
2.1.1 Fontes e receptores sísmicos . . . . .	6
2.1.2 Aquisição . . . . .	7
2.1.3 Processamento . . . . .	9
2.1.4 Interpretação . . . . .	9
2.2 Malhas Numéricas . . . . .	10
2.2.1 Malhas . . . . .	10
2.2.2 Triangulação de Delaunay e Diagrama de Voronoi . . . . .	11
2.3 Técnicas de Processamento de Imagens . . . . .	12
2.3.1 Detecção de Bordas . . . . .	13
2.3.2 Morfologia . . . . .	14
<b>3</b> Trabalhos Relacionados	<b>17</b>
3.1 Extração de dados Sísmicos . . . . .	17
3.2 Geração de Malhas a partir de Imagens . . . . .	21
<b>4</b> Malhas Atômicas	<b>25</b>
4.1 Modelagem do método . . . . .	27
4.2 Energia Potencial . . . . .	29
4.3 Distribuição dos Átomos . . . . .	32



4.4	Processo de Otimização . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Modelo proposto</b>	<b>36</b>
5.1	Distribuição dos Átomos . . . . .	36
5.2	Projeção de Átomos . . . . .	38
5.3	Energia Inter-Atômica Laplaciana . . . . .	40
<b>6</b>	<b>Construção do Protótipo</b>	<b>42</b>
6.1	Construção da Malha . . . . .	42
6.2	Extração de Superfícies . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Experimentos</b>	<b>49</b>
7.1	Qualidade da Malha . . . . .	50
7.2	Adequação da Malha . . . . .	51
<b>8</b>	<b>Conclusões</b>	<b>57</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>59</b>

# Lista de Figuras

1.1	Imagem sísmica. . . . .	2
1.2	Modelo geológico. Horizontes e falhas. . . . .	2
2.1	Aquisição sísmica [1]. . . . .	8
2.2	Tipos de malhas: Estruturadas, Não-Estruturadas e Híbridas. . . . .	10
2.3	(a) Triangulação de Delaunay. (b) Diagrama de Voronoi. . . . .	12
3.1	Atributos sísmicos: $w_t$ fatias dos dados sísmicos, orientados por um vetor normal $n$ . . . . .	18
4.1	Falha sísmica. . . . .	25
4.2	Malha 2D alinhada com a imagem sísmica. . . . .	26
4.3	Interação entre átomos. . . . .	28
4.4	Função potencial. . . . .	29
5.1	Átomos distribuídos. . . . .	38
5.2	Projeção de átomos em 2D. . . . .	40
5.3	Átomos projetados em 3D. . . . .	40
6.1	Visualização de um dado sísmico tridimensional. . . . .	43
6.2	Átomos distribuídos conforme uma distância constante. . . . .	44
6.3	Átomos após o procedimento de projeção. . . . .	44
6.4	Malha alinhada com o dado sísmico. . . . .	45
6.5	Cortes na malha tridimensional. . . . .	47
6.6	Superfície extraída da malha. . . . .	48
7.1	Dado sísmico sintético 3D. . . . .	50
7.2	Imagem sísmica antes da etapa de otimização. . . . .	51

7.3	Malha alinhada com o dado sísmico. . . . .	52
7.4	Qualidade da malha segundo a métrica de qualidade $q$ . . . . .	53
7.5	Qualidade da malha, sem utilizar a etapa de projeção. . . . .	53
7.6	Adequação da malha. . . . .	55
7.7	Adequação da malha (arestas). . . . .	56

# Lista de Tabelas

7.1	Distribuição dos ângulos obtidos, construindo a malha com a distância nominal variando de 10 a 20 pixels. . . . .	54
7.2	Adequação da Malha com e sem a etapa de projeção. . . . .	55
7.3	Adequação da Malha (arestas) com e sem a etapa de projeção. . . . .	55

# Capítulo 1

## Introdução

O conhecimento da composição do subsolo é fundamental para a tomada de decisão da indústria petrolífera. Simulações de processos geológicos complexos são feitas para ajudar na tomada de decisão, pois tanto na exploração como na produção, as decisões são baseadas em resultados de simulações de reservatórios e/ou de bacias.

As dificuldades na exploração e produção são muitas. Um dos principais motivos é o fato da coleta de informações ainda não ser de forma tão precisa e vasta, o que causa um limitado conhecimento das características físicas e geométricas dos modelos geológicos. A principal fonte de informação de dados subterrâneos vem de poços e da interpretação da resposta acústicas a ondas sísmicas (geradas por explosivos, ar comprimido, queda de pesos ou vibradores). Entretanto, esses dados são limitados por natureza e não fornecem uma quantidade ideal de informação para a montagem dos modelos geológicos.

Logo após a aquisição dos dados sísmicos, a sísmica é modelada matematicamente como um campo escalar tridimensional e pode ser visualizada como uma imagem sísmica, ilustrada da figura 1.1. Essa imagem é usada na interpretação das características geológicas de interesse. Além da visualização em forma de imagem, os dados sísmicos podem ser visualizados através de algoritmos de visualização volumétrica, como mostra um estudo feito em [1].

O modo tradicional é usar o conhecimento de geólogos e geofísicos para fazer a interpretação geológica dessas imagens sísmicas. O resultado disso é um conjunto de curvas e superfícies que são utilizados na construção de um modelo geológico geometricamente e topologicamente consistente. O próximo passo é usar esse modelo

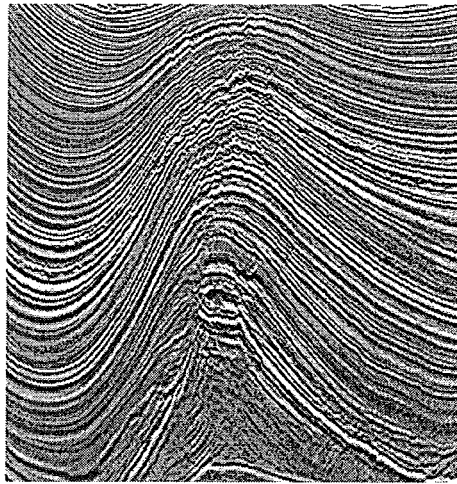


Figura 1.1: Imagem sísmica.

geométrico intermediário para gerar malhas discretas que poderão ser utilizadas em diversas simulações numéricas, como por exemplo: simulação de reservatórios, propagação de ondas acústicas ou fluxo de calor e fluido em larga escala dentro de sedimentos porosos saturados.

Este modelo geológico deve representar todas as características de interesse, como os horizontes, que representam as superfícies de separação entre camadas geológicas e as falhas, descontinuidades causadas por deslizamento de camadas, conforme podem ser vistos na figura 1.2. Os horizontes e falhas dividem o modelo geológico em um conjunto de regiões do espaço cuja a união forma as camadas do modelo. A partir do modelo geométrico é gerada uma malha numérica que contém a fronteira do modelo, fazendo com que os horizontes e falhas sejam representados como faces de tetraedros em 3D ou arestas de triângulos em 2D.

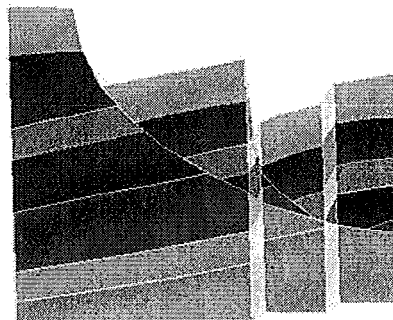


Figura 1.2: Modelo geológico. Horizontes e falhas.

Como visto anteriormente, o método tradicional utiliza a percepção visual hu-

mana para interpretação de características dos modelos geológicos, criados a partir de dados aproximados do subsolo. É nesse contexto que o presente trabalho se insere. A abordagem proposta neste trabalho adapta técnicas de processamento de imagens e de modelagem física, de maneira com que seja possível a criação de malhas tridimensionais, contendo horizontes e falhas, diretamente a partir de imagens sísmicas, sem fazer uso de um modelo geométrico intermediário. Desta maneira, os horizontes e falhas podem ser extraídos diretamente da malha, fornecendo uma sequência de processamento automatizada.

O método utilizado da continuidade ao trabalho desenvolvido por Esperança et al. [2], adequando o problema para o espaço tridimensional. Em seu trabalho, Esperança et al., aprimoraram a técnica conhecida por Malhas Atômicas introduzida por Hale [3][4].

O processo introduzido por Hale inicia realçando os horizontes e falhas na imagem sísmica. Em um segundo passo é gerado uma distribuição inicial de pontos (átomos) sobre o domínio do modelo. A partir daí, uma energia potencial é associada aos *pixels* da imagem e ao conjunto de átomos. Finalmente, os átomos são movidos para uma configuração de energia potencial mínima, onde a malha é gerada partir de uma triangulação de Delaunay, usando os átomos como vértices.

No que diz respeito aos aprimoramentos, chamados *Improved Atomic Meshes*, Esperança et al. introduziram duas modificações à idéia original de Hale: A primeira foi propor um procedimento no qual os átomos são inicialmente projetados até as características de interesse da imagem, e a segunda, diz respeito à introdução de um novo componente (Laplaciano) na formulação de energia que governa o movimento dos átomos. Experimentos constatam que tais modificações resultaram em uma malha final composta por uma quantidade maior de triângulos bem formados, além de um melhor alinhamento da malha com as características de interesse da imagem.

Este trabalho foi estruturado em 8 capítulos. O capítulo 2 expõe uma introdução aos métodos sísmicos, além de relacionar conceitos fundamentais para a correta compreensão desta dissertação. A capítulo 3 discute os trabalhos relacionados encontrados na literatura. No capítulo seguinte é apresentado o conceito de Malhas Atômicas, precursor do método proposto. Os capítulos 5 e 6 apresentam a modelagem física do modelo proposto e os detalhes da implementação, respectivamente. Os experimentos

efetuados, bem como os resultados obtidos são discutidos no capítulo 7. Finalmente, o capítulo 8 apresenta as conclusões.



# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

O caráter interdisciplinar deste trabalho torna necessário a apresentação de conceitos básicos de métodos sísmicos. Na próxima seção será feita uma breve descrição do processo de obtenção de dados sísmicos. A seção 2.2.1 introduz os conceitos de malhas e triangulações. A partir de algoritmos de visualização volumétrica são geradas imagens sísmicas. Tais imagens são a representação visual dos dados sísmicos. O método utilizado neste trabalho é iniciado a partir dessas imagens, onde são introduzidas técnicas de processamento de imagens para realçar as características de interesse desejadas. Os conceitos básicos dessas técnicas serão apresentados na seção 2.3.

### 2.1 Métodos Sísmicos

A descoberta de uma nova jazida de petróleo é uma tarefa que envolve um longo tempo de estudos e análises. Somente após exaustivo prognóstico do comportamento de diversas camadas do subsolo, os geólogos e geofísicos decidem propor a perfuração de um poço, que é a etapa no qual mais investimentos exige em todo o processo de prospecção. Um programa de prospecção tem basicamente dois objetivos: (i) localizar dentro de uma bacia sedimentar situações geológicas que tenham condição para a acumulação de petróleo; e (ii) verificar, entre as situações encontradas, qual possui mais chance de conter petróleo. A identificação de uma área favorável à acumulação de petróleo é realizada através de métodos geológicos e geofísicos, que, atuando em conjunto, conseguem indicar o local mais propício para a perfuração.

O método sísmico de reflexão é o método mais utilizado atualmente na indústria do petróleo, pois fornece alta definição das características geológicas em subsuperfície propícia à acumulação de hidrocarbonetos, a um custo relativamente baixo. Mais de 90% dos investimentos em prospecção são aplicados em sísmica de reflexão [5]. Os produtos finais são, entre outros, imagens das estruturas e camadas geológicas em subsuperfície, apresentadas sob as mais diversas formas, que são disponibilizadas para o trabalho dos intérpretes.

O levantamento sísmico inicia-se com a geração de ondas elásticas, através de fontes artificiais, que se propagam pelo interior da Terra, onde são refletidas e refratadas nas interfaces que separam as rochas de diferentes constituições petrofísicas, e retornam à superfície, onde são captadas por sofisticados equipamentos de registro. De acordo com Robinson e Treitel [6] a exploração de hidrocarbonetos, óleo e gás baseada em sísmica pode ser dividida em três etapas: aquisição, processamento e interpretação. A seguir será apresentado uma breve descrição de cada etapa, bem como uma introdução à definição de fontes e receptores sísmicos.

### **2.1.1 Fontes e receptores sísmicos**

As fontes de energia sísmica mais utilizadas são a dinamite e o vibrador em terra e canhões de ar comprimido em levantamento marítimo. Cada uma destas fontes emite um pulso característico conhecido como assinatura da fonte que se propaga em todas as direções. Estes pulsos elásticos ou detonações são de duração ou comprimento muito pequeno, da ordem de 200 milissegundos, e se refletem e refratam em cada uma das camadas geológicas em profundidade, retornando à superfície com informações valiosas para a pesquisa de petróleo.

Os receptores utilizados para registrar as reflexões destes pulsos são basicamente de dois tipos: eletromagnéticos (geofones) para registros em terra, e de pressão (hidrofones) para levantamento na água. O primeiro é composto por uma bobina suspensa dentro de um campo magnético gerado por um potente ímã acondicionado em invólucro impermeável, que é firmemente cravado à superfície da Terra. Quando uma onda sísmica atinge o geofone, o movimento relativo entre a bobina e o ímã gera uma corrente elétrica induzida que é proporcional a vários fatores, inclusive à amplitude da onda incidente.

Os hidrofones utilizam cristais piezoelétricos, que geram uma corrente elétrica proporcional à variação de pressão produzida pelas ondas acústicas na água. Estes receptores, a exemplo dos geofones, devem reproduzir o mais fielmente possível as vibrações mecânicas na forma de oscilações elétricas.

Estas oscilações elétricas são transmitidas até o sismógrafo, onde são digitalizadas, multiplexadas e registradas após severo depuramento e amplificação eletrônicos [5].

### 2.1.2 Aquisição

Tanto na terra quanto no mar, a aquisição de dados sísmicos consiste na geração de uma perturbação mecânica em um ponto da superfície e o registro das reflexões em centenas (128 a 1024) de canais de recepção ao longo de uma linha reta.

Estes canais encontram-se equidistantes (geralmente de 20 a 50 metros), de modo que o canal mais afastado muitas vezes encontra-se a vários quilômetros de distância da fonte de perturbação, ou ponto de tiro. Todo o conjunto fonte/receptores tem seu posicionamento dinâmico definido por levantamentos topográficos em terra e por radioposicionamento e satélites no mar.

Assim como na fotografia convencional ou na transmissão de imagens de televisão, a aquisição de dados sísmicos de reflexão leva em consideração uma série de parâmetros que visam à obtenção de imagens de boa qualidade da subsuperfície, dentro dos limites de economicidade. Em função do detalhe necessário aos objetivos do levantamento sísmico, critérios como resolução vertical e horizontal, distorções, atenuação de ruídos, profundidade de interesse, entre outros, são devidamente equacionados no projeto.

Como exemplo, o tempo de registro determina a profundidade máxima de pesquisas. No momento da detonação,  $t = 0$ , o sismógrafo inicia a gravação até o tempo de registro estabelecido pelo geofísico. Em levantamentos terrestres normalmente o tempo de registro é de 4,0 segundos. Considerando que a velocidade média de propagação das ondas sísmicas nas rochas é de 3.000 m/s, para  $t = 4,0$  segundos a profundidade máxima de pesquisa será de 6.000 metros (dois segundos para o percurso de ida e dois segundos para o percurso de volta). No mar, devido à presença da lâmina de água, onde as ondas sísmicas se propagam com velocidade

baixa (1.500 m/s), o tempo de registro varia de 6 a 12 segundos.

A amostragem horizontal é definida em função do detalhe necessário aos objetivos do levantamento. Nos levantamentos de reconhecimento regional, a distância horizontal entre os pontos amostrados em subsuperfície era da ordem de 100 metros. Atualmente são comuns levantamentos de detalhe com amostragem horizontal menores que 10 metros. Conseqüentemente, a distância entre os canais receptores é de 20 metros.

Em levantamento tridimensionais a amostragem lateral é definida em função da distância entre cabos. Além do detalhe do levantamento, a amostragem horizontal e lateral são importantes no processamento das imagens obtidas, onde algoritmos sofisticados exigem amostragem espacial e temporal adequadas. A amostragem temporal é definida pelo geofísico em função do conteúdo de frequências dos sinais.

Os sismógrafos modernos oferecem várias opções de amostragem temporal, sendo que as mais utilizadas são de 4 e 2 milissegundos. Desta maneira, a imagem sísmica final, ou seção sísmica, será composta por amostras contendo os valores das amplitudes, espaçadas teatralmente ou em função da distância entre estações receptoras ou em função da distância entre cabos, e verticalmente pela razão de amostragem temporal.

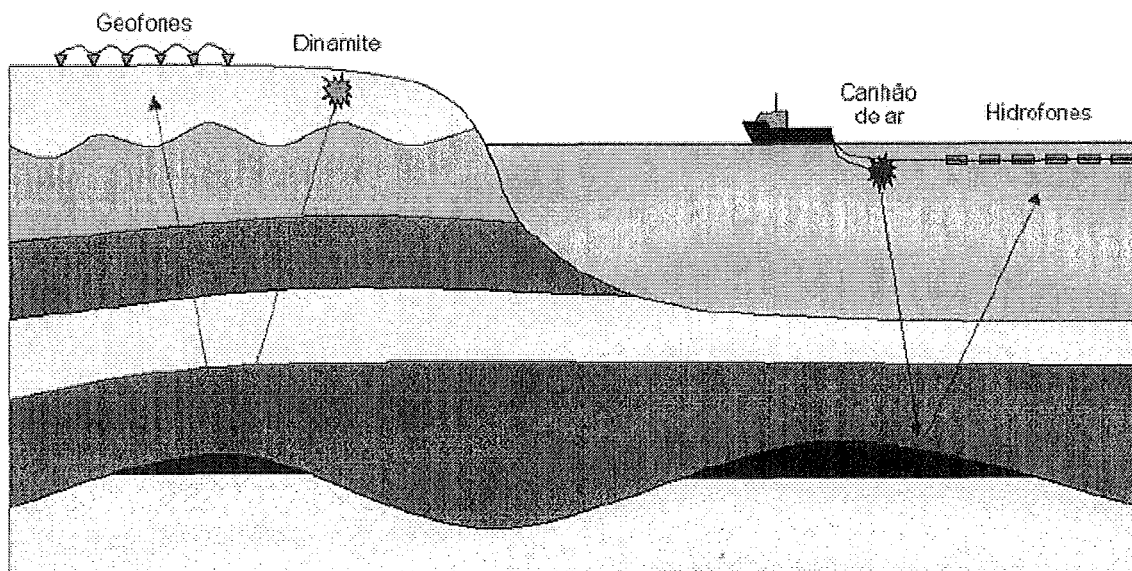


Figura 2.1: Aquisição sísmica [1].

### 2.1.3 Processamento

No processamento dos dados sísmicos, alguns erros inerentes ao levantamento sísmico são corrigidos, e os dados são reorganizados para formarem uma grade tridimensional com uma amostra de amplitude sísmica em cada vértice da grade (*voxel*). Duas das dimensões do conjunto de dados são direções espaciais e estão relacionadas com as posições das fontes e dos receptores. Uma das transformações realizadas nos dados durante o processamento faz com que as posições da fonte e do receptor sejam a mesma, formando uma linha vertical. Uma vez encontrada essa linha, as amostras são obtidas medindo o tempo que a onda leva para ir e voltar por cada intervalo de profundidade. Cada linha vertical é denominada como traço sísmico, e será usada para formar uma coluna da grade tridimensional. Sendo assim, a grade tridimensional possui duas dimensões espaciais, conhecidas como *inline* e *crossline*, produto do deslocamento das fontes e receptores numa área determinada, e uma dimensão temporal.

### 2.1.4 Interpretação

Na última etapa, a interpretação, o intérprete, em geral um geólogo ou geofísico, analisa os dados sísmicos e busca criar um modelo que represente a geologia contida na área do levantamento. A interpretação sísmica é usualmente classificada, de acordo com o foco, em dois tipos: estratigráfica e estrutural. Na interpretação estratigráfica o foco está em estudar a maneira como as camadas se comportaram ao longo do tempo. A interpretação estrutural está relacionada à identificação das camadas geológicas, normalmente um conjunto de curvas e superfícies, como visto na figura 1.2. Estas curvas e superfícies são a representação dos horizontes (superfícies que limitam camadas geológicas) e as falhas (descontinuidades causadas por deslizamento de camadas). No final desta etapa, são criadas malhas discretas que podem ser usadas para diferentes tipos de simulações numéricas, como por exemplo simulação de reservatórios, propagação de ondas acústicas, etc.

## 2.2 Malhas Numéricas

Um dos principais objetivos deste trabalho é gerar uma malha tridimensional a partir de dados sísmicos, de forma que os horizontes e falhas sísmicas sejam alinhados com as faces dos tetraedros da malha. A malha gerada poderá representar os dados sísmicos em outros tipos de aplicações, tal como na simulação de reservatórios, propagação de ondas acústicas, ou fluxo de fluido e calor em lagar escala dentro de sedimentos porosos saturados.

Este capítulo serão apresentados alguns conceitos clássicos sobre malhas e a Triangulação de Delaunay, método utilizado para gerar a malha neste trabalho.

### 2.2.1 Malhas

Uma malha pode ser definida como uma discretização de um domínio em formas geométricas simples, tais como triângulos ou quadriláteros em 2D e tetraedros ou hexaedros em 3D. Uma malha triangular é definida por uma triangulação  $T$  de um conjunto de pontos  $S$ . Geralmente, as malhas são classificadas de acordo com três grupos principais: estruturadas, não-estruturadas e híbridas. No entanto, não há unanimidade a respeito de uma definição associada a cada grupo [7]. Um modo comum de diferenciá-los é quanto à topologia da vizinhança dos elementos. Assim, malhas estruturadas são caracterizadas por seus nós internos possuírem número constante de elementos adjacentes. Malhas não-estruturadas possuem nós internos com números de elementos adjacentes variável, e as malhas híbridas, resultado de combinações entre as duas anteriores, não possuem características bem definidas. A figura 2.2 ilustra os três tipos de malhas.

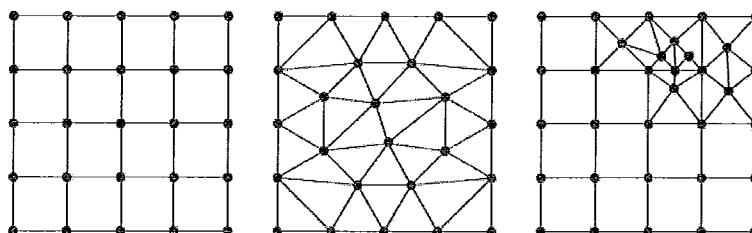


Figura 2.2: Tipos de malhas: Estruturadas, Não-Estruturadas e Híbridas.

Tratando-se de discretização, as malhas estruturadas discretizam o domínio em

elementos possuindo conectividade implícita, ou seja, a coordenada de um nó é suficiente para obter-se todas as relações de conectividade existentes, podendo acelerar o processo de consulta. Por outro lado, as relações de conectividade das malhas não-estruturadas são adquiridas explicitamente sob a forma de tabelas de conectividade. A obtenção de relações de conectividade em malhas híbridas depende de qual combinação de malhas esta resulta [7].

A escolha do tipo de malha adequada está diretamente relacionado à complexidade do problema. O uso de malhas estruturadas são preferidas em domínios simples. Por outro lado, as malhas não-estruturadas são apropriadas em domínios de complexidade arbitrária, pois se conformam melhor ao contorno. Estas, também, permitem a aplicação de refinamento local e adaptativo, fato impossível em malhas estruturadas e de tratamento complexo em malhas híbridas [8]. Vários métodos de discretização, tais como diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos, utilizam malhas não-estruturadas. Estes métodos são muito utilizados para simular sistemas físicos contínuos [9].

Os elementos mais freqüentes em malhas estruturadas são quadriláteros e hexaedros. Em malhas não-estruturadas, triângulos e tetraedros prevalecem apesar da possibilidade de construí-las com quadriláteros, prismas, pirâmides e hexaedros [7]. E, como a própria definição de malhas híbridas induz, estas são compostas por elementos de formas variadas.

O número de elementos de uma malha pode influenciar diretamente no custo computacional do problema, como por exemplo em simulações. Em uma simulação de reservatórios, quanto mais elementos, maior é o custo da simulação [5]. Por isso, a malha deve ser refinada apenas onde se faça necessário. Uma malha uniforme não considera esse fator. Diferentemente da malha uniforme, uma malha adaptativa forma triângulos menores nas proximidades das bordas e triângulos maiores longe delas [10].

### 2.2.2 Triangulação de Delaunay e Diagrama de Voronoi

A triangulação de Delaunay de um conjunto  $P$  de pontos é a triangulação cujo circuncírculo de cada triângulo não possui nenhum ponto de  $P$  no seu interior. Esta triangulação é muito usada em várias áreas. Dentre os motivos que justificam

tamanho popularidade estão as boas propriedades da triangulação Delaunay. Por exemplo, em  $\mathbb{R}^2$ , dentre todas as possíveis triangulações de um conjunto de pontos, a triangulação de Delaunay maximiza o ângulo mínimo da triangulação e minimiza o maior circuncírculo [11], sendo ainda a triangulação que minimiza os limitantes de erro de interpolação linear [12]. Tais propriedades sugerem que os elementos gerados através de uma triangulação de Delaunay sejam de boa qualidade.

A triangulação de Delaunay tem como dual o diagrama de Voronoi. Tal diagrama divide o espaço em regiões contendo os pontos  $P$  tal que cada ponto de  $P$  está contido em apenas uma região. A figura 2.3 ilustra, em um exemplo bidimensional, a Triangulação de Delaunay e circunferências vazias e o Diagrama de Voronoi.

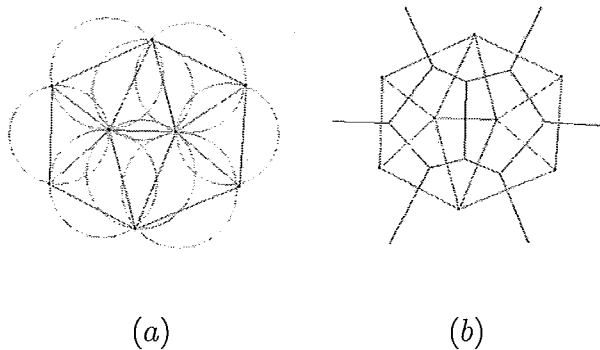


Figura 2.3: (a) Triangulação de Delaunay. (b) Diagrama de Voronoi.

Diversos algoritmos têm sido propostos para o cálculo, tanto da triangulação de Delaunay [13], quanto do Diagrama de Voronoi [14]. Tais algoritmos têm sido implementados em diversas bibliotecas de geometria computacional, sendo a biblioteca CGAL [15] uma das mais relevantes. As implementações realizadas neste trabalho tiveram como base a biblioteca CGAL.

## 2.3 Técnicas de Processamento de Imagens

Como dito anteriormente, alguns algoritmos de visualização volumétrica podem ser utilizados para gerar imagens sísmicas. Essas imagens são a representação visual dos dados sísmicos. O método no qual este trabalho se refere tem como entrada essas imagens sísmicas.

As imagens sísmicas servem de entrada para o método proposto, que utiliza algoritmos de processamento de imagens. Estes algoritmos, por sua vez, fazem



parte de uma etapa de pré-processamento no método proposto, onde o principal objetivo é realçar as características de interesse na imagem. As próximas subseções apresentam técnicas de processamento de imagens que podem ser utilizadas para o realce das características de interesse na imagem.

### 2.3.1 Detecção de Bordas

Em processamento de imagens, uma borda é o limite entre duas regiões, na mesma imagem, com propriedades relativamente distintas de nível de cinza. Assume-se que as regiões em questão são suficientemente homogêneas, de maneira que a transição entre duas regiões pode ser determinada com base apenas na descontinuidade dos níveis de cinza [16].

Geralmente, a idéia por trás da maioria das técnicas para a detecção de bordas, se referem à computação de um operador local diferencial. A primeira derivada pode ser usada na detecção da presença de uma borda em uma imagem, calculando o valor do gradiente em qualquer ponto da imagem.

A partir de análise vetorial, presumi-se que o vetor gradiente aponta na direção da maior variação da imagem num ponto. Normalmente, em algoritmos de detecção de bordas, o valor do vetor gradiente é aproximado pela soma dos valores absolutos das suas derivadas parciais [16] como na equação:

$$|\nabla f| = |G_x| + |G_y| , \quad (2.1)$$

onde  $\nabla f$  é o gradiente na imagem na posição  $(x, y)$ .

Dado que o cálculo do gradiente de uma imagem baseia-se na obtenção das derivadas parciais na posição  $(x, y)$ , a derivação pode ser implementada de maneira digital de diferentes formas. Os operadores de Sobel possuem a vantagem de fornecerem, a um só tempo, os efeitos de diferenciação e suavização. Uma vez que a derivação aumenta o ruído, o efeito de suavização é uma característica particularmente atrativa dos operadores de Sobel.

Tem-se, a partir da equação 2.1, que as derivadas baseadas nas máscaras do

operador de Sobel são:

$$\begin{aligned}Gx &= (z7 + 2z8 + z9) - (z1 + 2z2 + z3) \\Gy &= (z3 + 2z6 + z9) - (z1 + 2z4 + z7)\end{aligned}\tag{2.2}$$

onde os  $z$  são os níveis de cinza dos pixels sobrepostos pela máscara em qualquer posição da imagem. da imagem:

$$\begin{array}{ccc}z1 & z2 & z3 \\z4 & z5 & z6 \\z7 & z8 & z9\end{array}\tag{2.3}$$

### 2.3.2 Morfologia

A palavra morfologia é conhecida em diferentes ciências. Na área da biologia denota uma área que trata a forma e a estrutura de animais e plantas. Em lingüística, morfologia é o estudo das estruturas que foram uma palavra. Em processamento de imagens, a mesma palavra é usada no contexto da morfologia matemática, que denota uma ferramenta para a extração de componentes de imagens. Nesse contexto, a morfologia engloba um conjunto de operações morfológicas não lineares, incluindo operações consideradas simples, como remoção de ruídos, até operações mais complexas. Exemplos são o espaçamento de certas formas, a detecção de cantos e pontos isolados, a decomposição de formas complexas nas suas componentes significativas separando-as das partes estranhas, identificação de formas escondidas e reconstrução de formas distorcidas ou afetadas por ruído [17]. Em resumo, as operações morfológicas podem simplificar os dados de uma imagem, preservando a sua forma essencial e eliminando irrelevâncias.

Uma operação morfológica sempre possui associada uma máscara ou elemento estruturante, correspondendo à forma ou objeto que age sobre a imagem como o intuito de produzir um resultado esperado. O ideal é que este elemento seja mais simples possível, pois o tempo de processamento está diretamente ligado à sua complexidade. Além destas características, os operadores booleanos E, OU e NÃO são considerados fundamentais na morfologia binária.

Normalmente as operações morfológicas são definidas para imagens binárias ou para imagens com níveis de cinza. Para ambos os tipos os conceitos são similares,

no entanto, o elemento estruturante é um conjunto para imagens binárias e uma função para imagens com níveis de cinza. Existem duas classificações principais as quais as operações morfológicas se enquadram: elementares e compostas. No grupo das elementares encontram-se a dilatação e erosão. Nas compostas são incluídos o fechamento, abertura, transformada, fronteira e esqueleto entre outros [16].

A seqüência em que as operações morfológicas são aplicadas é um fato importante, por exemplo, depois de se aplicar uma seqüência de operações, a inversa não produz necessariamente a imagem original. A dilatação e a erosão são geralmente empregados em conjunto, ou seja, como operador composto, pois a sucessiva aplicação de erosões e dilatações tende a eliminar pequenos detalhes da imagem, menores que o elemento estruturante, sem degradar a geometria global da imagem.

## Dilatação

Devido as suas características e efeitos produzidos, a dilatação é conhecida como uma operação de crescimento, expansão ou preenchimento. Matematicamente, a dilatação é a transformada morfológica que combina duas matrizes utilizando edição vetorial dos elementos das mesmas. Formalmente, a dilatação de  $X$  por  $Y$ , denotada por  $X \oplus Y$ , é definida por:

$$X \oplus Y = \{z \in E^n | z = x + y, \text{ para algum } x \in X \text{ e } y \in Y\}, \quad (2.4)$$

onde  $X$  é a matriz da imagem que está sendo processada morfológicamente e  $Y$  é o elemento estruturante. Todos os pontos do espaço  $E^n$  ( $N = 2$ ), que correspondem a translações de pontos do objeto  $X$  por elementos  $Y$  pertencem à imagem dilatada. Em outras palavras, uma varredura de  $X$  por  $Y$  é executada. Cada vez que a origem de  $Y$  se sobrepõe a um ponto de  $X$  é feito um OU do conjunto  $Y$  transladado com a imagem final.

## Erosão

A erosão é conhecida como o dual morfológico da dilatação, que é a transformada morfológica que combina duas matrizes utilizando a relação  $\subset$ . Formalmente, a

erosão de  $X$  por  $Y$ , denotada por  $X \ominus Y$ , é definida por:

$$X \ominus Y = \{z \in E^n | z + y \in X, \text{ para qualquer } y \in Y\}, \quad (2.5)$$

Após a erosão, a imagem só contém aqueles pontos que depois de serem transladados ainda pertencem à imagem original.

### **Abertura e Fechamento**

A abertura é uma operação simples que consiste numa erosão seguida de uma dilatação. O resultado do processo de abertura é o afastamento de objetos que estão próximos demais ou se tocam, além de aumentar buracos existentes nas imagens. Por sua vez, o fechamento consiste numa dilatação seguida de uma erosão, juntando objetos afastados e fechando

# Capítulo 3

## Trabalhos Relacionados

A presente dissertação propõe um método para a obtenção de malhas tridimensionais geradas a partir de imagens sísmicas. Essas malhas, alinhadas com as imagens sísmicas, podem ser utilizadas para a extração/visualização das camadas da subsuperfície. Este capítulo apresenta trabalhos encontrados na literatura relacionados aos problemas de extração de dados sísmicos e geração de malhas a partir de imagens.

### 3.1 Extração de dados Sísmicos

Ferramentas de apoio à interpretação sísmica em conjuntos de dados tridimensionais têm se mostrado uma área de bastante interesse nos últimos tempos, principalmente envolvendo a extração automática de horizontes e falhas [18][1]. Da maneira tradicional, os intérpretes sísmicos normalmente necessitam definir centenas ou até milhares de pontos em volumes de dados sísmicos. Esses pontos definidos são utilizados posteriormente para gerar linhas poligonais ou interpolados para formar as superfícies da falha ou do horizonte interpretado. O conjunto dessas superfícies dá origem ao modelo geológico, utilizado para gerar a malha que representa as camadas da subsuperfície.

Grande parte das técnicas de apoio à interpretação sísmica utilizam-se de atributos sísmicos. O princípio por trás desses atributos está relacionado ao fato de que se os sinais sísmicos contêm informações geológicas, podem existir operações matemáticas capazes de revelar de forma mais clara essas informações [19]. Os atributos sísmicos foram popularizados no final dos anos 1970 por Taner [20].

A grande maioria dos atributos sísmicos utilizados fazem uso da hipótese de que os horizontes sísmicos podem ser modelados como localmente planares e que as falhas geram perturbações nesse modelo [19]. Neste contexto, os atributos de falha funcionam como um teste dessa hipótese para cada ponto  $(x, y, z)$  da imagem. Geralmente, esse teste é feito considerando um conjunto de  $w_t$  fatias dos dados sísmicos centradas em torno de  $(x, y, z)$  e orientadas com uma normal  $n$ , como é ilustrado na figura 3.1. Os dados contidos em cada fatia desse cubo de análise são obtidos por interpolação a partir do volume sísmico original.

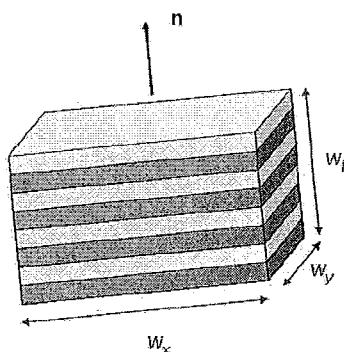


Figura 3.1: Atributos sísmicos:  $w_t$  fatias dos dados sísmicos, orientados por um vetor normal  $n$ .

Entre os atributos sísmicos mais famosos se destacam o Semblance e o Cubo de Coerência. O Semblance se baseia na soma de traços sísmicos. Caso os traços estejam alinhados e semelhantes, então a soma tem um efeito construtivo. Em outras palavras, o Semblance pode ser definido como uma medida de continuidade do horizonte que gera valores entre zero, no caso em que a defasagem entre traços vizinhos gera um efeito destrutivo, e o valor de um, para o caso de continuidade ideal do horizonte [19].

No contexto de Sísmica, entende-se coerência como uma medida de similaridade entre eventos sísmicos [21]. Existem pelo menos três versões diferentes do atributo conhecido como cubo de coerência propostas ao longo do tempo. A versão clássica do algoritmo calcula a correlação cruzada de cada traço com o seu vizinho em cada uma das direções espaciais e combina os dois resultados após uma normalização de energia [22].

Conforme dito anteriormente, existem vários tipos de atributos sísmicos propostos na literatura [19]. De uma maneira geral, os atributos sísmicos são bastante

úteis na detecção automática dos horizontes e falhas da subsuperfície, no entanto, não é possível, apenas com esses atributos, obter-se malhas e/ou superfícies que representam as camadas da subsuperfície geológica.

Uma forma bastante comum de extrair superfícies a partir de um volume de dados sísmicos consiste na aplicação de técnicas de afinamento de imagem [19]. Esse tipo de algoritmo tem por objetivo eliminar os pixels da borda dos objetos presentes na imagem, deixando apenas as linhas que descrevem os eixos centrais dos objetos.

Canny [23] propôs a aplicação de um método de supressão de pontos não-máximos. Esse método de processamento de imagens identifica as bordas de uma imagem, retendo apenas os pontos que são máximos locais do gradiente da imagem ao longo da direção do gradiente. O gradiente funciona como um detector de borda, enquanto a identificação do ponto de máximo localiza o evento com precisão. Canny utiliza a derivada combinada com o filtro Gaussiano. Alguns outros trabalhos utilizam a mesma estratégia proposta por Canny [4][24][25].

Ainda tratando-se de extração de superfícies, Canny [23] propôs a limiarização por histerese, cujo o objetivo é, após ter identificado os pontos de máximo local, ligá-los formando uma linha (no caso de uma imagem 2D) de borda. Essa técnica é combinada com um atributo sísmico para descartar os pontos que são gerados em máximos locais. A aplicação de um limiar pode ser difícil em dados muito ruidosos, levando à geração de muitos falsos positivos ou muitos falsos negativos. Nesse caso, a ideia é trabalhar com dois valores de limiar: o inferior e o superior. Se a intensidade for menor do que o limiar inferior ela é descartada, sendo zerada na saída. Se a intensidade estiver entre os dois limiares, ela é preservada apenas se o *voxel* está topologicamente conectado a um *voxel* com intensidade maior do que o limiar superior.

Em [26] foi utilizado técnicas tradicionais de esqueletonização de imagens binárias 2D (Mais detalhes em [27]). Tais técnicas foram adaptadas para a extração das superfícies sísmicas. O volume sísmico é submetido aos seguintes passos de filtragem:

1. Para cada fatia horizontal é efetuada uma binarização de imagem pela aplicação de um limiar. A imagem 2D binarizada de cada fatia é submetida ao processo de esqueletonização.
2. Para cada fatia vertical da direção x do volume resultado é realizada a esquele-

tonização.

3. O passo 3 é repetido para as fatias verticais na direção  $y$ , novamente nas fatias horizontais e assim sucessivamente até que não se tenha nenhuma alteração nas imagens.

Para que evitar buracos oriundos existentes anteriormente, cada iteração estica o esqueleto gerado. O processo de eskeletonização aplica regras sobre a imagem binária de forma a eliminar pixels que se encontram na borda das estruturas lineares, mantendo apenas os que se encontram no centro da estrutura. Esse processo inclui um passo de adaptação que envolve a utilização de um limiar inferior à semelhança do processo de limiarização por histerese.

Outra técnica interessante relacionada à extração de superfícies sísmicas é o Semblance Orientado pela Estrutura [28]. Neste trabalho, o atributo sísmico calculado é binarizado de forma a só considerar pontos cujo valor de Semblance seja menor do que um limiar. A partir daí, o mapa 3D de pontos é sub-amostrado espacialmente gerando um conjunto de sementes.

Essas sementes são agrupadas com o objetivo de obter-se um conjunto de retalhos planos, as quais representam, cada um, uma superfície do dado sísmico. O processo de agrupamento é baseado em uma função de compatibilidade  $C(p)$  que dá uma indicação de quão bem o grupo de pontos dentro da esfera de raio  $d$  centrada em  $p$  pode ser representado por um modelo plano. A semente de maior confiança, ou seja, aquela que obteve o maior  $C(p)$  é a escolhida para iniciar o processo de geração de retalhos. O processo de geração continua varrendo a lista de valores de  $C(p)$  em ordem decrescente até que o valor encontrado na lista seja menor do que um valor prefixado.

Após o processo de geração os retalhos planos são submetidos a um processo de combinação de forma a gerar superfícies maiores (*surface merging*). Nesse processo de combinação todos os pares de superfícies são considerados e, para classificar o quanto as superfícies são compatíveis, uma função de compatibilidade  $C_{s_1, s_2}$  entre duas superfícies  $s_1$  e  $s_2$  é utilizada. Do mesmo modo, o processo se inicia combinando as superfícies  $s_1$  e  $s_2$  de maior confiança, gerando uma nova superfície para a qual são calculados novos valores de compatibilidade com as demais superfícies. O processo continua até se chegar a um valor de compatibilidade menor do que um limiar. Cada



superfície gerada a partir de um conjunto de sementes é considerada como uma combinação de um modelo de superfície plana com um campo residual que modela as irregularidades da superfície. O campo residual é amostrado uniformemente ao longo do plano e calculado como uma média ponderada dos resíduos das sementes da superfície.

Machado [19] explora técnicas de Aprendizado Competitivo aplicadas aos problemas de extração e visualização de falhas em dados sísmicos. A estratégia proposta parte de um atributo de falha previamente calculado e consiste de três etapas. Na primeira, os dados tridimensionais uniformemente amostrados do atributo de falha são convertidos em um grafo com uso do algoritmo de aprendizado competitivo Growing Neural Gas. Na segunda etapa, o grafo sofre um processo de segmentação de forma a extrair um conjunto de subgrafos, cada um compatível com uma superfície de falha. Na terceira etapa, é utilizado o algoritmo Malhas Neurais Abertas para construir uma malha triangular para cada uma das superfícies identificadas. Malhas Neurais Abertas é um algoritmo de Aprendizado Competitivo que é proposto nesta tese, o qual constrói uma malha a partir de uma função de probabilidades com topologia de uma superfície aberta sem buracos.

## 3.2 Geração de Malhas a partir de Imagens

Um dos objetivos do método proposto neste trabalho é gerar malhas diretamente de imagens sísmicas. Diferentes abordagens têm sido propostas na literatura para solucionar o problema de criação de malhas a partir de imagens. Algumas dessas técnicas são discutidas a seguir.

De acordo com [29], métodos que buscam gerar malhas a partir de imagens podem ser divididos em duas categorias diferentes: abordagens de Modelagem de Imagens por meio de Malhas e abordagens de Geração de Malhas a partir de Imagens para Simulação. O primeiro grupo tem como objetivo construir malhas somente para representar a imagem original, por exemplo, para buscar uma compressão da mesma. Por outro lado, o segundo grupo busca a geração de malhas a partir de imagens para simulação, visam resultados nos quais é essencial que os elementos da malha estejam alinhados às características da imagem de entrada, tentando também





























































































