

**MÁRCIO RODRIGUES DE SANTI**

***PROCEDIMENTOS COMPUTACIONAIS PARA O  
BALANCEAMENTO DE SEÇÕES GEOLÓGICAS***

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil: Estruturas.

Orientador: Luiz Fernando C.R. Martha

Departamento de Engenharia Civil  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, Abril de 2002

*À Paula, mulher da minha vida, e aos  
meus pais Henrique e Lourdes.*

---

## **Agradecimentos**

Ao amigo e orientador Luiz Fernando Martha, acima de tudo pela energia e pelas idéias fundamentais para a realização desse trabalho.

Ao João Luiz, o Açai, pelas idéias e pelo acompanhamento do trabalho.

Ao Professor Sidnei Pires Rostirolla pelo amplo material bibliográfico fornecido, de grande valia para o enriquecimento dessa tese.

Ao amigo Ivan, pelas conversas, fundamentais para manter a motivação e conseqüentemente concluir com êxito esse trabalho.

Aos amigos do Tecgraf, em especial aos colegas (Camilo, Tílio, Ivan Lula, Waldemar, Thadeu, Setton e William) que participaram dos divertidíssimos almoços, sempre relaxantes, e que renovaram o restante das jornadas diárias de trabalho.

Ao Grupo Tecgraf, que representa muito mais do que um Centro Tecnológico capaz de fornecer apoio financeiro e tecnológico, mas, sobretudo, o aconchego de uma família.

À amiga Ana Perez, cujas conversas tanto ajudaram a clarear as questões mais básicas.

À todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC que acompanharam o meu desenvolvimento acadêmico desde que ingressei nessa Universidade em 1990.

Ao Clube de Regatas do Flamengo pelos vários títulos conquistados ao longo da minha jornada acadêmica até a conclusão da tese.

À Ana Roxo, em especial, e a todos os demais funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC.

À Capes e ao CNPq pelo apoio financeiro durante os cursos de mestrado e doutorado

---

## Resumo

Este trabalho apresenta uma nova abordagem para o balanceamento de seções geológicas baseada em modelagem física e simulação numérica. O objetivo principal é introduzir alguns conceitos da Mecânica do Contínuo no processo de restauração geológica, de forma a considerar as propriedades físicas dos materiais geológicos durante a simulação do movimento de um bloco de rocha sobre uma falha. A estratégia adotada utiliza-se de um algoritmo de Relaxação Dinâmica acoplado ao Método dos Elementos Finitos para resolver sistemas de equações, com condições de contorno específicas para a movimentação do bloco sobre a falha.

Foi adotado como ambiente de desenvolvimento um sistema de balanceamento de seções geológicas composto por um conjunto de transformações geométricas comuns na abordagem clássica do problema. O sistema utiliza uma tecnologia de modelagem geométrica baseada em uma estrutura de dados que permite a representação topológica completa de uma subdivisão planar.

A simulação numérica do balanceamento de seções geológicas proposta é implementada dentro desse ambiente e integra três módulos distintos: um módulo de pré-processamento no qual os dados requeridos podem ser facilmente gerados, um módulo de análise onde o método de Relaxação Dinâmica foi implementado e, finalmente, um módulo de pós-processamento em que podem ser visualizados os resultados obtidos da simulação numérica.

Considera-se ainda a natureza palinspática do problema de restauração através de uma interface gráfica amigável do ponto de vista do usuário. Neste sentido, foi realizada uma reorganização completa da interface gráfica e das classes de atributos geológicos associados às entidades topológicas (linhas e regiões) da seção geológica. Esta organização teve dois objetivos: o primeiro, implementar um processo gráfico baseado em uma árvore de decisões para o gerenciamento das tarefas do balanceamento, que

envolve passos arbitrários de tentativa e erro, e, o segundo, possibilitar a implementação da simulação numérica dentro do processo de balanceamento.

As idéias propostas podem ser consideradas como o primeiro passo para o desenvolvimento de um sistema de balanceamento de seções geológicas, cujas medidas de deformação representem de forma mais aproximada o comportamento mecânico das rochas, além de ser mais automatizado, o que sugere futuramente a implementação de um sistema tridimensional, no qual seja menos exigida a interação com o usuário.

---

## Abstract

This work presents a new approach for the restoration of geological cross-sections that is based on physical modeling and numerical simulation. The main purpose is to introduce Continuum Mechanics concepts into the geological restoration process in order to consider physical properties of the materials during the simulation of the movement of a rock block along a fault. The adopted strategy uses a dynamic relaxation algorithm to solve the equation system that arises from the numerical simulation based on the Finite Element Method, together with some specific boundary conditions to represent the movement of the rock block over the fault.

As development environment, a cross-section restoration system was adopted, composed by a group of usual geometric transformations from the classical approach of the problem. This system adopts a geometric modeling technology based on a data structure that is capable of completely representing the topology of a planar subdivision.

The proposed numerical simulation is implemented inside this system and integrates with three different modules: a pre-processing module, where the required input data can be easily generated; an analysis module, in which the dynamic relaxation method has been implemented; and a post-processing module, where the results of the numerical simulation can be viewed.

The palinspatic nature of the restoration problem is taken into account by means of a user-friendly graphics interface that was specifically designed for the system. The graphics interface and the geological attribute classes were completely re-organized with two purposes. First, to implement a graphical interface based on a decision tree to manage user tasks involved in the restoration process, which includes trial-and-error steps. Second, to provide support for the implementation of numerical simulation in the restoration process.

The ideas proposed herein can be considered as a first step towards a complete geological cross-section restoration system in which more consistent deformation measures can be incorporated into the governing equations to better represent the mechanical behavior of the rocks, and is also an expansion of the presented system to a three-dimensional environment, currently under investigation.

---

## Índice

<i>Agradecimentos</i>	<i>i</i>
<i>Resumo</i>	<i>ii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Índice</i>	<i>vi</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>x</i>
<i>Lista de Símbolos</i>	<i>xv</i>
<i>Capítulo 1 – Introdução</i>	<i>1</i>
<i>1.1. Introdução</i>	<i>1</i>
<i>1.2. Motivações</i>	<i>2</i>
<i>1.3. Objetivos</i>	<i>4</i>
<i>1.4. Organização da Dissertação</i>	<i>6</i>
<i>Capítulo 2 – Técnicas Clássicas de Balanceamento</i>	<i>8</i>
<i>2.1. Estruturas Geológicas</i>	<i>8</i>
<i>2.1.1. Zoneamento da Crosta Terrestre</i>	<i>10</i>
<i>2.1.2. Tectônica Distensiva</i>	<i>11</i>
<i>2.1.3. Tectônica Compressiva</i>	<i>12</i>
<i>2.1.4. Tectônica Transcorrente</i>	<i>12</i>
<i>2.1.5. Camadas Geológicas</i>	<i>13</i>
<i>2.1.6. Fraturas</i>	<i>14</i>
<i>2.2. Reologia das Rochas</i>	<i>17</i>
<i>2.2.1. Comportamento Mecânico dos Materiais</i>	<i>19</i>
<i>2.2.2. Comportamento Mecânico das Rochas</i>	<i>20</i>
<i>2.2.2.1. Deformação Rúptil</i>	<i>21</i>
<i>2.2.2.2. Deformação Dúctil</i>	<i>21</i>
<i>2.2.3. Comportamento Mecânico do Sal</i>	<i>22</i>
<i>2.3. Seções Geológicas</i>	<i>22</i>
<i>2.4. O Balanceamento Clássico</i>	<i>25</i>
<i>2.4.1. Premissas</i>	<i>25</i>
<i>2.4.2. Algumas Técnicas de Balanceamento</i>	<i>27</i>



2.4.3. <i>As Ferramentas</i>	30
<i>Capítulo 3 – O Sistema Recon</i>	33
3.1. <i>Introdução</i>	33
3.2. <i>Subdivisão Planar</i>	34
3.3. <i>Modelagem da Subdivisão Planar</i>	37
3.4. <i>O Sistema Recon Original</i>	40
3.4.1. <i>Criação de Uma Seção Geológica</i>	40
3.4.2. <i>Camadas</i>	40
3.4.3. <i>Módulos</i>	41
3.4.4. <i>Transformações</i>	42
3.4.5. <i>Consultas</i>	42
3.4.6. <i>Ajuste</i>	42
3.5. <i>Atributos Geológicos na Versão Original do Recon</i>	42
3.6. <i>As Transformações Geométricas</i>	45
3.6.1. <i>Transformações Rígidas</i>	46
3.6.1.1. <i>Translação</i>	46
3.6.1.2. <i>Rotação</i>	46
3.6.2. <i>Transformações Não Rígidas</i>	46
3.6.2.1. <i>Cisalhamento Simples</i>	46
3.6.2.2. <i>Move Sobre Falha</i>	49
3.7. <i>Novos Desenvolvimentos</i>	50
3.7.1. <i>Nova Interface Gráfica</i>	51
3.7.2. <i>Geração e Importação de Novas Seções</i>	52
3.8. <i>O Gerenciador de Balanceamento</i>	53
3.9. <i>Implementação da Modelagem do Sal</i>	59
<i>Capítulo 4 – Mecânica Computacional no Balanceamento</i>	63
4.1 <i>Histórico</i>	64
4.2 <i>Uma Outra Abordagem</i>	67
4.3 <i>Método dos Elementos Finitos</i>	68
4.3.1. <i>Formulação Para Análises Tensão Deformação Planas</i>	69
4.4 <i>Relaxação Dinâmica</i>	74

4.4.1. <i>Introdução</i>	74
4.4.2. <i>O Algoritmo</i>	75
4.4.3. <i>A Formulação</i>	77
4.5. <i>A Estratégia</i>	83
4.5.1 <i>O Move-Sobre-Falha Convencional</i>	84
4.5.2. <i>Condições de Contorno</i>	85
4.5.3. <i>Tipos de Carregamento</i>	87
<i>Capítulo 5 – Implementação da Modelagem Física</i>	90
5.1. <i>Introdução</i>	90
5.2. <i>Organização das Classes de Atributos</i>	90
5.2.1. <i>Classe GeoFace</i>	92
5.2.2. <i>Classe GeoEdge</i>	93
5.2.3. <i>Classe Line</i>	94
5.2.4. <i>Classe Layer</i>	95
5.3. <i>O Módulo de Análise</i>	97
5.3.1. <i>O Programa Relax</i>	97
5.3.2. <i>Dados de Entrada</i>	100
5.3.3. <i>Restrição de Deslocamento Nodal Sobre a Falha</i>	102
5.3.4. <i>Implementação da Restrição</i>	103
5.4. <i>O Sistema Integrado</i>	113
5.4.1. <i>O Pré-Processador</i>	113
5.4.1.1. <i>Atributos Globais da Análise</i>	114
5.4.1.2. <i>Atributos do Meio Contínuo</i>	115
5.4.1.3. <i>A Geometria do Modelo</i>	115
5.4.1.4. <i>Restrições ao Deslocamento</i>	120
5.4.1.5. <i>Carregamento</i>	120
5.4.2. <i>O Pós-Processador</i>	121
5.4.2.1. <i>Definição da Nova Geometria</i>	122
5.4.2.2. <i>Calculo e Visualização das Deformações Internas</i>	124
5.4.3. <i>Organização das Classes</i>	130
5.4.4. <i>Comunicação Entre o Recon e o Relax</i>	133

<i>Capítulo 6 – Exemplos</i>	134
6.1. <i>Introdução</i>	134
6.2. <i>Perfil ao Norte do Campo de Albacora</i>	135
6.3. <i>Exemplo de Utilização do Sistema Integrado</i>	142
6.4. <i>Campo de Parecis</i>	150
<i>Capítulo 7 – Conclusões</i>	156
7.1. <i>Resumo</i>	156
7.2. <i>Observações</i>	157
7.3. <i>Principais Contribuições</i>	159
7.4. <i>Sugestões Para Trabalhos Futuros</i>	160
8. <i>Referências Bibliográficas</i>	163

---

## Lista de Figuras

<i>Figura 2.1 – Exemplos de Estruturas Geológicas</i>	9
<i>Figura 2.2 – Exemplos de Seções Distensivas e Compressivas</i>	13
<i>Figura 2.3 – Camadas Geológicas Estratificadas</i>	14
<i>Figura 2.4 – Camadas em Uma Seção Geológica Atual</i>	11
<i>Figura 2.5 – Classificação Geométrica de Falhas</i>	15
<i>Figura 2.6 – A Geometria da Falha Lútrica</i>	16
<i>Figura 2.7 – Tensões Atuantes no Solo</i>	18
<i>Figura 2.8 – Gráfico Tensão vs Deformação</i>	19
<i>Figura 2.9 – Definição do Coeficiente de Poisson</i>	20
<i>Figura 2.10 – Detalhe da Bacia de Campos</i>	24
<i>Figura 2.11 – Mapeamento da Sísmica</i>	24
<i>Figura 2.12 – Seção Obtida da Interpretação dos Dados Sísmicos</i>	24
<i>Figura 2.13 – O Processo do Balanceamento</i>	26
<i>Figura 2.14 – Cálculo da Descompactação</i>	29
<i>Figura 2.15 – Cisalhamento Puro Em Um Bloco Sobre Uma Falha</i>	31
<i>Figura 2.16 – Dobramento das Camadas Em Terrenos Compressivos</i>	32
<i>Figura 3.1 – Entidades Topológicas De Uma Seção Geológica</i>	34
<i>Figura 3.2 - Exemplo De Uma Subdivisão do <math>R^2</math></i>	35
<i>Figura 3.3 - Orientação de Usos e Ciclos em Uma Subdivisão Planar</i>	36
<i>Figura 3.4 - Estrutura de Dados Winged-edge</i>	37
<i>Figura 3.5 - Estrutura de Dados Half-edge</i>	39
<i>Figura 3.6 - Subdivisão Hierárquica da Seção Dividida em Módulos</i>	41
<i>Figura 3.7 – Organização Original das Classes de Atributos no Sistema Recon</i>	44
<i>Figura 3.8 – Cisalhamento Simples: Montagem do campo de deformações</i>	47
<i>Figura 3.9 – Cisalhamento Simples: Dobras na Geometria Origem</i>	48
<i>Figura 3.10 – Move Sobre Falha Geométrico: Exemplo</i>	50
<i>Figura 3.11 – Estrutura de Uma Árvore Genérica</i>	54
<i>Figura 3.12 – Relação Hierárquica Entre Nós da Árvore</i>	55

<i>Figura 3.13 – Classe VisNode: Implementação</i>	56
<i>Figura 3.14 – Relacionamento Entre as Classes VisNode e VisTree</i>	57
<i>Figura 3.15 – O Gerenciador de Balanceamento: Interface</i>	58
<i>Figura 3.16 – Interface do Sistema Recon Sem o Gerenciador de Balanceamento</i>	58
<i>Figura 3.17 - Interface do Sistema Recon Com o Gerenciador de Balanceamento</i>	59
<i>Figura 3.18 – Seção Com Camada de Sal: Etapa 1</i>	60
<i>Figura 3.19 – Seção Com Camada de Sal: Etapa 2</i>	60
<i>Figura 3.20 – Seção Com Camada de Sal: Etapa 3</i>	60
<i>Figura 3.21 – Recon: Visualização do Histórico de Variação da Área de Sal</i>	61
<i>Figura 4.1 – Discretização do Meio Contínuo Por Elementos T3</i>	70
<i>Figura 4.2 – Método da Relaxação Dinâmica</i>	76
<i>Figura 4.3 - Move Sobre Falha Convencional</i>	84
<i>Figura 4.4 – Sistema de Coordenadas Locais Em Um Tramo da Falha</i>	85
<i>Figura 4.5 – Estratégia de Utilização do Algoritmo de Relaxação Dinâmica</i>	86
<i>Figura 4.6 – Condições de Contorno e de Carregamento</i>	87
<i>Figura 4.7 – Definição do Campo de Deslocamentos Prescritos</i>	88
<i>Figura 5.1 - Nova Organização das Classes de Atributos no Sistema Recon</i>	91
<i>Figura 5.2 – Definição da Classe GeoFace</i>	92
<i>Figura 5.3 – Definição da Classe GeoEdge</i>	93
<i>Figura 5.4 – Definição da Classe Line e Suas Sub-classes</i>	94
<i>Figura 5.5 – Definição da Classe Layer e Suas Sub-classes</i>	96
<i>Figura 5.6 – Relax: Hierarquia das Classes dos Tipos de Análise</i>	98
<i>Figura 5.7 – Relax: Hierarquia das Classes dos Materiais</i>	98
<i>Figura 5.8 – Relax: Hierarquia das Classes dos Elementos</i>	98
<i>Figura 5.9 – Relax: Ajuste Geométrico</i>	104
<i>Figura 5.10 – Relax: Apoio Inclinado</i>	105
<i>Figura 5.11 – Relax: Restrições ao Deslocamento Sobre a Falha Lútrica</i>	107
<i>Figura 5.12 – Relax: Definição da Orientação das Falhas</i>	108
<i>Figura 5.13 – Relax: Identificação das Regiões Próximas a Falha</i>	109

<i>Figura 5.14 – Relax: Teste Geométrico Para Localizar um Ponto Próximo a Falha</i>	110
<i>Figura 5.15 – Definição de Pseudo-ângulo</i>	110
<i>Figura 5.16 – Relax: Ajuste Geométrico com Projeção do Nó Sobre a Falha</i>	111
<i>Figura 5.17 – Recon: Geração da Malha de Elementos Finitos</i>	117
<i>Figura 5.18 – Recon: Malhas Penduradas Como Atributo de Face</i>	118
<i>Figura 5.19 – Recon: Malha Unificada do Módulo</i>	118
<i>Figura 5.20 – Recon: Sólido Temporário HED Para Armazenar a Malha Unificada</i>	119
<i>Figura 5.21 – Recon: Definição do Campo de Deslocamentos Prescritos</i>	121
<i>Figura 5.22 – Recon – Aresta HED e as Suas Subdivisões</i>	122
<i>Figura 5.23 – Recon: Mapeamento Malha-Modelo</i>	123
<i>Figura 5.24 – Recon: Resumo da Comunicação Entre Recon e Relax</i>	124
<i>Figura 5.25 – Recon: Cálculo das Deformações No Elemento T3</i>	126
<i>Figura 5.26 – Círculo de Mohr Para as Direções Principais de Deformação</i>	129
<i>Figura 5.27 – Recon - Mapa de Cores Ilustrando as Deformações</i>	130
<i>Figura 5.29 – Recon: Hierarquia das Classes de Transformações</i>	131
<i>Figura 5.30 – Recon: Definição da Classe AnlsTrnf</i>	132
<i>Figura 6.1 – Seção Original Interpretada do Campo de Albacora</i>	135
<i>Figura 6.2 – Sistema Recon Com a Seção Interpretada do Campo de Albacora</i>	136
<i>Figura 6.3 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 2</i>	136
<i>Figura 6.4 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 3</i>	137
<i>Figura 6.5 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 4</i>	137
<i>Figura 6.6 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 6</i>	137
<i>Figura 6.7 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 8</i>	138
<i>Figura 6.8 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 12</i>	138
<i>Figura 6.9 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 15</i>	138
<i>Figura 6.10 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 16</i>	138
<i>Figura 6.11 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 17</i>	139
<i>Figura 6.12 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 18</i>	139

<i>Figura 6.13 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 21</i>	139
<i>Figura 6.14 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 22</i>	139
<i>Figura 6.15 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 23</i>	139
<i>Figura 6.16 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 26</i>	140
<i>Figura 6.17 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 28</i>	140
<i>Figura 6.18 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 32</i>	140
<i>Figura 6.19 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 34</i>	140
<i>Figura 6.20 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 39</i>	140
<i>Figura 6.21 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 41</i>	141
<i>Figura 6.22 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 42</i>	141
<i>Figura 6.23 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 43</i>	141
<i>Figura 6.24 – Histórico da Área do Sal no Balanceamento Entre as Etapas 39 e 43</i>	141
<i>Figura 6.25 – Sistema Integrado – Subdividindo as Arestas do Módulo</i>	143
<i>Figura 6.26 – Sistema Integrado: Arestas Subdivididas</i>	143
<i>Figura 6.27 – Sistema Integrado: Gerando a Malha por Módulo</i>	144
<i>Figura 6.28 – Sistema Integrado: Malha de Elementos Finitos Gerada</i>	144
<i>Figura 6.29 – Sistema Integrado: Pré-processamento</i>	145
<i>Figura 6.30 – Sistema Integrado: Geração da Malha Unificada</i>	145
<i>Figura 6.31 – Sistema Integrado: Chamando o Programa de Análise</i>	146
<i>Figura 6.32 – Sistema Integrado: Nova Geometria (<math>\nu = 0,49</math>)</i>	146
<i>Figura 6.33 – Sistema Integrado: Nova Geometria (<math>\nu = 0,25</math>)</i>	147
<i>Figura 6.34 – Comparação Entre os Dois Resultados Obtidos</i>	147
<i>Figura 6.35 – Histórico de Balanceamento: Seção Original</i>	148
<i>Figura 6.36 – Histórico de Balanceamento: Nó fiction2</i>	148
<i>Figura 6.37 – Histórico de Balanceamento: Nó fiction3</i>	148
<i>Figura 6.38 – Relax - Gráfico de Convergência</i>	149
<i>Figura 6.39 – Seção da Bacia de Parecis no Sistema Recon</i>	150
<i>Figura 6.40 – Bacia de Parecis: Etapa 1</i>	150
<i>Figura 6.41 – Bacia de Parecis: Etapa 2</i>	151
<i>Figura 6.42 – Bacia de Parecis: Etapa 3</i>	151

<i>Figura 6.43 –Bacia de Parecis: Etapa 4</i>	<i>151</i>
<i>Figura 6.44 –Bacia de Parecis:Sistema de Falhas em Destaque</i>	<i>151</i>
<i>Figura 6.45 –Sistema Recon: Sistema de Falhas em Destaque</i>	<i>152</i>
<i>Figura 6.46 –Sistema Recon: Discretização do Bloco a Direita</i>	<i>152</i>
<i>Figura 6.47 –Sistema Recon: Resultado da Análise</i>	<i>153</i>
<i>Figura 6.48 –Comparação Entre o Algoritmo Geométrico e o Físico</i>	<i>153</i>
<i>Figura 6.49 – Sistema Recon: Visualização das Deformações</i>	<i>155</i>
<i>Figura 6.50 – Sistema Recon: Visualização das Deformações</i>	<i>155</i>



# 1

---

## Introdução

As seções geológicas são ferramentas fundamentais para se descrever as estruturas geológicas de uma determinada região. Podem também ser utilizadas como base de informações, quando se está estudando a história tectônica ou os recursos potenciais de uma região. É, portanto, imprescindível que elas sejam o mais precisas e verdadeiras quanto possível [22].

O processo de definição de uma seção geológica consiste inicialmente na obtenção de uma determinada geometria para uma fatia do subsolo em estudo. Essas informações podem ser obtidas por dados sísmicos ou de campo. A partir dessa geometria o intérprete (geofísico ou geólogo) constrói a seção geológica, identificando e associando os elementos geológicos estruturais. Da precisão dos dados e da boa interpretação dos mesmos é que vai resultar uma seção mais próxima da real que existe abaixo da superfície.

Nas últimas duas décadas o balanceamento de seções geológicas tem se tornado uma ferramenta padrão na indústria do Petróleo. O objetivo do uso desta ferramenta é a revelação de imperfeições ou impossibilidades físicas na interpretação de uma estrutura geológica. Dessa forma pode-se eliminar interpretações alternativas, inclusive corrigir uma dada interpretação. Permite também a reconstrução palinspática de seções e, conseqüentemente, a visualização de relações estruturais importantes na área do petróleo tais como:

- a. a geometria da camada reservatório em épocas críticas como a época da formação do selo da armadilha estrutural.
- b. a disposição espacial do reservatório em relação a rocha geradora do petróleo.

- c. a relação de consistência entre a geometria das camadas internas ao bloco baixo com as falhas adjacentes.

O objetivo do balanceamento e da reconstituição de seções geológicas é, portanto, testar a interpretação estrutural bem como a sua geometria, definindo o seu produto final, qual seja uma seção viável ou admissível ou a identificação de alguma imperfeição geométrica ou erro de interpretação da seção.

A importância de tal técnica para a indústria do petróleo consiste na redução do risco exploratório pela validação do modelo estrutural e pela visualização de versões pretéritas do mesmo em épocas críticas da geração e migração de petróleo em um determinado sistema petrolífero.

Considerando o grau de complexidade que envolve a determinação da geometria das sub-superfícies da crosta terrestre é fato que tal processo de balanceamento e restauração está amplamente sujeito a erros e imprecisões. Essa consideração aumenta a importância da validação das seções geológicas e, por conseguinte, do aperfeiçoamento das técnicas envolvidas no processo.

## ***1.2. Motivações***

O balanceamento é, por natureza, um processo interativo que depende muito da interpretação humana, onde o usuário decide a cada passo a validade ou não de cada operação em um esquema que envolve tentativa e erro. O processo de balanceamento originalmente é um trabalho feito a mão com o auxílio de recortes de cartolina e barbantes, que o torna trabalhoso e sujeito a erros. O atual acesso a recursos computacionais, principalmente gráficos, e sua própria natureza fazem do processo de balanceamento uma tarefa ideal de se realizar de forma automatizada.

As técnicas de balanceamento podem ser divididas em duas linhas: balanceamento clássico, cujos princípios foram desenvolvidos por Goguel [32], em 1962 e Dahlstrom

[21], em 1969 e seus colaboradores, e balanceamento não clássico, desenvolvido por Suppe a partir de 1983 [57], [58] e seus colaboradores [59].

As técnicas de balanceamento clássico são empíricas e buscam, partindo-se de premissas geológicas, simular as deformações ocorridas na crosta terrestre. Usam princípios geométricos como ferramentas de modelagem das premissas geológicas.

As técnicas não clássicas, em que pese ainda basicamente geométricas, buscam considerar em seus procedimentos medidas de deformações como forma de melhor compreender os fenômenos geológicos envolvidos na formação das estruturas geológicas. Além disso, buscam automatizar o processo de balanceamento utilizando-se de métodos numéricos.

Em ambas as abordagens a reconstituição consiste em voltar no tempo, através de um conjunto de operações, na tentativa de se obter a configuração original do segmento geológico. O sucesso desse procedimento, ou seja, a obtenção dessa geometria original, consistente geologicamente, é o que valida a interpretação da seção em estudo. Nesse contexto define-se uma seção balanceada como uma seção atual validada pelo processo de balanceamento.

Os sistemas de balanceamento existentes ou se baseiam em premissas geológicas para desenvolver e aplicar algoritmos geométricos [27] ou se utilizam de métodos numéricos buscando uma maior automatização do processo de balanceamento, porém sem incorporar as leis constitutivas associadas as propriedades físicas do material geológico.

A linha de pesquisa de Computação Gráfica Aplicada do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, de onde é originário este trabalho apresenta larga experiência em mecânica do contínuo e ênfase acentuada para o desenvolvimento computacional de métodos numéricos, em especial o Método dos Elementos Finitos. Da mesma forma, na área de modelagem geométrica, desde a década de 80 são desenvolvidas bibliotecas de estruturas de dados topológica que armazenam a subdivisão planar, HED (*Half-Edge*

*Data Structure*) [10] e espacial [11], e que podem ser bastante úteis dentro desse contexto. Um exemplo da utilidade de estruturas de dados topológicas é a dissertação de mestrado de Ferraz [27], em 1993, que descreve a implementação do *Sistema de Balanceamento de Seções Geológicas Recon*, ambiente adotado para o desenvolvimento computacional deste trabalho.

Acredita-se aqui que a aplicação, à técnica de balanceamento, de um método numérico que considere as relações constitutivas dos materiais geológicos em sua formulação, determine uma nova abordagem para o problema em questão, avaliando com um maior embasamento físico o comportamento mecânico das rochas na natureza.

Resumindo, com o uso de um método numérico dentro de um ambiente gráfico interativo e com uma interface gráfica adequada a filosofia do balanceamento, busca-se efetivamente dar o primeiro passo na direção do desenvolvimento de uma ferramenta computacional que faça balanceamento de seções geológicas de uma forma não empírica, ou seja, modelando o comportamento físico do material geológico e obtendo assim medidas mais exatas das deformações impostas aos blocos durante a formação das estruturas geológicas.

### ***1.3. Objetivos***

O problema de movimentação de um bloco sobre uma falha envolve não linearidade geométrica. O bloco fraturado, em geral por ação de esforços tectônicos, tende a deslocar-se sob ação da gravidade ao perder a sua coesão na zona de fraturamento. O que domina o movimento desses blocos é uma combinação de deslocamentos de corpo rígido (translação e rotação), com forças de fricção na região de contato do bloco com a falha, mais as deformações provenientes das forças de corpo (ação da gravidade).

Os mecanismos de deformação que definem o surgimento dessas fraturas não são o foco de estudo desse trabalho. O que se busca é simular a movimentação de um bloco sobre uma falha dentro do contexto da técnica de balanceamento de seções geológicas.

A aproximação utilizada nesse trabalho para a simulação do deslizamento de rochas sobre falhas utiliza o Método de Relaxação Dinâmica acoplado ao Método dos Elementos Finitos. A Relaxação Dinâmica se baseia no fato de que a solução estática em regime permanente é a resposta transiente em cada intervalo de tempo. O Método dos Elementos Finitos é aplicado para obter essa solução estática em cada passo (intervalo de tempo). O Método de Relaxação Dinâmica é especialmente interessante para a aplicação em problemas com não linearidades geométricas de grande magnitude. O fato de ser explícito no tempo torná-o computacionalmente atraente já que as grandezas envolvidas podem ser tratadas como vetores.

O objetivo primeiro deste trabalho consiste na implementação de um sistema de balanceamento de seções geológicas em ambientes extensivos (ambientes submetidos a esforços tectônicos de distensão) que simule, utilizando-se da mecânica do contínuo, a movimentação de um bloco sobre uma falha.

Utiliza-se como base de desenvolvimento desse trabalho o *Sistema Recon*, que já continha originalmente um pacote de transformações geométricas que simulam as premissas geológicas dentro da filosofia do balanceamento clássico. Sendo assim, tem-se como objetivo segundo obter um sistema que disponibilize ao geólogo ou geofísico as ferramentas já disponíveis no sistema acrescida da modelagem proposta. Para que isso seja possível, é necessário integrar o *Sistema Recon* a um programa de análise, o que determina o desenvolvimento de um pré-processador, do gerenciamento da comunicação entre os sistemas e finalmente o pós-processamento dos dados obtidos pelo algoritmo de Relaxação Dinâmica.

Como um terceiro objetivo, busca-se prover ao usuário do sistema de balanceamento novas facilidades, sob o ponto de vista da interface com o usuário, que visam a minimizar a tarefa de restaurar uma seção, inserindo, por exemplo, um gerenciador para o balanceamento de forma que o geólogo ou geofísico tenha disponível uma ferramenta que permite acessar de dentro do sistema todo o histórico do balanceamento e as suas várias

tomadas de decisões, corretas ou incorretas, inerentes ao processo de restauração de uma seção geológica.

Uma vez atingidas essas metas, acredita-se que seja possível desenvolver um sistema de balanceamento geológico tridimensional mais automatizado ou seja, minimizando a interação do sistema com o usuário, já que a manipulação de dados via *mouse* no espaço tridimensional é consideravelmente mais complexa.

#### ***1.4. Organização da Dissertação***

O presente trabalho é subdividido em 7 capítulos que são discriminados a seguir.

No Capítulo 2 são apresentados ao leitor os elementos básicos relacionados a geologia estrutural bem como uma breve discussão dos mecanismos que determinam a formação das estruturas geológicas presentes hoje na natureza e como se comporta o material geológico em função dos esforços tectônicos. Ainda no Capítulo 2 é introduzido o conceito clássico de balanceamento de seções geológicas apresentando as premissas geológicas e suas respectivas associações com as transformações geométricas que modelam o problema.

O Capítulo 3 descreve o sistema Recon que é a base do desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente é apresentada a sua estrutura de dados, a biblioteca HED [11], baseada em subdivisão planar [40]. Na seqüência é descrita a organização de classes do sistema, em especial as classes que representam os atributos associados às entidades topológicas do modelo HED e que por sua vez estão associadas as entidades geológicas. Ainda no Capítulo 4 são descritas as novas implementações feitas no sistema, em especial a nova interface gráfica que permitiu novos recursos como por exemplo o gerenciador de balanceamento.

No Capítulo 4 é apresentado um histórico a cerca do desenvolvimento das técnicas não clássicas de balanceamento de seções geológicas, criando assim a motivação para inserir

o presente trabalho dentro do contexto da linha de pesquisa. Na seqüência são introduzidos o Método dos Elementos Finitos e o Método da Relaxação Dinâmica [61], quando é apresentado o programa de análise *Relax* [28] utilizado no desenvolvimento deste trabalho. Por último descreve-se a estratégia adotada para modelar a movimentação de um bloco sobre uma falha utilizando-se o programa de análise anteriormente apresentado.

No Capítulo 5 são documentadas as implementações necessárias para o desenvolvimento do modelador numérico. Inicialmente é apresentada a nova hierarquia de classes dos atributos do *Sistema Recon*, redefinida em função dos novos dados e funcionalidades incorporados ao sistema. Em seguida, é apresentado o programa de análise, *Relax*, utilizado para executar o algoritmo de Relaxação Dinâmica. São também descritas as implementações feitas dentro do *Relax* para viabilizar a modelagem da movimentação de uma rocha sobre uma falha. Finalmente são apresentadas as implementações feitas para integrar o sistema de balanceamento e o programa de análise, gerando uma ferramenta única de reconstituição com pré-processamento, análise e pós-processamento.

O Capítulo 6 apresenta alguns exemplos de utilização do programa de análise dentro do *Sistema Recon*.

Por último o Capítulo 7 contém as considerações finais, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

# 2

---

## Técnicas Clássicas de Balanceamento

Nesse capítulo são apresentados alguns conceitos básicos importantes para a futura compreensão desse trabalho. Inicialmente são introduzidos sucintamente alguns conceitos relacionados as estruturas geológicas presentes na Terra e como essas estruturas foram formadas. Na seqüência é feita uma breve discussão sobre algumas propriedades físicas de materiais, em geral, especialmente a respeito do comportamento mecânico dos materiais geológicos.

Uma vez introduzidos esses conceitos básicos, descreve-se de uma forma geral a filosofia do balanceamento de seções geológicas e, mais especificamente, algumas técnicas do balanceamento clássico.

### *2.1. Estruturas Geológicas*

Diversos fatores são determinantes na formação das estruturas geológicas, entre elas, pode-se destacar:

- movimentos tectônicos,
- sedimentação,
- compactação,
- erosão,
- migração.

As camadas geológicas são depositadas ao longo do tempo e, simultaneamente, vão sofrendo todos os processos geológicos causadores de deformações acima citados. Dentre esses, o que mais influencia a formação das estruturas são os movimentos tectônicos, classificados basicamente em: distensivos, compressivos e transcorrentes. Porém, antes



de examinarmos esses processos, será necessária a apresentação de alguns conceitos básicos relacionados à geologia estrutural. Nesse trabalho apenas os movimentos tectônicos e sedimentação e compactação são consideradas.

A Figura 2.1 [27], a seguir, ilustra algumas dessas estruturas geológicas determinadas pelos fenômenos acima citados.

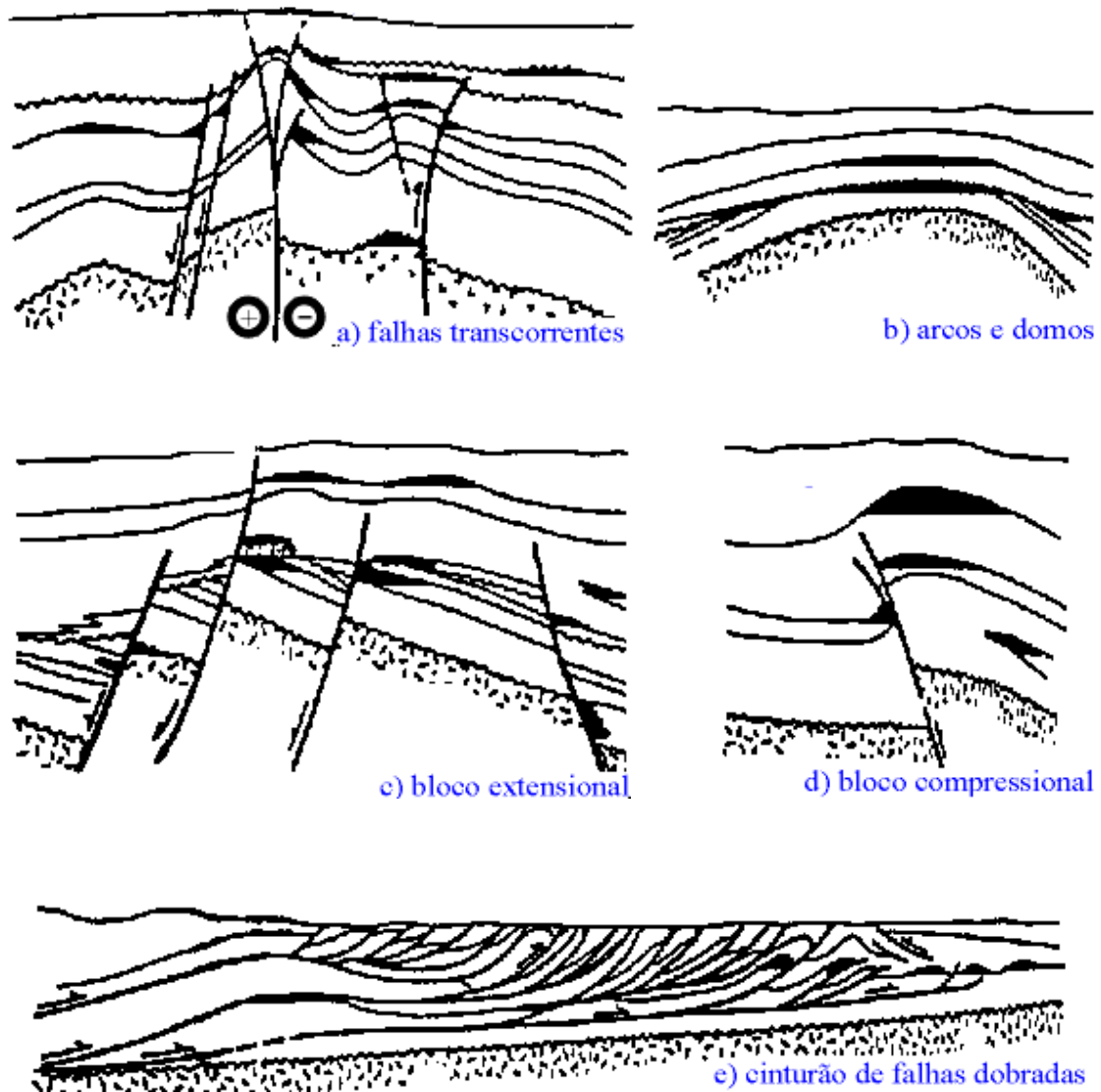


Figura 2.1 – Exemplos de estruturas geológicas.

### ***2.1.1. Zoneamento da Crosta Terrestre***

Pode-se dividir a Terra em zonas específicas sob basicamente duas classificações distintas: uma que se refere ao zoneamento da composição dos materiais geológicos (estrutura estática) e outra ao seu comportamento mecânico (estrutura dinâmica). Na literatura moderna é comum associar o comportamento mecânico das rochas ao termo reologia.

Sob o ponto de vista de composicional, a Terra pode ser dividida particularmente em três unidades principais: crosta, manto e núcleo [1]. A crosta, representa a película externa e é composta de rochas de relativa baixa densidade.

A crosta oceânica em geral é menos espessa do que a continental, podendo variar de 4 a 20 km, sendo constituída de sedimentos pouco consolidados. A crosta continental, com espessura variável de 30 a 70 Km apresenta uma variação de densidade contínua de acordo com a sua profundidade.

O manto é dividido em duas camadas: manto superior com cerca de 700 Km e o manto inferior, que pode atingir o limite de 2900 Km de profundidade. Análises de sismogramas em geral definem as densidades da crosta e do manto. Observa-se através dos dados sísmicos uma descontinuidade provocada pela diferença de propagação de ondas entre as duas camadas, denominada de descontinuidade de *Mohorovicic*. A crosta apresenta características de baixa velocidade de ondas sísmicas, enquanto no limite crosta-manto há um aumento considerável de ondas longitudinais, o que sugere um aumento de densidade das rochas [49].

Há também a divisão reológica da Terra, baseada em características de rigidez, que não coincide com o zoneamento referente a composição dos materiais acima descrita. São definidas nesse caso três camadas: litosfera, astenosfera e mesosfera [46].

A litosfera representa a camada externa rígida que compreende a crosta e uma parte do manto. Seu limite inferior é definido por temperaturas médias de 1100° a 1300° C. Apenas a sua parte superior é suficientemente rígida para reter tensões elásticas na escala de tempo geológico (até 10<sup>9</sup> anos). Abaixo desse limite, processos visco-elásticos absorvem as tensões, diferenciando a litosfera em duas camadas: uma superior rígida e outra inferior visco-elástica [49].

Abaixo da litosfera, se posiciona a astenosfera, que possui temperatura mais elevada e portanto apresenta uma rigidez menor, sofrendo deformação mais facilmente, quando sujeita a esforços. A rigidez da astenosfera é tal que ela pode ser considerada um fluido viscoso para longos períodos de tempo e como um sólido elástico para curtos intervalos de tempo, como para a passagem de ondas sísmicas. De uma forma geral o seu fluxo se dá em taxas consideravelmente mais rápidas.

Abaixo da astenosfera se encontra a mesosfera, caracterizada por apresentar alta viscosidade, ocasionada pelo aumento da pressão com a profundidade.

### ***2.1.2. Tectônica Distensiva***

Em terrenos distensivos, Figura 2.1c, os esforços tectônicos atuantes provocam o estiramento e afundamento da crosta terrestre. São geradas falhas (chamadas normais, de gravidade ou distensivas) que dividem a litosfera em blocos, alguns dos quais sofrendo rebaixamento (blocos altos) com relação a outros (blocos baixos).

Os sítios distensivos são definidos por regimes tectônicos divergentes e estão associados a zonas de *rifte* continentais e oceânicas, regiões de retro-arco (*back-arc*) e em ambientes de margem continental.

Existem vários modelos que definem a formação das estruturas geológicas em regimes distensivos. O modelo clássico associa esses ambientes ao desenvolvimento de conjuntos de falhas normais de ângulo médio e alto. Recentemente falhas de baixo ângulo também

têm sido associadas a áreas distensivas. Em 1978 McKenzie [42] propôs um modelo simplificado onde a litosfera é estirada de forma uniforme e rápida, provocando assim uma diminuição de espessura. Isso gera o soerguimento da astenosfera por compensação isostática (equilíbrio estático), e o conseqüente aumento de temperatura média na descontinuidade de *Mohorovicic* além do afundamento da bacia, chamado de subsidência. Wernicke [66] em 1985, propôs um modelo alternativo considerando que a litosfera seria acomodada em uma zona de cisalhamento de baixo ângulo ao longo de toda a litosfera. Nesse modelo a distensão na crosta não coincide verticalmente com a distensão na base da litosfera.

Na Seção 2.2.6 discute-se sucintamente os tipos de falhas provocados por regimes distensivos, em especial quanto a sua geometria, que é a característica de maior influência para o contexto desse trabalho.

### ***2.1.3. Tectônica Compressiva***

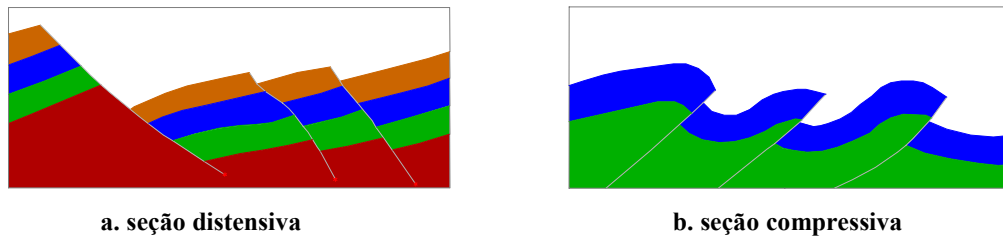
Em áreas compressivas, como as ilustradas nas figuras 2.1b, 2.1d e 2.1e, os esforços tectônicos provocam encurtamento e soerguimento da crosta. São geradas falhas (de empurrão ou cavalgamento) ao longo das quais os blocos sobrepõem-se uns em relação aos outros. Ocorrem simultaneamente dobramentos das camadas. Nas áreas mais soerguidas, as rochas podem sofrer erosão.

Sistemas compressivos são resultantes de regimes tectônicos convergentes, associados a zonas de colisão continental e a regiões compressionais de *back-arc* em margens ativas.

### ***2.1.4. Tectônica Transcorrente***

Em regimes transcorrentes, como na figura 2.1a, os blocos se deslocam paralelamente entre si, ocorrendo uma zona de atrito ou cisalhamento, contudo, o deslocamento pode não ser exatamente paralelo. Quando os blocos convergem durante o deslocamento, pode suceder um regime transpressivo, caracterizado pela presença de falhas oblíquas reversas

e dobras (anticlinais) as quais constituem excelentes armadilhas para hidrocarbonetos. No caso dos blocos divergirem, caracteriza-se um regime transtrativo, responsável pela geração de falhas oblíquas normais e baixos estruturais (sinclinal) associados.



*Figura 2.2 – Exemplos de seções distensivas e compressivas.*

A Figura 2.2 ilustra esquematicamente seções submetidas a tectônica distensiva, Figura 2.2a, e compressiva, Figura 2.2b.

### ***2.1.5. Camadas Geológicas***

As camadas geológicas vão se depositando ao longo do tempo e, naturalmente, por ação gravitacional em posição horizontal, isto é, paralelas entre si. São constituídas de rochas de tipos diferentes. Os limites que separam uma camada de outra são chamados de contatos ou horizontes. Assim, cada camada é caracterizada a partir da definição dos seu horizonte topo e horizonte base. Cada camada, bem como cada horizonte tem uma idade de formação que está associada a um tempo geológico. Nas Figuras 2.3 e 2.4, é apresentada uma seção geológica em dois momentos diferentes: um na sua forma original (Figura 2.3), apenas com perfil erodido, e um outro, após sofrer deformações devidas a movimentos tectônicos (Figura 2.4).



*Figura 2.3 – Camadas geológicas estratificadas.*



*Figura 2.4 – Camadas em uma seção geológica atual.*

### **2.1.6. Fraturas**

Fraturas são as estruturas geológicas mais comuns que ocorrem na litosfera, seccionando as rochas. O grau de complexidade dos fenômenos envolvidos na formação de fraturas nas rochas é normalmente bastante elevado.

As fraturas são representadas por planos de ruptura no maciço rochoso, quando a rocha perde totalmente a coesão [49]. Uma fratura é considerada uma falha quando ocorre deslocamento relativo entre as superfícies do material na região de ruptura.

De uma forma bastante simplificada, pode-se dizer que falhas são criadas a partir de movimentos tectônicos sofridos pela crosta terrestre ou localmente em bacias

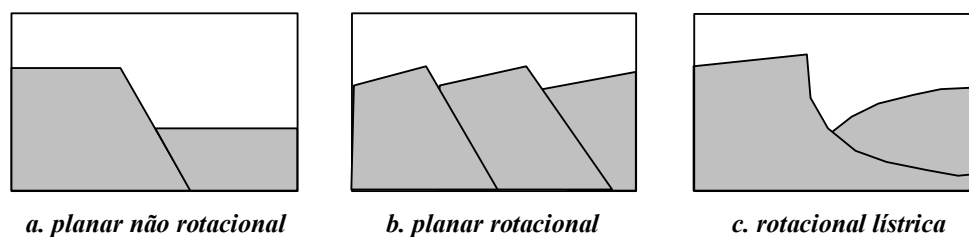
sedimentares, gerando descontinuidades. A estes movimentos combina-se o movimento gerado pela gravidade, abatendo os blocos que perdem a estabilidade.

De uma forma geral é comum encontrar na literatura classificações de falhas de acordo com a sua geometria ou segundo os esforços tectônicos que determinaram suas formações.

As falhas compressivas, também conhecidas como falhas de empurrão, podem apresentar deslocamentos de mergulho ou de rejeito oblíquo [66]. Elas são formadas em função do encurtamento de uma determinada superfície de referência. O bloco alto é empurrado ao longo do plano de falha, emergindo e se posicionando acima do bloco baixo. Em áreas compressivas porém, os elementos geológicos estruturais mais comuns são as dobras, que podem ser geradas pela combinação de esforços compressivos e uma resposta dúctil do material geológico.

Falhas distensivas são geradas pela movimentação descendente do bloco baixo ao longo de uma superfície de falha, que desliza relativamente ao bloco alto.

As classificações geométricas de sistemas de falhas normais (ambientes distensivos) foram inicialmente propostas por Wernicke *et al.* [66], em 1982, e Gibbs [31] em 1984. Basicamente podem ser subdivididas em dois grandes grupos: falhas planares, não rotacionais e rotacionais, e falhas rotacionais lítricas, conforme ilustra a Figura 2.5.



*Figura 2.5 – Classificação geométrica de falhas.*

As falhas normais não rotacionais geralmente são relacionadas a ambientes onde a distensão da crosta é uniforme. Observações sismológicas de falhas ativas indicam que falhas normais são essencialmente planares, atravessando a camada sismogênica com ângulos que podem variar entre 30 e 60 graus.

As falhas planares rotacionais podem ser representadas por um modelo simplificado, onde os blocos individualizados pelos planos de falha são submetidos a uma certa rotação rígida [66]. À medida que o material geológico é distendido, o plano de falha e os blocos são igualmente rotacionados. A característica principal é a conservação angular ao longo da seqüência de planos de falhas. A sua geometria assemelha-se a um conjunto de dominós rotacionados.

No modelo de falhamento lístrico a distensão é alcançada pelo deslocamento entre os estratos dos blocos alto (*footwall*) e baixo (*hanging-wall*) ao longo de um plano de falha curvilíneo (Figura 2.6).

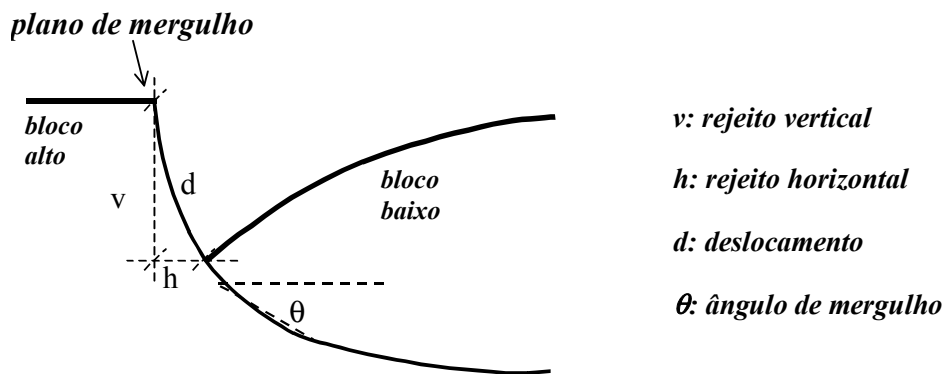


Figura 2.6 – A Geometria da falha lístrica.

As falhas lístricas são provenientes de falhamentos distensivos, associados a movimentos gravitacionais e que ocorrem mais comumente em margens continentais. Geralmente são formadas em seções sedimentares, parcialmente ou não consolidadas, onde as rochas apresentam propriedades elásticas de baixa resistência a coesão.



A geometria da falha listrica acomoda progressivamente a distensão crescente com a profundidade, suavizando o mergulho paulatinamente até alcançar uma superfície de descolamento horizontal. A deformação interna do bloco baixo associado a falhas listricas é bastante estudada devido à potencialidade das estruturas em *rollover* para armazenar óleo e gás [6].

## ***2.2. Reologia das Rochas***

Define-se como reologia o estudo das deformações e do fluxo da matéria [65]. O comportamento reológico das rochas, em conjunto com a distribuição das tensões e condições de contorno determina como as rochas são deformadas. Em outras palavras, a reologia descreve a resposta mecânica de um material sob a ação de esforços externos ao meio. As estruturas geológicas encontradas na natureza dependem em grande parte da resposta mecânica das rochas, ou seja, dependem do tipo de deformação que as levou ou não a sofrer à ruptura.

Para se compreender o comportamento do material geológico é fundamental entender as cargas atuantes no meio. No estudo das tensões atuantes na litosfera, tem-se as tensões normais ao plano, tensões cisalhantes e forças de fricção ou atrito. Esta última apresenta uma particular importância por estar associada ao coeficiente de fricção interno do material, que por sua vez é função do limite de resistência à ruptura que um corpo pode suportar ao ser solicitado.

Considera-se que um determinado meio geológico se encontra em equilíbrio caso não seja submetido aos esforços tectônicos citados. Isso pode ser representado por um cubo infinitesimal localizado no interior da crosta como é ilustrado na Figura 2.7.

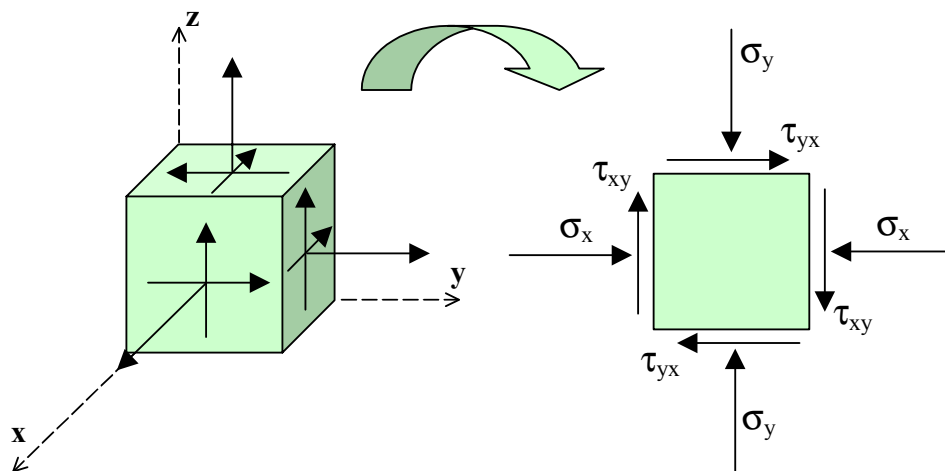


Figura 2.7 – Tensões atuantes no solo.

A esquerda são ilustradas as tensões normais e de cisalhamento atuando no cubo infinitesimal. A direita, simplificando para o problema bidimensional, tem-se as tensões atuantes no *plano xy*.

O modelo comumente adotado para descrever o equilíbrio entre as forças de superfície (peso de uma coluna de rocha) e de corpo (forças gravitacionais) atuantes entre o manto e a crosta (isostasia) é baseado no Princípio de Arquimedes (equilíbrio hidrostático). As forças de superfície decorrentes do peso das rochas sobrepostas é denominada de pressão litostática. As forças de superfície devido a diferentes colunas de rochas sob a litosfera devem ser iguais de forma a manter esse equilíbrio.

Quando um determinado meio se encontra submetido a esforços tectônicos, surgem tensões desviatórias que alteram esse equilíbrio. Em tais circunstâncias são introduzidas forças desequilibradas que determinam diferentes respostas do material geológico a depender de suas propriedades físicas, que por sua vez geram diferentes comportamentos mecânicos.

### 2.2.1. Comportamento Mecânico dos Materiais

Deformações ocorrem quando tensões são aplicadas a um material. É denominada deformação relativa a quantidade de deformação por unidade de comprimento e tensão a força por unidade de área. A deformação relativa inicial é essencialmente proporcional à tensão e é reversível. Após removida a tensão, a deformação desaparece. Essa é a definição de deformação elástica. O módulo de *Young* ou módulo de elasticidade  $E$  é a razão entre a tensão e essa deformação reversível. A deformação não reversível, ou seja, aquela cujas tensões excedem o limite linear elástico (Figura 2.8), são denominadas deformações plásticas. Ao ser retirada a tensão sobre o material, apenas a deformação referente a parcela elástica do material desaparece [64].

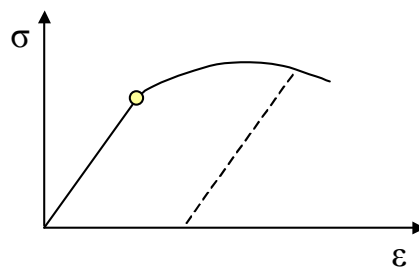


Figura 2.8 – Gráfico tensão vs deformação.

A deformação elástica, única resposta de deformação abaixo do limite de resistência ao escoamento, continua a aumentar à medida que o aumento de tensão vai ampliando a deformação plástica.

A ductilidade representa a deformação plástica requerida para a fratura do material. Em corpos submetidos a esforços de tração ou distensivos, uma medida da ductilidade do material é o seu alongamento percentual com relação ao corpo não deformado. Por outro lado, corpos submetidos a compressão tem a sua ductilidade observada pela extricção na seção de fratura, que representa a redução de área na seção fraturada.

Outra propriedade dos materiais é o coeficiente de Poisson  $\nu$ , que representa a relação entre a deformação lateral  $D_l$  e a deformação axial  $D_a$ , conforme pode ser observado na Figura 2.9. Para modelagem geológica em terrenos distensivos, onde é comum preservar o volume do material geológico, pode-se adotar o valor de  $\nu$  igual a 0.5.

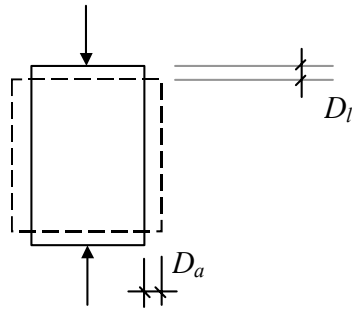


Figura 2.9 – Definição do coeficiente de Poisson.

### 2.2.2. Comportamento Mecânico das Rochas

As fraturas causadas por movimentos tectônicos consistem na mais conhecida forma de deformação crustal. Regiões com presença de falhas tectônicas são zonas de alta concentração de tensões de cisalhamento. A parcela de deformação elástica é significativamente pequena se comparada com a parcela de deformação viscosa irreversível. As estruturas geológicas presentes hoje na crosta são portanto função não apenas das cargas que atuam ou atuaram sobre si, mas principalmente das características e do comportamento do material submetido a esses esforços.

A distinção entre estruturas rúpteis e dúcteis é de fundamental importância em Geologia Estrutural [49]. De uma forma bem simplificada pode-se dizer que a deformação dúctil, envolve mudança de volume, conforme citado na seção acima, além de rotação e translação. A deformação rúptil por sua vez é basicamente causada por rotação e translação de blocos internamente rígidos.

O comportamento rúptil (ruptura frágil) ou dúctil do material geológico está em geral associado a sua temperatura e ao seu nível crustal. Em baixas temperaturas e níveis crustais superiores as rochas apresentam comportamento rúptil. Em altas temperaturas e

níveis crustais inferiores, as rochas pouco se deformam de forma elástica, se comparadas com o seu fluxo viscoso ou a quantidade de deformação plástica.

#### ***2.2.2.1. Deformação Rúptil***

Quando submetida um estado desviatório de tensões, a rocha se deforma, a princípio de forma elástica. Embora de baixa magnitude, promove-se a propagação de ondas elásticas no contínuo. Após atingir o limite elástico, o material começa a deformar-se plasticamente até fraturar-se caso atinja o seu estado limite último de deformação plástica. Sob ação da gravidade pode haver deslizamento caso seja ultrapassado o limite de resistência à ruptura do material, associado ao coeficiente interno de fricção. A partir de então ocorre o movimento plástico friccional sobre uma superfície de falha.

#### ***2.2.2.2. Deformação Dúctil***

A deformação dúctil, conforme já foi citado na *seção 2.2.2.1*, envolve deformação plástica, onde a rocha flui como um líquido. Os mecanismos de deformação dúctil ocorrem nas escalas de íons até grãos minerais. Podem se dar através de rearranjo de grãos, átomos, cristais e por superplasticidade. O que governa essas deformações são em geral as condições físicas do ambiente, como pressão, temperatura, taxa de deformação, etc.

A deformação plástica do material geológico é sempre proporcional a tensão aplicada. A viscosidade (medida para a ductilidade ou resistência ao fluxo) ao cisalhamento tende a ser dependente da temperatura do meio. A deformação das rochas apresenta um comportamento visco-elástico, apresentando inicialmente um comportamento elástico linear e, após atingir o seu limite ao escoamento, começa a apresentar fluxo viscoso.

A consideração da *anelasticidade* (deformação recuperável de forma não instantânea) e da resistência do material ao escoamento ao modelo visco-elástico define o

comportamento reológico das rochas na natureza, que considera a elasticidade, a ruptura e a plasticidade friccional, sob tensões desviatórias induzidas tectonicamente [49].

### ***2.2.3. Comportamento Mecânico do Sal***

Dentre as propriedades físicas do sal, a sua mobilidade é de fato a mais importante. O sal é excelente condutor térmico, apresentando calor específico elevado, ou seja, é bastante susceptível a variações de temperatura. O sal tem condutividade térmica 3 vezes maior que dos sedimentos vizinhos. O sal não possui porosidade e por isso não sofre variações de densidade sob efeito de compactação. A densidade pode ser uma propriedade física constante do sal dependendo apenas do seu tipo. (halita 2,17g/cm<sup>3</sup>, anidrita 2,98g/cm<sup>3</sup>). O sal é muito solúvel e boa parte das estruturas pode ter sofrido com o escape de sal solubilizado.

O mecanismo de deformação mais comumente encontrado na natureza é o fluxo provocado pelo efeito da sobrecarga sedimentar, por deslizamento e espalhamento gravitacional. As camadas (*pós-rifte*) que são depositadas ao longo do tempo provocam o fluxo do sal como um fluido. Durante a evolução de margens passivas, o sal pode fluir como resposta à distensão na cobertura ou, alternativamente os fenômenos halocinéticos (cinemática do sal) podem induzir os processos de deformação das rochas [48].

Sob ação do mesmo campo de tensões o comportamento é rúptil na cobertura sedimentar e dúctil na camada de sal. A característica mais importante do comportamento do sal é a deformação por *creep* (deformação em maior escala de tempo sob tensões com magnitude invariável), na qual ocorre fluência do material em função da aplicação de tensões desviatórias durante longos períodos de tempo.

## ***2.3. Seções Geológicas***

Uma seção geológica representa um plano de visualização vertical de um corte na crosta terrestre e por conseguinte auxiliam bastante no estudo das formações das sub-

superfícies. Sobre o mapa geológico de um terreno é traçada a linha da seção, que representa a interseção do perfil com a superfície do terreno. A trajetória da linha deve ser escolhida de forma que a seção apresente o melhor ponto de vista para o estudo das estruturas sub-aflorantes, como falhas, dobras, mergulhos, etc. Falhas, por exemplo, devem ser cortadas perpendicularmente pela seção. No caso de existirem poços na área de interesse, geralmente a trajetória é formada por segmentos de linha entre poços adjacentes. As seções devem ser obtidas de forma a representar uma projeção em relação ao transporte tectônico.

Existem dois tipos de seções. A estrutural tem como referência o nível do mar e representa as posições relativas de camadas, falhas, dobras, etc, ou seja, basicamente a geometria. A seção estratigráfica mostra a posição das camadas em relação a um nível aproximadamente horizontal, correspondente a um evento geológico de determinada idade e é preparada para o estudo de correlações estratigráficas, mudanças nas espessuras das camadas, e outras alterações sofridas pelas camadas ao longo do tempo.

O mapeamento geológico em sub-superfície consiste na predição de estruturas geológicas existentes em profundidade, com a maior precisão possível e de forma a buscar possíveis formações que se comportem como armadilhas de hidrocarbonetos. As seções são construídas a partir de dados geológicos e geofísicos, tais como dados de poços e dados sísmicos (Figuras 2.10, 2.11 e 2.12).

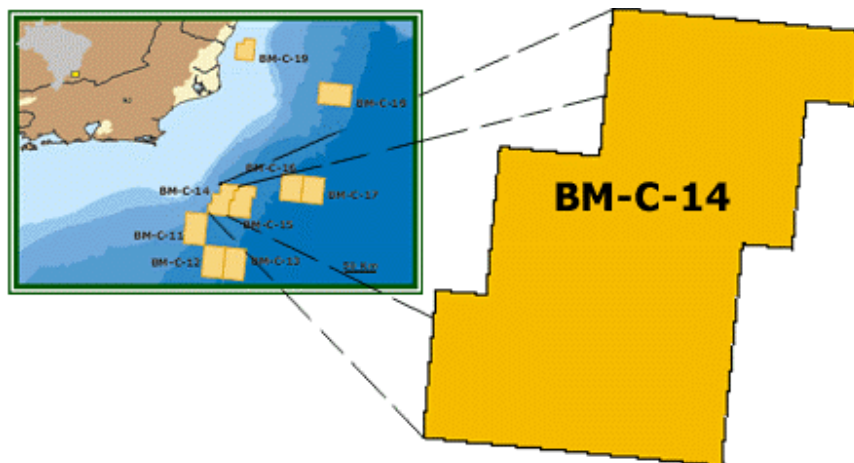


Figura 2.10 – Detalhe da Bacia de Campos [2].

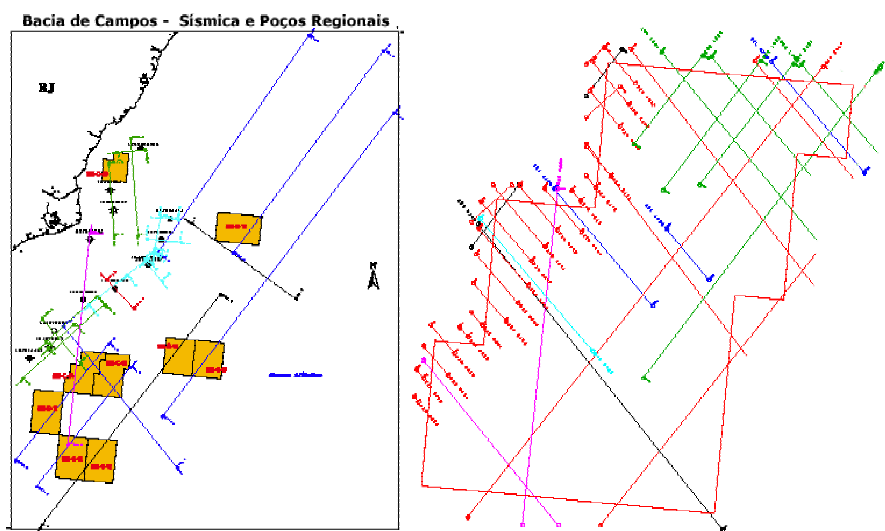


Figura 2.11 – Mapeamento da sísmica [2].

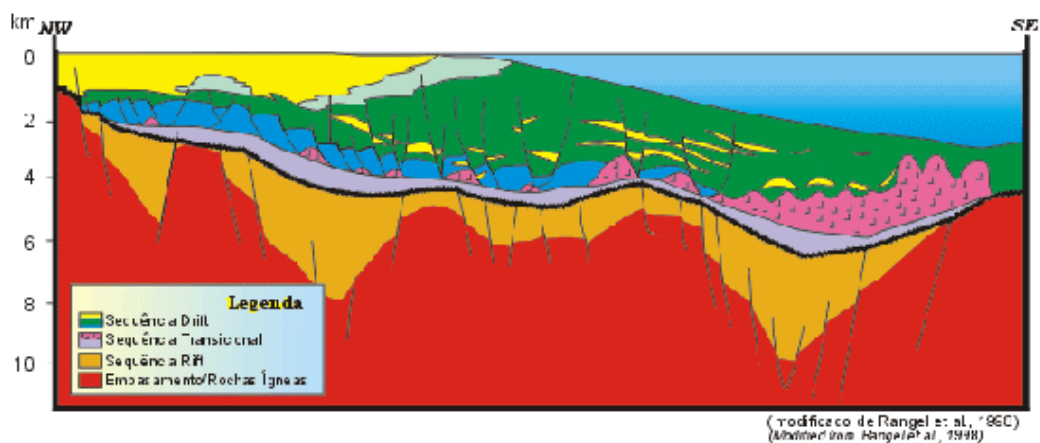


Figura 2.12 – Seção obtida da interpretação dos dados sísmicos [2].



Os dados de poços são obtidos a partir de perfilagem, amostragem e testes de formação. Mas estas técnicas só fornecem informações sobre a região próxima aos poços. As evidências obtidas com a sísmica de reflexão, a partir da qual se obtém as seções sísmicas ou perfis sísmicos, complementam o mapeamento de sub-superfície. A partir destas informações, o intérprete constrói a seção geológica. Em função da precisão dos dados e da boa interpretação dos mesmos é que vai resultar uma seção mais próxima da real que existe abaixo da superfície. As técnicas de balanceamento, discutidas adiante, podem aferir a consistência e a interpretação dos dados, aceitando ou invalidando a seção proposta.

A Figura 2.10 mostra em mapa a Bacia de Campos e um de seus vários blocos (*BMC-14*). A Figura 2.11 apresenta as posições dos levantamentos sísmicos realizados na bacia e em detalhe para o bloco *BCM-14*. Finalmente a Figura 2.12 ilustra a seção geológica obtida através da interpretação dos dados sísmicos [2].

## ***2.4. O Balanceamento Clássico***

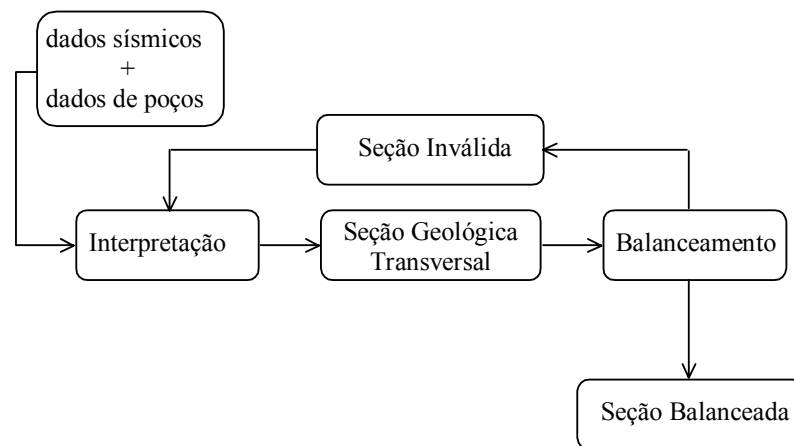
### ***2.4.1. Premissas***

O surgimento de técnicas geométricas envolvendo seções geológicas balanceadas relaciona-se historicamente com a necessidade de testar de forma apropriada as formas estruturais representadas em seções transversais. O balanceamento de seções geológicas é um exercício de teste de confiabilidade geométrica de uma determinada interpretação, expressa por um geólogo, ou geofísico, em uma seção transversal [21]. Consiste na tentativa de reconstituição da geometria original que as camadas da seção possuíam antes das deformações sofridas ao longo do tempo. Como se tem muito pouco conhecimento acerca dos mecanismos de deformação ocorridos no passado, o balanceamento fundamenta-se em premissas geológicas que podem ser simuladas utilizando-se princípios geométricos [27].

Essas premissas são em geral fundamentadas em teorias bastante simples, isso em função do elevado grau de incertezas relativos aos processos tectônicos, entre outros, ocorridos na formação das estruturas geológicas. Um deles está baseado na “lei de conservação do volume”, que estabelece que as feições geológicas sejam restauradas para um estado pré-deformacional sem perda ou acréscimo de volume do material geológico de forma que a disposição do comprimento e a espessura de cada camada mantenha um quadro coerente [21].

A variação de volume é considerada apenas em processos que envolvam a perda de água que ocupa o volume poroso, decorrente da compactação dos sedimentos à medida em que são soterrados. Outra premissa básica diz respeito à consideração de que a seção restaurada não deve possuir sobreposições nem vazios, pois na natureza não existem buracos ou sobreposição de matéria.

A técnica de balanceamento de seções é um processo iterativo, representado por vários passos. Partindo-se de uma interpretação estrutural baseada em dados de poços ou dados sísmicos, é obtida uma seção geológica que passa por várias etapas de balanceamento até que se obtenha uma seção válida, o que pode não ocorrer e conseqüentemente uma nova interpretação deverá ser realizada. A Figura 2.13 resume o processo do balanceamento desde a obtenção dos dados de campo até uma possível validação dos mesmos.



*Figura 2.13 – O Processo do balanceamento.*

O balanceamento, portanto, permite ao geólogo uma maior sensibilidade do histórico de formação das estruturas, já que busca simular os eventos deformacionais ocorridos, um a um, e de forma seqüencial.

### ***2.4.2. Algumas Técnicas de Balanceamento***

#### *a. Conservação da Área*

Em terrenos distensivos a suposição mais comum considera a conservação do volume. Ao trabalhar com seções geológicas, considera-se a conservação da área do bloco deformado, o que em outras palavras significa a adoção de um modelo no qual não teria havido entrada ou saída de material no plano da seção geológica. Isso impõe limitações na aplicação da técnica, entre elas a mais óbvia, ou seja, a seção deve ser escolhida entre aquelas situadas paralelas à direção do transporte tectônico. Em outras palavras, adota-se a simplificação de que nenhum material está entrando ou saindo do plano da seção, que é uma vista em corte de duas dimensões do espaço tridimensional. Assim sendo, a regra da preservação de volume pode ser estendida como regra de preservação de área dentro da seção bidimensional.

#### *b. Preservação de Comprimento e Espessura*

Se não houver fluxo elevado de material para dentro ou para fora da seção bidimensional, então o comprimento das camadas, antes e depois da deformação, deve ser o mesmo, inclusive caso a camada seja dobrada ou segmentada, o comprimento total se preservará. O mesmo vale para a espessura da camada. A premissa de preservação da espessura das camadas é em geral aplicado a cinturões compressivos.

### *c. Compactação das Camadas Geológicas*

No balanceamento devem ser usadas as leis de conservação, levando-se em conta as variações de volume pela compactação das camadas geológicas causadas pela sobrecarga sedimentar imposta pelas camadas superiores.

Uma coluna de material sedimentar é formada por sedimentos de rocha, água e vazios em uma certa proporção. A razão entre o volume de água ou vazios e o volume total é chamada de porosidade. Com o aumento da profundidade, o peso da sobrecarga sedimentar aumenta e, conseqüentemente, a porosidade diminui.

A compactação pode ser estimada a partir de medidas diretas da deformação em amostras recuperadas na perfuração. Infelizmente essas medidas se aplicam apenas a pequenos intervalos e freqüentemente somente a uma dada litologia. Outro método seria estimar a compactação diretamente a partir do perfil sônico.

O modelo comumente utilizado [53] para estimar a compactação estabelece que a porosidade  $\rho$  decai exponencialmente com a profundidade ( $z$ ), de acordo com a expressão (2.1):

$$\rho(z) = \rho_0 e^{-dec \cdot z} \quad (2.1)$$

Onde  $\rho_0$  é a porosidade inicial e  $dec$  é o fator de decaimento.

No processo de balanceamento, os métodos de estimação da compactação citados são utilizados na descompactação das camadas, que é o processo inverso da compactação que ocorreu naturalmente ao longo do tempo. A descompactação é feita após a remoção da camada superior da seção, equivalente a um alívio de carga sobre as camadas inferiores.

A massa sedimentar não se altera com a compactação, mas a porosidade sim, e conseqüentemente o volume e a geometria (que se deforma na vertical). A deformação no

eixo vertical altera o ângulo de mergulho das falhas. Assim deve ser feita a descompactação antes da restauração das falhas.

O fato da massa sedimentar não se alterar, ou seja, ser uma constante, apesar da variação de porosidade, e de só depender das profundidades de topo e base, pode ser usado no cálculo da descompactação (ou compactação), como no exemplo da Figura 2.14.

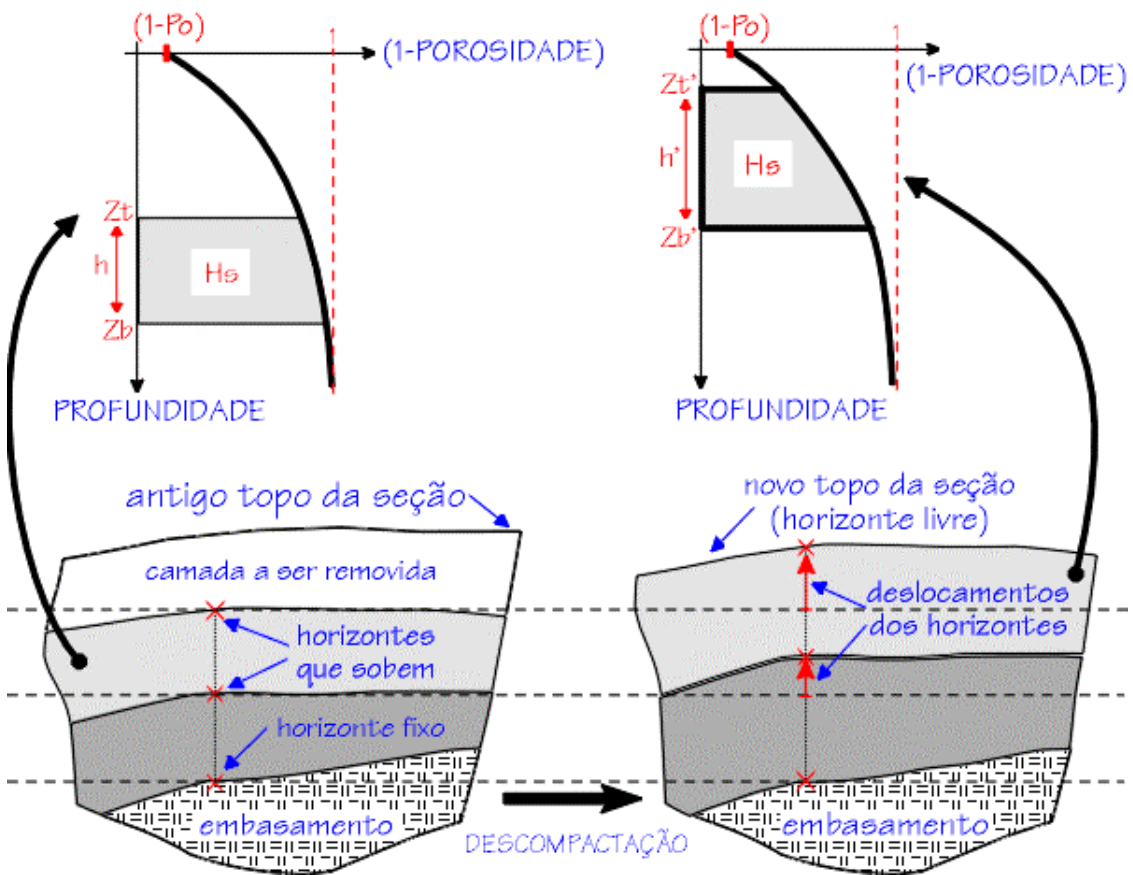


Figura 2.14 – Cálculo da Descompactação.

A integral da função de decaimento exponencial da porosidade entre as profundidades do topo  $Z_t$  e da base  $Z_b$  de uma camada resulta na altura equivalente de vazios e água da camada. Desta forma, a integral, da expressão (2.2), representa a altura equivalente de sedimento da camada.

$$H_s = \int_{Z_b}^{Z_t} (1 - \rho(z)) dz \quad (2.2)$$

Com isso a expressão (2.2) pode ser expressa por (2.3), como segue:

$$H_s = Z_b - Z_t + (\rho_0 / dec)(e^{-dec \cdot Z_b} - e^{-dec \cdot Z_t}) \quad (2.3)$$

O processo de descompactação é feito da seguinte maneira. Calcula-se o  $H_s$  da camada situada abaixo da coluna que vai ser removida a partir das suas profundidades de topo e base, e antes da remoção da camada superior. Após a sua remoção,  $H_s$  é o mesmo e a profundidade de topo da nova camada livre passa a ser zero. Basta então usar a expressão para  $H_s$ , expressão (2.3), afim de obter a nova profundidade de base da nova camada livre. O mesmo processo pode ser aplicado iterativamente para uma camada inferior, a partir do novo valor de profundidade de base obtido para a camada superior.

### **2.4.3. As Ferramentas**

Na tectônica distensiva o processo de balanceamento pode ser definido como um conjunto de operações que envolvem o reagrupamento de módulos de trabalho, remoção dos sedimentos depositados e descompactação das camadas. Já em terrenos compressivos, deve ser feito o alongamento de camadas que foram empurradas e dobradas e também devem ser levados em conta os efeitos da erosão. Para realizar estas diferentes tarefas são necessárias ferramentas específicas para cada caso.

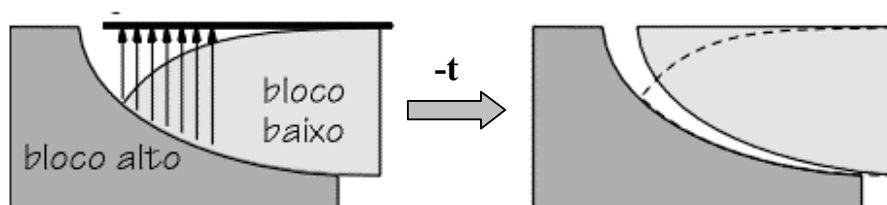
Em geral, as ferramentas utilizadas para o balanceamento clássico de seções geológicas, são um conjunto de transformações geométricas. Essas transformações são classificadas quanto a deformação ou não dos blocos, podendo ser rígidas (translação e rotação) ou não rígidas (distorção e dilatação).

Nas deformações rígidas os corpos são transladados e/ou rotacionados, mantendo seus tamanhos e formas originais. Quando ocorre mudança na forma do bloco, o processo é

chamado de distorção e quando ocorre aumento ou diminuição de volume, os processos deformacionais são chamados de dilatação e contração.

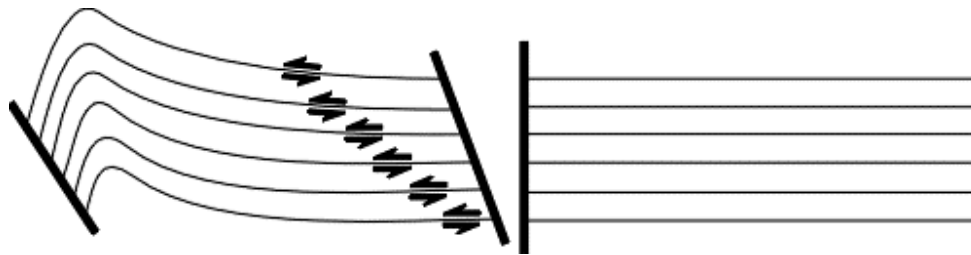
Na distorção, apesar da alteração da forma, não há variação de volume. Em alguns casos a distorção obedece a leis geométricas, sendo dita uniforme, e pode ser simulada através de transformações geométricas, como por exemplo, cisalhamento linear e deslizamento flexível.

O cisalhamento simples [24] [51] permite restaurar blocos que sofreram deformações paralelas a um eixo, situado geralmente próximo da vertical. Por exemplo, o bloco baixo da falha mostrada na Figura 2.15 se abateu pela força da gravidade, segundo um eixo vertical e sofrendo cisalhamento. Para esta transformação devem ser fornecidos ao sistema o bloco a ser cisalhado, o ângulo de cisalhamento e um perfil ao qual o bloco se ajustará, que é a geometria destino. No caso da Figura 2.15, a geometria destino é uma linha horizontal, correspondente a parte superior do bloco baixo, no seu estado deposicional original. Nessa transformação a área do bloco cisalhado deve ser mantida pelo processo de deformação.



*Figura 2.15 – Cisalhamento puro em um bloco sobre uma falha.*

O deslizamento flexural pode ser observado na Figura 2.16, onde, à esquerda, se vê um bloco cujas camadas deslizaram umas com relação as outras, além de se curvarem, tal qual as folhas de um livro. Na direita observamos o mesmo bloco após a transformação. Esta técnica leva em conta a premissa de preservação das espessuras e comprimentos das camadas. É feita uma analogia com um catalogo submetido a compressão lateral, onde o efeito que se percebe é similar, ou seja, ocorre o dobramento das camadas inferiores que vão empurrando as superiores.



*Figura 2.16 – Dobramento das camadas em terrenos compressivos.*

As deformações que os blocos sofrem são estudadas pela geologia, que procura entender o mecanismo do processo através do estudo do comportamento mecânico das rochas. As transformações geométricas acima citadas, aplicadas em ordem reversa na tentativa de reconstituir o terreno original, constituem o balanceamento ou restauração. Os processos de deformação das rochas citados na *seção 2.2*, em especial o comportamento mecânico de rochas submetidas a esforços tectônicos, são fenômenos tridimensionais, mas como é bastante complexa a operação em três dimensões, tenta-se fazer balanceamento com seções bidimensionais, daí o chamado balanceamento de seções geológicas.



# 3

---

## O Sistema Recon

### 3.1. Introdução

A proposta do presente capítulo é descrever o sistema que serve de ambiente para o desenvolvimento deste trabalho, ou seja, o sistema *Recon*. Pode-se subdividir este capítulo, então, em três partes distintas. A primeira parte se destina a apresentação da estrutura de dados utilizada pelo sistema para representar as seções geológicas. A seguir, descreve-se as principais funcionalidades do sistema, básicas para a realização de um balanceamento de uma determinada seção geológica. Em uma terceira etapa são descritos o que foi desenvolvido dentro do sistema para torná-lo mais funcional para o geólogo ou geofísico.

O Sistema *Recon* vem sendo desenvolvido pelo convênio entre o Tecgraf/PUC-Rio e a PETROBRAS desde 1991. O sistema utiliza uma tecnologia de modelagem geométrica baseada em uma estrutura de dados topológica, uma biblioteca também desenvolvida pelo Tecgraf. Esta tecnologia faz com que o *Recon* tenha não só uma edição gráfica inteligente, mas muitas opções de deformação estrutural (transformações geométricas) que no conjunto facilitam bastante o processo de balanceamento geológico. O sistema já foi aplicado nas bacias de Campos, Recôncavo, Potiguar e Sergipe entre outras.

O Recon permite testar a validação geométrica de seções geológicas, assim como permite a construção de modelos geológicos mais confiáveis, constituindo-se assim numa importante ferramenta exploratória.

### 3.2. Subdivisão Planar

As estruturas representadas em uma seção geológica podem ser vistas como blocos que se deslocam e deformam geometricamente, mas mantêm entre si uma relação de adjacência durante estas transformações. Uma estrutura de dados que seja capaz de representar estas estruturas geológicas deverá manter as relações de topologia ao longo de todo o processo de balanceamento. A estrutura, além de manter a representação da subdivisão do plano que modela a seção, deve também facilitar o processo de criação da mesma, já que todo este processo de modelagem geométrica deverá se passar em tempo real.

A seção geológica pode ser vista como uma subdivisão planar, pois pode ser estabelecida uma relação entre as entidades geológicas e as entidades topológicas da subdivisão. Na Figura 3.1 é apresentada uma seção. A camada A está fragmentada em três blocos (separados por falhas), blocos A1, A2 e A3. O horizonte A (topo da camada A) é formado por linhas no contorno destes blocos. A cada entidade podem ser associados atributos, tais como idade, litologia, porosidade, etc. A estrutura de dados deve permitir o armazenamento destes atributos.

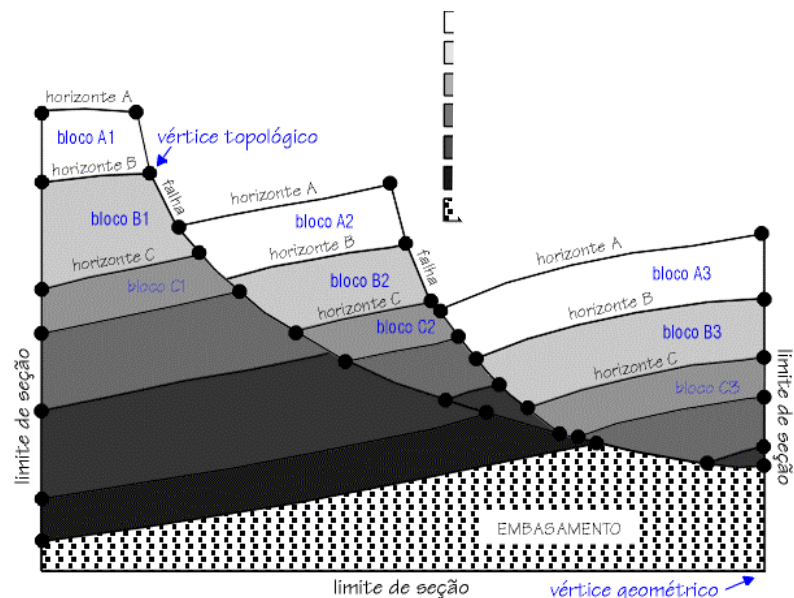


Figura 3.1 –Entidades topológicas de uma seção geológica.

A estrutura de dados utilizada pelo *Recon* é baseada no conceito de subdivisões planares. Uma subdivisão do  $\mathbf{R}^2$  é apresentada na Figura 3.2 abaixo. Nela o plano é dividido em diversas regiões (faces  $f_1, f_2, f_3$  e a face externa), sendo cada uma delas delimitada por um conjunto de segmentos de curva (arestas) que, por sua vez, são delimitados por dois vértices não necessariamente distintos. Os termos vértice, aresta e face são provenientes do fato de que subdivisões planares representam a topologia da fronteira de sólidos homeomorfos a uma esfera [9], [10].

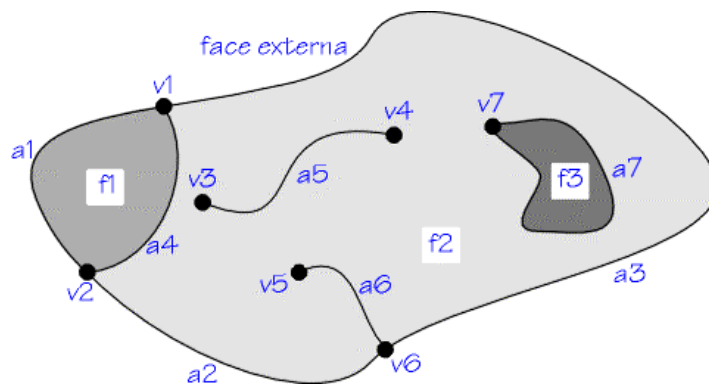


Figura 3.2 -Exemplo de uma subdivisão do  $\mathbf{R}^2$ .

No processo de criação e manutenção de uma subdivisão planar, quando um segmento de curva for incluído, todos os pontos de interseção com os segmentos já pertencentes à subdivisão são calculados. Estes pontos se tornam vértices topológicos e são criadas arestas entre cada um desses vértices. No caso de regiões fechadas por arestas se formarem, novas faces são criadas na subdivisão. Os componentes topológicos que formam uma subdivisão planar são dos seguintes tipos:

- **vértice** - correspondente a um ponto único do  $\mathbf{R}^2$ , não podendo haver dois vértices com a mesma localização geométrica.
- **aresta** - segmento de curva (equivalente homeomorficamente a um segmento de reta) delimitado por dois vértices não necessariamente distintos.
- **ciclo** (loop) - subconjunto conexo e ordenado de vértices e arestas alternados.
- **face** - subconjunto conexo do  $\mathbf{R}^2$ , cuja fronteira é formada por um ou mais ciclos, sendo que, com exceção da face externa, um destes contém os outros e representa sua fronteira externa.

As estruturas de representação podem ser baseadas em vértices, faces ou arestas. Mas, pela sua própria natureza, as baseadas em arestas possuem algumas propriedades que as tornam mais vantajosas do que as baseadas em vértices ou faces. Em uma representação baseada em arestas, cada aresta é limitada por exatamente dois vértices não necessariamente distintos, e cada aresta é adjacente a exatamente duas faces não necessariamente distintas. Além disso, se for considerado que a adjacência aresta-aresta é caracterizada por arestas que compartilham tanto vértices quanto faces, o número de arestas adjacentes a uma dada aresta é limitado a quatro. Estes fatos são explorados em uma estrutura de dados baseada em arestas, resultando em uma estrutura com registros de tamanhos fixos. Cada aresta tem dois usos, que são definidos pelo uso da aresta pelos ciclos adjacentes. Os usos de uma mesma aresta estão orientados em sentidos opostos, levando automaticamente a uma orientação para as faces. Na Figura 3.3, vê-se uma subdivisão planar com a indicação dos ciclos de cada face. Uma das faces possui um ciclo interno. Também é indicado em tracejado a inclusão de uma nova aresta com a conseqüente adição de um ciclo e uma face à subdivisão. Tal como os usos das arestas, os ciclos têm orientação, e neste exemplo, no sentido horário. O uso de uma aresta é o lado de uma aresta visto por uma das duas faces. Os ciclos são compostos pelo encadeamento dos usos das arestas de uma face.

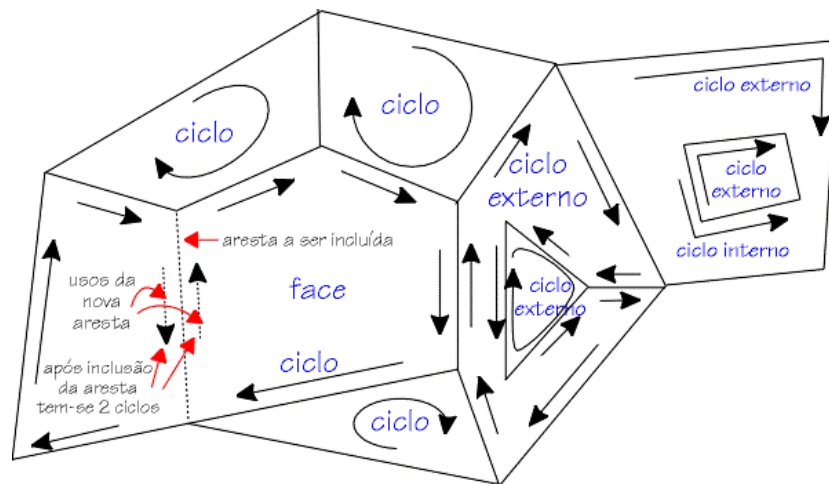


Figura 3.3 - Orientação de usos e ciclos em uma subdivisão planar.

### 3.3. Modelagem da Subdivisão Planar

No *Recon* a modelagem da subdivisão planar utiliza a biblioteca de rotinas HED desenvolvida pelo Tecgraf/PUC-Rio. O HED é uma estrutura de dados topológica, baseada em arestas, do tipo *half-edge* [40]. Uma estrutura do tipo *half-edge* é uma extensão de uma outra, também baseada em arestas, denominada *winged-edge* e que é sucintamente ilustrada na Figura 3.4.

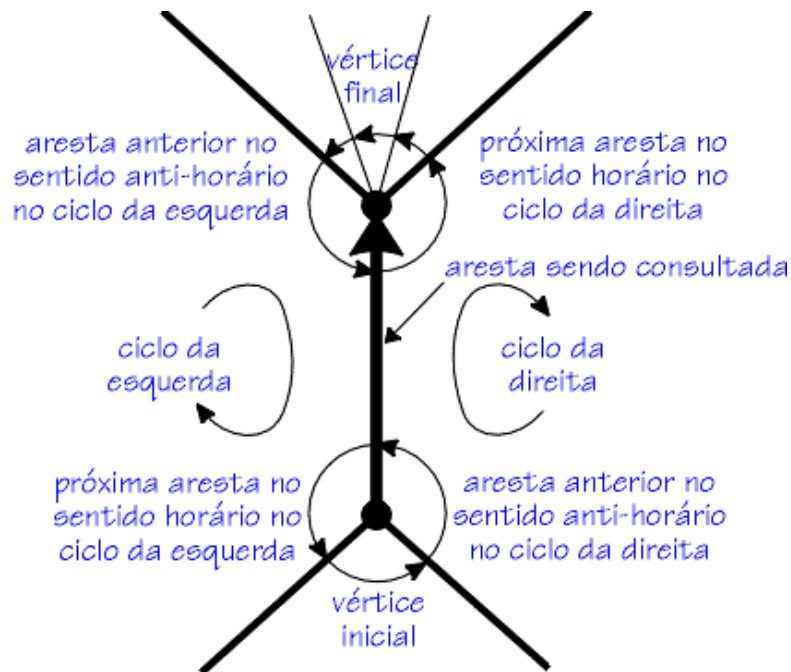


Figura 3.4 - Estrutura de dados *winged-edge*.

Como cada aresta aparece em dois ciclos, duas outras arestas aparecem em seguida a esta aresta em cada um dos ciclos, uma no sentido horário e outra no anti-horário. Mas esta estrutura não utiliza o conceito de uso de uma aresta por dois ciclos que a compartilham. Por sua vez, as estruturas *half-edge* utilizam este conceito.

Observa-se na Figura 3.5 a seguir que a estrutura *half-edge* é hierárquica e formada por listas circulares encadeadas, indo dos níveis mais altos de hierarquia (subdivisão planar) aos mais baixos (vértices). No que diz respeito ao armazenamento explícito das relações

de adjacência, a estrutura *half-edge* não é completa, embora forneça alguns relacionamentos de forma já ordenada. Por exemplo, percorrendo-se o ponteiro *eu\_nxt* ou o *eu\_prv* (apontam o próximo uso de aresta e o anterior, respectivamente) varrem-se as arestas adjacentes de um ciclo da fronteira de uma face (Figura 3.5a).

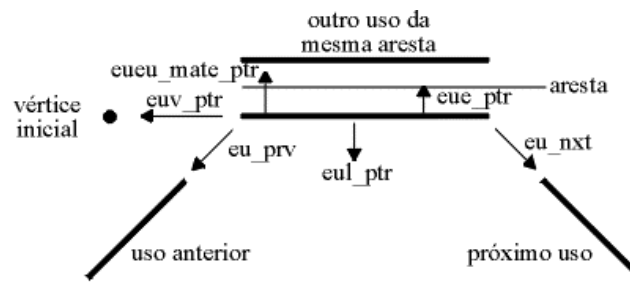
Além do encadeamento de ponteiros que estabelece as relações de adjacência, cada entidade possui também um ponteiro para um registro de atributos opcional. A subdivisão planar, a face, o ciclo, a aresta e o vértice podem ter atributos associados. Por exemplo, no caso de representação de seções geológicas, as faces que representam blocos de camadas geológicas podem ter como atributos uma cor, uma litologia, e propriedades físicas como valor de porosidade, decaimento, etc.

A criação da subdivisão planar pode ou não ser um processo interativo. No caso interativo, um processo natural de modelagem é tal que os segmentos de curva são fornecidos um após o outro pelo usuário do sistema, através de um dispositivo como o mouse ou uma mesa digitalizadora.

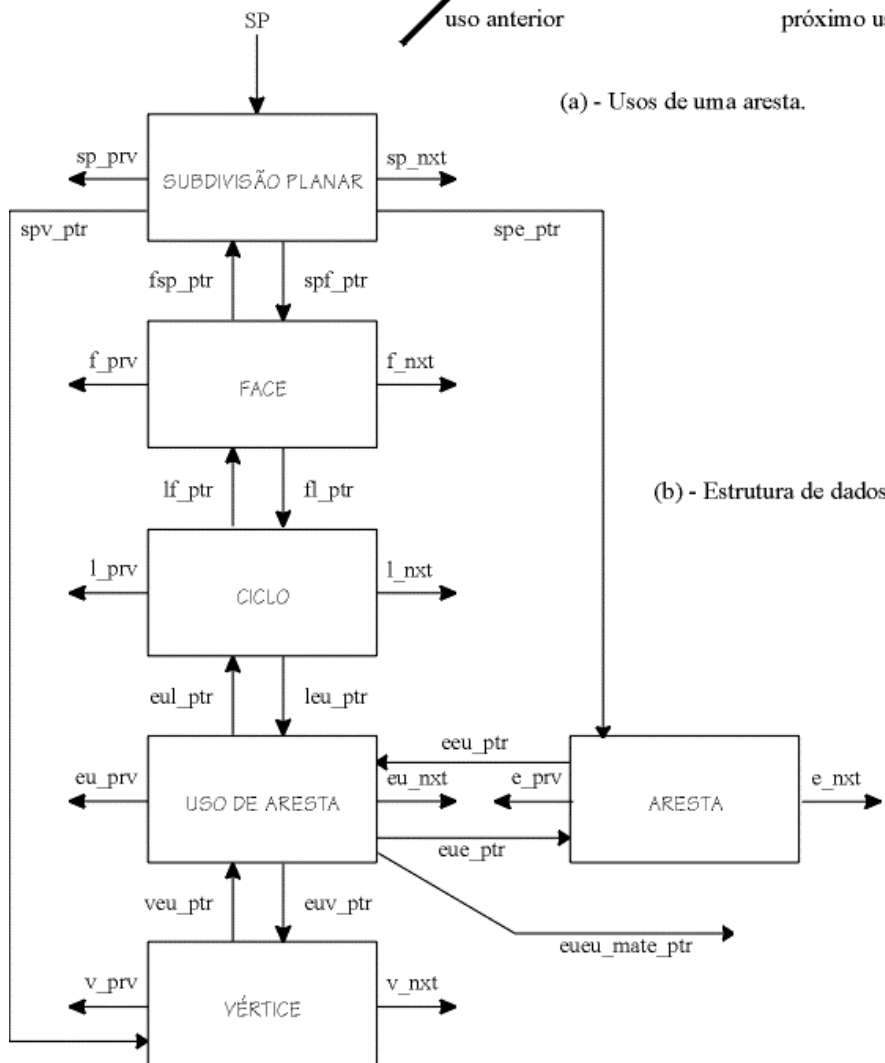
O pacote HED oferece os recursos necessários para a criação e manutenção de uma subdivisão planar. Basicamente é constituído de uma camada de operadores geométricos que recebe da aplicação as curvas a serem incorporadas à subdivisão. Esta camada trata uma curva, transformando-a em uma ou mais arestas, e passa estas arestas a uma camada de operadores topológicos, chamados de operadores de *Euler*, que fazem a manipulação da estrutura de dados *half-edge* que representa a subdivisão. O HED possui também funções de consulta à estrutura de dados.

Uma outra funcionalidade fundamental que o HED provê é a possibilidade de inserção de um segmento de curva a uma subdivisão. Para tal, deverá haver um pré-processamento geométrico, permitindo que este segmento seja decomposto em segmentos simples que são arestas, contidos inteiramente nas faces da subdivisão já existente.

Essas arestas poderão então ser adicionadas à subdivisão através de operadores de Euler, responsáveis pela criação e manipulação da subdivisão planar. Este pré-processamento deverá determinar todos os pontos de interseção entre o novo segmento e as arestas já existentes. A consistência topológica da subdivisão é garantida pelos operadores de Euler.



(a) - Usos de uma aresta.



(b) - Estrutura de dados.

Figura 3.5 - Estrutura de dados half-edge.

### ***3.4. O Sistema Recon Original***

Nesta seção são descritas as principais funcionalidades e características do sistema *Recon* original, ou seja, antes de se iniciar o desenvolvimento deste trabalho. O sistema apresenta todas as funcionalidades básicas que para se realizar a tarefa de balanceamento de seções geológicas em ambientes distensivos. Dentre estas funcionalidades pode-se destacar:

#### ***3.4.1. Criação de Uma Seção Geológica***

A criação da seção pode ser feita a partir da importação da mesma através de um outro sistema ou como era mais comumente utilizada, via digitalização de uma seção em papel.

Além disso, o sistema provê um editor gráfico de linhas, às quais são associados atributos próprios (falha, limite de seção horizonte, etc). Aos horizontes ainda tem-se associada uma tabela de idades geológicas, igualmente construída via interface pelo usuário. A edição de linhas está diretamente relacionada às funções do HED de inserção de curvas na subdivisão planar que representa a seção. O uso de uma estrutura de dados topológica e dos recursos de manipulação da subdivisão planar, próprios do HED, discutidos anteriormente. O reconhecimento automático das novas regiões formadas, em tempo real, é o *feedback* ideal para o processo de criação ou importação de uma seção, já que permite a visualização de qualquer inconsistência topológica gerada em um dado instante.

#### ***3.4.2. Camadas***

A definição das camadas é feita de forma automática a partir do reconhecimento das regiões que vão sendo formadas pela inserção de linhas. Desta forma, o atributo geológico de um bloco é determinado automaticamente pelo sistema com base nos atributos geológicos das linhas na fronteira do bloco. Esta atribuição também pode ser feita de forma explícita pelo geólogo. Os tipos de camada, aqui representados, são a



camada sedimentar, a camada intrusiva, ou a camada indefinida, caso está não tenha sido identificada como nenhuma das duas anteriores.

### 3.4.3. Módulos

O sistema permite o agrupamento de faces (blocos de rocha) em módulos. A forma simples de definir um módulo é a indicação pelo usuário das faces que devem ser incluídas no novo módulo. Também é possível fazer operações entre módulos, como união e separação. Além de um algoritmo de ajuste implementado para corrigir as inconsistências topológicas aqui traduzidas por *gaps* gerados pelos erros introduzidos durante o processo de balanceamento.

As transformações geométricas, inerentes ao processo de balanceamento, são aplicadas simultaneamente a agregados de faces, arestas e vértices, chamados aqui de módulos. Cada módulo pode conter todas as entidades topológicas que uma subdivisão planar contém, ou seja, cada módulo é uma subdivisão planar à parte. Uma seção geológica será composta então de módulos, sendo que um deles é o módulo base. Na Figura 3.6, tem-se uma seção dividida em três módulos, constituídos por sua vez de blocos. O módulo I poderia ser o módulo base e os módulos II e III são agregados de blocos que se movimentaram com relação ao módulo base.

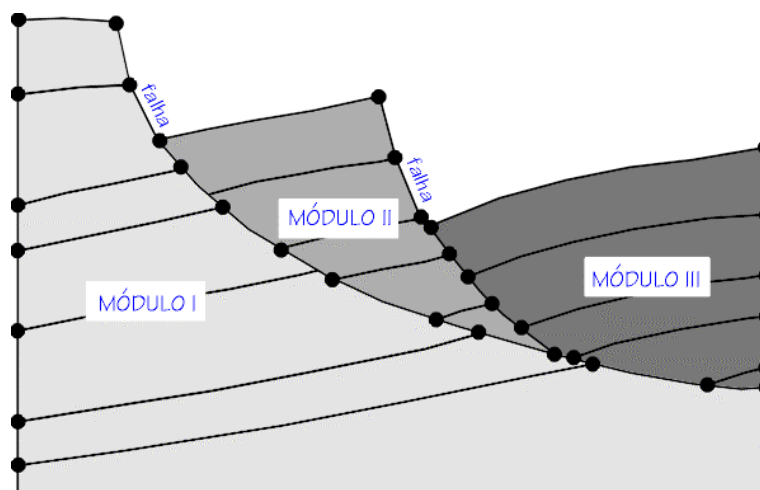


Figura 3.6 -Subdivisão hierárquica da seção dividida em módulos.

#### ***3.4.4. Transformações***

O Sistema possui o conjunto básico de transformações geométricas. No caso, as transformações já citadas no Capítulo 2. Na Seção 3.6 são documentadas as técnicas envolvidas na implementação do conjunto de transformações de que dispõe o sistema.

#### ***3.4.5. Consultas***

O *Recon* apresenta um conjunto de operações de consulta, tanto aos atributos das entidades da seção (tipos e idades de linhas, parâmetros de uma camada, etc.), quanto consultas que dizem respeito à geometria da seção (medidas de comprimento de linhas, valor de ângulos, totalização de área, etc)

#### ***3.4.6. Ajuste***

A operação de ajuste, usada na colagem de módulos, é um procedimento iterativo onde o usuário visualmente define a tolerância a ser usada no ajuste. Assim, o geólogo pode fazer tentativas com várias tolerâncias, de forma a obter um ajuste que considere mais aceitável. O objetivo desta operação é corrigir o erro introduzido durante o processo de balanceamento já que não pode haver sobreposição ou vazios, mantendo assim a consistência topológica do modelo.

### ***3.5. Atributos Geológicos na Versão Original do Recon***

Esta seção descreve a organização de classes de atributos da versão original do Recon. Neste trabalho, conforme é descrito no Capítulo 5, foi realizada uma reestruturação completa desta organização com o objetivo de permitir a incorporação de um módulo de análise ao processo de balanceamento.

O HED [40] permite que sejam armazenados os atributos referentes às faces e arestas do

modelo. Geologicamente, cada seção pode ser representada contendo atributos para as camadas e para as suas linhas, que podem ser interfaces entre as camadas ou simplesmente linhas de falha, limite de seção, etc. No *Recon*, cada entidade geométrica da seção está associada aos seus atributos geológicos, mas, na modelagem do sistema, camadas na realidade representam um conjunto de faces com os mesmos atributos. As entidades topológicas HED que apresentam classes de atributos atrelados a si, são:

- **Faces:** que herdam os atributos das camadas a que pertencem. Esses atributos são: porosidade inicial, taxa de decaimento (expressão 2.6) e código de litologia da rocha que compõe a camada. Além disso tem associadas a si os seus respectivos tipos: *depósito, topo de sal, indefinida ou externa*.
- **Arestas:** são formadas por curvas, representadas por poligonais, denominadas aqui de linhas. Estas linhas na seção geológica têm o atributo tipo, que pode ser: *horizonte, falha, limite de seção, discordância, topo do sal* ou até mesmo indefinida, caso esta não tenha ainda recebido qualquer destes tipos. Ao horizonte ainda fica associado um outro atributo que é a sua idade geológica.

O HED provê ainda mecanismos flexíveis que possibilitam o manuseio destes atributos. O programador do aplicativo que usa o pacote HED passa para ele ponteiros de funções do aplicativo. Automaticamente estas funções serão disparadas quando ocorrer uma operação topológica sobre a subdivisão. Por exemplo, se uma face é dividida, uma função escrita pelo programador cliente da biblioteca é chamada e, por exemplo, os atributos das duas faces podem ser herdados da face original.

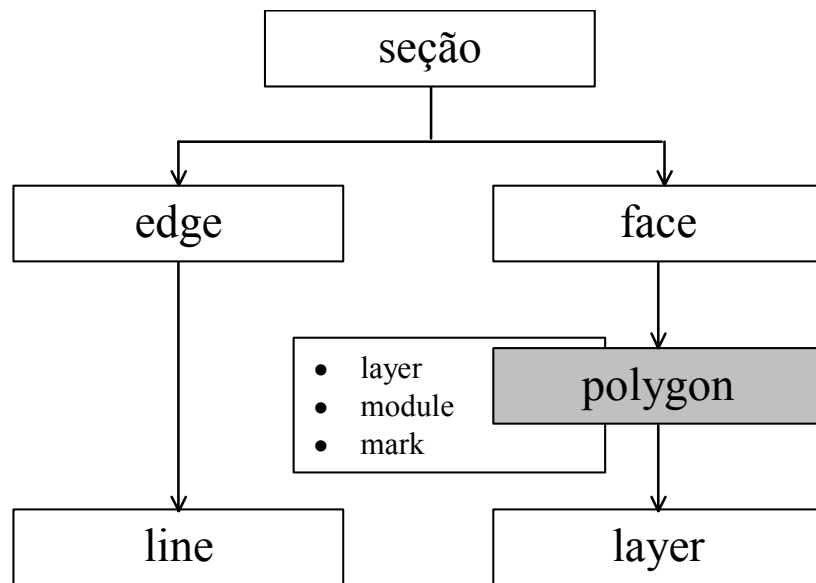


Figura 3.7 – Organização original das classes de atributos no Sistema Recon.

A estrutura original de hierarquia das classes no *Recon* responsável pelo controle dos atributos geológicos associados as entidades topológicas da subdivisão é ilustrada de forma simplificada conforme a Figura 3.7.

A idéia básica envolvida estava nas abstrações criadas entre a geometria (subdivisão planar) e as classes e sub-classes dos atributos geológicos. Associados a uma seção estão os elementos topológicos de aresta e face, que são basicamente tipos do HED. Na concepção original, a super-classe *Line* que representava o conjunto de todos os tipos geológicos de linhas (horizontes, falhas, etc.) e a aresta topológica não apresentavam entre si uma outra camada de abstração. Por outro lado, entre as faces topológicas do HED e a super-classe *Layer*, é possível observar em destaque a classe *Polygon* que representava justamente a interface entre atributo e geometria de forma explícita.

Cabia à classe *Polygon* gerenciar esta interface e ainda ter pendurados a si própria outros atributos não identificados a dados geológicos e ou mesmo não relacionados à subdivisão planar, tais como apontadores para o módulo de trabalho (*module*), ao qual uma instância de *Polygon* estaria associado, e uma lista de marcadores de transformação (*mark*).

### ***3.6 As Transformações Geométricas***

Os blocos de rocha de uma estrutura geológica sofrem movimentações e deformações de origem tectônica ao longo do tempo. As transformações geométricas realizadas no balanceamento também correspondem a movimentações e deformações destes blocos, em geral na tentativa de reverter os mecanismos geológicos ou de simulá-los.

A aplicação das transformações geométricas requer, primeiramente, que sejam definidos módulos de trabalho, sobre os quais serão aplicadas as transformações. O usuário, baseado na sua experiência em geologia, escolherá os blocos da seção que serão agrupados, formando o módulo.

Basicamente o critério será o de selecionar blocos que sofreram o mesmo tipo de movimento ou deformação em conjunto, para que possa ser aplicada a estes blocos a transformação inversa visando a reconstituição da seção. Um processo interativo natural de definição de um módulo é o apontamento, pelo usuário, das faces que representam os blocos a serem agrupados.

As transformações relevantes para o processo de balanceamento podem ser divididas entre as que movimentam corpos rígidos e as que causam deformação. As da primeira classe são a translação e a rotação, que são feitas por algoritmos tradicionais. Já as transformações não rígidas têm algoritmos relativamente complexos e são baseadas nos princípios geológicos discutidos no Capítulo 2.

Todas as operações de transformação, com exceção da descompactação, constam de três fases: a coleta das informações necessárias, preparação destas informações de forma que fiquem adequadas a serem aplicadas a cada uma das coordenadas que definem a geometria do módulo e a aplicação da transformação propriamente dita ponto a ponto.

### **3.6.1. Transformações Rígidas**

#### **3.6.1.1. Translação**

As transformações de translação e de rotação de corpos rígidos são apropriadas para uso em regiões onde o movimento tectônico gera o deslizamento e basculamento de blocos, associados a falhamentos planares.

Falhas com perfil plano causam a translação (deslizamento) do bloco baixo, sem a formação da chamada geometria de *rollover*, ou seja, não ocorrem mudanças na forma dos blocos, apenas movimentação. A translação de um módulo promove o deslocamento do mesmo em uma determinada direção e distância.

#### **3.6.1.2. Rotação**

O deslocamento ao longo de uma falha, com trajetória circular, promove a rotação dos blocos sobre a mesma, associada a um movimento de translação. Durante o deslizamento e a rotação ao longo da falha, as paredes dos blocos alto e baixo permanecem em contato até que seja atingida a parte mais profunda da falha, onde ela tende a ser horizontal (*profundidade de detachment*). Aí pode surgir um espaço entre os dois blocos. No caso dos blocos serem formados por materiais pouco dúcteis (rochas indeformáveis), não haverá fluxo plástico e estes espaços não serão preenchidos devido à deformação e à adaptação do perfil destes blocos. Estes vazios abaixo destes blocos causam uma instabilidade, possibilitando a rotação dos mesmos.

### **3.6.2. Transformações Não Rígidas**

#### **3.6.2.1. Cisalhamento Simples**

As falhas geradas pela movimentação tectônica são acompanhadas do abatimento de blocos, devido a falta de estabilidade dos mesmos, que faz com que eles percam a

sustentação com a separação dos blocos pela falha. Esse abatimento ocorre segundo uma direção (ângulo). Em geral esta direção está próxima à vertical e coincide com a orientação da força de gravidade. O bloco se acomoda sobre o leito da falha, ao se deformar plasticamente, ajustando-se ao perfil da falha, ou seja, o bloco cisalha segundo uma direção. As partes do bloco cisalhado se deslocam na direção do abatimento, sendo o deslocamento diferenciado ao longo do corpo do bloco em função do perfil da falha. Na realidade o cisalhamento pode ser aplicado a um módulo, ou seja, a um grupo de blocos. A este módulo é aplicado um campo de deslocamentos, formado por linhas paralelas. Assim, todas as linhas deste campo tem uma direção única, mas cada linha está associada a um deslocamento que depende da distância (Figura 3.8a) ao longo da linha (unidimensional) entre um perfil destino (leito da falha) e um perfil origem (fronteira do módulo que se abate sobre o leito). O mesmo mecanismo é usado na reconstituição da geometria original, ou seja, no processo inverso ao do abatimento do módulo. Cada vértice do módulo é submetido ao campo de deslocamentos.

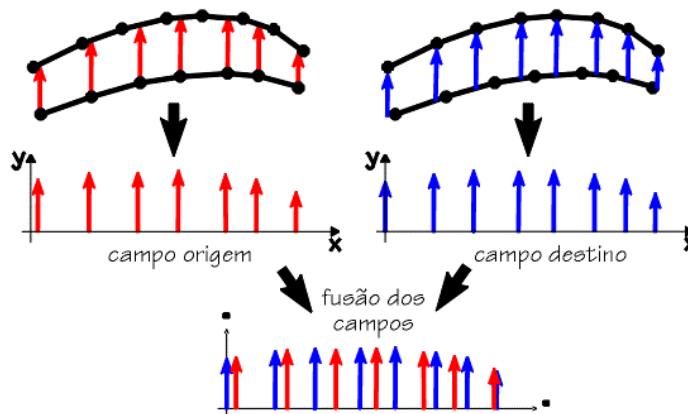
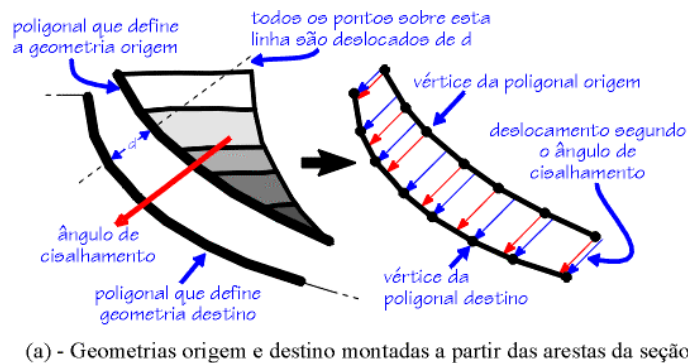


Figura 3.8 – Cisalhamento simples: montagem do campo de deformações.

As rotinas que coletam as informações necessárias para o cisalhamento fornecem ao algoritmo duas poligonais (geometria origem e destino) e o ângulo de cisalhamento.

A fase do algoritmo que prepara o campo de deslocamentos é a parte mais complexa conforme pode-se observar na descrição abaixo:

- **Passo 1** - *É criado um novo sistema de coordenadas auxiliar para o campo de deslocamentos a ser montado. Para obter suas coordenadas no novo sistema, as poligonais origem e destino são transladadas e rotacionadas. Com a rotação, os deslocamentos do campo só terão componentes no eixo y e as poligonais se desenvolverão na direção do eixo x. Com a translação, o primeiro ponto das poligonais coincidirá com o início do eixo x. Esta modificação do sistema de coordenadas facilita as fases seguintes do algoritmo. Nesta fase, é feito um teste para detectar dobras nas linhas origem e destino, ou seja, se existe mais de uma ordenada para uma mesma abscissa (Figura 3.9). Em caso afirmativo, a operação é interrompida. Um outro teste é feito para garantir que os limites, na direção x, da poligonal destino fiquem iguais ou maiores que o da poligonal origem, pois esta se projetará sobre a poligonal deformada. Se necessário, a poligonal destino é prolongada retilinearmente.*

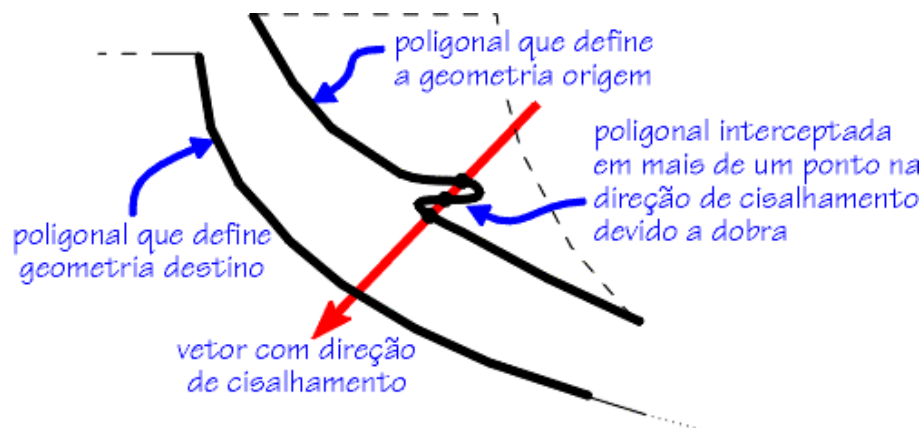


Figura 3.9 – Cisalhamento simples: dobras na geometria origem.



- **Passo 2** - *A partir das poligonais origem e destino, já no novo sistema de coordenadas, são criados os campos de deformação origem e destino, respectivamente (Figura 3.8.b). O primeiro campo de deformações (o origem) parte de cada ponto da poligonal origem, até a interseção da vertical que passa por este ponto com a poligonal destino. A deformação ou deslocamento para a dada abscissa será a diferença entre as ordenadas do ponto de interseção e do ponto da linha origem. O segundo campo chega a cada ponto da linha destino, partindo da interseção da vertical que passa por este ponto com a poligonal origem. Os valores do campo também serão a diferença entre as ordenadas dos pontos e os respectivos pontos de interseção.*
- **Passo 3** - *Após a criação dos dois campos, eles são fundidos em um só campo de deformações, a ser usado posteriormente no cisalhamento. Esta fusão se baseia nas abscissas que devem ter sido previamente colocadas em ordem crescente. No caso de pontos com mesma abscissa é evitada a repetição da mesma no campo resultante.*

A aplicação do algoritmo ao campo de deslocamentos simplesmente repetirá para todos os vértices do módulo em transformação os seguintes passos:

- Transformação para o sistema de coordenadas auxiliar, que é o sistema do campo de deformações.
- Aplicação do campo de deformações, ou seja, é feita uma interpolação linear da abscissa, e é obtida uma ordenada correspondente à deformação naquela faixa do campo.
- Transformação para o sistema de coordenadas original da seção.

### **3.6.2.2. Move Sobre Falha**

A transformação de movimentação de um bloco sobre uma falha lítrica é na realidade a combinação de duas das transformações acima descritas: translação e cisalhamento puro. Inicialmente são requeridos:

- a geometria da falha sobre a qual haverá a movimentação
- ponto  $p_0$  de referência sobre o módulo a ser movido
- ponto  $p_1$  sobre a linha destino (falha)
- ângulo de cisalhamento

Com os pontos  $p_0$  e  $p_1$  define-se o vetor que rege a parcela de translação aplicada ao módulo. O cisalhamento simples, por sua vez, para ser executado necessita como dados de entrada a geometria destino, a linha de falha selecionada, a geometria origem, que é representada pelo conjunto dos segmentos da falha selecionados que interfaceia o módulo, e o ângulo de cisalhamento, que já é dado de entrada. A Figura 3.10 ilustra o move-sobre-falha realizado dentro do ambiente *Recon*.

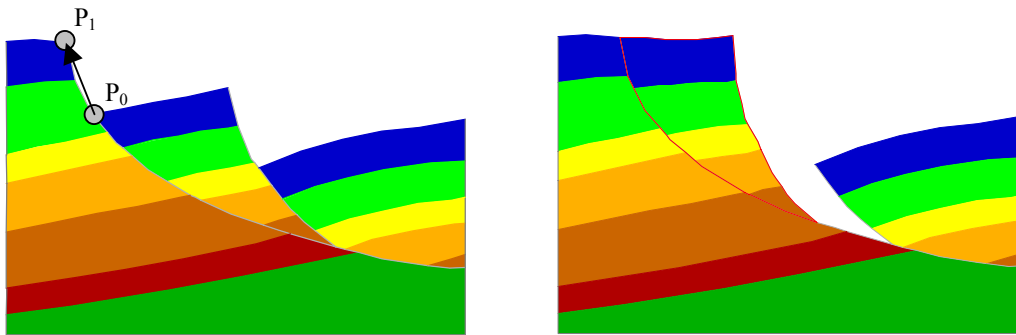


Figura 3.10 – Exemplo de restauração com o Move sobre falha geométrico.

### 3.7. Novos Desenvolvimentos

No início do desenvolvimento deste trabalho, foi possível interagir com vários geólogos e geofísicos usuários do sistema o que contribuiu bastante para que novas funcionalidades fossem incorporadas ao sistema, buscando torná-lo mais amigável sob o ponto de vista da interface com o usuário dentro da filosofia do balanceamento de seções geológicas.

A estratégia adotada, portanto, ao início do trabalho foi implementar uma nova versão para o sistema, mais atualizada e funcional sob o enfoque da interface gráfica.

Inicialmente as únicas alterações realizadas foram as migrações dos sistemas de interface e gráfico conforme pode-se observar na seção 3.7.1 a seguir.

A presente seção visa apresentar as principais funcionalidades incorporadas ao *Recon*, descrevendo as ferramentas utilizadas e os ganhos obtidos tanto sob o ponto de vista do uso do programa quanto efetivamente as novas possibilidades de desenvolvimento que surgiram em função destas implementações.

### ***3.7.1. Nova Interface Gráfica***

No início do seu desenvolvimento, início da década de 90, os recursos computacionais eram mais escassos principalmente no que diz respeito às bibliotecas de interfaces gráficas disponíveis na época. O mesmo pode-se dizer com relação aos sistemas gráficos.

O sistema de interface do sistema foi inteiramente reescrito utilizando-se da biblioteca *IUP* [39], desenvolvido no Tecgraf/PUC-Rio. O IUP é um sistema portátil de criação de interfaces que oferece uma *API* (*Application Program Interface*) de configuração através de três linguagens básicas: *C* [38], *Lua* [34] e *LED*. Sua biblioteca contém várias funções para a criação e a manipulação de diálogos.

A idéia básica do IUP é permitir que um programa possa ser executado sem modificações em diferentes sistemas, sendo, portanto, a alta portabilidade uma de suas principais características. Os sistemas suportados são: *Motif*, *Microsoft Windows* (contém bibliotecas para todas as versões). Por isso, o IUP possui algumas vantagens em relação aos *toolkits* de interface comerciais disponíveis no mercado.

Foi substituído também o sistema gráfico do *Recon* para o, *CD* (*Canvas Draw*), uma biblioteca gráfica independente implementada em várias plataformas usando as suas respectivas bibliotecas gráficas nativas. O *CD* [13] contém funções que instanciam objetos gráficos vetoriais e *raster*. Além disso, esses objetos podem ser visualizados tanto em uma área de desenho, *canvas*, quanto em superfícies mais abstratas, como *Clipboard*,

*Metafile* e *Postscript*, o que possibilita a exportação de modelos do Recon nesses formatos.

Com a migração do *Recon* para os sistemas IUP/CD, foi possível gerar versões do *Recon* para outras plataformas, entre elas o *Windows*, o que não era possível na versão antiga do sistema. Além disso, a interface tornou-se muito mais amigável sob o ponto de vista do usuário, com um *layout* bem mais moderno.

### **3.7.2. Geração e Importação de Novas Seções**

Com a substituição do sistema de interface do sistema não foi mais possível gerar novas seções via mesa digitalizadora, já que o *IUP* não possui *driver* para este periférico. Com isso, foi necessário lançar mão de outros mecanismos para a geração de novas seções.

Somadas as bibliotecas acima descritas utilizou-se uma outra biblioteca para se fazer a leitura de imagens raster, o IM [35], igualmente desenvolvida pelo *Tecgraf*. O IM é capaz de ler e escrever imagens *bitmaps* em formatos *raster*, tais como BMP, PCX, GIF, TIF, etc. A IM possui total compatibilidade com imagens cliente do CD, fornecendo armazenamento persistente para imagens cliente.

O que se ganhou foi a possibilidade de importação de uma imagem raster, e que permitiu sofisticar a entrada dos dados até aqui feitos ou por leitura de uma seção no formato padrão do *Recon*. A imagem é importada e colada ao fundo da tela do sistema. Neste processo o *Recon* passa a ser também um ambiente de interpretação de dados sísmicos armazenados em forma de imagem digital, já que através do editor de linhas do sistema é possível usar a imagem colada como fundo de tela e aí sim gerar uma nova seção a ser balanceada com base na imagem importada.

Foi implementado também, dentro do sistema, um conversor de formato de dados geológicos em uso na *PETROBRAS*, formato *BIG* [62], para o formato de dados do sistema *Recon*. Mais do que isso, o formato *Recon* foi cadastrado como um objeto da

base de dados do Sistema Integrado de Geologia e Geofísica da *PETROBRAS*, o *SIGEO* [63], de onde o *Recon* pode ser executado de forma totalmente integrada.

Além disso, constatou-se que uma característica básica do processo do balanceamento, que está relacionada ao minucioso processo de tentativa e erro, não foi considerada na implementação original do sistema. Sendo assim, a tarefa de balancear seções geológicas no *Recon* era de fato bastante árdua uma vez que ao usuário era atribuída a incumbência de gerenciar os modelos gerados salvando e carregando inúmeros arquivos no intuito de obter no final um mapa completo com todas as etapas de balanceamento. Isso tudo era feito sem que se disponibilizasse nenhum recurso que introduzisse quaisquer facilidades.

### ***3.8. O Gerenciador de Balanceamento***

O balanceamento de seções geológicas é por definição um processo de repetição, que envolve várias tomadas de decisões e, por conseguinte, caminhos distintos em busca da configuração original do solo. É, portanto, uma operação de tentativa e erro. Para cada geometria obtida em uma determinada etapa de balanceamento tem-se uma nova decisão a ser tomada. Sendo assim, é natural em um dado instante o geólogo deparar-se com a dúvida de ter que optar entre uma operação ou outra. Qual a mais conveniente só será possível saber alguns passos adiante.

Devido a esta peculiaridade, inerente ao processo, foi implementado no *Recon* um módulo responsável pelo gerenciamento da restauração geológica da seção. Até aqui, para documentar as etapas envolvidas no balanceamento era necessário salvar cada arquivo com cada geometria obtida durante as transformações as quais era submetida uma determinada seção. Esse procedimento, além de lento e trabalhoso, não permitia ao geólogo uma visão global de seu trabalho. Foi justamente com base nesta limitação que surgiu a motivação para o desenvolvimento de um gerenciador gráfico e interativo para a manipulação, controle e visualização das etapas do balanceamento.

O gerenciador de balanceamento utiliza-se de uma estrutura de dados que armazena os nomes das seções e os acessa via leitura do arquivo de dados no formato que o *Recon* já utilizava anteriormente. Devido à natureza hierárquica do problema, a estrutura de dados utilizada é uma árvore.

Árvores são abstrações computacionais para representação de dados. São estruturas essencialmente dinâmicas, permitindo inserção e destruição de elementos. As operações de inserção, destruição e busca são realizadas eficientemente sob o ponto de vista computacional. Árvores trazem, implicitamente, a idéia de hierarquia, por isso são estruturas muito utilizadas em gerenciamento de arquivos [20].

Uma árvore pode ser definida de várias formas. Talvez, a maneira mais natural seja defini-la recursivamente. Existe um nó  $r$ , denominado *raiz*, que contém zero ou mais sub-árvores, cujas raízes são ligadas diretamente a  $r$ . Estes nós raízes das sub-árvores são ditos filhos do nó  $r$ . Dentro do modelo de balanceamento, o nó raiz significa a seção em sua geometria atual, ou seja, a seção a ser balanceada. A Figura 3.11 exemplifica a estrutura de uma árvore genérica. [14]

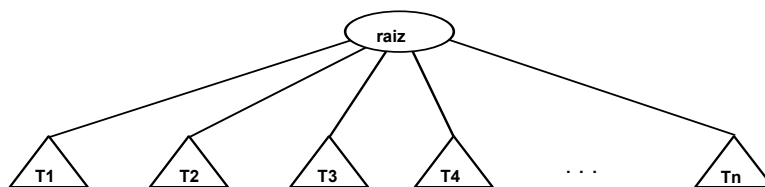
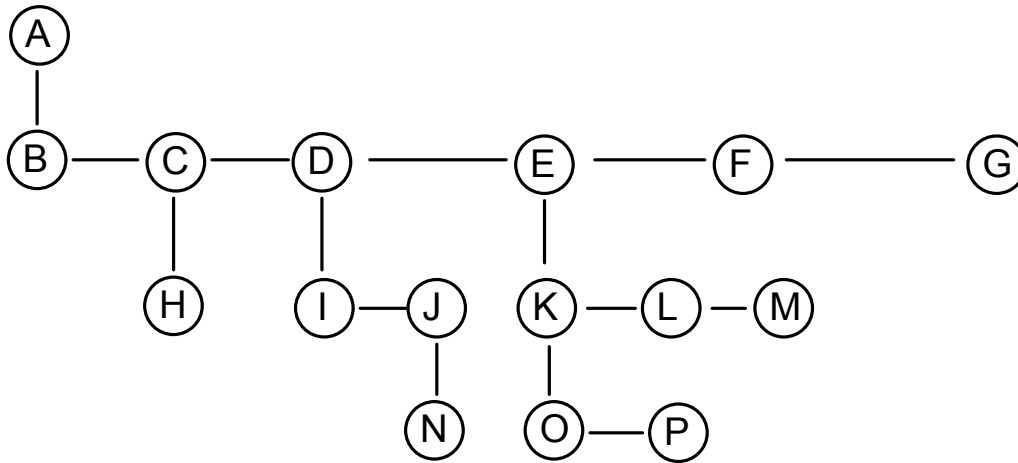


Figura 3.11 – Estrutura de uma árvore genérica

Em geral usa-se classificar uma árvore quanto ao número de filhos. Em uma árvore genérica, por exemplo, o número de filhos de um determinado nó é qualquer. Uma *quadtree* apresenta quatro filhos por nó, uma árvore binária apresenta dois filhos. Dentro da questão do balanceamento o mais conveniente é não amarrar o número de filhos de um determinado nó já que não se pode saber *a priori* quantas alternativas de balanceamento uma seção vai apresentar em uma dada etapa. O desenho esquemático da Figura 3.12 exemplifica como foi feita a implementação da estrutura de dados para o gerenciador de

balanceamento. Pode-se observar que para cada nó da árvore apresenta-se uma lista de nós filhos.



*Figura 3.12 – Relação hierárquica entre nós da árvore.*

Cada nó apresenta portanto um ponteiro para o primeiro filho e um outro para o próximo irmão. Além disso, outras informações adicionais são guardadas como ponteiros para o pai, para o último filho e para o irmão anterior. Essas informações adicionais servem para aumentar a eficiência no uso de operações como inserção e busca. Observando o desenho esquemático acima vê-se que, por exemplo, para o nó **E**, teríamos **A** como seu pai, **K** como primeiro filho, **M** como último filho, **F** como próximo irmão e **D** como o irmão anterior. Por sua vez, o nó **P** teria **K** como pai e **O** como irmão anterior.

A implementação foi feita utilizando-se o paradigma da programação orientada a objetos e seu código foi escrito na linguagem C++ [56]. Foram criadas duas classes: uma que implementa a abstração de um nó da árvore, e uma outra que por sua vez implementa a abstração do objeto árvore propriamente dito. A segunda instancia objetos da primeira e gerencia as relações hierárquicas entre os nós. É possível observar abaixo trechos do código da classe que representa um nó da árvore, Figura 3.13, principalmente no que se refere as relações entre os nós especificamente.

```

class VisNode
{
    protected:
        VisNode* _father;
        VisNode* _firstChild;
        VisNode* _lastChild;
        VisNode* _nextBrother;
        VisNode* _prevBrother;
        ...
    public:
        VisNode();
        virtual ~VisNode();
        ...
        VisNode* Father (void) { return _father; }
        VisNode* FirstChild (void) { return _firstChild; }
        VisNode* LastChild (void) { return _lastChild; }
        VisNode* NextBrother(void) { return _nextBrother;}
        VisNode* PrevBrother(void) { return _prevBrother;}
        ...
        virtual void Select(void) {};
        virtual void Execute(void) {};
        ...
        virtual void MSelect (List<VisNode> *) {};
        virtual void MExecute(List<VisNode> *) {};
        // ...
};

```

**Classe VisNode**

*Figura 3.13 – Implementação da classe VisNode.*

Para representar graficamente a estrutura de dados hierárquica acima descrita, foi implementada a classe *VisNode*, que representa um nó, e a classe *VisTree*, que representa o novo objeto de interface para navegação no projeto de balanceamento, Figura 3.14, que é responsável pelo *layout* e interface com o usuário. A classe *VisTree* portanto é quem



possibilita a visualização do histórico do balanceamento, desenhando todas as tomadas de decisão e os caminhos que definiram as eventuais configurações finais obtidas.

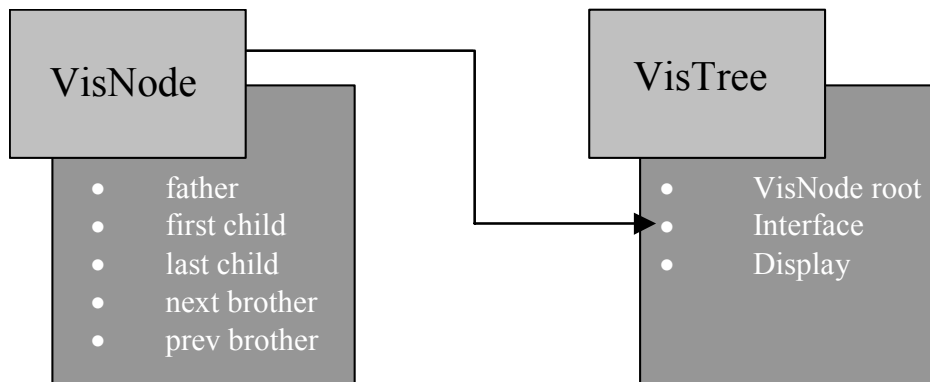


Figura 3.14 – Relacionamento entre as classes *VisNode* e *VisTree*.

Para incorporar a árvore de decisões de balanceamento ao *Recon* foi necessário introduzir ao sistema o conceito de projeto. Dentro do sistema, um projeto é caracterizado pela existência da árvore de balanceamento. Foi incorporado um novo formato de arquivo, *ASCII*, que faz uma representação recursiva da árvore. Este arquivo ao ser carregado para o sistema, abre o seu projeto e permite a sua visualização através da árvore implementada. Cada nó deste arquivo, tem um nome associado, que referencia o arquivo correspondente ao nó onde são armazenados os dados de cada etapa do balanceamento. O formato do arquivo que contém as seções é o mesmo que já era utilizado pelo antigo sistema, ainda sem a árvore. Um módulo de projetos foi então criado para gerenciar a abertura dos projetos já existentes e a criação dos novos, e a atualização da árvore de balanceamento. O resultado final pode ser observado na Figura 3.15.

Para o projeto abaixo, Figura 3.15, pode-se observar que *sp* é o nome do arquivo gerenciador que contém as informações referentes à topologia da árvore. O nó *sp1* representa a seção a ser balanceada. O nó que apresenta a cor mais clara, *sp9*, representa a seção selecionada e a linha poligonal destacada em amarelo determina o caminho de balanceamento desde a seção original *sp1* até a seção selecionada *sp9*. Por apresentar uma estrutura de dados dinâmica, é possível inserir e eliminar nós na árvore. Algumas

sofisticações também foram implementadas, tais como inserção de textos referentes as seções e para um determinado caminho de balanceamento é possível executar uma animação com suas etapas.

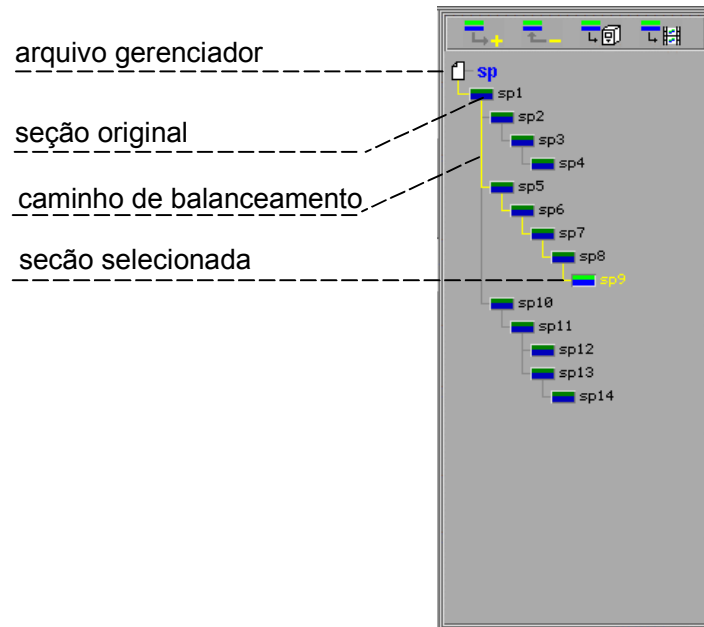


Figura 3.15 – Interface do gerenciador de balanceamento.

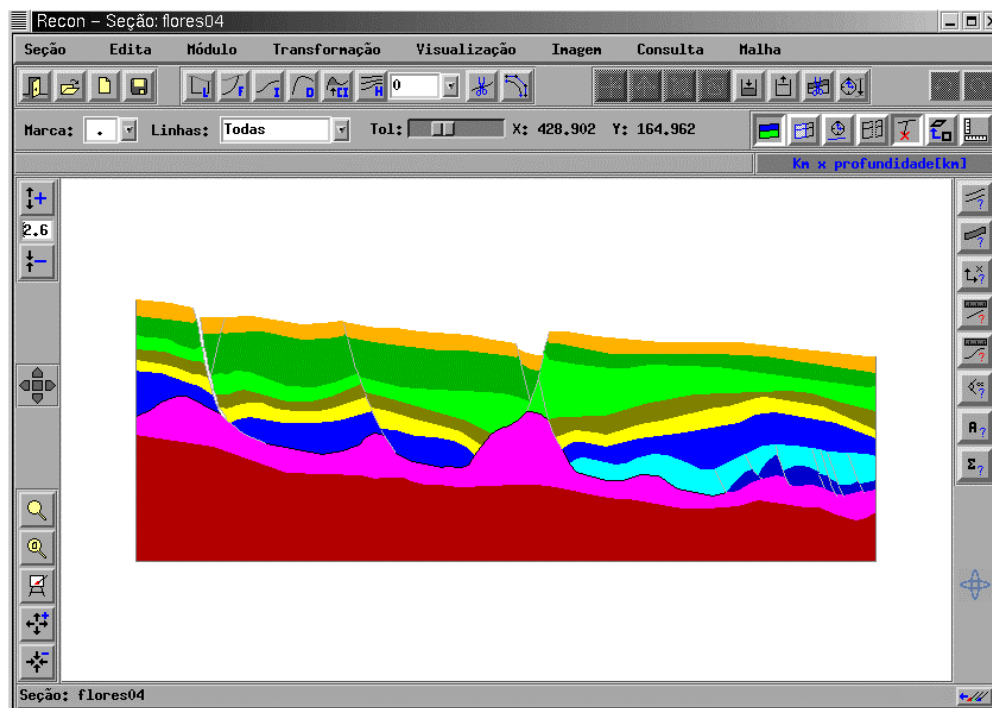


Figura 3.16 – Interface do Sistema Recon sem o gerenciador de balanceamento.

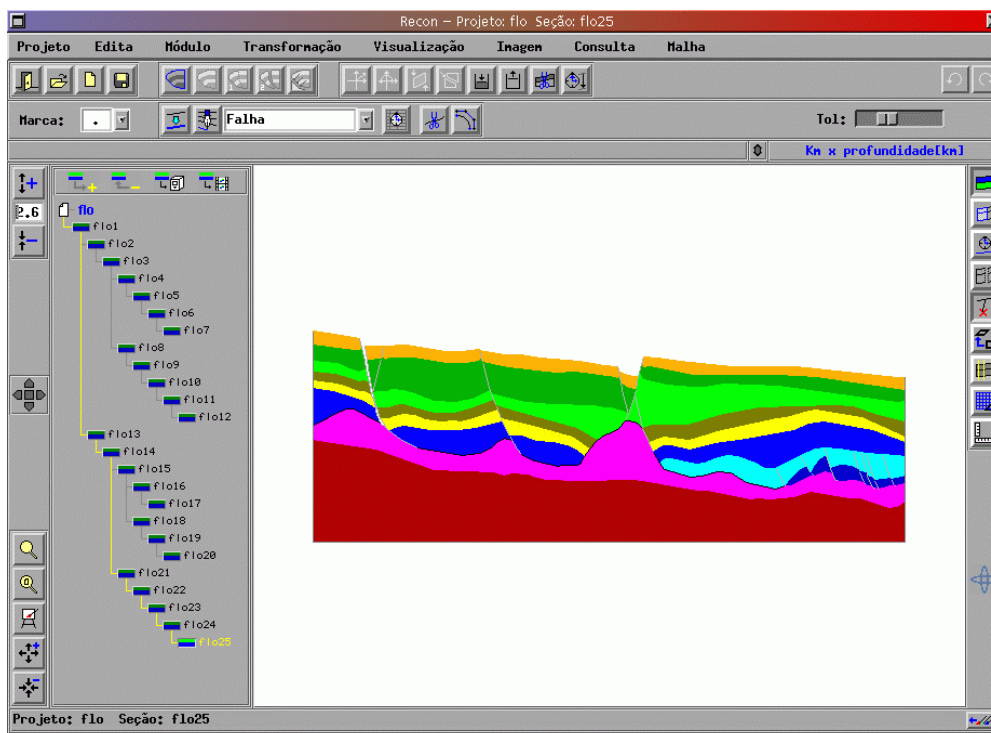


Figura 3.17 - Interface do Sistema Recon com o gerenciador de balanceamento.

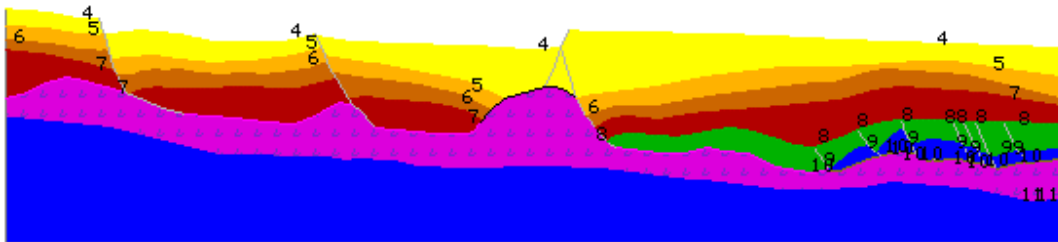
### 3.9. Implementação da Modelagem do Sal

O balanceamento de seções geológicas que apresentam camada de sal requer uma disciplina um pouco diferente do que a usualmente adotada. Isso se deve ao comportamento do sal discutido na Seção 2.2.3.

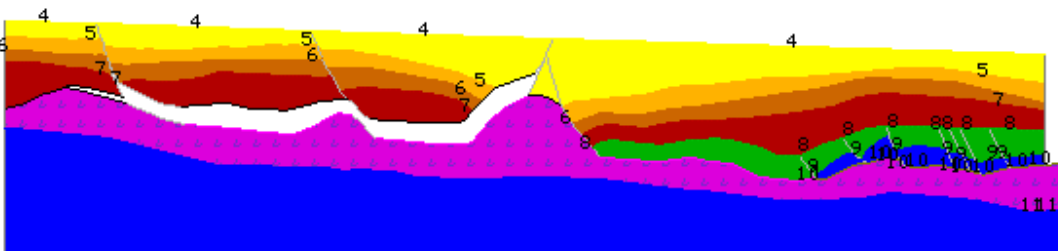
Na realidade a aproximação que normalmente se faz é reconstituir a seção acima da camada de sal e a medida que formam-se os vazios em cada etapa, preenche-se os mesmos com o sal considerando-se que o comportamento de escoamento do sal é passivo no processo de distensão da crosta.

A seqüência das Figuras 3.18, 3.19 e 3.20 ilustra este procedimento. Na Figura 3.18 tem-se uma determinada seção em uma dada etapa de balanceamento. Na seqüência, a Figura 3.19 apresenta a mesma seção submetida a algumas transformações realizadas nos blocos posicionados acima da camada do sal a esquerda do seu maior domo, onde é possível

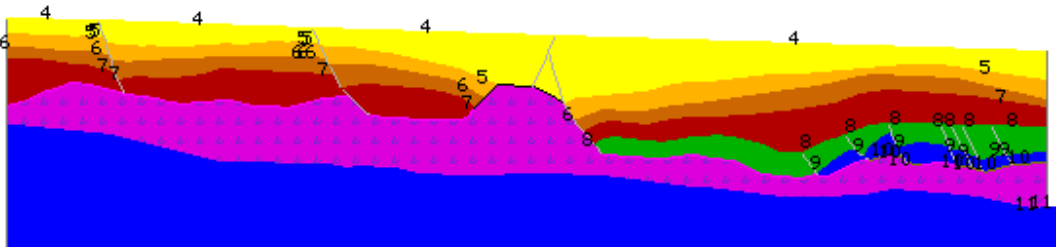
observar que essas transformações formaram um polígono vazio (face HED sem atributo algum associado). A seguir, na Figura 3.20, é possível visualizar a camada de sal preenchendo esses vazios



*Figura 3.18 – Seção com camada de sal: etapa 1.*



*Figura 3.19 – Seção com camada de sal: etapa 2.*



*Figura 3.20 – Seção com camada de sal: etapa 3.*

O que em geral o geólogo deseja controlar, portanto, durante as etapas de balanceamento é justamente o fluxo do sal. Isso se deve ao fato do escoamento do sal ser tridimensional e por conseguinte, mesmo a seção sendo definida perpendicularmente ao transporte tectônico (garantindo que as camadas não apresentem perdas durante o balanceamento), ainda assim o sal presente na seção poderá apresentar um acréscimo ou perda de material.

Com o advento do gerenciador de balanceamento, esse controle pôde ser incorporado ao sistema. A idéia consiste em, cada etapa do balanceamento, representado por cada nó da

árvore de visualização acima descrita, armazenar a área de sal presente na seção nesta etapa. Esse dado fica pendurado como atributo do nó da árvore. Além disso, consulta-se, para um determinado nó selecionado (seção corrente) a área correspondente ao seu nó pai, o que possibilita informar a taxa de variação da área da camada de sal entre etapas adjacentes do processo de balanceamento.

Assim, ao final do processo, disponibiliza-se todo o histórico da área do sal e o percentual de variação entre as etapas de balanceamento ao longo do processo. Paralelo a isso, duas outras ferramentas foram implementadas para facilitar esse procedimento. A Figura 3.21 mostra o elemento de interface presente no diálogo principal do programa que informa o histórico de variação do sal ao longo do balanceamento da seção. Cada número da seção representa um nó da árvore ou uma etapa de balanceamento.

Sal		
Secao	Area	Taxa
16	2,5e+07	0,00
15	2,5e+07	1,83
14	2,4e+07	8,79
13	2,2e+07	1,02
12	2,2e+07	0,01
direção do fluxo		← →

Figura 3.21 – Visualização do histórico de variação da área de sal.

Para preencher os vazios presentes na seção da Figura 3.19 é necessário, antes de tudo, eliminar a camada antiga, ou seja, existente antes de se retrodeformar os blocos de rocha. A primeira ferramenta refere-se a eliminação automática da camada de sal. Com o HED essa tarefa torna-se facilitada, bastando identificar o polígono de sal, no caso uma face HED, percorrer a sua lista de arestas e eliminar aquelas que tenham adjacência com a face externa.

A segunda trata-se de um algoritmo de cálculo automático da área do polígono de sal. Uma vez eliminada a camada de sal o que se deseja é justamente acomodá-la nos novos

vazios gerados. Como o fluxo de sal na seção se dá no seu sentido longitudinal o novo polígono é preenchido automaticamente bastando indicar a taxa de variação do sal entre uma seção e outra e a direção do fluxo (para a esquerda ou para a direita da seção).

# 4

---

## Mecânica Computacional no Balanceamento

### 4.1 Histórico

A grande maioria das técnicas existentes para se fazer balanceamento de seções geológicas é baseada em metodologias empíricas, ou seja, parte-se de premissas geológicas e através de algoritmos geométricos busca-se simular tais premissas. A aproximação em geral varia em função dos esforços tectônicos atuantes no terreno em estudo. Em função disso, neste trabalho, será denominada essa linha empírica, de balanceamento tradicional ou convencional.

No balanceamento convencional, aplicado à tectônica compressiva, o mais comum é utilizar-se de uma metodologia baseada na preservação, tanto dos comprimentos individuais das camadas dos blocos deformados, quanto das suas respectivas espessuras. Foi desta forma que Bally *et al.* [3], em 1966 e Dalhstron [21], em 1969 inicialmente aplicaram tal técnica a cinturões compressivos.

A aplicação das técnicas de balanceamento em terrenos distensivos, apesar de mais recente, é amplamente encontrada na literatura. A aplicação de cisalhamento puro em planos verticais foi inicialmente utilizada por Gibbs [30] [31] e ao longo de planos inclinados por White *et al.* [67] em 1986, Rowan [51] em 1989, Dula [24] em 1991 e Ferraz [27] em 1993. No balanceamento de terrenos dessa natureza busca-se em geral preservar as áreas dos blocos deformados, tanto na construção como na restauração da seção, utilizando-se a geometria da falha para modelar o processo deformacional. [3].

Ao longo das décadas de 70 e 80 vários estudos indicaram que, em diversas situações, a concepção tradicional de balanceamento não era a mais adequada. O deslizamento em falhas principais representam apenas uma fração da totalidade das deformações (Fischer

[29], em 1982, e Protzman [47], em 1990). Em 1988 Kautz e Sclater [36], utilizando-se de modelos físicos simulando crostas extensionais, compararam os deslocamentos produzidos nas falhas aos já conhecidos deslocamentos extensionais e observaram que as deformações internas nos blocos instáveis apresentavam uma parcela de contribuição de aproximadamente 60% em relação ao total de extensão sofrida no modelo de argila e 30% em relação a modelos feitos a base de areia. Em ambos os casos os blocos que sofreram deformações internas não apresentaram as suas áreas preservadas ao longo de suas seções deformadas e o mesmo observou-se com relação ao comprimento das camadas da seção, onde também foi possível verificar variações.

Esses estudos indicaram que as deformações internas do bloco são parâmetros que precisavam ser melhor compreendidos e, que, portanto, novas técnicas de balanceamento deveriam ser desenvolvidas de forma que tais deformações pudessem ser incorporadas à essas metodologias. Para que essas deformações possam ser medidas computacionalmente, é necessário discretizar o domínio do bloco deformado, ou seja, discretizar o campo contínuo de deformações em um bloco submetido a esforços tectônicos e gravitacionais.

A idéia de se utilizar técnicas de discretização para obter deformações no contínuo através de interpolação por mínimos quadrados dos elementos de tamanhos finitos foi originalmente desenvolvida por Etchecopar [26], em 1974, que usou tal aproximação em translações, rotações e deslizamento interno dos elementos para estudar deformações em um agregado cristalino.

Cobbold [15], em 1979, também utilizando-se de uma aproximação por mínimos quadrados em translações e rotações, desenvolveu um método para obter o estado não deformado de regiões finitas onde a deformação era conhecida a priori, reconstruindo desta forma o estado inicial do bloco.

Schwerdtner [52], Woodward [69], Howard [33] e Wickham & Moeckel [68] também consideraram as deformações em blocos com presença de falhas em seu contorno como



dados de entrada já conhecidos, a priori, em cada ponto da seção transversal. O problema entretanto dessas estratégias consistia no fato de que nem sempre era possível saber qual seria a deformação inicial.

Com uma técnica similar Bourgeois *et al.* [7] fizeram a restauração de camadas terciárias na depressão de *Tajik* (Ásia Central). Aqui aplicado para cinturões compressivos, o princípio do método é reconstruir o estado inicial não deformado de uma camada estratificada que se encontra atualmente com dobramentos. Cada horizonte é representado em mapa e apresenta espaços, ao longo do seu domínio, que representam as discontinuidades provocadas pelas falhas, formando assim um mosaico de blocos limitados por falhas. Nesse mosaico os blocos podem ser contínuos, separados por vazios, ou podem apresentar-se até mesmo sobrepostos uns aos outros, tudo isso em função da natureza das falhas. Em seguida, ao desdobrar os blocos, são introduzidas alterações nas formas dos blocos bem como nas espessuras das sobreposições e/ou vazios entre os blocos. Finalmente a técnica une os blocos por meio de translações e rotações, sempre de corpo rígido, visando minimizar a área total de vazios e sobreposições, o que determina finalmente o mosaico restaurado. Comparando este com o mosaico original é possível então obter os campos de deformação de cada camada. As hipóteses fundamentais envolvidas no trabalho em questão são, primeiro, considerar as superfícies a serem restauradas como sendo planares horizontais e contínuas antes de serem deformadas, e segundo, dividir a região em um número finito de blocos, cada um apresentando falhas em seu contorno. Ainda com relação a tal discretização tem-se que nem todas essas falhas são originais, na realidade algumas são introduzidas em tempo de pré-processamento e, finalmente, a terceira hipótese envolvida é a de que os blocos são considerados rígidos.

Antes disso, Rouby *et al.* [50] haviam aplicado a mesma técnica acima descrita na Bacia de Campos, onde os esforços tectônicos são de natureza extensional. Erickson *et al.* [25] também utilizou a mesma técnica de interpolação dos blocos citada em [7] para terrenos extensionais, porém ao invés de discretizar camadas usando estruturas baseadas em visualização de mapa, discretizou as seções transversais. O método é iterativo e busca a

minimização de um certo valor  $D$ , onde  $D$  é definido como a soma dos quadrados de todas as distâncias entre blocos inicialmente contíguos. A seção é inicialmente separada em domínios definidos como blocos de falhas, ou seja, blocos que apresentam falhas em seu contorno. Para cada bloco, seus contornos são individualmente subdivididos em segmentos de retas. Para cada um desses segmentos são definidos os vetores  $dt$ , distância entre o seu ponto médio e o ponto médio do segmento, de um outro bloco, mais próximo deste. É também definido  $dr$ , a distância entre o ponto extremo de cada segmento e suas projeções ortogonais no bloco vizinho mais próximo. Os blocos são compactados através de uma série de translações e rotações, em torno dos centróides dos blocos de falha, de forma a minimizar  $D$ , onde as translações são medidas pela média dos vetores  $dt$ , e as rotações são definidas de forma a minimizar  $D$ , até que se obtenha um valor deste, menor que uma dada tolerância. Para que seja possível obter o estado de deformações da seção, cada bloco de falha é, por sua vez, discretizado em elementos triangulares.

Cada incremento no processo de restauração é determinado através da remoção da camada estratigráfica superior e o material que acomoda a camada removida é restaurado em dois passos distintos. Durante o primeiro passo considera-se que os blocos se deslocam rigidamente por intermédio de translações e rotações, sendo assim reagrupados de forma a se ajustarem de acordo com uma dada geometria horizontal imposta, o que simula a busca da estratigrafia original da seção. Acompanhando o movimento dos blocos, os seus elementos triangulares são transladados e rotacionados, o que introduz provisoriamente na seção vazios e sobreposições. Em um segundo passo, os blocos de falha são deformados com o objetivo de eliminar os vazios e as sobreposições introduzidas no referido passo anterior. As deformações internas dos blocos são acomodadas pelos elementos triangulares, que são re-agrupados através mais uma vez da interpolação por mínimos quadrados já descrita. Após obter-se o ajuste dos elementos triangulares, os vértices, inicialmente coincidentes, são trazidos para um mesmo ponto comum, no caso um ponto médio, devolvendo a continuidade da malha e introduzindo deformações em cada elemento triangular fruto da variação de suas respectivas formas originais. Com isso, através do mapeamento entre as duas geometrias, para cada triângulo é medida a sua deformação, dada como constante.

## ***4.2 Uma Outra Abordagem***

Dentro deste apanhado observa-se que a evolução em torno das técnicas de balanceamento geológico busca cada vez mais abandonar o conjunto de incertezas das metodologias tradicionais e caminhar na direção de modelagens que busquem acrescentar medidores relacionados com o fenômeno físico envolvido na formação das estruturas geológicas. Muito embora sejam de pequena escala quanto as suas magnitudes, inserir medidas de deformação ao processo é certamente um ganho, já que permite uma restauração um pouco mais precisa e sobretudo mais sensível. A obtenção de magnitudes e direções de deformação nos blocos ajudam a predição de intensidade, orientação e tempo de fraturas [25].

Para que esse incremento de realismo possa ter continuidade, no entanto, faz-se necessária a inserção de parâmetros outros a este processo. As metodologias apresentadas até então, mesmo considerando deformação como parte do processo, não deixam de representar ferramentas basicamente geométricas para o balanceamento. Uma modelagem fundamentada na mecânica do processo requer *a priori* que se lance mão das relações constitutivas do material deformado, o que implica em definir as suas propriedades físicas tais como módulo de elasticidade longitudinal, peso próprio, coeficiente de Poisson, etc. Se for considerado que as técnicas mais recentes são baseadas em discretização do domínio e análise de deformações, nada mais natural do que utilizar-se de algum método numérico capaz de fazer essa simulação.

Em outras palavras, um dos objetivos deste trabalho é estudar as deformações inerentes ao balanceamento geológico tendo como base os princípios da mecânica do contínuo, e de forma não tão empírica obter a geometria de um bloco deformado mediante sua movimentação sobre uma falha. Para tanto, o método de transformação move-sobre-falha, que na forma convencional é obtido pela combinação de uma translação com um cisalhamento simples, é revisitado utilizando-se um método numérico que considera as propriedades físicas dos materiais geológicos e suas respectivas leis constitutivas.

No capítulo 5 são apresentadas as ferramentas e os algoritmos implementados afim de viabilizar a modelagem física dentro de um sistema de balanceamento único. Como pode ser observado no capítulo 4, as ferramentas para se fazer o balanceamento de seções geológicas no sistema *Recon*, adotado como plataforma de desenvolvimento, são convencionais, ou seja, baseadas na preservação da área e dos comprimentos e espessuras das camadas e composto de algoritmos puramente geométricos.

### ***4.3 Método dos Elementos Finitos***

O Método dos Elementos Finitos (MEF) pode ser definido, de uma forma simplificada, como um método no qual divide-se um determinado meio contínuo em um conjunto de pedaços ou elementos, que por sua vez são definidos por seus nós e suas conectividades [16]. Em todas as suas aplicações busca-se sempre obter o campo de uma determinada grandeza (calor, tensão, deformação, etc) no domínio de um meio contínuo. Formula-se o comportamento do elemento de acordo com a grandeza em estudo, e após processados individualmente, os elementos são unidos de forma a manter a continuidade do modelo (sem lacunas). Esse processo resulta num conjunto de equações algébricas simultâneas.

A solução que o método obtém são os valores nodais referentes a grandeza em estudo. Para cada elemento, esses resultados nodais são extrapolados para o seu domínio, através de interpolações em geral polinomiais. Ao unir os elementos, esses valores são interpolados, desta feita em todo o domínio do meio contínuo, por intermédio de expressões polinomiais associadas a cada um desses elementos. Os valores ótimos nodais são aqueles que minimizam alguma função, como por exemplo a energia total do meio. O processo de minimização gera um conjunto de equações algébricas simultâneas para esses valores nodais. De uma forma bem geral, o conjunto dessas equações pode ser expresso em sua forma matricial de acordo com a expressão (4.1):

$$[K][D] = [R] \quad (4.1)$$

Onde  $\{D\}$  representa o vetor com as incógnitas nodais do problema,  $\{R\}$  o vetor nodal de carregamento e  $[K]$  a matriz de valores constantes que determina as características do material, relacionando  $\{D\}$  com  $\{R\}$ .

#### ***4.3.1. Formulação Para Análises Tensão Deformação Planas***

Para análises de tensão e deformação, objetivo desse trabalho,  $[K]$  representa a matriz de rigidez do meio, que determina as suas propriedades físicas e o comportamento do material quando submetido a algum carregamento. A matriz de rigidez associa forças a deslocamentos, no caso a incógnita do problema. As dimensões das matrizes e vetores da expressão (4.1) depende exclusivamente do número de nós da malha e do número de graus de liberdade para o deslocamento.

A teoria do MEF inclui manipulação matricial, integração numérica, solução de equações, entre outros. O usuário do método em geral o usa através de sistemas computacionais, principalmente em função da quantidade de equações envolvidas que é tão maior quanto mais refinada for a malha.

Para que o programa possa executar uma análise, é necessário que sejam estruturados os seus dados de entrada, como por exemplo definir carregamentos, apoios, propriedades dos materiais envolvidos, além da geração da malha. Além disso, uma vez encerrada a análise, novas ferramentas são necessárias para a visualização das respostas obtidas.

Os nós de um elemento, representados na Figura 4.1 por pontos amarelos, aparecem em sua fronteira e funcionam como conectores que fixam os elementos uns aos outros. De uma forma geral os elementos podem ser triangulares, como na Figura 4.1, ou quadrilaterais.

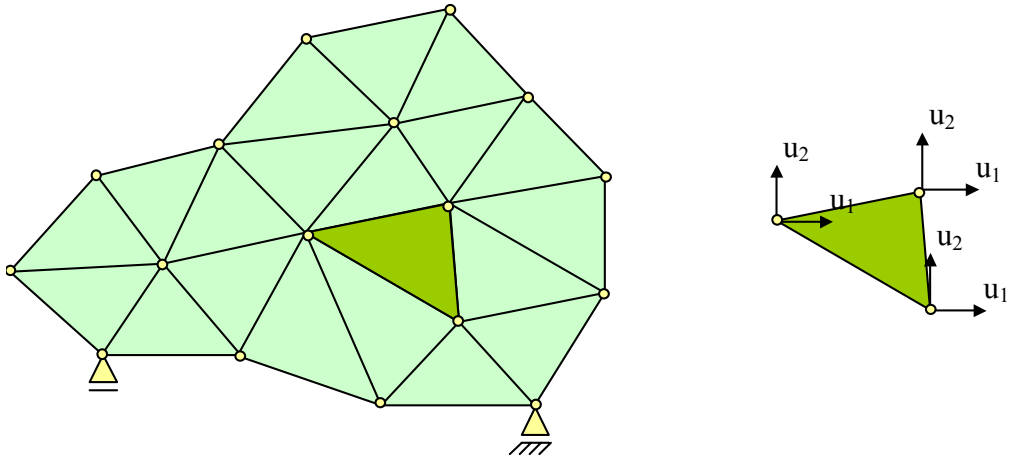


Figura 4.1 – Discretização do Meio Contínuo Por Elementos T3.

Todos os elementos que compartilham um mesmo nó apresentam as mesmas componentes de deslocamentos nesse nó, o que garante a não existência de vazios ao longo do domínio.

Para o elemento em destaque na Figura 4.1, pode-se definir o seu campo de deslocamentos de acordo com:

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1(x, y) \\ u_2(x, y) \end{Bmatrix} = [N] \{d\} \quad (4.2)$$

Onde  $u_1$  e  $u_2$  são os campos de deslocamentos respectivamente nas direções  $x$  e  $y$ , o vetor  $\{d\}$  é composto dos deslocamentos nos nós dos elementos em ambas as direções e  $[N]$  representa a matriz contendo as funções de forma ou polinômios de interpolação. Assim a expressão (4.3) também pode ser definida como:

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1(x, y) \\ u_2(x, y) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Com  $N_i$  representando as funções de interpolação, chamadas de funções de forma para cada nó do elemento. Por outro lado, as deformações  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  e  $\gamma_{xy}$ , quando definidas infinitesimalmente, podem ser obtidas de acordo com:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_1}{\partial x} \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u_2}{\partial y} \quad (4.5)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial x} \quad (4.6)$$

Ou matricialmente, conforme:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(x, y) \\ u_2(x, y) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

De forma mais simplificada, a equação (4.7) pode ser reescrita conforme a equação (4.8) abaixo, onde  $[D]$  representa a matriz de operações diferenciais que associa o campo de deslocamentos às deformações

$$\{\varepsilon\} = [D][u] \quad (4.8)$$

Juntando-se as expressões (4.3) com (4.7) pode-se obter a relação entre os deslocamentos e as deformações e que pode ser traduzida por:

$$\{\varepsilon\} = [B][d] \quad (4.9)$$

Onde  $[B]$  representa a matriz que associa deslocamentos à deformações e que é definida por:

$$\{B\} = [D][N] = \begin{bmatrix} N_{1,x} & 0 & N_{2,x} & 0 & N_{3,x} & 0 \\ 0 & N_{1,y} & 0 & N_{2,y} & 0 & N_{3,y} \\ N_{1,y} & N_{1,x} & N_{2,y} & N_{2,x} & N_{3,y} & N_{3,x} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Com  $N_{i,x}$  e  $N_{i,y}$  sendo definidas como sendo as derivadas das funções de forma com relação a  $x$  e  $y$ .

O funcional de energia de um elemento, não considerando tensões e deformações residuais, pode ser expresso pela expressão (4.11) abaixo, onde  $[E]$  representa a matriz das propriedades do material, ou matriz constitutiva,  $[F]$  representa as forças de volume,  $\{\Phi\}$  as forças de superfície.

$$\Pi_i = \int_{v_e} \frac{1}{2} \{d\}_i^t [B]_i^t [E]_i [B]_i \{d\}_i dv_e - \int_{v_e} \{d\}_i^t [N]_i^t \{F\}_i dv_e + \int_{s_e} \{d\}_i^t [N]_i^t \{\phi\}_i ds_e \quad (4.11)$$

A primeira parcela corresponde a energia interna de deformação do elemento  $i$ , integrado em todo o seu volume, a segunda parcela representa a energia das forças de volume aplicadas e a terceira a energia das forças de superfície aplicadas. Com isso é possível obter o funcional de energia de todo o contínuo através da expressão (4.12) abaixo:

$$\Pi_p = \sum_{i=1}^{n. elem} (\Pi_i) - \{D\}^t \{P\} \quad (4.12)$$

Obtido através do somatório dos funcionais de energia de cada um dos elementos individualmente mais a parcela do potencial adquirido pelas forças externas aplicadas nos nós da malha. Na equação (4.12),  $\{D\}$  representa o vetor de deslocamentos globais de todo o contínuo. Substituindo (4.11) em (4.12), obtém-se a expressão para o funcional de energia:

$$\Pi_p = \frac{1}{2} \{D\}^t [K] \{D\} - \{D\}^t \{R\} \quad (4.13)$$



Onde  $[K]$  é a matriz de rigidez global do contínuo e é expressa pela equação::

$$[K] = \int_{V_e} [B]^T [E] [B] dV_e \quad (4.14)$$

A matriz de rigidez associa o vetor de cargas aplicadas no contínuo  $\{R\}$  aos deslocamentos nodais  $\{D\}$ , conforme observa-se na expressão (4.1), que é o resultado da minimização do funcional de energia da expressão (4.13):

Uma vez introduzidas as condições de contorno e resolvido o sistema de equações, resta calcular as deformações e tensões em cada elemento, através das expressões:

$$\{d\}_i = [A]_i \{D\} \quad (4.15)$$

$$\{\varepsilon\} = [B]_i \{D\}_i \quad (4.16)$$

$$\{\sigma\} = [E] \{\varepsilon\} \quad (4.17)$$

Onde  $[A]_i$  é a matriz de incidência cinemática do elemento  $i$  e que associa os deslocamentos nodais da malha com os deslocamentos nos nós do elemento  $i$ .

O módulo de elasticidade,  $E$ , e o coeficiente de Poisson,  $\nu$ , fazem parte da definição da matriz constitutiva do material  $[E]$ . A expressão (4.17) pode ser reescrita através da equação (4.18) para o estado plano de deformações, que é utilizado para análises cuja representação do meio é a de uma fatia de espessura unitária. Nesses casos, as deformações ( $\varepsilon_{zz}$ ,  $\varepsilon_{yz}$  e  $\gamma_{zx}$ ) no plano normal a esta fatia são nulas [4].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.18)$$

O problema do MEF se resume na discretização do domínio em vários elementos e na determinação das funções de interpolação, ou de forma, em cada elemento, de forma que garanta a convergência da solução obtida [18].

## ***4.4 Relaxação Dinâmica***

### ***4.4.1. Introdução***

O sistema de equações resultantes do MEF, expresso na equação (4.1), pode ser resolvido de diversas maneiras, dependendo da complexidade do problema, como por exemplo comportamento do material (linear ou não linear), grandeza dos deslocamentos (pequenas ou grandes comparadas com as dimensões do modelo), ou condições de contorno (fixas ou variando com o tempo).

Conforme será visto na seção 4.5, um dos principais objetivos deste trabalho é simular através da mecânica do contínuo o movimento de um bloco de uma seção geológica através de uma falha. Este tipo de problema envolve grandes deslocamentos e uma modificação das condições de contorno para cada posição do bloco deformado.

Como hipóteses simplificadoras deste problema adota-se deformações infinitesimais e um comportamento elástico-linear para o material. Mesmo assim, o sistema de equações do MEF é não linear, pois a geometria do modelo tem grandes variações ao longo do processo (grandes deslocamentos) e as condições de contorno também variam dependendo da posição do bloco ao longo da falha. Para obter a solução do problema nestas condições, é empregada a técnica de Relaxação Dinâmica, que é descrita nesta seção.

De uma forma mais genérica, pode-se dizer que a idéia do algoritmo da Relaxação Dinâmica (RD) é obter a solução de regime permanente a partir de um algoritmo de análise transiente. A técnica de RD está associada a um método iterativo simultâneo, explícito no tempo, de integração das equações de movimento criticamente amortecidas e discretizadas por diferenças finitas centrais [54]. A RD está conjugada à consideração

independente das equações constitutivas, que por sua vez são também discretizadas por intermédio de um outro método aproximado qualquer, neste trabalho, o MEF.

Trata-se portanto de uma técnica iterativa de solução do problema de equilíbrio do sistema através da minimização das forças desequilibradas. Para cada iteração faz-se o uso das leis que descrevem o problema mecânico. Em sua formulação global, define-se a equação de movimento que descreve o problema dinâmico, resolvendo-a iterativamente, onde cada iteração resolve o problema estático de equilíbrio através do MEF, preparando então uma nova configuração para o passo seguinte.

#### ***4.4.2. O Algoritmo***

O algoritmo avalia a cada passo as forças desequilibradas, ou seja, é avaliado o equilíbrio entre as forças externas e as forças internas do módulo em transformação. A convergência do algoritmo está associada, então, à minimização desta diferença. Portanto, para cada iteração, faz-se o uso da equação que rege as leis de movimento (segunda lei de Newton) e a equação constitutiva. O emprego que se faz das leis que descrevem o problema mecânico é feito de forma estagiada e seqüencial, o que facilita a introdução das condições de contorno mistas, isto é, em termos de deslocamentos e/ou velocidades prescritas e de forças aplicadas.

Para cada iteração, as forças desequilibradas entre elementos da malha provocam a movimentação dos nós da malha, conectando-os. Resultam deslocamentos que são obtidos por sucessivas integrações numéricas, no tempo, de acelerações e velocidades. Deslocados os pontos nodais, procede-se a determinação das deformações de cada elemento, as quais introduzidas em uma relação constitutiva fornecem as tensões correspondentes. Destas encontram-se forças internas nos nós, que devidamente descontadas das forças aplicadas à malha, originam as novas forças desequilibradas, reiniciando a iteração [28]. A Figura 4.2 apresenta de forma esquemática como funciona o algoritmo de Relaxação Dinâmica. Está acoplado portanto ao algoritmo da Relaxação

Dinâmica algum método numérico que monte a relação constitutiva do material, no caso, o MEF.

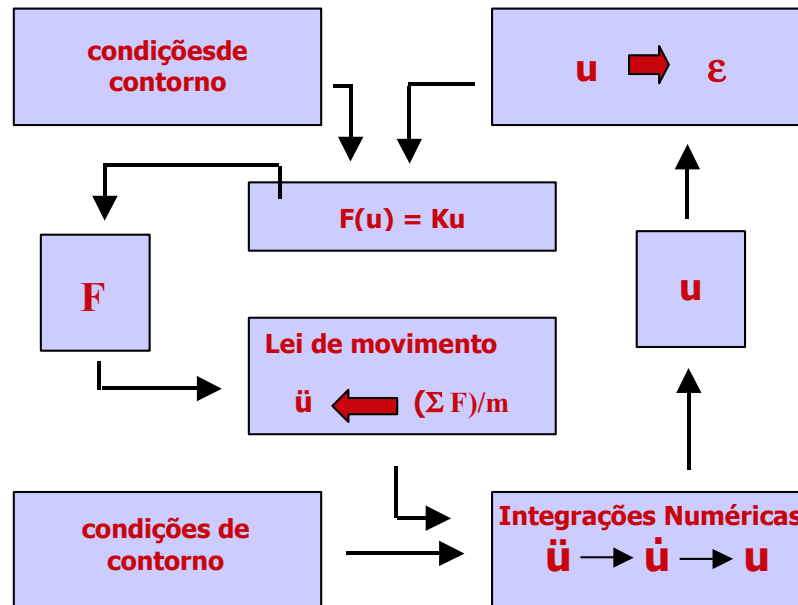


Figura 4.2 – Método da Relaxação Dinâmica.

Os deslocamentos são limitados em cada etapa em função da natureza explícita do método. Um incremento de pequena magnitude  $\Delta t$  é requerido de modo a impedir a comunicação física entre os nós contíguos na malha. Isto é possível por haver uma velocidade de propagação finita para vibrações mecânicas, que é função das propriedades de rigidez e inércia do meio. Esta restrição imposta ao  $\Delta t$  representa o desacoplamento das equações de movimento referentes a cada ponto nodal.

Por ser um método explícito no tempo, tem-se que as operações são realizadas somente com vetores e o equilíbrio é estabelecido em  $t$  com vistas a obtenção de uma configuração em  $t + \Delta t$ . Em outras palavras, o que interessa é a resposta estática, ou de regime permanente e portanto as massas inerciais não tem significado físico, apenas servem para a obtenção de uma convergência estável do algoritmo da Relaxação Dinâmica. Com isso e com a equação fundamental do movimento pode-se obter deslocamentos através de integrações sequenciais de acelerações e velocidades. Estas

integrações por sua vez são calculadas através de expressões de diferenças finitas centrais obtidas em relação ao tempo  $t$ . Computacionalmente, em função da diagonalidade e inversibilidade da matriz de massa, é possível obter cada um dos componentes do vetor solução computados isoladamente. Em outras palavras, não há operações matriciais e o desacoplamento nodal é garantido.

#### 4.4.3. A Formulação

Nesta formulação parte-se da consideração de que as equações de equilíbrio para um meio discreto sejam derivadas a partir de Diferenças Finitas [54] ou elementos finitos [4]. Partindo-se da equação de equilíbrio tem-se que:

$$\{F(\{u\})\} = \{f\} \quad (4.19)$$

onde  $\{F\}$  é o vetor das forças internas,  $u$  o vetor de variáveis discretas dependentes, aqui, mais especificamente o vetor de deslocamentos resultantes e  $\{f\}$  representam as forças externas aplicadas. Em geral, pode-se obter  $\{F\}$  através de princípios variacionais:

$$F(u) = \frac{\partial E(u)}{\partial u} \quad (4.20)$$

em que  $E$  representa a energia interna de deformação. Para problemas lineares tem-se:

$$\{F\} = [K]\{u\} \quad (4.21)$$

Em problemas não-lineares é comum apresentar-se  $\{F\}$  na forma incremental, atualizando-se a matriz de rigidez a cada passo:

$$\{\Delta F\} = [K(\{u\})]\{\Delta u\} \quad (4.22)$$

Aqui,  $[K(u)]$  representa a matriz de rigidez tangente obtida de:

$$[K(u)] = \frac{\partial F(u)}{\partial u} = \frac{\partial^2 E(u)}{\partial u \partial u} \quad (4.23)$$

A equação de equilíbrio por sua vez é obtida através da seguinte expressão (4.24) abaixo:

$$[K(u)]\{u\} = \{f\} \quad (4.24)$$

onde  $[K(u)]$  é a matriz de rigidez secante. A equação (4.24) representa um sistema de equações simultâneas cuja solução  $\{u\}^*$  é procurada, ou seja:

$$\{u^*\} = [K]^{-1}\{f\} \quad (4.25)$$

Para obter a solução por Relaxação Dinâmica, as equações acima descritas são transformadas em equações de movimento descrevendo a resposta transiente [44] através da inserção das forças de massa e das forças de amortecimento viscosas, proporcionais a velocidade:

$$[M]\{\ddot{u}\}^n + [C]\{\dot{u}\}^n + [K]\{u\}^n = \{f\} \quad (4.26)$$

onde  $[M]$  é a matriz de massa,  $[C]$  é a matriz de coeficientes de amortecimento,  $[K]$  é a matriz de rigidez e  $\{f\}$  representa o vetor das forças externas e  $n$  compreendendo ao enésimo incremento do algoritmo. Para que seja possível desenvolver o algoritmo de integração das equações de movimento são necessários os cálculos de suas acelerações, velocidades e deslocamentos, o que é obtido através de uma interpolação por diferenças finitas centrais [54], fornecendo as seguintes respectivas expressões:

$$\{\ddot{u}\}^n = \frac{(\{\dot{u}\}^{n+1/2} - \{\dot{u}\}^{n-1/2})}{\Delta t} \quad (4.27)$$

$$\{\dot{u}\}^{n-1/2} = \frac{(\{u\}^n - \{u\}^{n-1})}{\Delta t} \quad (4.28)$$

$$\{\dot{u}\}^n = \frac{(\{u\}^{n+1} - \{u\}^n)}{\Delta t} \quad (4.29)$$

Aqui,  $\Delta t$  representa um passo de tempo fixado pelos requisitos de estabilidade e a velocidade no  $n$ -ésimo passo pode ser obtida através da expressão:

$$\{\dot{u}\}^n = \frac{(\{\dot{u}\}^{n-1/2} + \{\dot{u}\}^{n+1/2})}{2} \quad (4.30)$$

Substituindo as expressões (4.27) e (4.29) em (4.26) obtém-se as seguintes expressões incrementais:

$$\{\dot{u}\}^{n+1/2} = \frac{([M]/\Delta t - [C]/2)}{([M]/\Delta t + [C]/2)} \{\dot{u}\}^{n-1/2} + \frac{[f] - \{F(\{u\}^n)\}}{[M]/\Delta t + [C]/2} \quad (4.31)$$

$$\{u\}^{n+1} = \{u\}^n + \{\dot{u}\}^{n+1/2} \Delta t \quad (4.32)$$

As equações (4.31) e (4.32) constituem uma integração sequencial de acelerações e velocidades fornecendo deslocamentos. As velocidades são calculadas no centro do intervalo do tempo, enquanto que as acelerações e deslocamentos nos extremos. Estas, através da equação (4.32) fornece os deslocamentos do passo seguinte.

As forças internas são então obtidas por intermédio da relação constitutiva adotada, o que depende do método de discretização. Assim, para cada passo, as forças desequilibradas são obtidas de acordo com os deslocamentos definidos pelas integrações no tempo acima definidas. O processo é repetido até que o sistema entre em equilíbrio, ou seja, quando as forças internas forem minimizadas.

Definindo-se que a matriz  $[M]$  como uma matriz de massas concentradas, teremos  $[M]$  diagonal. Considerando-se também que a matriz  $[C]$  seja obtida através do *Amortecimento de Rayleigh*. [4]

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (4.33)$$

Isto é, a matriz  $[C]$  é uma combinação linear das matrizes de massa e rigidez, e considerando  $\beta$  sendo nulo, temos então que a matriz de amortecimento é obtida através da multiplicação da matriz de massa, diagonal, por um escalar, o que garante a  $[C]$  desta forma igualmente a sua diagonalidade e com isso temos:

$$[C] = \alpha [M] \quad (4.34)$$

Assim o integrador de diferenças centrais pode ser definido pela expressão:

$$\{\dot{u}\}^{n+1/2} = \frac{(1/\Delta t - \alpha/2)}{(1/\Delta t + \alpha/2)} \{\dot{u}\}^{n-1/2} + \frac{[M]^{-1} \{R(\{u\}^n)\}}{(1/\Delta t + \alpha/2)} \quad (4.35)$$

$$\{u\}^{n+1} = \{u\}^n + \{\dot{u}\}^{n+1/2} \Delta t \quad (4.36)$$

aonde  $[M]^{-1}$  é a inversa da matriz de massas e  $\{R(\{u\}^n)\}$  é o vetor de forças desequilibradas resultante da  $n$ -ésima iteração e pode ser obtido pela expressão:

$$\{R(\{u\}^n)\} = \{f\} - \{F(\{u\}^n)\} \quad (4.37)$$

Se for garantido que nenhum dos componentes da diagonal principal da matriz de massas é nulo, garante-se também a sua inversibilidade e a sua não singularidade, o que determina que para o integrador apresentado nas equações (4.36) e (4.37) cada componente do vetor solução possa ser computado isoladamente e as referidas equações



podem então ser reescritas de forma desacoplada como se segue nas expressões (4.38) e (4.39) abaixo:

$$\dot{u}_i^{n+1/2} = \frac{(1/\Delta t - \alpha/2)}{(1/\Delta t + \alpha/2)} \dot{u}_i^{n-1/2} + \frac{R_i(u_i^n)}{m_{ii}(1/\Delta t + \alpha/2)} \quad (4.38)$$

$$u_i^{n+1} = u_i^n + \dot{u}_i^{n+1/2} \Delta t \quad (4.39)$$

onde o índice  $i$  representa o  $i$ -ésimo componente vetorial e  $m_{ii}$  a  $i$ -ésima posição na diagonal principal de  $[M]$ . A menos do primeiro passo, quando é imposto um procedimento específico para inicialização das variáveis, em todos os demais passos são utilizadas as expressões acima para se obter os deslocamentos nos nós da malha. Para o primeiro passo não são conhecidas as velocidades em  $t = -1/2$ , mas sim em  $t = 0$ . Com isso, as condições iniciais podem ser dadas pelas expressões 4.40 e 4.41 abaixo:

$$u^0 \neq 0 \quad (4.40)$$

$$\dot{u}^0 = 0 \quad (4.41)$$

Recorrendo-se a (4.30) e (4.40), pode-se chegar a seguinte expressão:

$$\dot{u}^{-1/2} = -\dot{u}^{1/2} \quad (4.42)$$

que por vez substituída em (4.35) determina que:

$$\dot{u}^{1/2} = [M^{-1} R(u^0)] \Delta t / 2 \quad (4.43)$$

A integração completa das equações de movimento, considerando-se massas concentradas e definindo-se a matriz de amortecimento como proporcional a matriz de massa, fica composta pela equação (4.43) para o primeiro passo e por (4.17) nos demais passos. O esquema abaixo ilustra de uma forma mais global o funcionamento do algoritmo da Relaxação Dinâmica.

**a. atribuição das condições iniciais**

$$\forall i \begin{cases} u_i^0 \rightarrow \text{dado} \\ \dot{u}_i^0 = 0 \end{cases}$$

→ **b. seleção de parâmetros**

- $\forall i \rightarrow m_{ii}$
- $\alpha, \Delta t$

→ **c. cálculo das forças desequilibradas**

- $\forall i \rightarrow R(u^n) = f - F(u^n)$

**d. condição de encerramento**

- se  $\forall i \rightarrow R_i \cong 0$  pare

**e. cálculo das velocidades**

- $\forall i \rightarrow$

se  $n = 0$

$$\dot{u}_i^{1/2} = \left( \frac{R_i(u_i^0)}{m_{ii}} \right) \Delta t / 2$$

senão

$$\dot{u}_i^{n+1/2} = \frac{(1/\Delta t - \alpha / 2)}{(1/\Delta t + \alpha / 2)} \dot{u}_i^{n-1/2} + \frac{R_i(u_i^n)}{m_{ii}(1/\Delta t + \alpha / 2)}$$

**f. cálculo dos deslocamentos**

- $\forall i \rightarrow u_i^{n+1} = u_i^n + \dot{u}_i^{n+1/2} \Delta t$

**g. incremento de passo**

- $n = n + 1$

**h. retorne:**

- para c (análise linear)
- para b (se não linear)

Dentro da formulação da Relaxação Dinâmica as matrizes  $[M]$ ,  $[C]$  e o intervalo de tempo  $\Delta t$  não apresentam significado físico algum. Aqui, o que interessa é a resposta de regime permanente. Com isso as massas inerciais devem ser definidas com o único objetivo de se obter a convergência e o fato da matriz ser diagonal apenas contribui para que a integração seja mais simples e o custo computacional menor. Com relação a matriz de amortecimento  $[C]$ , vale a mesma observação. A consideração do amortecimento de Rayleigh é amplamente utilizada nos métodos de integração direta de análises dinâmicas de oscilações amortecidas.

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são calculados a partir das frações, conhecidas a priori, requeridas do amortecimento crítico de ao menos dois modos de vibrações diferentes. No caso da Relaxação Dinâmica, considerar  $\beta$  com valor nulo significa que  $\alpha$  corresponde a uma fração de 100% ou próxima para o respectivo modo fundamental [28]. Os critérios de convergência e estabilidade podem ser encontrados detalhadamente em [28].

Maiores detalhes da formulação do algoritmo de Relaxação Dinâmica aqui apresentado podem ser encontrados em *Underwood* [61].

É apresentado abaixo, de forma esquemática e simplificada, o algoritmo de Relaxação Dinâmica de acordo com a descrição anterior:

#### ***4.5. A Estratégia***

Na presente seção apresenta-se a estratégia adotada para a utilização do algoritmo de Relaxação Dinâmica no contexto da movimentação de um bloco sobre uma falha. Detalhes de implementação podem ser encontrados nas seções 5.3 e 5.4. Antes porém, comenta-se sucintamente o algoritmo de move-sobre-falha convencional do sistema *Recon*, em especial os seus dados de entrada.

### 4.5.1 O Move-Sobre-Falha Convencional

A transformação de move-sobre-falha original, ilustrada na Figura 4.3, requer os seguintes parâmetros de entrada:

- geometria da falha
- vetor  $\mathbf{u}$  de deslocamento
- ângulo de cisalhamento

O resultado dessa operação é na realidade a combinação entre as transformações geométricas de translação e de cisalhamento puro. A geometria destino (o bordo superior do módulo deformado) é obtida de acordo com o ângulo de cisalhamento e não é parâ

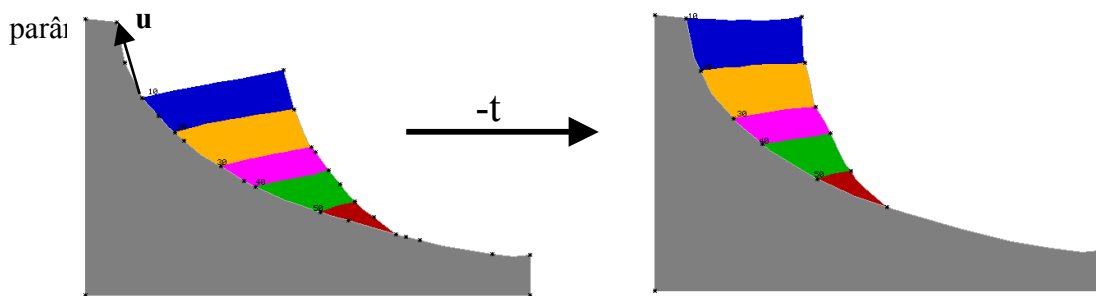


Figura 4.3 - Move sobre falha convencional.

O vetor  $\mathbf{u}$  define a translação que constitui a parcela da transformação de corpo rígido, ou seja, que não introduz deformações ao bloco. O campo de deslocamentos para a parcela de cisalhamento simples combinado com a translação define os deslocamentos dos demais vértices. O único vértice que apresenta o seu vetor de deslocamentos já definido *a priori* é o vértice mais elevado em contato com a falha. Todos os demais vértices, inclusive os do topo da última camada, terão seus valores de deslocamentos obtidos em função da matriz de transformação geométrica.

Existem cinco classes de dados que são fornecidos ao algoritmo: atributos globais da análise, atributos do meio contínuo, geometria do modelo, restrições ao deslocamento e cargas aplicadas. Dentre esses destaca-se nessa seção os dois últimos, que estão

associados a abordagem adotada para a utilização do algoritmo de Relaxação Dinâmica dentro do contexto do trabalho. Estes cinco itens são apresentados de forma detalhada na seção 5.4.1, quando são descritas as implementações envolvidas.

#### 4.5.2. Condições de Contorno

O que se deseja é definir uma restrição aos deslocamentos dos nós da malha de elementos finitos que se encontram sobre a falha. Definido um eixo de sistemas locais para esses vértices de acordo com a inclinação do tramo da falha sobre o qual esse nó se encontra. Com isso é permitido a estes nós o deslocamento na direção longitudinal do seguimento de falha, enquanto que na direção normal, o deslocamento é restringido. De acordo com a Figura 4.4, vê-se que para a direção 1, ao longo do segmento da falha, é permitido ao nó se deslocar, enquanto que na direção normal à falha, direção 2, o deslocamento está restringido

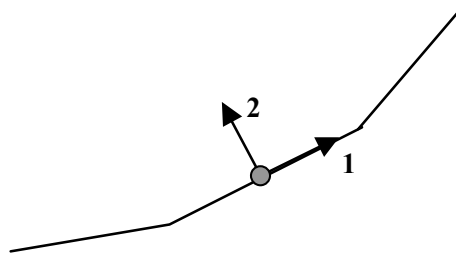


Figura 4.4 – Sistema de coordenadas locais em um tramo da falha.

Essas condições de contorno merecem um cuidado especial e na realidade são a chave para a garantia de que o deslocamento de fato ocorrerá sobre a falha, simulando assim o deslizamento do bloco alto sobre o bloco baixo. Ao longo da falha, na interface com o bloco sujeito à deformação, são impostas restrições normais ao plano de falha, conforme observado anteriormente. Com isso é montada a configuração inicial da seção antes de se iniciar a análise. Para o caso de falhas lítricas, no entanto, essa direção normal restringida pode variar ao longo do deslocamento, pois um nó pode mudar de tramo entre duas iterações. Isso significa que, ao final de cada iteração o algoritmo deve atualizar o perfil de restrições ao longo da falha. Os nós restringidos deslocam-se sempre sobre a

geometria da poligonal que define a falha, a menos de um erro provocado justamente quando um nó muda de tramo, conforme observa-se na Figura 4.5 abaixo:

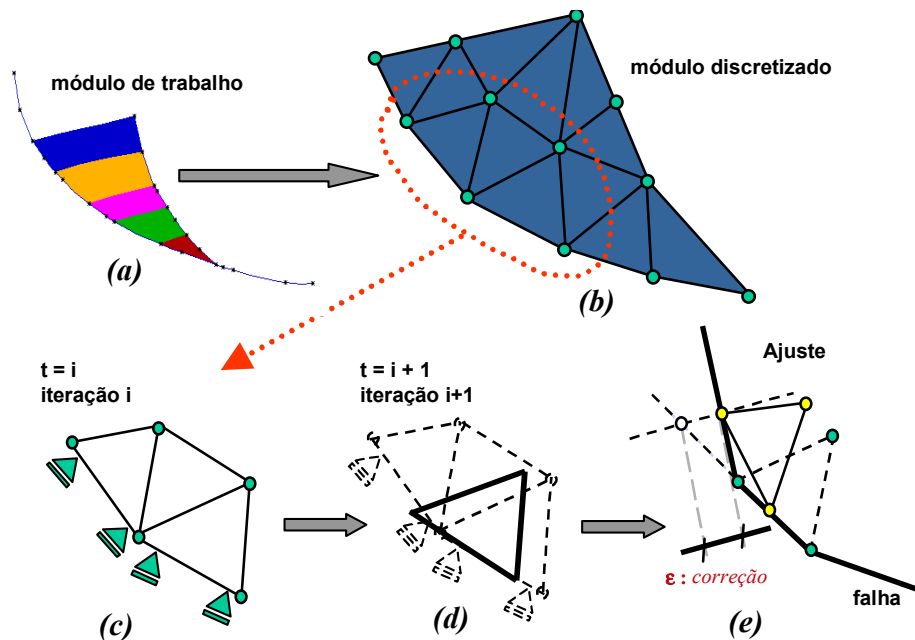


Figura 4.5 – Estratégia de utilização do algoritmo de Relaxação Dinâmica.

Nesse caso, o nó após sair do limite do tramo no qual se encontrava, mantém o seu deslocamento governado pela restrição desse tramo, perdendo contato com a geometria da falha. Para retornar o nó de volta para a falha é necessário um ajuste geométrico, no caso projetando esse nó sobre o tramo seguinte conforme pode-se observar na Figura 4.5.

A garantia de que o erro não será grande está no fato de que o algoritmo ao discretizar o tempo e obter para cada passo a sua solução em regime permanente estará trabalhando com pequenos deslocamentos  $\epsilon$ , com isso, a correção do deslocamento original para o deslocamento sobre a falha será pequena o suficiente para garantir que o erro seja pequeno e a convergência seja garantida..

A Figura 4.5 resume essa operação. O módulo em destaque nas figuras anteriores é discretizado em uma malha de elementos finitos triangular (Figuras 4.5a e 4.5b). A seguir é aplicado o campo de deslocamentos ao módulo e com isso, automaticamente, o sistema

chama o módulo de análise descrito anteriormente. As Figuras 4.5c, 4.5d e 4.5e ilustram o procedimento adotado em cada iteração, quando são obtidos os deslocamentos nodais referentes a um passo  $i$  qualquer.

### 4.5.3. Tipos de Carregamento

São previstos dois enfoques distintos para se analisar a movimentação do bloco sobre a falha. Uma dentro da filosofia do balanceamento de seções geológicas, quando formula-se o problema inverso, ou seja, no sentido contrário do tempo e o segundo para modelar o problema de forma direta, ou seja, o deslizamento do bloco como ocorreu no passado, no sentido real do tempo.

Para resolver o problema inverso há que se definir os deslocamentos prescritos, o que inicialmente gera um campo de forças internas no bloco, para no final do processo obter-se as incógnitas do problema, ou seja, os deslocamentos e as deformações, de acordo com as expressões (4.15) e (4.16). Dentro desse enfoque, existem duas abordagens distintas para aplicar-se os deslocamentos prescritos e que podem ser melhor compreendidas através da Figura 4.6.

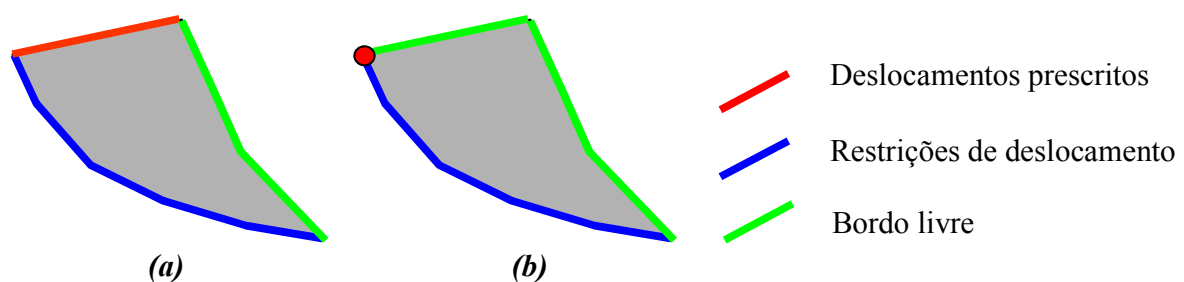


Figura 4.6 – Condições de Contorno e de Carregamento.

O bloco da Figura 4.6 é isolado e o seu contorno dividido em três regiões que estão submetidas a esforços e condições de contorno distintas. A região em azul representa o bordo do bloco em contato com a falha, igual em ambas as situações. Em verde representa-se as regiões da fronteira que não estão submetidas a nenhum tipo de carregamento ou restrição e finalmente em vermelho as regiões do contorno onde são

aplicados os deslocamentos prescritos. Na primeira (Figura 4.6a) todo o bordo superior é submetido a um campo de deslocamentos. Ou seja, o geólogo define a geometria destino do bloco como pode-se observar na Figura 4.7 abaixo:

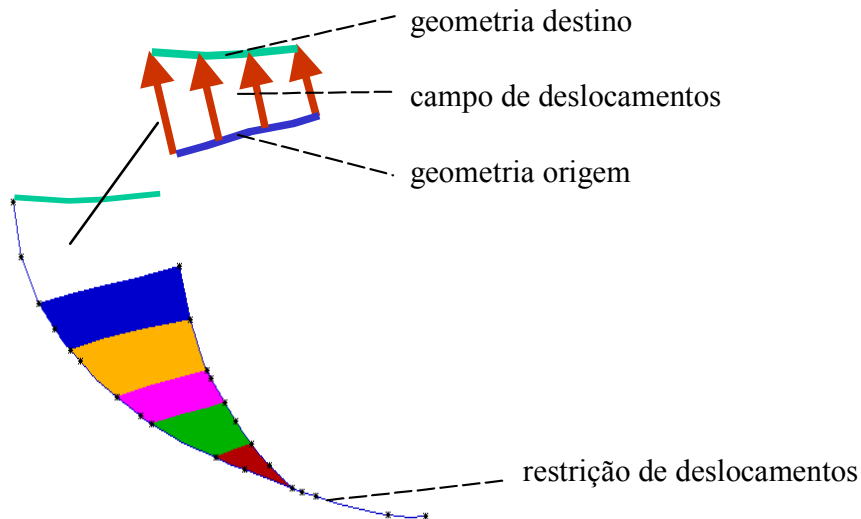


Figura 4.7 – Definição do campo de deslocamentos prescritos.

São coletados do usuário um perfil de *paleobatimetria*, que define a geometria, destino e a geometria origem quando é selecionado o bordo submetido aos deslocamentos prescritos. Esse último por sua vez é calculado em função das geometrias origem e destino, de acordo com a Figura 4.7.

A segunda opção, que é representada pela Figura 4.6b, associa apenas a um nó da malha os deslocamentos prescritos, justamente o nó do bordo superior que faz interseção com a falha. Nesse caso o domínio da fronteira, que representa o bordo livre, é igual ao do move-sobre-falha original.

Sob o ponto de vista do balanceamento de seções geológicas, não faz sentido amarrar a geometria do bordo superior, como é feito na primeira abordagem, pois o que se deseja justamente é validar a seção. Nesse caso, poder-se-ia estar obtendo deslocamentos referentes a uma restrição governada pela geometria de uma falha incorreta. Mas, uma



vez assegurada a validade daquela interpretação, essa pode se transformar em mais uma ferramenta de avaliação e comparação com outros algoritmos.

Já na segunda abordagem, representada pela Figura 4.6b, em função do bordo superior estar totalmente livre para se deslocar, permite-se que o algoritmo de Relaxação Dinâmica obtenha a nova configuração do bordo superior. Com base nessa nova geometria o geólogo poderá decidir pela validade ou não desse resultado.

O segundo enfoque busca simular no sentido cronológico do tempo o deslizamento do bloco ativo sobre uma falha. Nesse caso, é aplicada a aceleração da gravidade e o programa de análise irá obter passo a passo uma nova geometria para o bloco, durante o seu deslizamento igualmente sujeito às mesmas restrições de deslocamentos nodais discutidas anteriormente.

O capítulo 5, na seqüência, descreve as novas implementações feitas no sistema *Recon* e no programa de análise adotado, incorporado ao sistema com o objetivo de viabilizar as técnicas acima descritas.

# 5

---

## Implementação do Sistema Integrado

### 5.1. Introdução

Uma vez definida a metodologia para o desenvolvimento da modelagem física, apresentada no Capítulo 3, passa-se para a descrição das implementações que visam incorporar ao sistema *Recon* um pré-processador, um módulo de análise e um pós-processador integrados, provendo um ambiente único para o balanceamento dentro da proposta apresentada.

Neste capítulo, inicialmente, é apresentada a nova organização das classes de atributos do sistema, no caso extensões das classes originais já descritas no Capítulo 3 e que foram implementadas para a representação dos novos atributos incorporados em função da integração do módulo de análise. Na seqüência é descrita a implementação, dentro do programa de análise, das novas restrições impostas ao deslocamento nodal a fim de viabilizar a simulação da movimentação de um bloco sobre uma falha. Finalmente são apresentadas as etapas necessárias para a integração do sistema de balanceamento com o módulo de análise, quando são descritas as implementações do pré- e do pós-processador.

### 5.2. Organização das Classes de Atributos

Com a inserção da modelagem por Elementos Finitos no sistema *Recon*, surge a necessidade de se definir novas classes para melhor gerenciar os novos atributos e funcionalidades adicionadas. Uma questão então passa a ser aonde acrescentar, na estrutura de dados descrita no Capítulo 3, as informações referentes à malha de elementos finitos e as subdivisões das arestas que servem de base para a geração da malha. Outra questão diz respeito aos resultados obtidos no programa de análise e como armazená-los.

Finalmente, existem também outros atributos associados às camadas que também deverão ser pendurados na classe de atributos das faces. Para guardar todas essas informações fez-se, uma reestruturação na hierarquia de classes de atributos original, sendo algumas classes redefinidas, enquanto outras foram criadas.

A Figura 5.1 apresenta a reestruturação da hierarquia das classes responsáveis pelo controle dos atributos das entidades geológicas do sistema *Recon*. É possível observar quatro níveis de abstração desde a primeira camada, que correspondem as entidades topológicas do HED (geometria do modelo) até a última camada de abstração dos atributos geológicos.

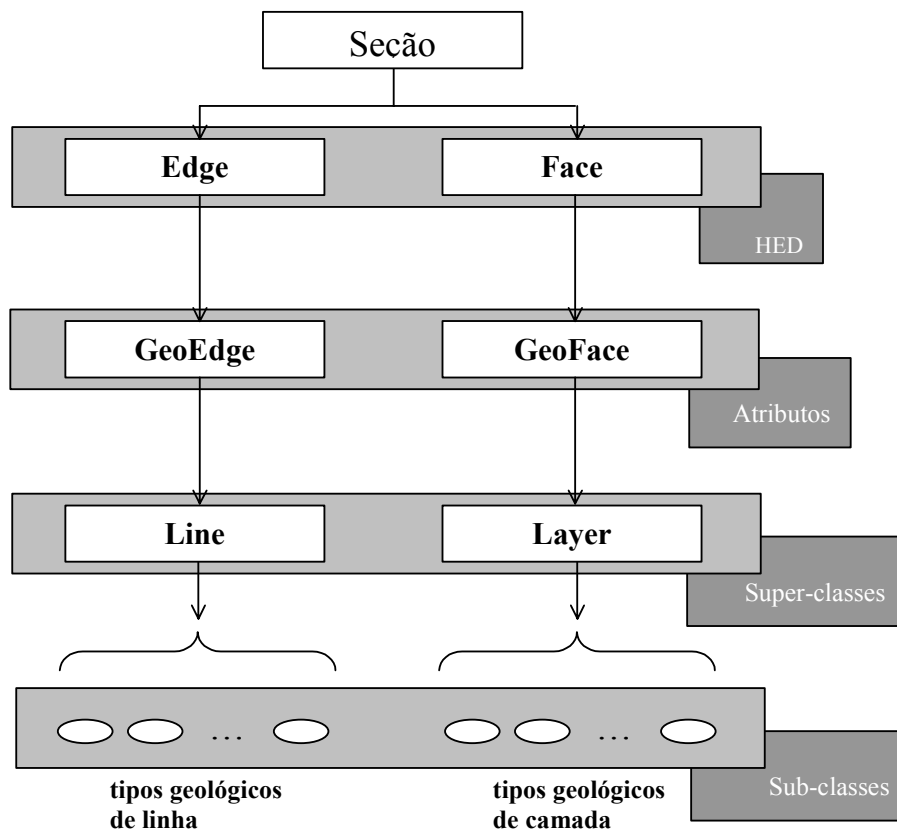


Figura 5.1 - Nova organização das classes de atributos no Sistema Recon.

Às entidades topológicas da subdivisão planar *Face* e *Edge* estão agora relacionadas as classes *GeoFace* e *GeoEdge*, respectivamente representando os blocos de atributos das faces e arestas. A primeira diferença que se pode observar em relação à versão original do

*Recon* é que agora existe mais uma camada de abstração entre a linha topológica e os tipos geológicos de linha. Esta camada é representada pela classe *GeoEdge*. A segunda alteração visível diz respeito à substituição da classe *Polygon* pela classe *GeoFace*. Essa nova hierarquia permite acomodar as novas informações de forma mais organizada. Na seqüência são descritas de forma mais detalhada as classes acima citadas.

### 5.2.1. Classe *GeoFace*

Esta classe contém métodos relacionados aos atributos geológicos associados às faces da subdivisão espacial. Uma face geológica no *Recon* apresenta informações como por exemplo a que módulo e a que tipo de camada a face pertence. Tem também pendurados a si dados dos marcadores de transformação. Somadas a essas informações, já presentes na antiga classe *Polygon*, *GeoFace* passa a apresentar também as informações referentes à malha de elementos finitos e aos dados relacionados aos resultados obtidos do módulo de análise, vide Figura 5.2.

<b>Classe <i>GeoFace</i>:</b>	
• <i>Layer</i>	<i>ponteiro para a superclasse Layer</i>
• <i>Mdul</i>	<i>ponteiro para o module a que pertence</i>
• <i>Mark</i>	<i>ponteiro para a lista de marcadores de transformação</i>
• <i>Mesh</i>	<i>geometria da malha de elementos finitos</i>
• <i>AnRes</i>	<i>resultados provenientes do módulo de análise</i>

Figura 5.2 – Definição da classe *GeoFace*.

O algoritmo de análise é sempre aplicado a um módulo de trabalho. Este, por sua vez, é composto por uma lista de faces HED. A malha de elementos finitos é mais um atributo atrelado à face. Uma vez processados os valores de deformação, que são o objetivo final da presente análise numérica, precisa-se mais uma vez amarrá-los às entidades topológicas do modelo. Para tal foi criado um outro atributo pendurado à face topológica, a classe *AnRes*, que guarda as informações referentes aos resultados obtidos pelo módulo de análise.

No campo que representa um ponteiro para o módulo ao qual a face pertence foi pendurado um informação adicional: a malha unificada do módulo, o que é discutido detalhadamente na Seção 5.4.1.3.

A classe *GeoFace* também gerencia a detecção automática de camadas geológicas, que pode se dar de três formas distintas e que será melhor explicado na definição da classe *Layer*.

### 5.2.2. Classe *GeoEdge*

De forma análoga, esta classe apresenta métodos relacionados aos atributos geológicos de linha. Uma linha geológica, *GeoEdge*, no *Recon* representa o mesmo papel da classe *GeoFace* com relação ao bloco de atributos das faces. Esta nova abstração foi implementada para gerenciar os novos atributos necessários à modelagem em função da existência da malha de elementos finitos que discretiza o módulo deformado. A geração da malha se dá em função do número de subdivisões das arestas que compõem o contorno da face. Com a criação desta classe, é possível agora armazenar informações sobre a subdivisão das linhas para a geração das malhas associadas às faces. Além disso, a classe *GeoEdge* guarda também um campo para armazenar nomes associados às linhas. Este novo atributo será útil futuramente quando serão gerados modelos de 2 1/2 dimensões (geração de superfícies 3D através da interpolação de várias seções transversais, defasadas porém no seu sentido ortogonal). A Figura 5.3 ilustra a nova classe *GeoEdge*.

<b><i>Classe GeoEdge</i></b>	
• <b>line</b>	<b><i>ponteiro para a superclasse Line</i></b>
• <b>nsdv</b>	<b><i>número de subdivisões da linha</i></b>
• <b>label</b>	<b><i>nome identificador da linha</i></b>

Figura 5.3 – Definição da classe *GeoEdge*.

### 5.2.3. Classe Line

A classe *Line* representa a superclasse de atributos geológicos associados às linhas. É da super-classe *Line* que são derivadas as classes que formam o conjunto de tipos geológicos de linha, aqui identificados pelos nomes: horizonte, falha, topo de sal, limite de seção, discordância e indefinida. A Figura 5.4 ilustra melhor a classe *Line* e seu relacionamento com as sub-classes citadas.

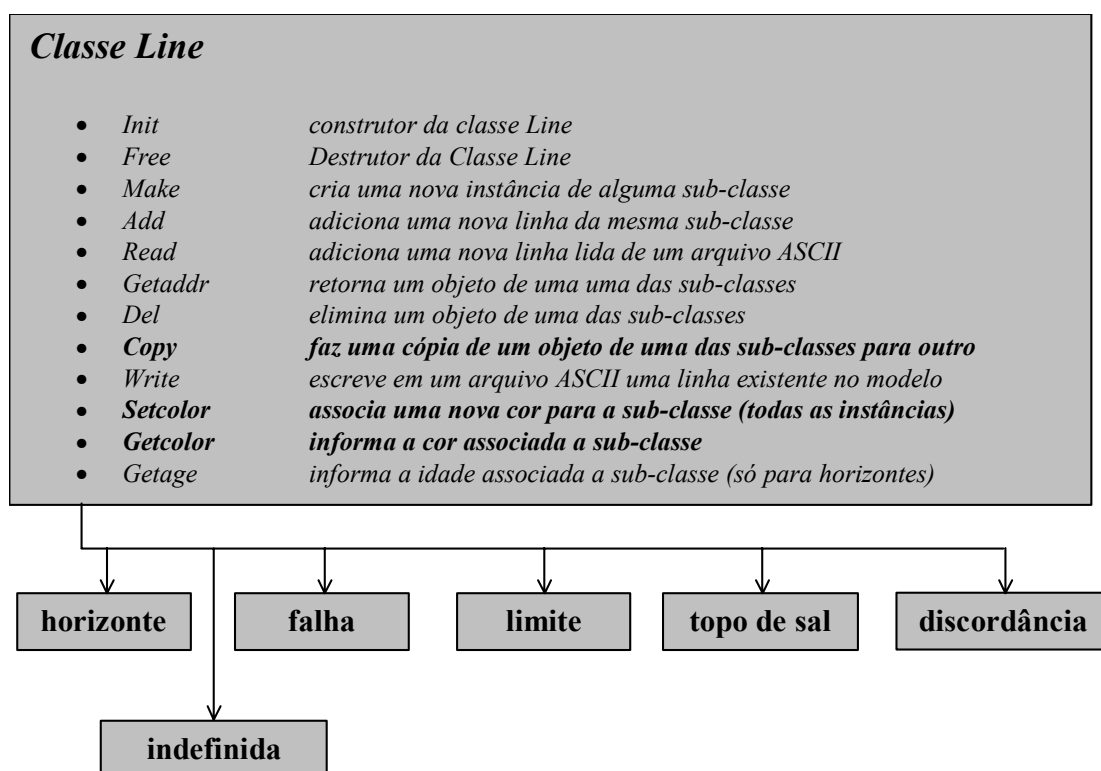


Figura 5.4 – Definição da classe Line e suas sub-classes.

Todos os métodos que não estão em negrito são herdados pelas classes derivadas. As classes derivadas são na realidade representações dos tipos de linhas geológicas.

#### 5.2.4. Classe *Layer*

A classe *Layer* representa a super-classe de atributos geológicos associados às camadas. É da super-classe *Layer* que são derivadas as classes que formam o conjunto de tipos geológicos de camadas, aqui identificados pelos nomes: depósito, indefinida, sal e externa.

Os depósitos são as camadas associadas às eras geológicas. A camada externa representa o atributo da entidade topológica face externa do HED. Uma camada que ainda não teve associada a si algum tipo recebe o atributo de indefinida.

A Figura 5.5 apresenta os principais métodos da classe *Layer* e seu relacionamento com as sub-classes citadas. A classe *Layer* guarda todas as informações referentes às camadas de uma forma geral. Dentre essas informações, tem-se o tipo da camada e uma lista com as propriedades de camadas que o *Recon* trata ao aplicar as suas transformações. Essas propriedades são:

- porosidade inicial
- taxa de decaimento [1/km]
- velocidade intervalar [m/s]
- código de litologia
- compactação [s/n]

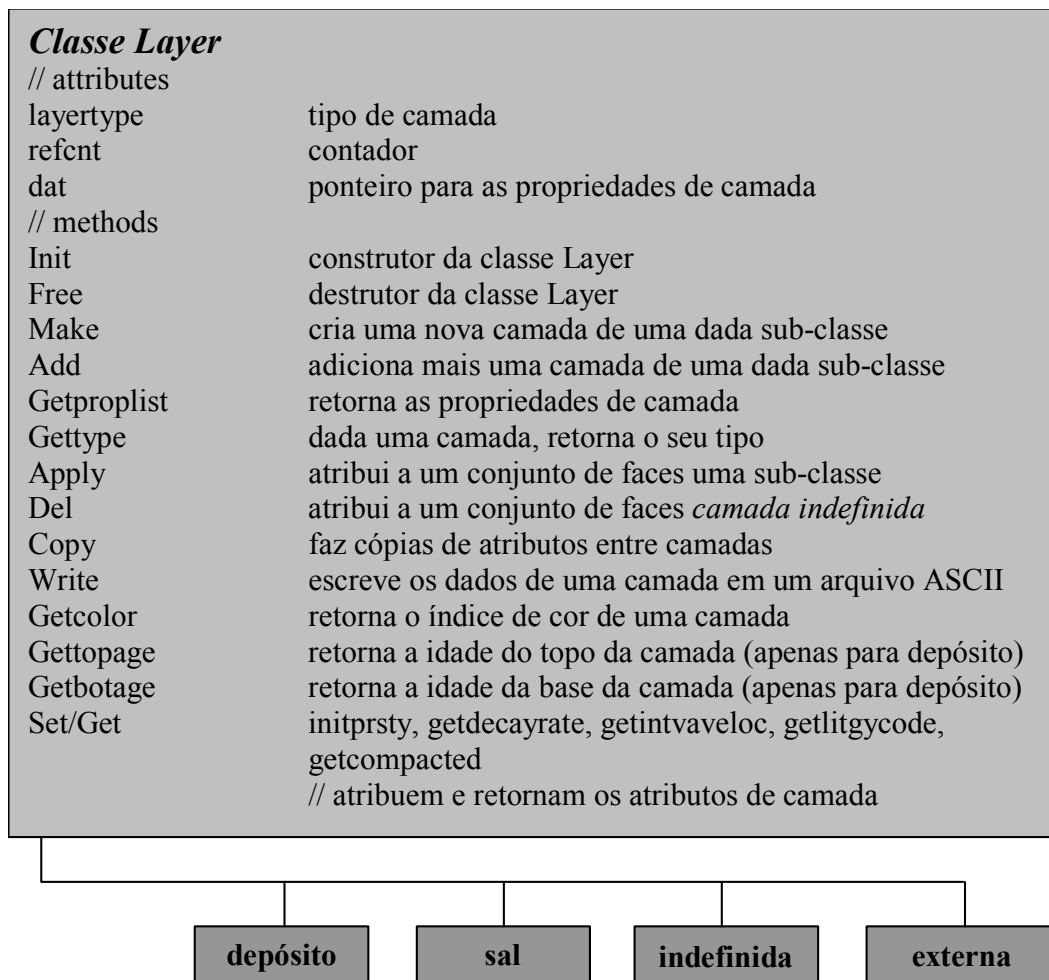


Figura 5.5 – Definição da classe *Layer* e suas sub-classes.

Os métodos que compõem a interface da classe *Layer* são apresentados na descrição da classe acima. Através deles pode-se criar e atribuir propriedades a um dado conjunto de faces topológicas que compõe uma camada geológica.

As sub-classes da classe *Layer*, que representam os tipos de camadas presentes no *Recon*, herdam as propriedades concernentes a camadas de uma forma geral e ainda guardam para si propriedades específicas de seus tipos.

A atribuição de um tipo de camada a faces pode se dar de duas formas distintas no sistema. O usuário pode explicitamente, através da interface gráfica, atribuir a um conjunto de faces topológicas uma determinada camada, ou esta atribuição pode se dar de



forma implícita através dos parâmetros de detecção automática definidos na classe *GeoFace*. Neste caso, a atribuição pode ser feita baseada nos atributos da linha de topo e base conjuntamente, apenas baseada na linha de base ou ainda baseada no atributo que apresenta maior comprimento dentre todos os presentes no topo de uma dada camada.

### ***5.3. O Módulo de Análise***

Para o desenvolvimento desse trabalho foi utilizado, inicialmente para testes, o programa *Relax*, desenvolvido pelo Tecgraf/PUC-Rio. Por dispor-se de seu código fonte, esses testes puderam ser realizados com maior flexibilidade até que definitivamente optou-se por integrá-lo ao sistema *Recon* de forma a prover um ambiente único para a execução do move-sobre-falha não geométrico. O programa *Relax* baseia-se em Figueiredo [28], e implementa a técnica de Relaxação Dinâmica, descrita no Capítulo 4, acoplada ao Método dos Elementos Finitos.

#### ***5.3.1. O Programa Relax***

O Programa *Relax* foi implementado utilizando a linguagem de programação C [37], com a filosofia de programação orientada a objetos, POO. O programa consiste em três classes básicas:

- ***DrvClass*** – É a classe responsável pela definição do tipo de análise que vai ser realizada. Estas análises estão divididas em: *rezone*, que é a solução do modelo que contém passos de erosão, *load-step*, que é a solução do modelo que contém mais de um passo de carregamento e *standard*, que é a solução do modelo com um único passo de carregamento e sem erosão, vide Figura 5.6.

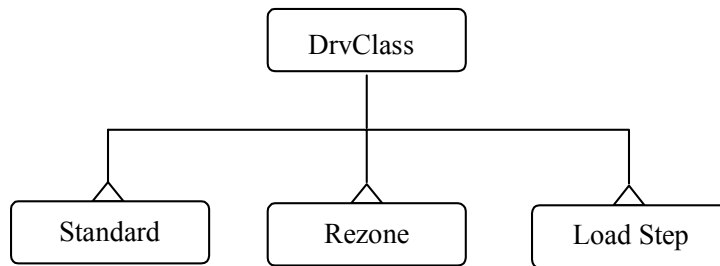


Figura 5.6 – Relax: Hierarquia das classes dos tipos de análise.

- **MatClass** – É a classe responsável pela definição dos comportamentos dos materiais dos elementos que serão utilizados na análise, admitindo o comportamento do material como sendo isotrópico, ou segundo as hipóteses de *Mohr Coulomb* ou *Von Mises*, vide Figura 5.7.

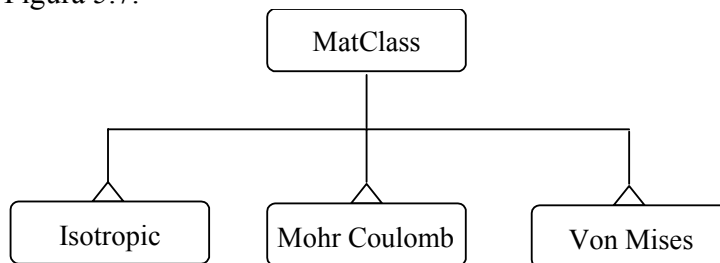


Figura 5.7 – Relax: Hierarquia das classes dos materiais.

- **ElmClass** – É a classe responsável pela definição dos tipos de elementos implementados no programa, vide Figura 5.8.

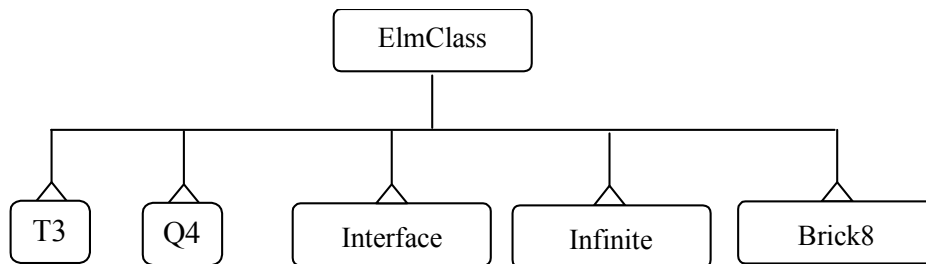


Figura 5.8 – Relax: Hierarquia das classes dos elementos.

O *Relax* contém cinco tipos de elementos finitos implementados. Para a representação de domínios bidimensionais pode-se utilizar elementos triangulares lineares, quadrilaterais de quatro nós e elementos infinitos de quatro e três nós. O programa faz também análise em modelos tridimensionais e para tal existe implementado o elemento hexaedral de oito nós (*Brick8*). Para modelagem de fraturamento é possível usar o elemento de interface linear, apenas para modelos bidimensionais.

O programa de análise comporta ainda considerações de não-linearidades geométricas. Para tal se faz necessário correções nas componentes cartesianas do tensor das tensões, utilizando-se o modelo seguido por Bathe [4].

A entrada dos dados no programa é originalmente feita via arquivo texto no formato *Neutral File* [60], onde são definidos todos os dados necessários à simulação de problemas geológicos em geral. Através dos rótulos predefinidos pelo programa é possível fazer a leitura dos dados referentes às suas respectivas informações. Existem informações relativas a quatro classes distintas de dados:

- **Configuração**
- **Material**
- **Casos de carregamento**
- **Erosão**

Os dados relativos à configuração podem ser referentes ao tipo de análise a ser processada (análise de deformação plana, tensão plana ou tridimensional), definição da tolerância de convergência, para avaliar a ordem de grandeza das forças internas do bloco, consideração de linearidade ou não-linearidade geométrica, etc.

Os dados referentes aos tipos de material podem ser isotrópico elástico linear [23], ortotrópico elástico linear, vários modelos elasto-plásticos perfeitos com superfícies de *Von Mises* [23] ou *Mohr-Coulomb*, modelos visco-elásticos de Maxwell ou Kelvin [45], modelo hiperbólico, modelo elástico linear para interface e modelo elasto-plástico perfeito para interface com superfície de Mohr-Coulomb.

No programa *Relax* é possível interpretar mais de um caso de carregamento. Estão previstos os seguintes casos de carregamentos:

- Gravidade
- Forças nodais
- Velocidades nodais
- Carregamento uniforme ou variavelmente distribuído
- Deslocamento nodal
- Tensão inicial uniforme
- Carga potencial nos elementos da malha
- Variação de temperatura

É previsto também pelo programa um tipo de análise de escavação, que é associado a um rótulo no arquivo de entrada para erosão.

A seguir resume-se a utilização do programa de análise, especialmente na definição dos parâmetros, dos são dados de entrada do algoritmo de relaxação dinâmica e das hipóteses adotadas para a modelagem física. Por fim são explicadas as alterações implementadas dentro do algoritmo original no *Relax* de forma a impor a restrição de deslocamentos ao longo da geometria da falha de acordo com a estratégia apresentada na Seção 4.5

### ***5.3.2. Dados de Entrada***

Nesta seção são definidos os dados de entrada do *Relax* utilizados nesse trabalho para a simulação do *move-sobre-falha*. Os dados foram agrupados de acordo com a classificação abaixo:

#### ***a. Configuração da Análise:***

Os parâmetros associados à configuração da análise são o seu tipo (estado plano de tensões ou estado plano de deformações) e os parâmetros associados a execução do algoritmo especificamente, como tolerância, número de passos, tempo do passo. Além desses, existem também parâmetros referentes a matriz de amortecimento e que não são

alterados por estarem diretamente associados a convergência do algoritmo. O modelo de análise adotado foi o estado plano de deformações.

*b. Material:*

Os valores referentes ao módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson são parâmetros de entrada do usuário, cabendo portanto ao geólogo ou geofísico defini-los. O coeficiente de Poisson aqui sugerido é o de algum valor próximo a meio, o que simula uma quase inexistência de variação de volume.

Define-se também para o material o seu tipo de comportamento ao deformar-se (super-classe *MatClass*) Adotou-se neste trabalho um comportamento isotrópico elástico linear do material deformado como uma primeira aproximação, embora seja sabido que essa aproximação não é a mais próxima do que ocorre na realidade, já que estamos claramente trabalhando com grandes deslocamentos e não linearidade física. No entanto, devido ao elevado grau de incertezas quanto ao comportamento do material geológico, optou-se por essa aproximação. Planeja-se no futuro considerar o comportamento elasto-plástico para os materiais.

*c. Carregamentos:*

Os tipos de carregamentos solicitados pelo sistema de balanceamento ao programa de análise são deslocamentos prescritos, quando se faz a análise no sentido inverso do tempo e ação da gravidade quando se faz a simulação do deslizamento do bloco. É possível também simular cargas de atrito nos nós da malha em contato com a falha aplicando-se cargas concentradas nesses nós no sentido contrário ao deslocamento do módulo.

*d. Restrições:*

O *Relax* não apresenta na sua implementação opção para restrição ao deslocamento em direções inclinadas. Mas para modelar o deslizamento sobre uma falha lítrica não basta

amarrar um nó ao deslocamento na direção longitudinal da falha. A Seção 5.3.3 a seguir discute detalhadamente as implementações feitas no programa de análise para garantir tal comportamento.

### ***5.3.3. Restrição de Deslocamento Nodal Sobre a Falha***

Para amarrar o deslocamento desses nós de interface à geometria da falha definiu-se dois novos rótulos no arquivo de entrada para o programa *Relax*, representando assim uma restrição nodal variável, ao longo do processamento.

O primeiro deles, aplicado explicitamente aos nós da malha que pertencem a linha de falha, define que estes nós estão submetidos à restrição de deslocamentos ao longo da falha. Uma vez definida tal restrição, a esses nós já estará definido o seu caminho de deslocamento. São fornecidas as seguintes informações para cada nó:

***<número do nó>      <dn> <dt1> <dt2> <label da falha>***

Para cada nó, representado pelo seu identificador, fornecido pelo gerador da malha, são informados o estado das restrições nas direções normal e tangente (duas direções tangentes para modelos 3D) e a linha de restrição sobre a qual está submetido.

O segundo rótulo é simplesmente para definir a lista de falhas do modelo, quando se define as geometrias das poligonais que modelam as falhas e os seus respectivos identificadores, representadas por numeração.

O cálculo dos deslocamentos e velocidades nodais no *Relax* dependem dos graus de liberdade previamente especificados em cada uma das direções  $(x,y)$  ou  $(x,y,z)$ , caso o modelo seja 3D. No programa já existem os seguintes graus de liberdade:

- **FORCE**- quando um nó apresenta um grau de liberdade expressado em força, em uma dada direção, as velocidades e os deslocamentos são obtidos através, respectivamente, das expressões (4.38) e (4.39).
- **DISPLACEMENT** - quando um nó apresenta um grau de liberdade expresso em deslocamento, em uma dada direção, sua velocidade é nula nesta direção e ao deslocamento nodal é definido o valor atribuído para todas as iterações. É o que ocorre com os deslocamentos prescritos atribuídos a um nó.
- **VELOCITY** - quando um nó apresenta um grau de liberdade expresso em velocidade, em uma dada direção, em todas iterações será atribuído a este nó a mesma velocidade naquela direção. O incremento de deslocamento para cada passo naquela direção é obtido através do produto entre o tempo do passo e a velocidade prescrita definida

A estes tipos de graus de liberdade foi acrescido o grau de liberdade que especifica a restrição de trajetória do nó sobre a falha, denominado de **PATH-DISPLACEMENT** ou trajetória de deslocamento, cujo comportamento é descrito a seguir.

#### **5.3.4 – Implementação da Restrição**

Uma vez estruturados os dados referentes aos nós submetidos à nova restrição, parte-se para a implementação da mesma durante a execução do algoritmo de Relaxação Dinâmica.

Dentro do algoritmo, descrito no capítulo anterior, foi implementado um outro grau de liberdade denominado **PATH-DISPLACEMENT**. Ou seja, os nós localizados sobre a falha apresentam esse novo grau de liberdade.

A primeira abordagem definida para restringir o deslocamento dos nós com esse grau de liberdade corrigia as coordenadas obtidas originalmente pelo algoritmo para a posição equivalente sobre a falha e pode ser melhor compreendida através da Figura 5.9.

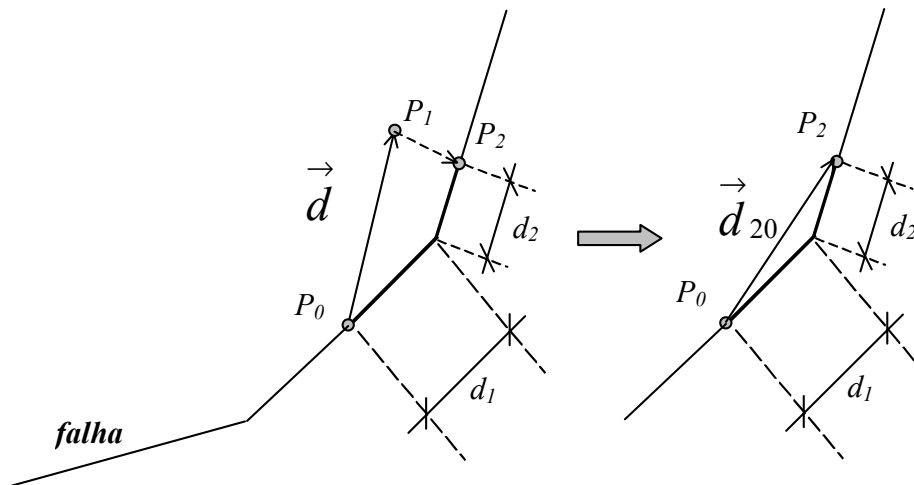


Figura 5.9 – Relax: Ajuste geométrico.

Em um determinado passo  $n$  tem-se o nó  $P_0$  pertencente a malha e situado sobre a falha. São processados os seus deslocamentos, definido pelo vetor  $\vec{d}$ , de tal forma que a sua nova posição é a do ponto  $P_1$ . Tendo os valores das coordenadas dos pontos  $P_0$  e  $P_1$ , é possível caminhar ao longo da falha, partindo-se de  $P_0$  de tal forma que se chegue até o ponto  $P_2$  que por definição terá a sua distância em relação ao ponto  $P_0$  igual ao módulo do vetor de deslocamentos  $d$ :

$$|\vec{d}| = d_1 + d_2 \quad (5.1)$$

Com isso é possível obter as coordenadas do ponto  $P_2$  situado sobre a falha e por conseguinte obter o deslocamento corrigido, definido pelo vetor  $\vec{d}_{20}$  e que será o novo valor de deslocamentos deste nó, definido pelos pontos  $P_0$  e  $P_2$ .

$$\vec{d}_{20} = P_2 - P_0 \quad (5.2)$$

Os resultados obtidos com essa abordagem não foram satisfatórios e o algoritmo nunca conseguiu obter uma configuração de equilíbrio tanto para problemas com carga de deslocamentos prescritos, quanto para ação da gravidade. Isso é devido ao fato de que para cada iteração as novas coordenadas dos nós eram obtidas em função de um sistema



de forças desequilibradas que por sua vez definiam velocidades até efetivamente serem obtidos os deslocamentos. As correções geométricas acima descritas definiam um vetor de deslocamentos nodais não compatível com as forças e velocidades atuantes nesses nós.

O procedimento correto deve calcular forças e velocidades em função das condições de contorno e daí naturalmente os deslocamentos obtidos serão consistentes com essas condições de contorno. Em função disso a abordagem acima descrita foi descartada e uma nova estratégia passou a ser adotada, no caso alterando o sistema de forças e velocidades, descrito na seqüência.

Considera-se inicialmente o caso de falhas planares, ou seja, falhas cuja representação em seções podem ser descritas por uma simples linha reta. Conforme é possível observar na Figura 5.10, fazer um nó deslizar sobre uma falha representa restringir o seu deslocamento na sua direção longitudinal (direção 1), ou seja, impedir que haja deslocamento na direção normal à falha (direção 2).

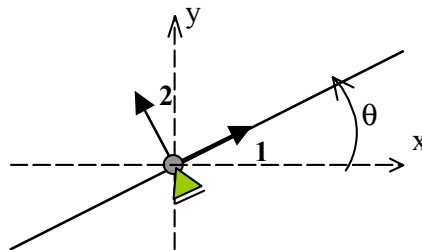


Figura 5.10 – Relax: Apoio inclinado.

O que se deseja é utilizar-se de apoios inclinados de primeiro gênero para restringir o deslocamento de um determinado nó ao longo de uma falha planar. Implementou-se, portanto, dentro do programa de análise, a restrição nodal representando apoios inclinados, já que o *Relax* não dispunha originalmente desse tipo de restrição.

O objetivo é permitir o deslocamento de um nó em uma direção que não é a dos eixos principais  $x$  e  $y$  e impedi-lo em uma outra direção também diferente de  $x$  e  $y$ , mas como o sistema trabalha com as coordenadas globais, as restrições nodais que se deseja

implementar podem ser definidas de acordo com as expressões (5.3), que associam deslocamentos nodais nas direções dos eixos globais com deslocamentos no sistema de coordenadas local.

$$\begin{cases} u_1 = u_x \cos \theta + u_y \operatorname{sen} \theta \\ u_2 = -u_x \operatorname{sen} \theta + u_y \cos \theta = 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

Porém é mais fácil trabalhar-se nesse caso com o sistema de coordenadas locais, ou seja, com  $u_1$  livre e  $u_2$  fixo. O que se faz então é transformar, para cada iteração, forças, deslocamentos e velocidades dos nós sobre a falha, do sistema de coordenadas global para o sistema de coordenadas local. Para tal aplica-se, para todas essas grandezas, a matriz de rotação apresentada abaixo na expressão (5.4), onde  $\theta$  é ângulo de rotação no sentido anti-horário entre o sistema global e o sistema local.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \operatorname{sen} \theta \\ -\operatorname{sen} \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Tem-se então que, numa dada iteração, para os nós submetidos a restrição da falha, o seguinte procedimento:

1. *Obtém-se os cossenos diretores que definem a inclinação da falha e calcula-se o ângulo  $\theta$  de rotação;*
2. *As forças desequilibradas atuantes em um nó são decompostas no sistema de coordenadas local;*
3. *Os vetores de velocidades e deslocamentos, obtidos na iteração anterior, também são transformados para o sistema de coordenadas locais;*
4. *O novo vetor de velocidades, no sistema local, é obtido de forma idêntica a obtida para um nó sem restrições, exceto na direção normal ao apoio que é igualado a zero;*

5. Da mesma maneira que são obtidos para os nós sem restrição, os novos deslocamentos são obtidos. Como as velocidades na direção normal são nulas, por conseguinte o mesmo ocorrerá para os deslocamentos;
6. Uma vez obtidas forças desequilibradas, velocidades e deslocamentos no sistema local, retorna-se todas essas grandezas novamente para o sistema de coordenadas globais, aplicando-se a mesma matriz de rotação da expressão (5.4), porém com o valor angular de  $(-\theta)$ .

A forma como o *Recon* e o *Relax* aproximam curvas quaisquer é através de poligonais. No caso de falhas lítricas, sob o ponto de vista da restrição nodal, isso significa que um determinado nó de falha, pode estar submetido a mais de uma angulação de apoio inclinado diferente, bastando para isso que este nó mude de tramo ao se deslocar sobre esta falha. A Figura 5.11 ilustra essa situação:

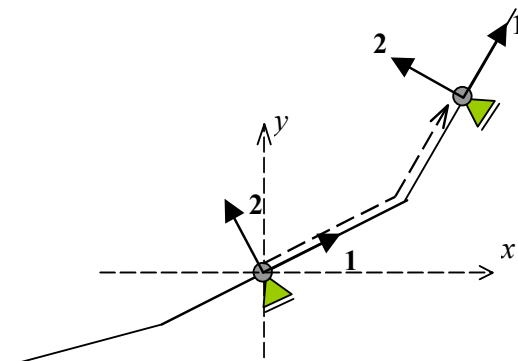


Figura 5.11 – *Relax*: Restrições ao deslocamento sobre a falha lítrica.

Nesse caso são necessários alguns outros procedimentos para garantir que ao mudar de tramo o nó tenha as suas restrições de deslocamento corretamente alteradas de forma que o algoritmo passe a buscar o equilíbrio do módulo de acordo com as suas novas condições de contorno.

A possibilidade do modelo ter condições de contorno variáveis, quanto as suas restrições ao deslocamento, exige que ao final de cada iteração sejam testados, para cada nó submetido ao deslocamento sobre a falha, em qual tramo este nó se encontra após obtido

o novo vetor de deslocamentos nodais. Criou-se então, na estrutura de dados do *Relax*, mais um campo na classe *Node*, que representa os nós da malha, para armazenar o tramo sobre o qual este nó se encontra e a direção na qual este nó se movimentou sobre a falha na iteração anterior. Com isso torna-se mais eficiente o processo de se testar geometricamente a posição deste nó sobre a falha.

A geometria das falhas é definida na entrada de dados do programa de análise sempre ordenadas no seu sentido horário, conforme ilustra a Figura 5.12. Esta convenção é necessária porque a detecção do tramo corrente do nó se baseia nessa ordenação. Assim para a falha definida a esquerda de A, a sua orientação correta é AB, enquanto que para a outra falha a orientação seria CA.

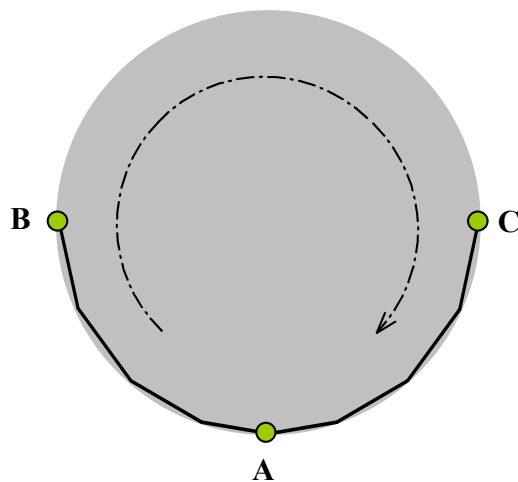
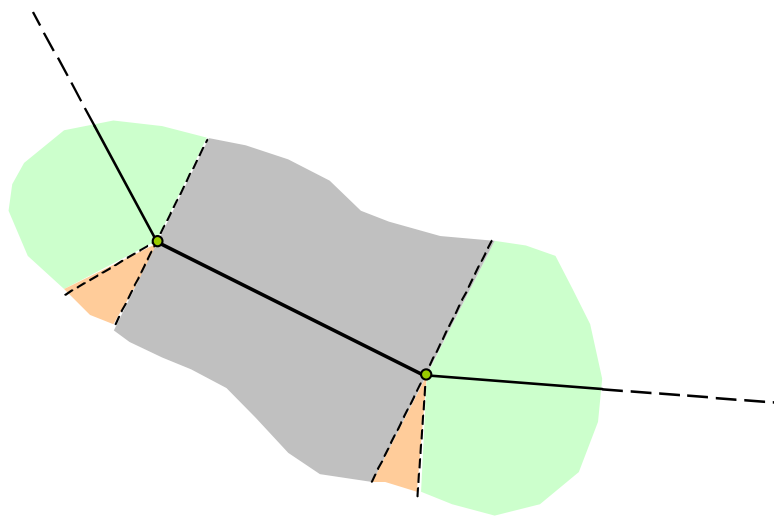


Figura 5.12 – *Relax*: Definição da orientação das falhas.

Se é sabido na iteração anterior aonde se encontrava o nó, a pesquisa começa a ser realizada justamente no mesmo tramo que se encontrava anteriormente e caso não mais nesse tramo esteja, o próximo candidato é justamente o seguinte de acordo com a direção para aonde ele esteve se deslocando na iteração anterior. Já o teste geométrico que define se o nó está de fato em um determinado tramo ou não é explicado a seguir.

Na Figura 5.13 abaixo são identificadas várias regiões possíveis para as quais um nó pode estar posicionado com relação ao tramo central, com a linha mais grossa, e que representa

justamente o tramo onde o nó testado se encontrava na iteração anterior. As regiões são delimitadas pelas linhas tracejadas, que são na realidade as linhas perpendiculares aos tramos corrente superior e inferior. O algoritmo geométrico determina se o ponto em estudo encontra-se na região cinza, o que define que ele continua na área de influência do mesmo tramo, na região laranja, o que determina que este nó se encontra em uma região de interseção entre o tramo corrente e um tramo vizinho ou na região verde, que determina que o nó em estudo efetivamente mudou de tramo.



*Figura 5.13 – Relax: Identificação das regiões próximas a falha.*

Após a identificação da região aonde se encontra o nó é feita a projeção do mesmo sobre o tramo que define a sua restrição e ao mesmo tempo é calculada a distância do nó para este tramo. Caso essa distância seja superior a uma certa tolerância, previamente definida de acordo com a tolerância do modelo HED, o processo é encerrado e a análise não é concluída.

A definição da região sobre a qual o nó se encontra é obtida através do cálculo do ângulo entre vetores que são obtidos de acordo com a Figura 5.14, que ilustra a situação de um ponto que permanece no mesmo tramo nas iterações anterior e corrente.

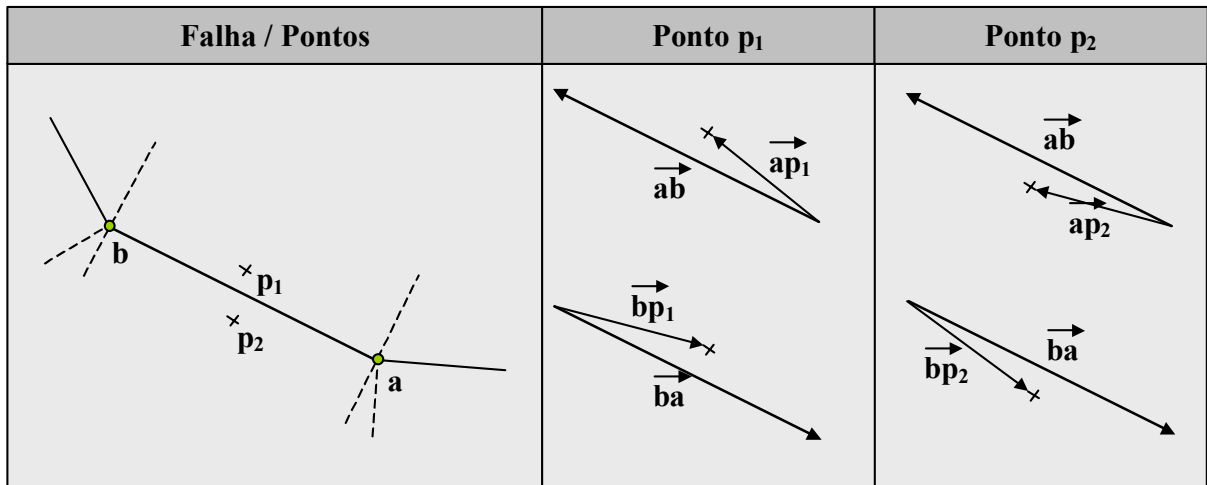


Figura 5.14 – Relax: Teste Geométrico Para Localizar um Ponto Próximo a Falha.

Obtidas as novas coordenadas de um nó  $p$ , e com base no tramo e direções desse nó na iteração anterior, são calculados dois ângulos,  $\theta_a$  e  $\theta_b$ , obtidos respectivamente através da diferença entre dos pseudo-ângulos entre os vetores  $ab$  e  $ap$  e  $ba$  e  $bp$ , definida pelas expressões (5.5).

$$\begin{cases} \theta_a = ps\_ang(ab) - ps\_ang(ap) \\ \theta_b = ps\_ang(ba) - ps\_ang(bp) \end{cases} \quad (5.5)$$

Onde  $ps\_ang$  representa o pseudo-ângulo [8] do vetor e que é definido de acordo com a Figura 5.15:

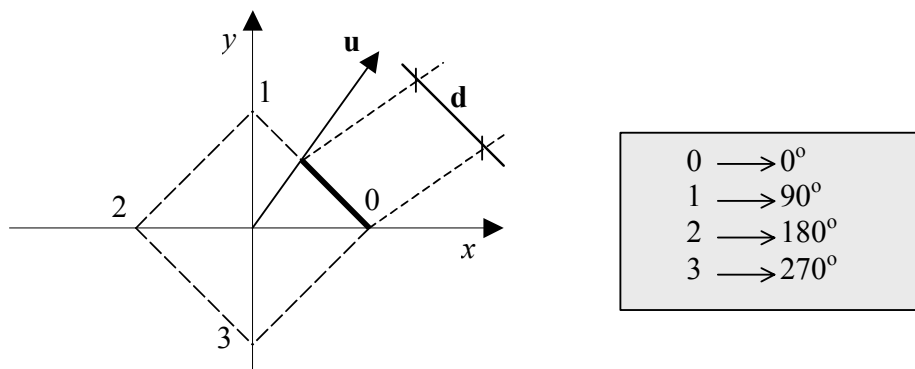


Figura 5.15 – Definição de pseudo-ângulo.

O pseudo-ângulo é uma forma mais eficiente computacionalmente de se obter valores de ângulos relativos de vetores. É obtido caminhando-se sobre o espaço paramétrico do quadrado unitário da Figura 5.15, sendo  $d$  o seu valor para o vetor  $u$ , por exemplo. O pseudo ângulo pode então variar de 0 a 4, exclusive.

Com isso, caso  $\theta_a$  e  $\theta_b$  apresentem ambos valores entre  $-1$  e  $1$ , significa que o nó em estudo permanece no mesmo tramo. Caso algum dos ângulos não apresente o seu valor dentro do intervalo  $-1$  e  $1$ , neste caso, repete-se o mesmo procedimento só que para o tramo referente ao ângulo fora do intervalo. Caso o valor de  $\theta_a$  referente ao novo tramo em estudo também esteja fora do intervalo  $[-1,1]$ , então este nó encontra-se na região de interseção, caso contrário, este nó estará sob a influência da restrição ao deslocamento do novo tramo em estudo.

Quando um nó posiciona-se na região de interseção entre dois tramos, representado na Figura 5.13 pela região laranja, este nó é projetado sobre o ponto de interseção entre dois tramos. Essa distância entre as coordenadas dos nós e a falha são limitadas de acordo com uma dada tolerância, que é dado de entrada do programa de análise, devendo portanto apresentar valores de baixa magnitude, já que representam um erro numérico do algoritmo de relaxação dinâmica. Esse erro torna-se relativamente maior quando o nó muda de tramo na falha de uma iteração do algoritmo para outra, conforme pode-se observar na Figura 5.16. Nessa situação igualmente projeta-se o nó sobre o seu novo tramo e atualiza-se as suas restrições ao deslocamento.

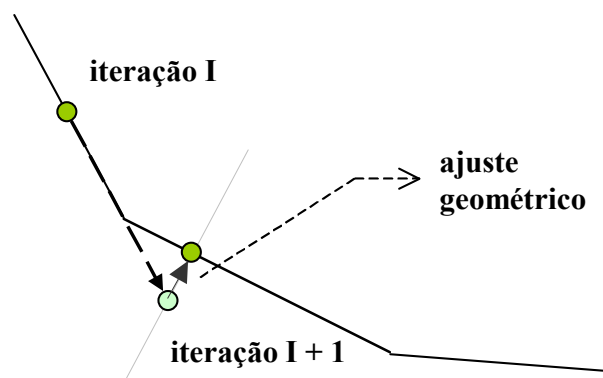


Figura 5.16 – Relax: Ajuste geométrico com projeção do nó sobre a falha.

Quando um nó troca de tramo, significa que o sistema teve as suas condições de contorno alteradas em tempo de execução do algoritmo de relaxação dinâmica. Abaixo é descrito de forma sucinta o algoritmo que calcula os deslocamentos dos nós governados pela geometria de uma falha lítrica.

□ **Para cada nó localizado sobre a falha**

- ***Consulta grau de liberdade***

- *Obtém ângulo  $\theta$*

- ***rotação das forças desequilibradas e das velocidades para sistema local***

- $[f] = [R(\theta)][F]$
- $[v] = [R(\theta)][V] = \begin{bmatrix} v_1 \\ 0 \end{bmatrix}$

- ***obtenção das novas velocidades (4.19) em  $it = n+1$***

- $[V]^{n+1} = \frac{(1/\Delta t - \alpha / 2)}{(1/\Delta t + \alpha / 2)} [v]^n + \frac{R_i(u_i^n)}{m_{ii}(1/\Delta t + \alpha / 2)}$

- ***cálculo dos deslocamentos na iteração  $n+1$  (sistema local)***

- $[\Delta u] = dt [v]$

- ***voltando velocidades para o sistema global***

- $[V] = [R(-\theta)][v]$

- ***deslocamentos na iteração  $n+1$  no sistema global***

- $[\Delta U] = [R(-\theta)][\Delta u]$

- ***acumulando variação de deslocamentos da iteração  $n+1$  no deslocamento total***

- $[U] = [U] + [\Delta U]$

- ***atualização das restrições***

- chama o algoritmo geométrico descrito anteriormente

- ***incremento de passo***

- $n = n + 1$



Numa dada iteração  $n+1$  são obtidas as forças desequilibradas do nó e convertidas para o seu sistema de coordenadas locais, definido pela consulta às suas restrições de deslocamento assim como as velocidades definidas na iteração anterior.  $n$ . Através de interpolações por diferenças finitas centrais (expressões (4.38) e (4.39)) são obtidas as velocidades na iteração  $n+1$  para o sistema de coordenadas locais. Das velocidades são obtidos os deslocamentos da iteração corrente, que após ser transformado para o sistema de coordenadas globais é acumulado no vetor de deslocamentos total, ou seja, que contém acumulados os deslocamentos desde o início da análise e que informa efetivamente o quanto o nó se deslocou. Após esse procedimento é possível, através do algoritmo de ajuste geométrico descrito, precisar em qual tramo da falha o nó se encontra, atualizando as suas restrições e iniciando uma nova iteração até que o equilíbrio seja obtido.

Para que se possa considerar o módulo em equilíbrio é necessário que as componentes das forças desequilibradas em cada nó da malha seja nula. Nos nós submetidos a restrição sobre a falha, essas forças devem estar zeradas na direção tangencial do sistema de coordenadas locais do nó, que é definida por sua vez pela angulação  $\theta$  do tramo onde o nó se encontra.

## ***5.4. O Sistema Integrado***

Um objetivo deste trabalho é obter um ambiente de balanceamento de seções geológicas totalmente integrado. Em outras palavras, o que se deseja é implementar, dentro de um ambiente único, o *Recon*, a preparação dos dados a serem enviados para o módulo de análise, o processamento do algoritmo de Relaxação Dinâmica com base nesses dados, e a visualização das deformações e dos deslocamentos finalmente obtidos.

### ***5.4.1. O Pré-Processador***

Fazer o pré-processamento significa organizar todos os dados necessários para que o programa de análise possa ser executado. No caso, o *Relax* recebe os seus dados de

entrada por intermédio de um arquivo texto que apresenta um formato padrão, o arquivo neutro. Este formato, por trabalhar com rótulos associados aos diversos tipos de dados, permitiu que fossem exportadas pelo *Recon* somente as informações necessárias para o tipo de análise proposto.

Para que o *Recon* possa fornecer ao módulo de análise essas informações foram necessárias diversas implementações. Nas seções anteriores foi descrita a hierarquia de classes dos atributos geológicos que estão atrelados a estrutura de dados do sistema. Foi também documentada a criação de novas classes, métodos e atributos pendurados a essas classes. Essas alterações foram necessárias justamente para armazenar e estruturar as informações que são consultadas pelas rotinas que, de dentro do ambiente *Recon*, geram o arquivo neutro.

Essas informações, encontradas no arquivo neutro, e que o sistema *Recon* exporta para o módulo de análise foram classificadas em cinco categorias diferentes. A seguir são apresentados para cada uma dessas categorias, os procedimentos computacionais necessários para a geração do arquivo neutro.

#### ***5.4.1.1. Atributos globais da análise***

Os atributos considerados globais da análise, ou seja, que não estão diretamente relacionados a geometria não são pendurados na estrutura de dados do programa. Esses dados são pedidos ao usuário sempre antes de ser executado o módulo de análise e são eles:

- Tipo de análise
- Tolerância para convergência
- Número máximo de iterações
- Intervalo de tempo da análise dinâmica
- Parâmetros associados a matriz de amortecimento

Para consultar esses dados ao usuário foram criados diálogos específicos para a captura dessas informações.

#### **5.4.1.2. Atributos do meio contínuo**

Existem ainda atributos que são definidos no contínuo discretizado. No caso, para cada região, face topológica HED, foram pendurados outros atributos conforme descrito na Seção 5.2. Esses atributos estão associados às propriedades dos diferentes materiais existentes em uma seção, no caso, as camadas referentes as eras geológicas e podem ser subdivididos em três categorias distintas:

- *propriedades físicas*: módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson
- *comportamento do material*: linear-elástico, elasto-plástico, etc.
- *propriedades geométricas*: espessura do material
- *parâmetros da análise*: ordem de integração

Para cada uma dessas categorias é possível definir diferentes propriedades, associá-las a rótulos que, por sua vez, são associados a diferentes regiões do modelo. A forma como são feitas essas atribuições é explicada na seção seguinte.

Para entrar com esses dados foram criados novos campos nos diálogos já existentes para a definição das propriedades das camadas.

#### **5.4.1.3. A geometria do modelo**

Como o *Relax* trabalha integrado ao método dos elementos finitos, foi incorporado ao sistema *Recon* uma biblioteca de geração de malhas bidimensionais que apresenta os elementos dos tipos triangular e quadrilateral, com interpolação linear e quadrática (*T3*, *T6*, *Q4* e *Q8*). É fornecida à biblioteca uma lista de *loops*, sendo o primeiro deles referente ao contorno da região a ser discretizada e os demais representando poligonais fechadas, internas ao *loop* externo. Cada *loop* é representado por uma lista de pares de

coordenadas que, por sua vez, representam os pontos que subdividem os *loops*. O algoritmo de geração de malhas é baseado na combinação de duas técnicas: avanço de fronteira e decomposição hierárquica de domínio. A técnica de avanço de fronteira é tradicional em vários aspectos que são encontrados em outros algoritmos da literatura. Entretanto, o algoritmo utilizado inclui alguns passos adicionais que propiciam geração de malhas de boa qualidade (no que se refere à forma dos triângulos), mesmo para problemas com geometria complicada (incluindo furos ou fraturas), característica comum em seções geológicas, e para problemas onde o tamanho dos elementos tem uma variação muito grande de tamanho, isto é, o algoritmo faz uma boa transição entre um trecho da malha com pequenos elementos e outro trecho com grandes elementos. A decomposição hierárquica do domínio é feita antes da geração de malha pela técnica de avanço de fronteira e utiliza um estrutura de dados de árvore quaternária (*quadtree*). Esta estrutura auxiliar tem a finalidade de definir uma função de espaçamento nodal, isto é, ela define a distribuição do tamanho dos elementos a serem gerados dentro do domínio do modelo [43].

Dependendo do espaçamento entre esses pontos, a malha gerada será ou não de boa qualidade, em outras palavras, a malha apresentará elementos mais uniformes quanto a tamanho e geometria.

O elemento utilizado para discretizar as faces que compõem o módulo de trabalho é o *T3* (triangular linear), com um ponto de integração. A biblioteca gera a malha de acordo com a geometria da fronteira da região e com o número de subdivisões de cada uma das arestas que formam esse contorno. Foi implementado dentro da nova classe, *GeoEdge*, Seção 5.2, métodos responsáveis pela subdivisão das arestas das faces. A figura 5.17 mostra uma face composta por duas arestas, a subdivisão dessas arestas e a geração da malha triangular baseada na geometria e na subdivisão das arestas que compõem a face discretizada.

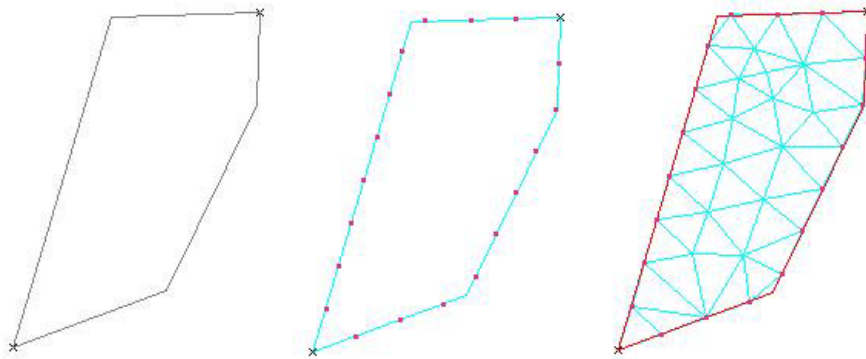
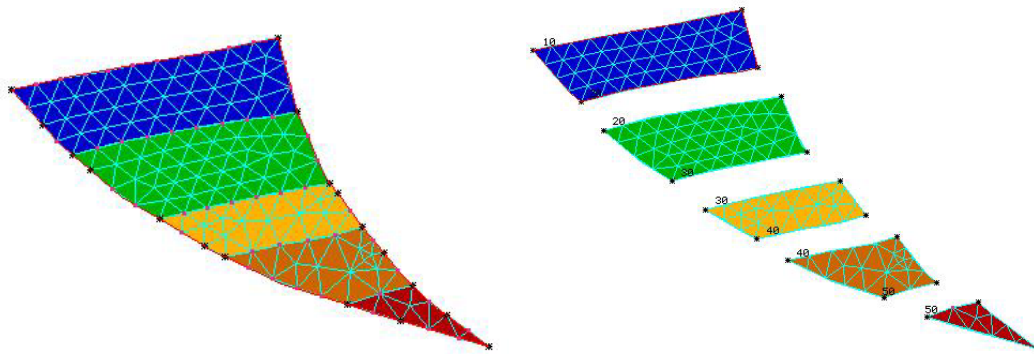


Figura 5.17 – Recon: Geração da malha de Elementos Finitos.

A biblioteca retorna, além da geometria da malha, informações de conectividade entre nós e elementos, importantes para que o módulo de análise e o sistema *Recon* referenciem os dados coerentemente.

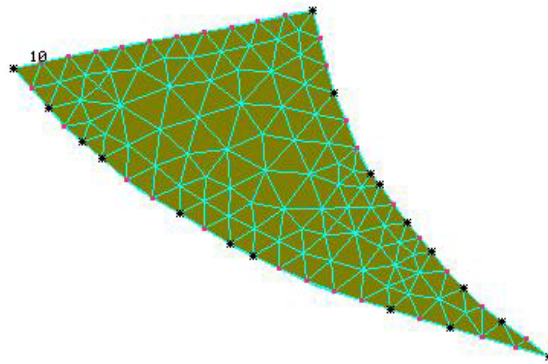
A forma como os atributos são armazenados na estrutura de dados, somado a maneira como é implementado o gerenciamento do módulo de trabalho, causa uma certa dificuldade na hora de exportar essas malhas, que compõem um módulo, para o *Relax*, pois o programa de análise recebe apenas uma malha de elementos finitos, enquanto que um módulo de trabalho do *Recon* pode apresentar várias malhas distintas.

Conforme observado na descrição das classes *GeoFace* e *Layer* (Seções 5.2.1 e 5.2.3), uma face tem pendurada a si, entre outros atributos, a malha de elementos finitos e um apontador para o módulo ao qual esta face pertence. Portanto, o módulo de trabalho obrigatoriamente apresentará mais de uma malha desde que esse apresente igualmente mais de uma camada, como ocorre por exemplo no módulo da *figura 5.18*. A geração da malha, inicialmente individual para cada face que compõe o módulo, apesar de determinar posteriormente a união dessas em uma única malha, se faz necessária já que para cada camada teremos diferentes materiais e conseqüentemente propriedades específicas associadas. Com isso é possível exportar para o *Relax* uma malha com regiões distintas, identificadas pelas diferentes propriedades dos materiais que as definem.



*Figura 5.18 – Recon: Malhas penduradas como atributo de face.*

Para se obter a malha unificada, Figura 5.19, que representa a subdivisão do bloco deformado, é necessário percorrer a lista de faces do módulo e, para cada face, ir construindo a conectividade da nova malha. O objetivo principal é eliminar a duplicidade dos nós de fronteira entre as malhas de duas faces com arestas comuns. Para se identificar esses nós, são necessários testes geométricos.



*Figura 5.19 – Recon: Malha unificada do módulo.*

Criou-se um sólido temporário HED (Figura 5.20) cujos vértices reproduzem os nós da malha e as faces seus elementos, no caso *T3*. Assim, para cada face do módulo, percorre-se os nós da sua respectiva malha e faz-se o teste geométrico com o sólido temporário, construído dinamicamente enquanto todos os nós das malhas são varridos. Para cada nó não encontrado no sólido temporário, lhe é inserido um novo vértice, sendo pendurados

como atributo um novo identificador. Como esses nós das malhas são percorridos elemento a elemento, ao final é possível obter o vetor de conectividades da malha única. Finalmente, para se montar o vetor de coordenadas da malha é bastante percorrer a lista de vértices do sólido temporário, consultar as suas coordenadas e com o seu identificador, pendurado como atributo de vértice, obter a sua posição no vetor de coordenadas da malha.

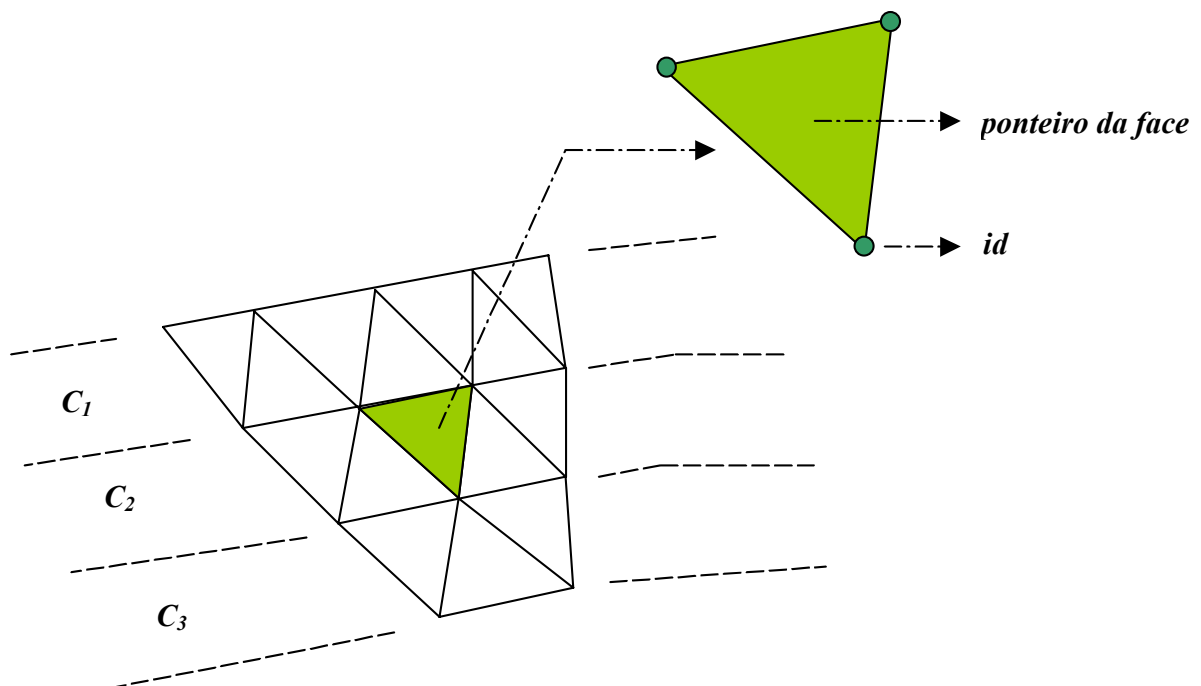


Figura 5.20 – Recon: Sólido temporário HED para armazenar a malha unificada.

Além da lista de nós com as respectivas coordenadas, já obtida através do procedimento acima descrito, também é gerada a lista de elementos contendo, além da conectividade dos nós de cada elemento, os identificadores referentes as propriedades do material, apresentados na Seção 5.4.1.2. O vetor de conectividades entre os elementos da malha unificada já foi montado, mas para exportar a conectividade da malha, é necessário associar para cada elemento da malha os seus atributos. Para tal, usa-se o mesmo sólido temporário utilizado para estruturar os dados da malha unificada. Percorre-se o vetor de conectividades e para cada elemento da malha, é obtida a face do sólido temporário correspondente, consulta-se o seu atributo, no caso o ponteiro para a face do modelo, da

seção geológica onde, por sua vez, encontram-se os atributos de camada que especificam as propriedades de material.

#### **5.4.1.4. Restrições ao Deslocamento**

É necessário informar ao programa de análise a lista de nós da malha unificada que está submetido a restrição de deslocamento sobre a falha. A falha sobre a qual haverá o deslizamento do bloco é selecionada do modelo pelo usuário através de interação com o *mouse*. Para identificar quais são esses nós submetidos à restrição de deslocamento sobre a falha são feitos testes geométricos e novamente utiliza-se o HED para gerenciar esses testes, criando-se mais um sólido temporário para representar essa falha coletada. Basta a seguir percorrer a lista de nós da malha unificada e armazenar os nós que se encontram sobre a falha. Além disso, também é exportada a geometria da falha propriamente dita.

#### **5.4.1.5. Carregamento**

Os tipos de carregamentos previstos para se fazer a análise pelo algoritmo de relaxação dinâmica são ou a aplicação de um campo de deslocamentos prescritos ou a ação da gravidade, que, no caso, atuaria igualmente em todos os nós da malha única.

O campo de deslocamentos prescritos pode ser aplicado a todo o bordo superior do módulo, definido na coleta dos dados para a análise ou aplicado simplesmente no nó que pertence ao bordo superior submetido à restrição de deslocamentos da falha. A escolha de qual das duas opções será utilizada na análise é obtida pelo usuário.

Para se definir e exportar o campo de deslocamentos aplicado a todo o bordo superior são coletadas a geometria origem (o bordo superior) e a geometria destino, tudo via *mouse*. O campo é uniforme, ou seja, todos os vetores que definem os deslocamentos de cada nó individualmente apresentam o mesmo vetor unitário, que por sua vez é definido pela diferença entre o primeiro ponto da poligonal da geometria destino e o nó de interseção entre a falha e o bordo superior, chamado de vetor  $u$  na Figura 5.21.



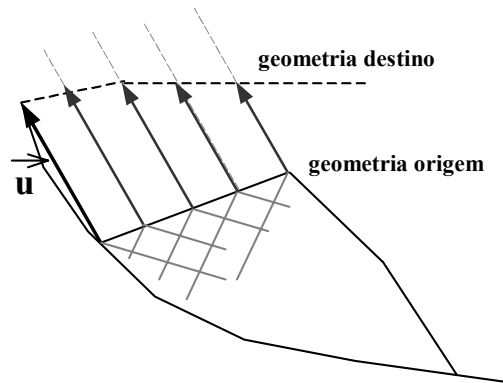


Figura 5.21 – Recon: Definição do campo de deslocamentos prescritos.

Caso seja definido a aplicação de deslocamento prescrito apenas ao nó da falha, este já é o próprio vetor  $u$ .

Com as modificações e rotinas até aqui apresentadas e implementadas no *Recon*, ficam disponibilizados todos esses dados, no caso tanto geometria quanto os atributos.

#### 5.4.2. O Pós-Processador

O objetivo final da integração entre o sistema de balanceamento e o programa de análise é visualizar a nova geometria do bloco conjuntamente com o resto da seção. Além disso também se deseja obter as deformações no módulo após a convergência do algoritmo de relaxação dinâmica. Ao término do processamento, mesmo que o algoritmo não tenha obtido uma nova configuração de equilíbrio, o *Relax* gera um arquivo de pós-processamento contendo, entre outras informações, as novas coordenadas da malha unificada. Esse arquivo apresenta formato similar ao arquivo de entrada de dados, ou seja, o arquivo neutro.

Para que seja possível desenhar dentro do ambiente *Recon* a nova geometria do bloco, é necessário transformar a lista de vértices e arestas que compõem a topologia do bloco. Mais que isso, é fundamental preservar essa topologia após obtidas as novas coordenadas de seus vértices. Ocorre porém que o programa de análise recebe, processa e retorna apenas as novas coordenadas dos nós da malha, conforme já mencionado. A questão

passa a ser então como fazer o mapeamento entre a geometria da nova malha obtida pelo algoritmo de relaxação dinâmica e os vértices e arestas que compõem a lista de faces do módulo de trabalho.

Na realidade esse mapeamento é feito ainda na etapa de pré-processamento, após a geração da malha unificada. O que é feito em tempo de pós-processamento é apenas consultar uma lista que associa vértices e arestas do modelo com a topologia da malha unificada, ou seja, o mapeamento, e com o seu auxílio, partindo-se da nova geometria da malha unificada, reconstruir a lista de faces HED que definem o módulo.

#### 5.4.2.1. Definição da Nova Geometria

O mapeamento é composto de duas listas distintas, uma que associa os vértices topológicos do módulo aos identificadores da malha unificada e outro que associa cada aresta do módulo, a uma lista de identificadores dos nós da malha que estão sobre essa aresta. Ao percorrer a lista de nós da malha unificada define-se, para cada nó, através de testes geométricos se este é ou não referente a um vértice topológico do módulo. Caso seja, são armazenados na lista de vértices o seu ponteiro bem como o seu respectivo nó identificador da malha unificada. Caso o nó da malha não corresponda a um vértice topológico, mas corresponda a uma aresta, então este nó é inserido na lista de identificadores associada a essa aresta. A construção dessa lista, no entanto, requer certos cuidados adicionais. No caso, os nós da malha que são internos das arestas não apresentam correspondência alguma com os vértices não topológicos das arestas, ou seja os vértices internos que definem a geometria da aresta HED, conforme pode ser observado na Figura 5.22 abaixo



Figura 5.22 – Recon – Aresta HED e as suas subdivisões.

Esses nós na realidade são justamente as subdivisões das arestas definidas para a geração da malha. Quando é feito o mapeamento, esses nós passam a ser os novos atributos geométricos das arestas transformadas, o que evidentemente altera a sua geometria. Essa alteração será tanto mais grosseira quanto menos refinada for a subdivisão das arestas. A Figura 5.23 abaixo ilustra o que ocorre com a geometria da malha, quando é redefinida a descrição geométrica de acordo com as suas respectivas subdivisões. As novas arestas apresentam o número de vértices geométricos igual ao número de subdivisões da aresta original acrescido de um.

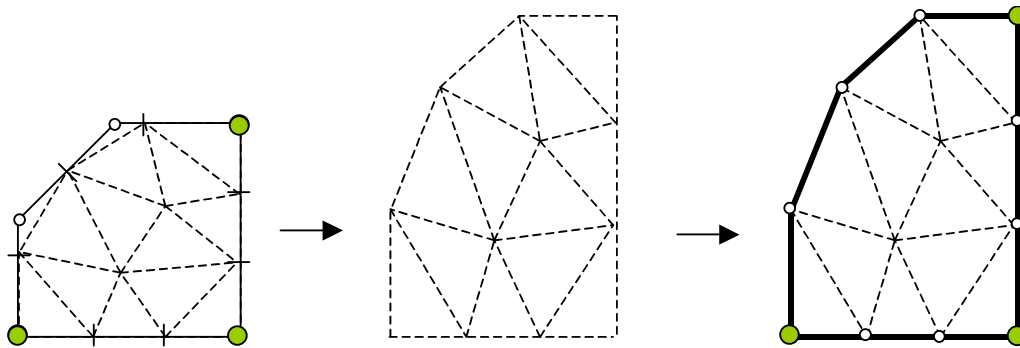


Figura 5.23 – Recon: Mapeamento malha-modelo.

Com o mapeamento montado, é possível ao percorrer as arestas e vértices do módulo obter as novas coordenadas de todos os vértices geométricos que o compõem e com isso remontar a sua geometria, baseada no mapeamento e na malha unificada já com as suas coordenadas atualizadas. A Figura 5.24 mostra como funciona o mapeamento e a reconstrução da aresta  $e_l$ . Na tabela que destaca a aresta  $x$  da lista de arestas mapeadas, pode-se observar que os identificadores estão ordenados de acordo com a topologia original da aresta. Isso é fundamental para que se possa reconstruir corretamente as arestas. Abaixo é descrito o algoritmo que implementa esse mapeamento.

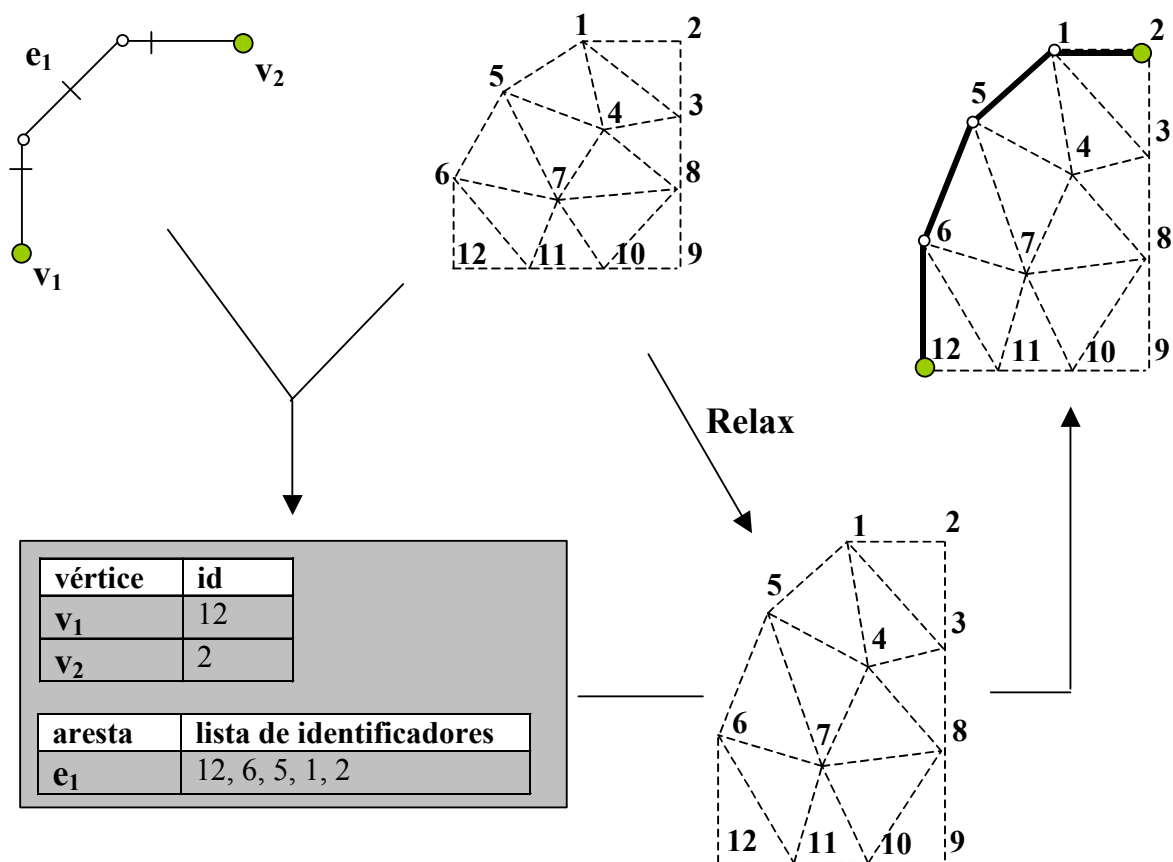


Figura 5.24 – Recon: Resumo da comunicação entre Recon e Relax.

#### 5.4.2.2. Cálculo e Visualização das Deformações Internas

É possível com as ferramentas presentes no *Recon* atualmente visualizar as deformações introduzidas pelas transformações geométricas existentes no *Recon*, independentemente da inserção do módulo de análise. O objetivo disso é prover, dentro do ambiente *Recon*, uma ferramenta para comparação dos resultados obtidos entre os modelos empírico e não empírico.

A idéia é calcular a deformação dos elementos triangulares das faces do módulo deformado utilizando-se do modelo CST (*Constant Strain Triangle*) [19] e, obter a deformação constante de cada elemento triangular. Para suavizar a visualização do campo de deformações introduzido pela transformação, desde que não seja de corpo rígido, é

aferida, para cada nó, a média das deformações dos elementos que contém este nó e a partir de então obter os valores de deformação para cada nó da malha.

A princípio estamos interessados em obter, para um triângulo qualquer, as suas deformações. Considerando deformações infinitesimais com referencial na configuração de origem do elemento (formulação eulleriana) e em notação indicial [4], estes valores podem ser obtidos através da expressão:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} - u_{k,i} u_{k,j}) \quad (5.6)$$

As deformações  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  e  $\gamma_{xy}$ , que representam respectivamente as deformações nas direções  $x$ ,  $y$  e a distorção podem portanto ser obtidas de (5.6), gerando as expressões (5.7), (5.8) e (5.9) abaixo.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (5.7)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (5.8)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5.9)$$

Onde  $u$  e  $v$  são os deslocamentos expressos de acordo com as funções de forma expressões abaixo e que definem os deslocamentos nodais da Figura 5.25:

$$\begin{cases} u(x, y) = N_1(r, s)u_1 + N_2(r, s)u_2 + N_3(r, s)u_3 \\ v(x, y) = N_1(r, s)v_1 + N_2(r, s)v_2 + N_3(r, s)v_3 \end{cases} \quad (5.9)$$

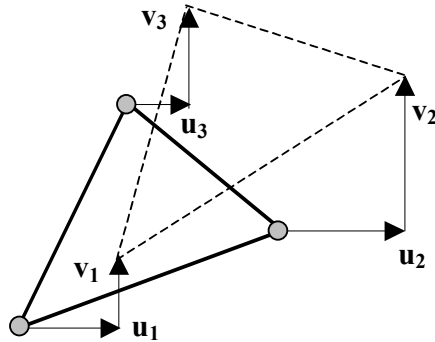


Figura 5.25 – Recon: Cálculo das Deformações No Elemento T3.

Interpolando os deslocamentos nodais e adotando como sistema de coordenadas locais as coordenadas de área do triângulo  $(r,s,t)$ , pode-se obter as seguintes funções de forma:

$$\begin{aligned}
 N_1(r,s) &= r \\
 N_2(r,s) &= s \\
 N_3(r,s) &= 1 - r - s
 \end{aligned}
 \tag{5.10}$$

Com isso, a expressão para a obtenção das deformações em forma matricial é definida abaixo:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix}
 \tag{5.11}$$

onde a matriz  $[B]$ , que relaciona deslocamentos com deformações é expressa por:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Como as funções de forma são expressas em suas coordenadas locais, não há como obter diretamente as derivadas das funções de forma presentes nos termos da matriz  $\mathbf{B}$ . Para tal, é necessário mapear os termos expressos nas derivadas em relação as coordenadas globais da matriz  $[B]$  para as coordenadas locais:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial r} & \frac{\partial N_2}{\partial r} & \frac{\partial N_3}{\partial r} \\ \frac{\partial N_1}{\partial s} & \frac{\partial N_2}{\partial s} & \frac{\partial N_3}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (5.13)$$

onde  $[J]^{-1}$  representa a inversa da matriz *Jacobiana*. Ambas as expressões, a matriz *Jacobiana* e a sua inversa, são representadas nas equações (5.14) e (5.15):

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

$$[J]^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial s} & -\frac{\partial x}{\partial s} \\ -\frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

onde  $\Delta$  é o determinante da matriz *Jacobiana*. Por outro lado, é possível expressar as coordenadas de um nó através das funções de forma, obtendo as expressões (5.16) abaixo:

$$\begin{aligned}x &= N_1(r,s)x_1 + N_2(r,s)x_2 + N_3(r,s)x_3 \\y &= N_1(r,s)y_1 + N_2(r,s)y_2 + N_3(r,s)y_3\end{aligned}\tag{5.16}$$

que substituídas em (5.13) e (5.14) determinam (5.17) e (5.18):

$$[J] = \begin{bmatrix} (x_1 - x_3) & (y_1 - y_3) \\ (x_2 - x_3) & (y_2 - y_3) \end{bmatrix}\tag{5.17}$$

$$[J]^{-1} = \frac{1}{(x_1 - x_3)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_1 - y_3)} \begin{bmatrix} (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) \end{bmatrix}\tag{5.18}$$

Assim é possível obter os termos da matriz  $[B]$  expressos na equação (5.11):

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{Bmatrix} (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \\ (x_3 - x_1) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_3) \end{Bmatrix}\tag{5.19}$$

Basta agora substituir os termos obtidos matricialmente em (5.18) na equação (5.10) obtendo as deformações  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  e  $\gamma_{xy}$ :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (y_2 - y_3) & 0 & (y_3 - y_1) & 0 & (y_1 - y_2) & 0 \\ 0 & (x_3 - x_2) & 0 & (x_1 - x_3) & 0 & (x_2 - x_3) \\ (x_3 - x_2) & (y_3 - y_2) & (x_1 - x_3) & (y_3 - y_1) & (x_2 - x_3) & (y_1 - y_2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix}\tag{5.20}$$

Uma vez obtidas as deformações  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  e  $\gamma_{xy}$  pode-se obter as deformações nas direções principais conforme ilustra a Figura 5.26 e as expressões (5.18) a (5.20):



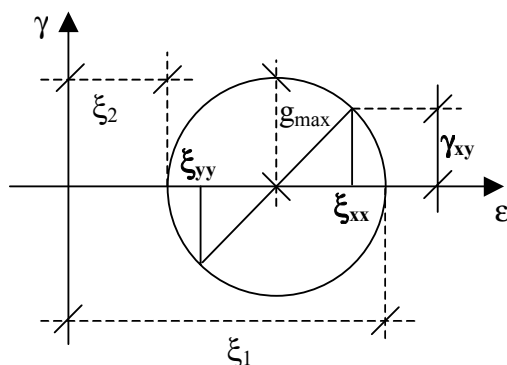


Figura 5.26 – Círculo de Mohr para as direções principais de deformação.

$$g_{\max} = \sqrt{\frac{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2}{4} + \gamma_{xy}^2} \quad (5.21)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} + g_{\max} \quad (5.22)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} - g_{\max} \quad (5.23)$$

Figura 5.27 – Mudança de base para descontar deslocamentos de corpo rígido.

Podem portanto ser visualizadas as seguintes deformações:

- $\varepsilon_{xx}$ : campo de deformações no eixo x;
- $\varepsilon_{yy}$ : campo de deformações no eixo y;
- $\gamma_{xy}$ : campo de distorções no plano xy;
- $\varepsilon_1$ : direção principal máxima de deformação;
- $\varepsilon_2$ : direção principal mínima de deformação;
- $g_{\max}$ : distorção máxima.

Além disso é possível também visualizar o campo das direções de deformação mínima e máxima do bloco transformado.

A visualização das deformações nodais é feita através de mapas de cores, na realidade são iso-faixas. Para tal lançou-se mão de uma biblioteca, *Contour2D* [41] que implementa um algoritmo para a definição de iso-faixas e iso-linhas com base nos valores associados a malhas de uma forma geral. Cada iso-faixa, representa uma faixa de intensidade de deformação.

Concluindo, independentemente do procedimento adotado para se fazer as transformações no *Recon*, é possível obter o mapa de deformações das seções.

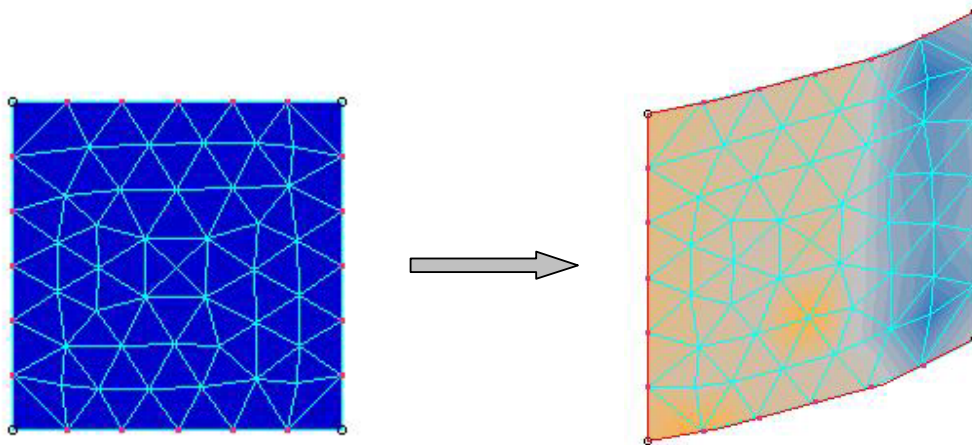


Figura 5.27 – *Recon*: Mapa de cores ilustrando as deformações.

### 5.4.3. Organização das Classes

Com a incorporação de um programa de análise o sistema *Recon* passa a apresentar uma outra categoria de transformações, desta feita associadas a um módulo de análise e não a algoritmos puramente geométricos. No caso das transformações geométricas o procedimento para se aplicá-las é mais simples após a montagem da matriz que rege a transformação, sendo bastante percorrer os vértices e arestas do módulo e obter as suas novas coordenadas através do produto entre os vértices topológicos e não topológicos e a matriz correspondente a transformação corrente. Conforme pôde ser observado na Seção 5.4.2, o mesmo não ocorre com transformações obtidas por métodos numéricos, como o método dos elementos finitos, por exemplo, já que esses algoritmos retornam uma nova

geometria para a malha. Daí a necessidade de se implementar o mapeamento entre malha e modelo anteriormente descrito.

No Capítulo 3 foi descrita a hierarquia de classes que gerenciam as transformações geométricas originais do sistema *Recon*. Para se incorporar esta nova filosofia de transformações foi alterada a hierarquia dessas classes conforme pode-se observar na Figura 5.29.

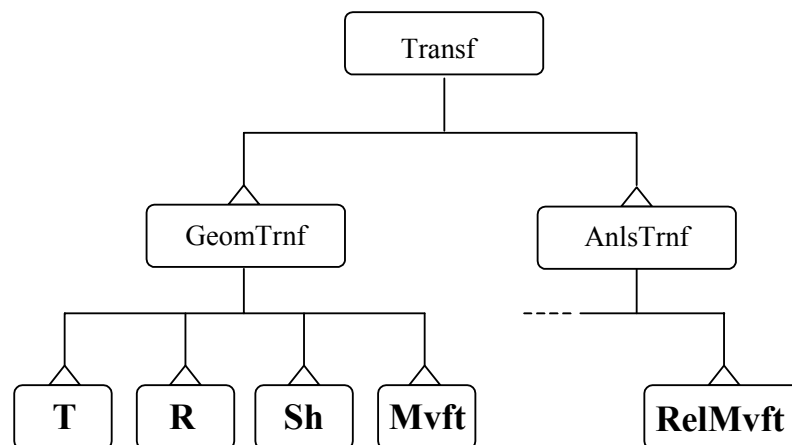


Figura 5.29 – *Recon*: Hierarquia das classes de transformações.

A superclasse *Transf* passou a ser mais genérica e agora é uma classe base para as classes *GeomTrnf* (classe base para as transformações geométricas) e *AnlsTrnf* (classe básica para as transformações providas por métodos numéricos).

Das classes *GeomTrnf* e *AnlsTrnf* é que são derivadas as classes que efetivamente implementam as transformações presentes no *Recon*. Assim a superclasse *Transf* apresenta os métodos comuns a todas as transformações e as suas subclasses servem de base para os dois tipos genéricos de transformações que o sistema passou a dispor.

A principal vantagem que se obtém com essa disciplina de programação orientada a objetos expressa na hierarquia de classes acima apresentada está na facilidade de se incorporar futuramente ao sistema outros tipos de análises numéricas, bastando para isso criar uma nova classe, derivada de *AnlsTrnf*

A Figura 5.30 resume a construção da classe *AnlsTrnf*. As classes derivadas de *AnlsTrnf* herdam todos os seus métodos e atributos, como é o caso da subclasse *RelMvft*, que implementa os métodos responsáveis pela simulação da movimentação de um bloco sobre uma falha lítrica utilizando-se um algoritmo de relaxação dinâmica acoplado ao método dos elementos finitos. Às classes derivadas ainda é permitida a criação de novos métodos e atributos peculiares a uma determinada análise.

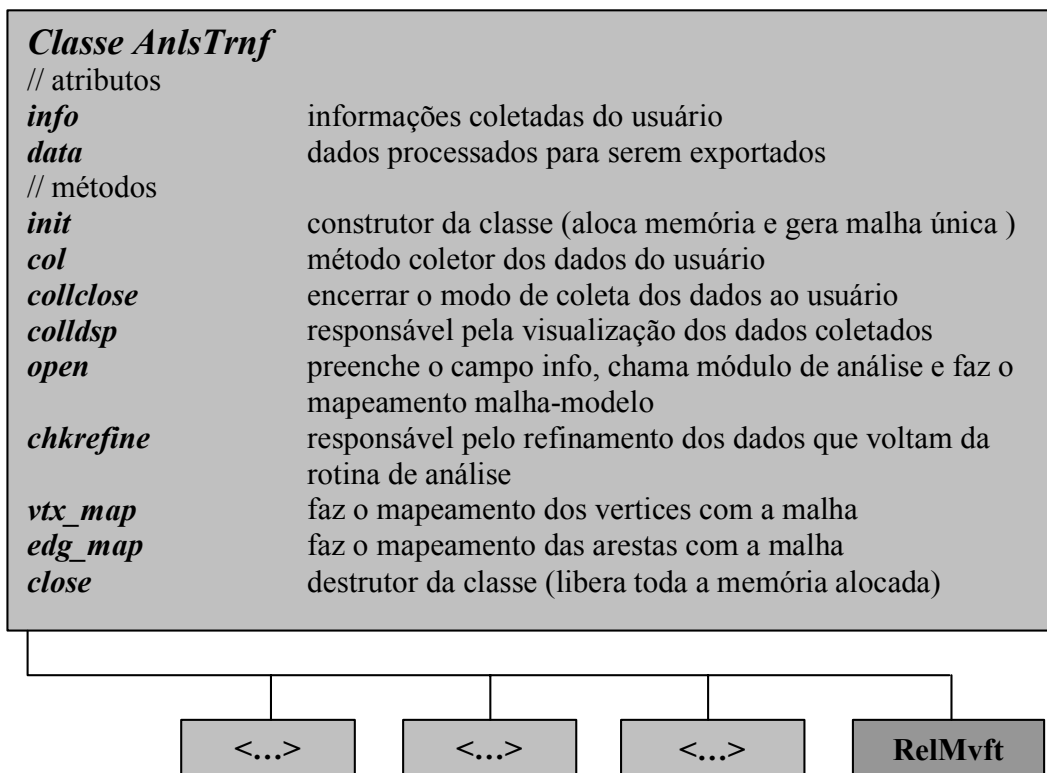


Figura 5.30 – Recon: Definição da classe *AnlsTrnf*.

O atributo *info* armazena as informações coletadas do usuário necessárias para definir o processamento como por exemplo a falha que definirá as restrições ao deslocamento e as poligonais que definem as geometrias origem e destino. O atributo *data* por sua vez armazena os dados processados pelo método *open*. Este método chama as rotinas que calculam a malha unificada, o campo de deslocamentos prescritos e monta todo o mapeamento que será utilizado além de efetivamente gerar o arquivo neutro e chamar as funções da biblioteca *Relax* para rodar o programa de análise. Existem métodos

responsáveis para checar e refazer a consistência topológica do modelo após a transformação. Os métodos *vtx\_map* e *edg\_map* são os métodos que consultam o mapeamento e obtém as novas coordenadas do modelo baseada na nova geometria da malha retornada pelo *Relax*.

#### **5.4.4. Comunicação Entre o Recon e o Relax**

Com todas as mudanças acima descritas no sistema *Recon*, que passou a exportar um arquivo no formato de leitura do programa de análise é possível transformar o *Recon* e o *Relax* em um único sistema. Para isso, o programa de análise foi incorporado ao sistema *Recon* como uma biblioteca com funções que são executadas de dentro do *Recon*. Os sistema se comunica com a biblioteca via arquivo texto simplesmente para não sobrecarregar a memória RAM da máquina que estiver executando o sistema.

Os resultados da análise feita pelo *Relax* são lidos pelo *Recon*, novamente por intermédio de um arquivo texto, sendo a seguir pós-processados conforme já foi explicado.

Resumindo todo o processo, temos que após a subdivisão das arestas e a geração da malha, é feito o pré-processamento do modelo e exportado o arquivo neutro para o *Relax*, que, após atingir a sua configuração de equilíbrio, fornece uma nova geometria para a malha unificada do módulo. Já com a nova malha, são feitas as consultas ao mapeamento definido ainda no pré-processamento, quando é obtida a nova geometria da lista de faces que compõe o módulo de trabalho. Os resultados provenientes do programa de análise são então guardadas na estrutura de dados do sistema que passa a disponibilizar o mapa de cores com as deformações do módulo, bem como as barras com as direções dessas deformações.

# 6

---

## Exemplos

### 6.1. Introdução

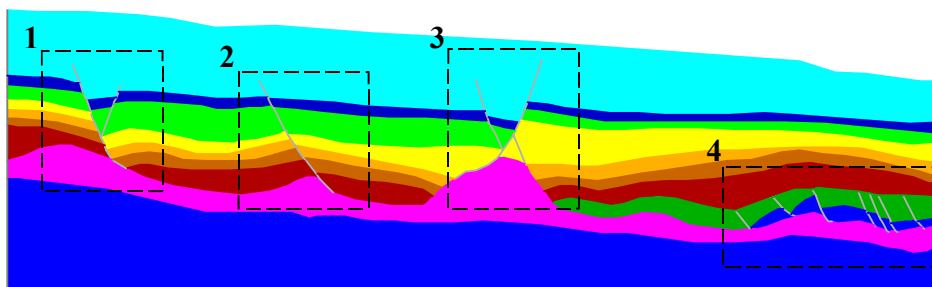
O presente capítulo apresenta alguns exemplos de utilização do sistema integrado, descrito detalhadamente no Capítulo 5. Inicialmente é apresentado um exemplo de balanceamento completo de uma seção geológica que apresenta uma camada de sal. A seção inicial constituiu perfil original interpretado, ao norte do Campo de Albacora, porção da lâmina d'água profunda da Bacia de Campos. O balanceamento dessa seção foi feito por Rostirola et al [48].

O segundo exemplo representa uma seção fictícia, onde são feitas comparações entre os algoritmos geométrico e baseado em modelagem física. Inicialmente são ilustradas as principais etapas necessárias para a exportação dos dados fornecidos ao programa de análise. Após o pré-processamento do modelo, no *Recon*, é gerado o arquivo neutro, que o programa *Relax* interpreta e em seguida executa o algoritmo de Relaxação Dinâmica. Finalmente pode ser visualizada a geometria do bloco obtida pelo programa de análise, bem como o mapa de cores, representando o campo de deformações nas suas direções principais.

O último exemplo apresenta uma parte do balanceamento da Bacia de Parecis. Nessa seção é destacada uma das operações de movimentação de um bloco sobre uma falha lítrica. Essa transformação específica é realizada inicialmente pelo algoritmo geométrico original do Sistema Recon e em seguida a mesma transformação é executada utilizando-se a nova abordagem proposta neste trabalho, ou seja, utilizando-se o algoritmo de Relaxação Dinâmica.

## 6.2. Perfil ao Norte do Campo de Albacora

Na seção interpretada da Figura 6.1 podem ser observados 4 sistemas de falhas lítricas e os seus domos de sal associados, representados pela camada de cor magenta. Os 3 sistemas de falhas situados à esquerda (sistemas 1, 2 e 3) afetam todas as camadas acima da camada de sal, com múltiplas fases de atividades tectônica e sedimentação.



*Figura 6.1 – Seção original interpretada ao norte de Albacora.*

A Figura 6.2 apresenta a mesma seção ilustrada na Figura 6.1, porém carregada pelo Sistema Recon. Observa-se na interface a o gerenciador de balanceamento, representado pela árvore de visualização à esquerda da área de visualização e, mais abaixo, a tabela que contém o histórico de variação de área do sal ao longo do balanceamento. A seção original apresenta uma área de sal com aproximadamente 19 Km<sup>2</sup>.

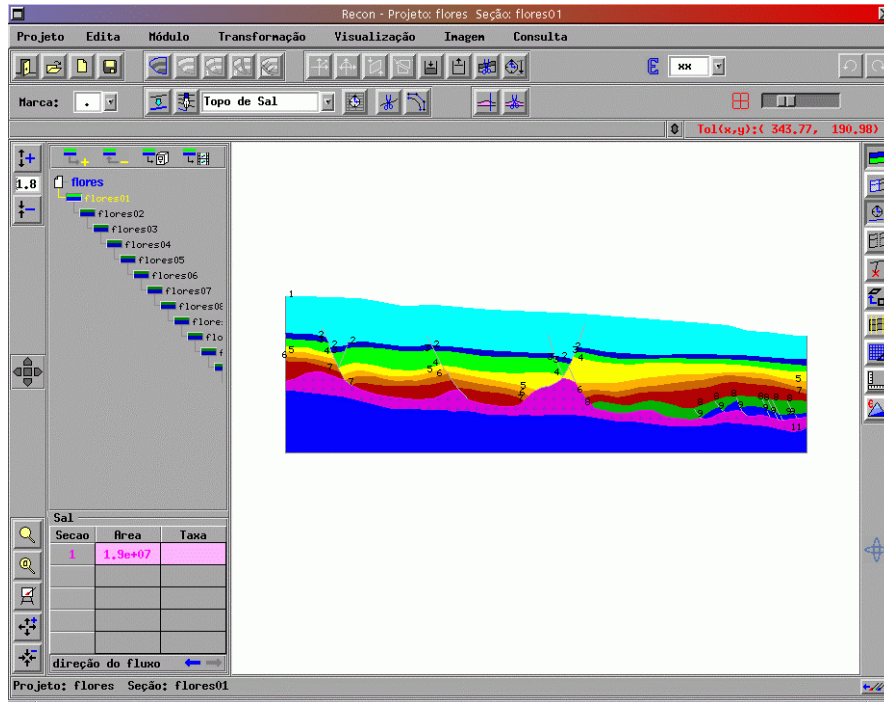


Figura 6.2 – Sistema Recon com a seção interpretada ao norte de Albacora.

Na sequência são apresentadas as etapas de balanceamento refeitas de forma idêntica à metodologia utilizada por Rostirola, porém, utilizando-se dos novos recursos implementados e descritos na Seção 3.9.

De uma forma resumida pode-se dizer que, basicamente, as operações realizadas nessa modelagem foram translação, rotação e cisalhamento simples. A ideia básica principal consiste em retrodeformar as camadas pós-evaporito (acima do sal) e, em seguida, acomodar a camada de sal nos vazios gerados. Inicialmente foi removida a camada superior, descompactando as camadas abaixo.

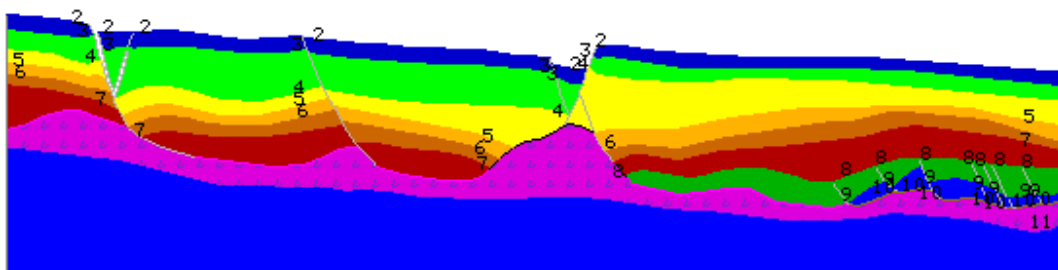
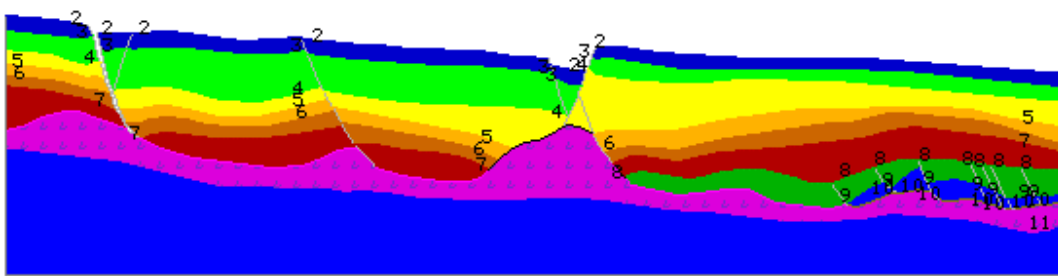


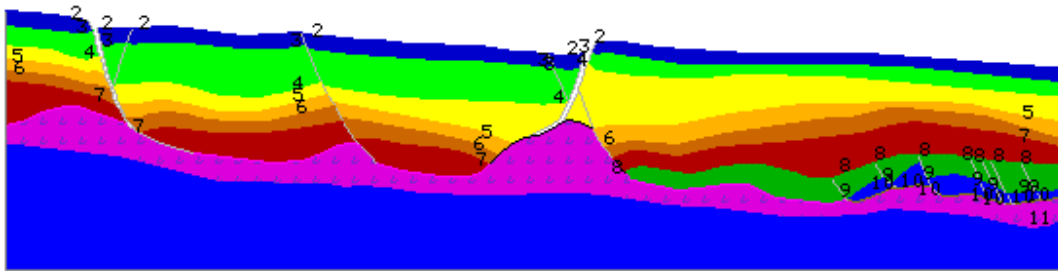
Figura 6.3 – Balanceamento do Campo de Albacora: Etapa 2.



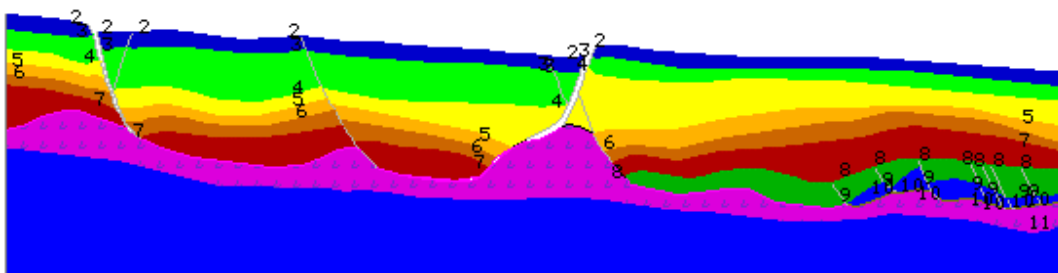
Na seqüência a camada 2 foi reconstituída provocando novos vazios que foram acomodados pela camada de sal, sendo em seguida retirada, gerando nova descompactação. O processo foi repetido até que nas etapas finais foram restauradas as duas primeiras camadas depositadas acima do sal (camadas 8 e 9). A camada 9, que sofreu a deformação pós-evaporítica inicial, contém um maior número de falhas (sistema de falhas 4 da Figura 6.1) e foi restaurada por processos de cisalhamento vertical e translação. Posteriormente o sal é novamente acomodado nos vazios gerados.



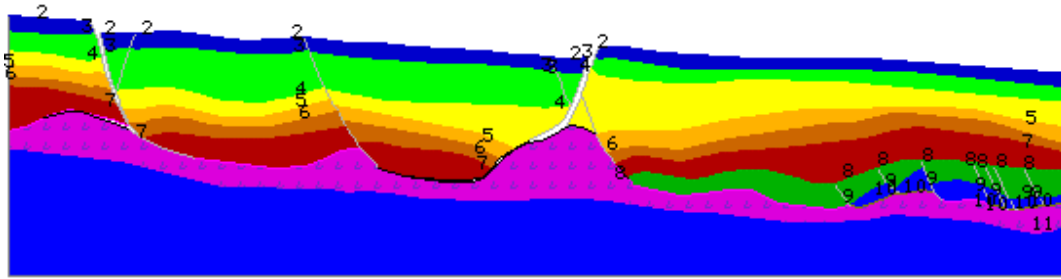
*Figura 6.4 –Albacora: Etapa 3 do balanceamento.*



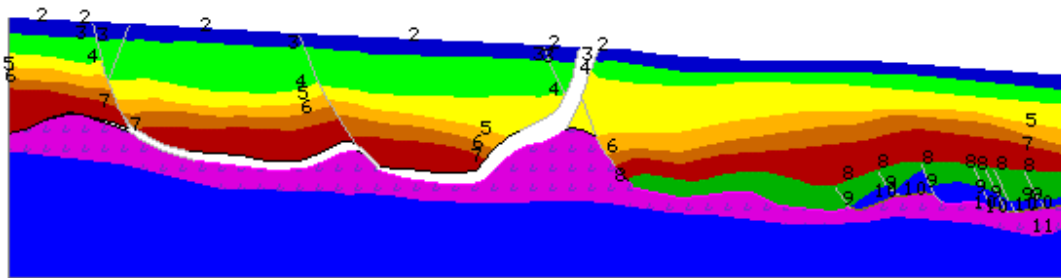
*Figura 6.5 –Albacora: Etapa 4 do balanceamento.*



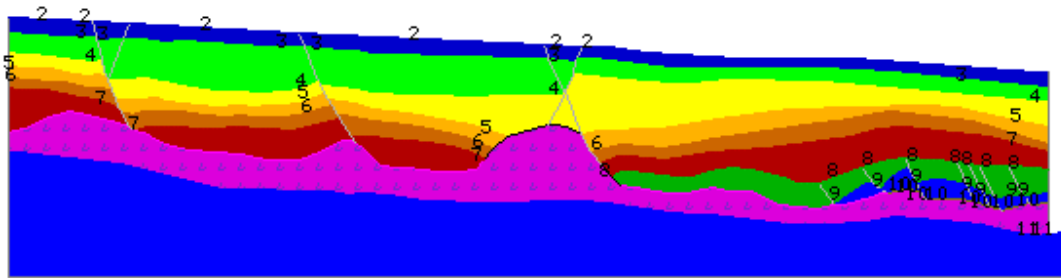
*Figura 6.6 –Albacora: Etapa 6 do balanceamento.*



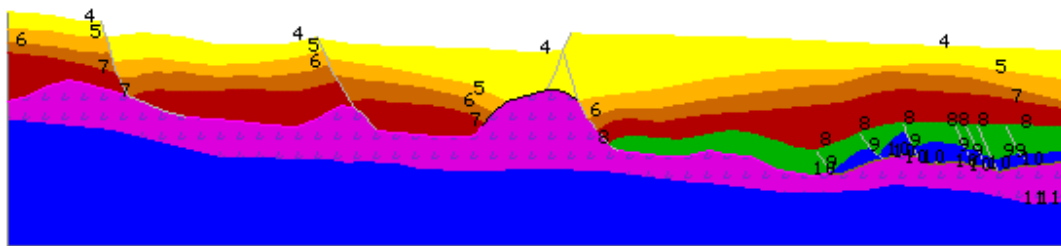
*Figura 6.7 –Albacora: Etapa 8 do balanceamento.*



*Figura 6.8 –Albacora: Etapa 12 do balanceamento.*



*Figura 6.9 –Albacora: Etapa 15 do balanceamento.*



*Figura 6.10 –Albacora: Etapa 16 do balanceamento.*

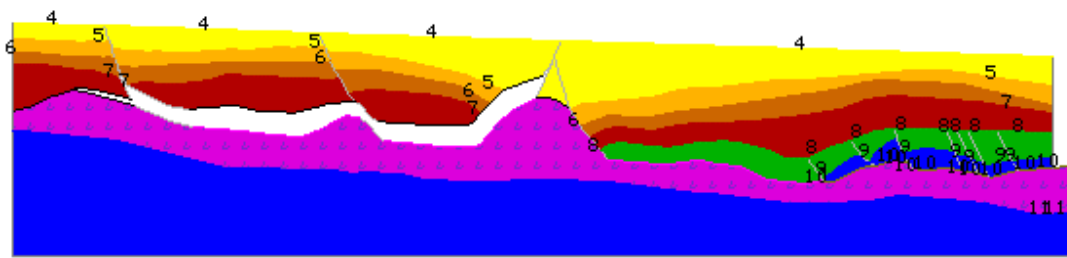


Figura 6.11 –Albacora: Etapa 17 do balanceamento.

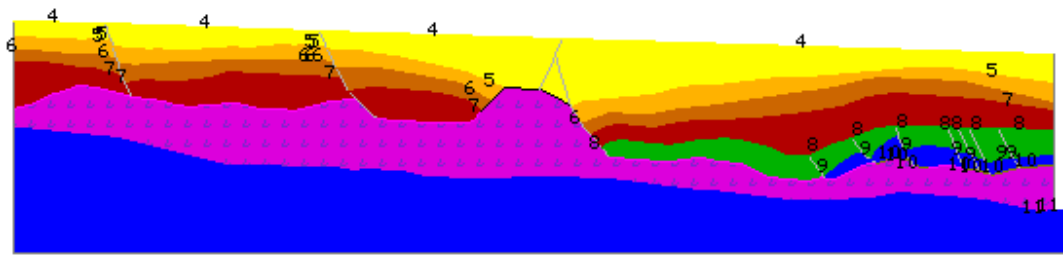


Figura 6.12 –Albacora: Etapa 18 do balanceamento.

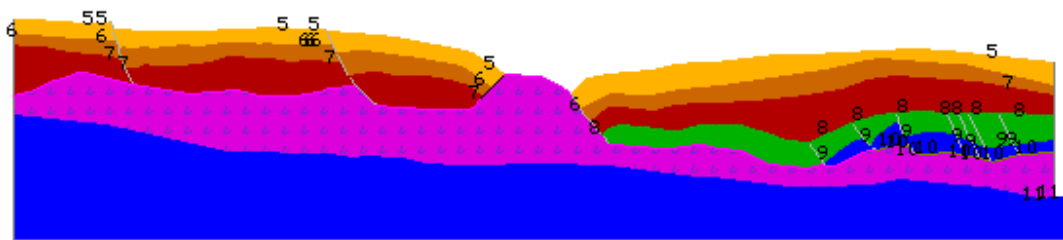


Figura 6.13 –Albacora: Etapa 21 do balanceamento.

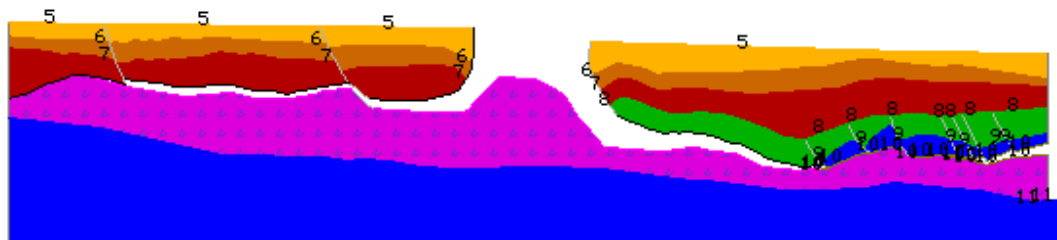


Figura 6.14 –Albacora: Etapa 22 do balanceamento.

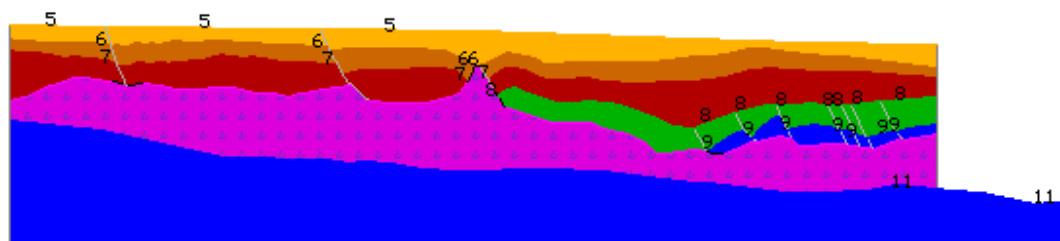


Figura 6.15 –Albacora: Etapa 23 do balanceamento.

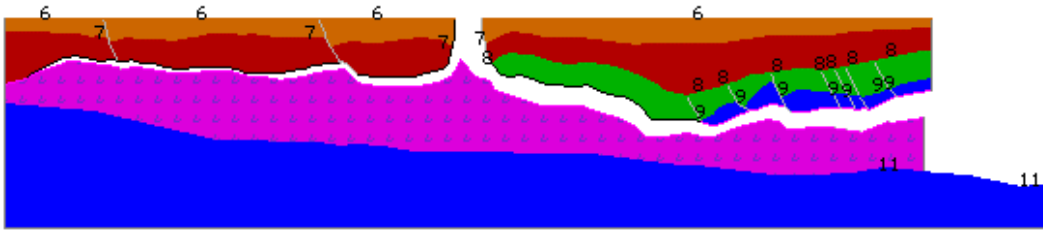


Figura 6.16 –Albacora: Etapa 26 do balanceamento.

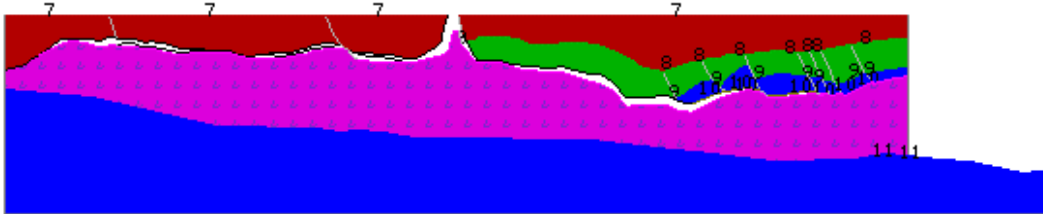


Figura 6.17 –Albacora: Etapa 28 do balanceamento.

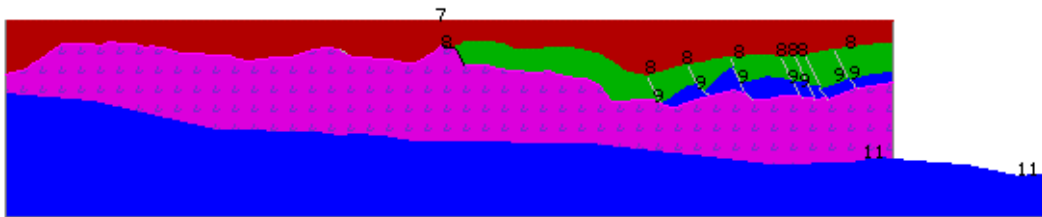


Figura 6.18 –Albacora: Etapa 32 do balanceamento.



Figura 6.19 –Albacora: Etapa 34 do balanceamento.



Figura 6.20 –Albacora: Etapa 39 do balanceamento.

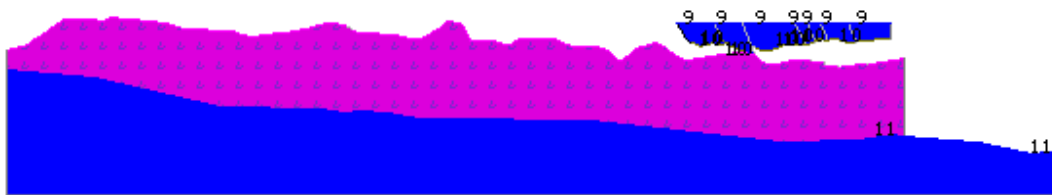


Figura 6.21 –Albacora: Etapa 41 do balanceamento.



Figura 6.22 –Albacora: Etapa 42 do balanceamento.



Figura 6.23 –Albacora: Etapa 43 do balanceamento.

Sal		
Secao	Area	Taxa
43	2.9e+07	48.39
42	4.4e+07	129.73
40	4.2e+07	119.40
41	4.2e+07	119.40
39	4.2e+07	119.40
direção do fluxo		← →

Figura 6.24 – Histórico da area do sal no balanceamento entre as etapas 39 e 43.

A Figura 6.24 mostra o histórico da variação da área do sal em relação à seção interpretada. A seção original apresenta 19 Km<sup>2</sup>, enquanto que a seção balanceada

apresenta aproximadamente 28,5 Km<sup>2</sup>. Em tais circunstâncias, a seção balanceada apresentou um acréscimo de sal de aproximadamente 48% com relação a seção deformada.

Ao fim do balanceamento foi possível observar que o movimento do sal sucedeu em parte pela distensão das camadas superiores, mas fundamentalmente em função da sobrecarga sedimentar das camadas superiores.

### ***6.3. Exemplo de Utilização do Sistema Integrado***

A seção utilizada para ilustrar o funcionamento do sistema integrado é fictícia. A idéia deste exemplo é mostrar o bloco deslizando sobre uma falha que apresenta um grande número de tramos e uma curvatura bastante acentuada, o que permite testar o algoritmo principalmente com relação à sua convergência.

A seguir são apresentados os passos necessários para efetuar uma análise no sistema de balanceamento integrado, desde a subdivisão das arestas (Figuras 6.25 e 6.26), geração da malha (Figuras 6.27 e 6.28), o pré-processamento (Figuras 6.29 e 6.30), até a chamada do programa de análise, (Figura 6.31) sua execução e a obtenção da nova geometria (Figuras 6.32 e 6.33). As análises efetuadas nesse exemplo apresentaram deslocamentos prescritos apenas no nó 19 (Figura 6.30), isto é no nó que pertence ao bordo superior e a falha. No primeiro exemplo (nó *fiction2* da árvore) adotou-se o valor de  $\nu$  igual a 0,49 e no segundo o valor de  $\nu$  igual a 0,25.

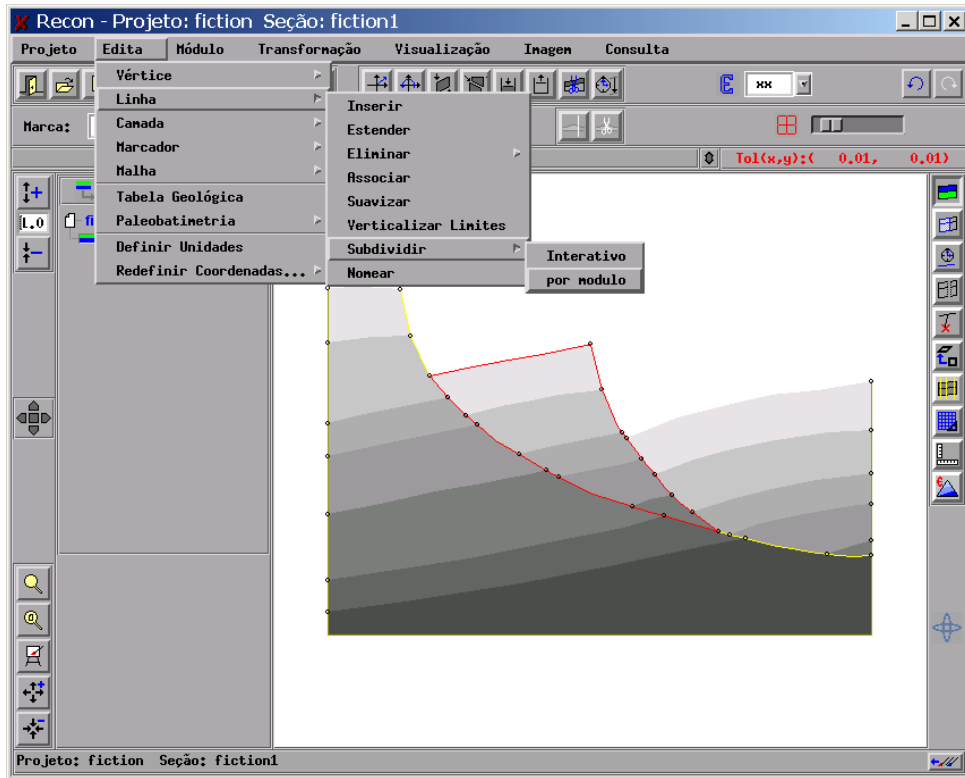


Figura 6.25 – Sistema integrado – subdividindo as arestas do módulo.

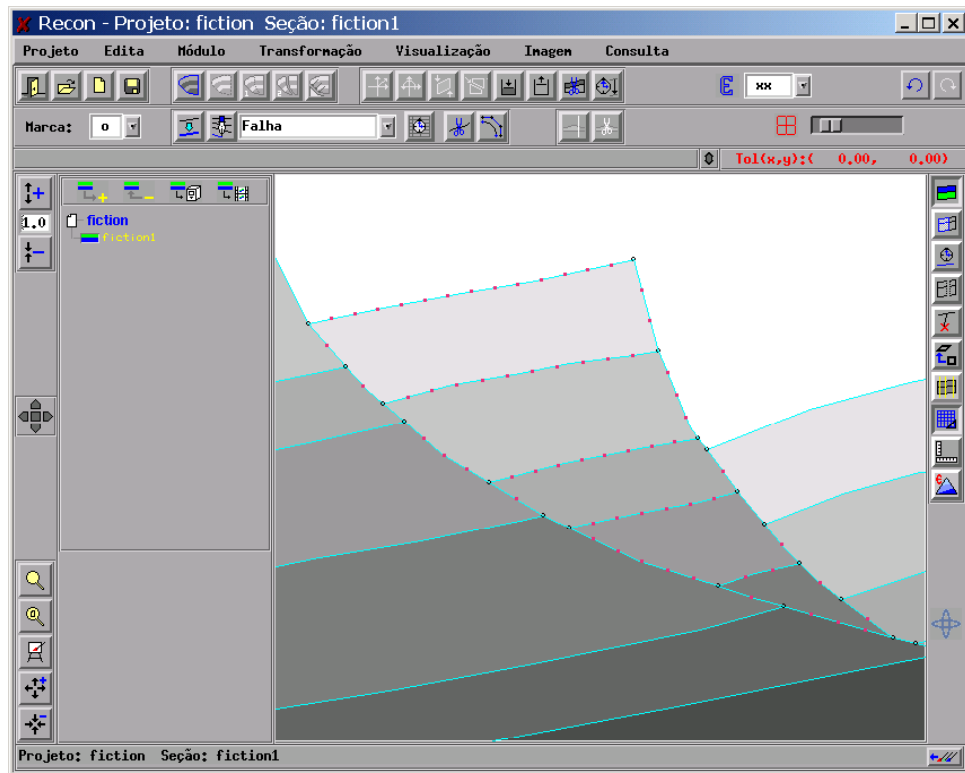


Figura 6.26 – Sistema integrado: Arestas subdivididas.

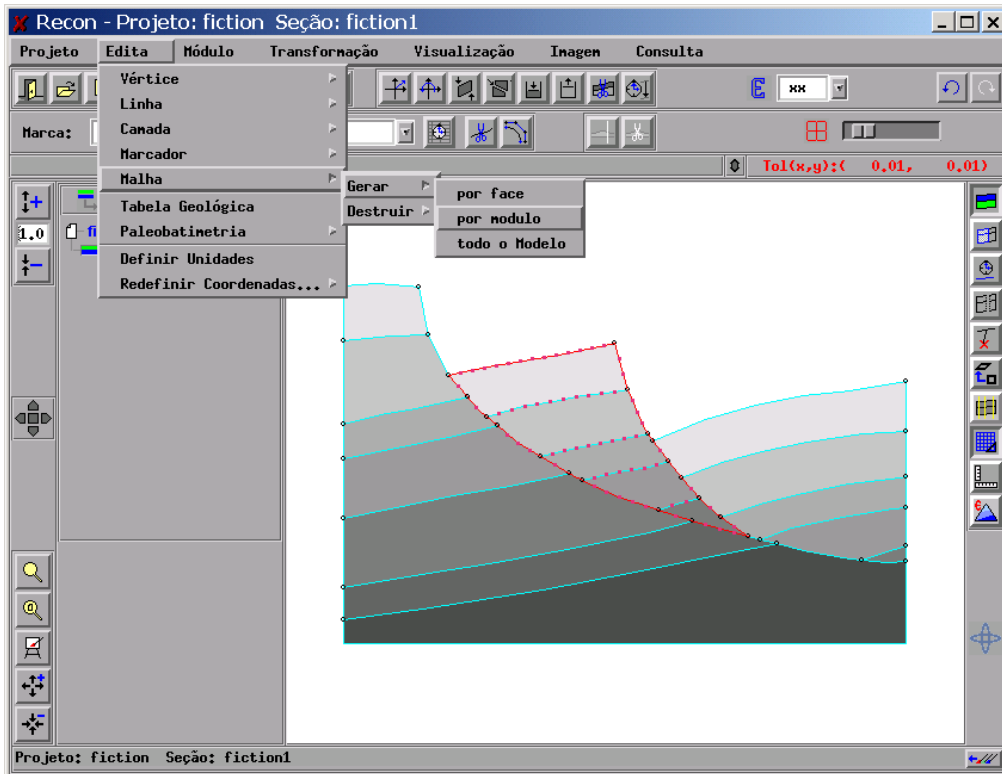


Figura 6.27 – Sistema integrado: Gerando a malha por módulo.

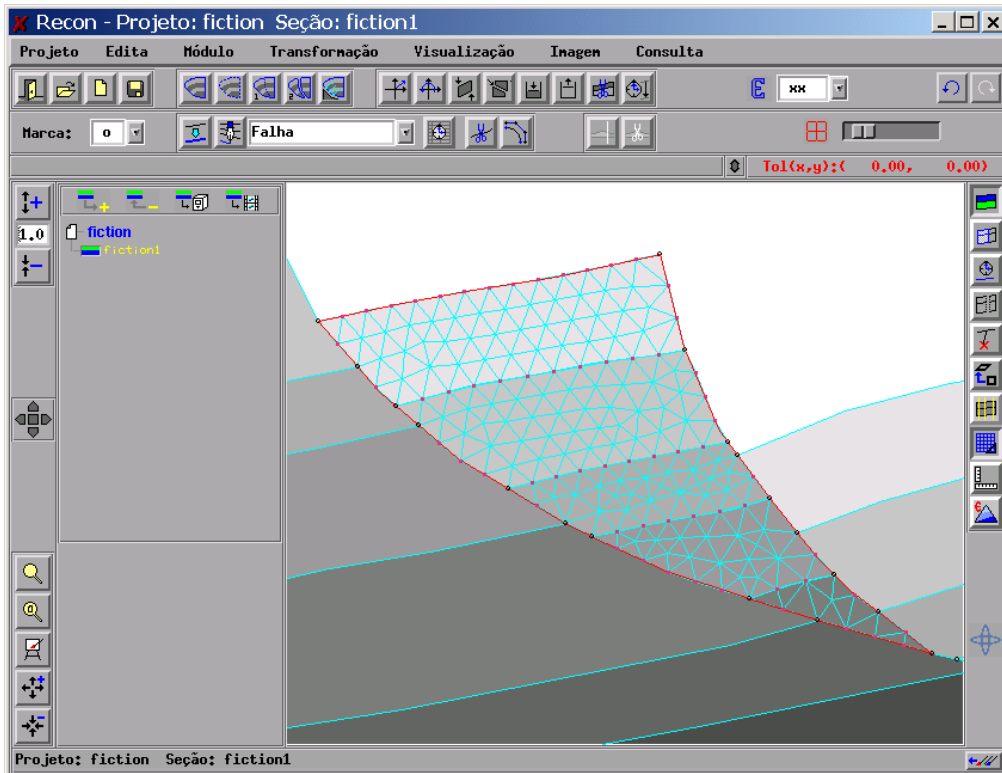


Figura 6.28 – Sistema integrado: Malha de elementos finitos gerada.





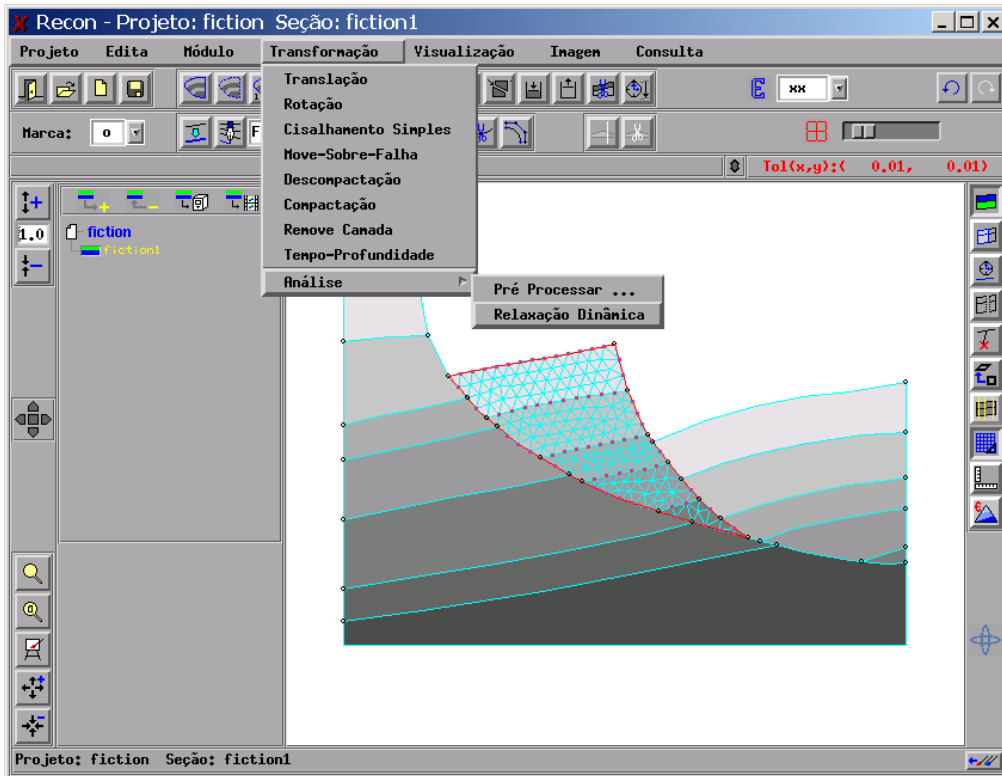


Figura 6.31 – Sistema integrado : Chamando o programa de análise.

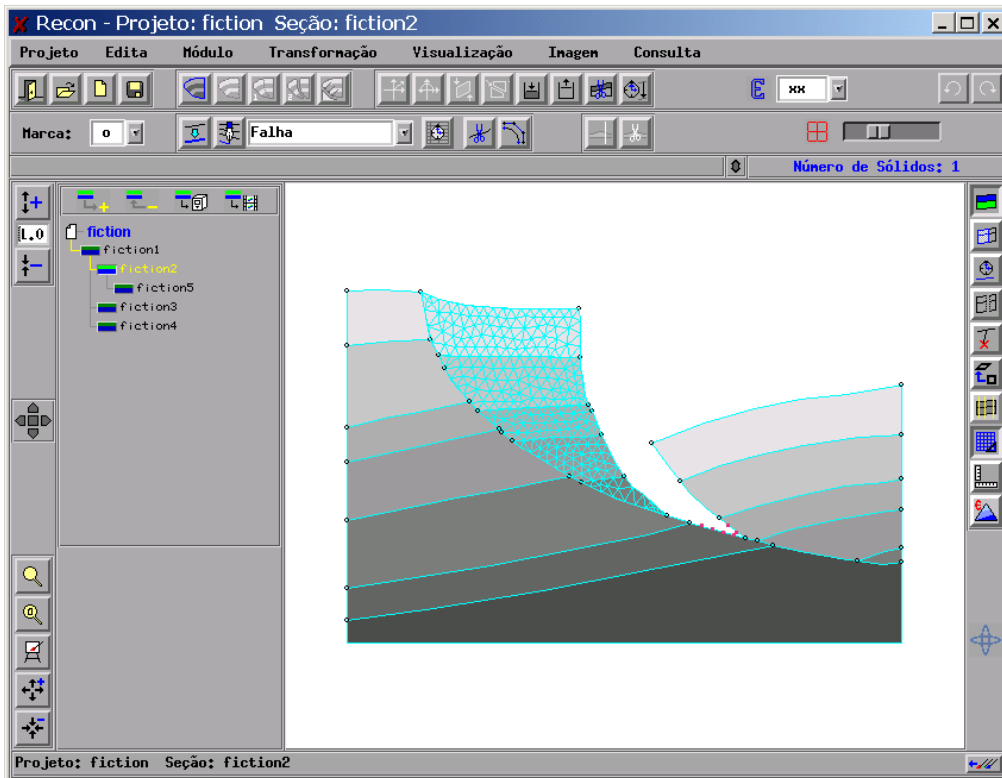


Figura 6.32 – Sistema integrado: Nova geometria ( $v = 0,49$ ).

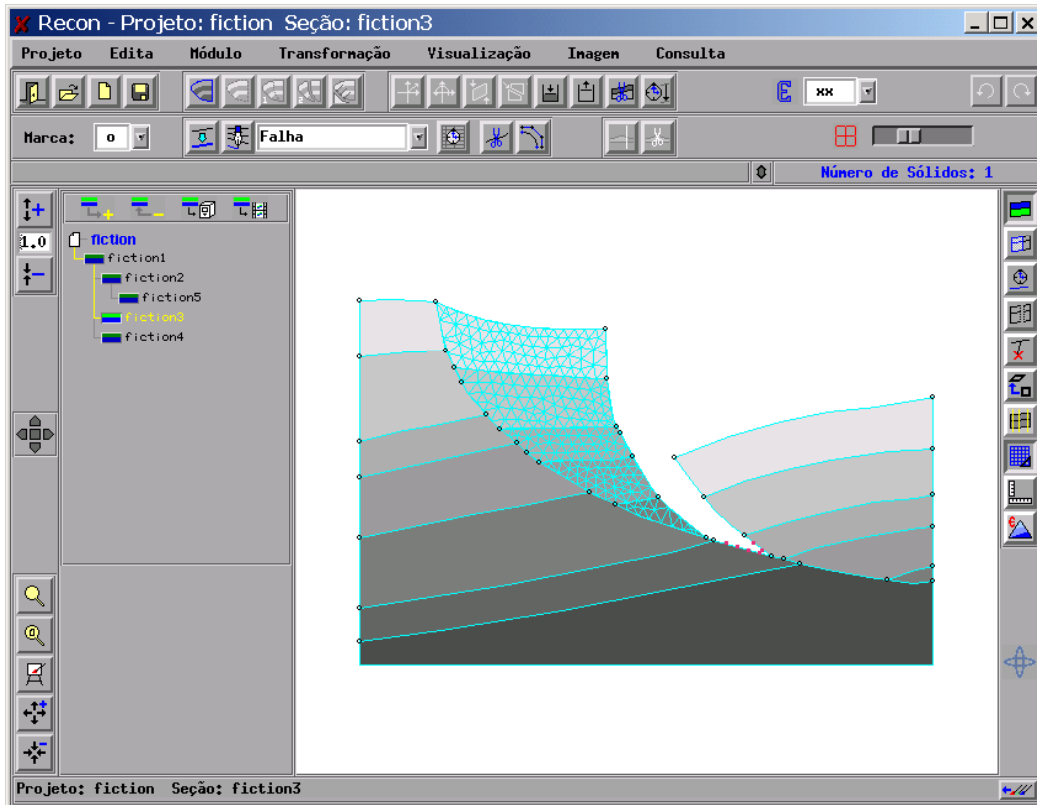


Figura 6.33 – Sistema integrado: Nova geometria ( $v = 0,25$ ).

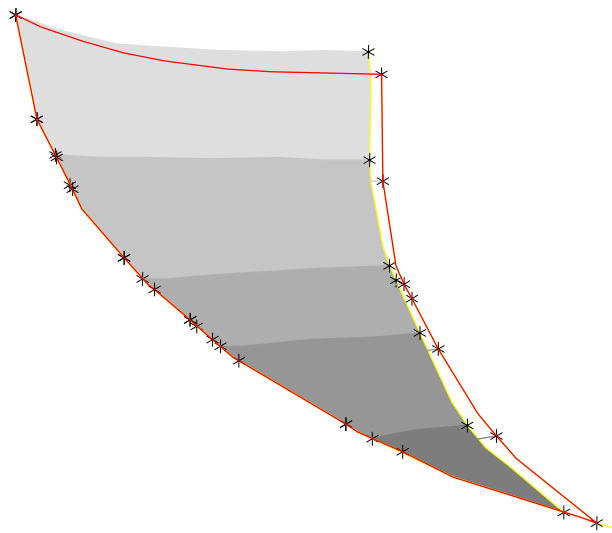


Figura 6.34 – Comparação entre os dois resultados obtidos.

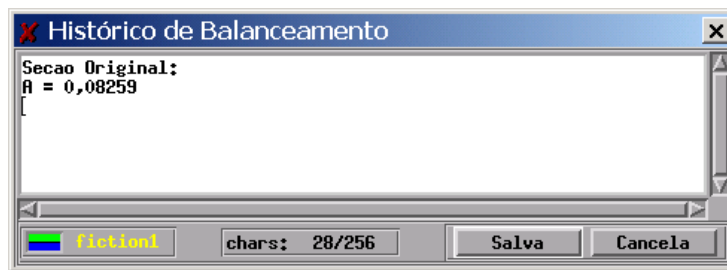


Figura 6.35 – Histórico de balanceamento: Seção original.

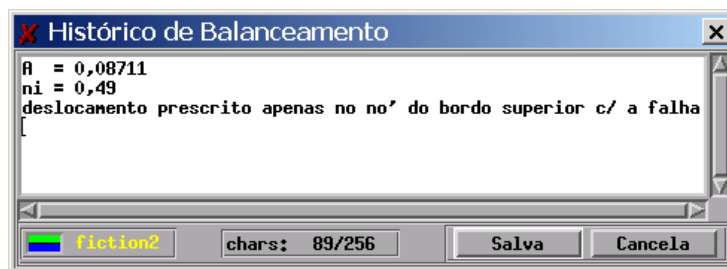


Figura 6.36 – Histórico de balanceamento: Nó fiction2.

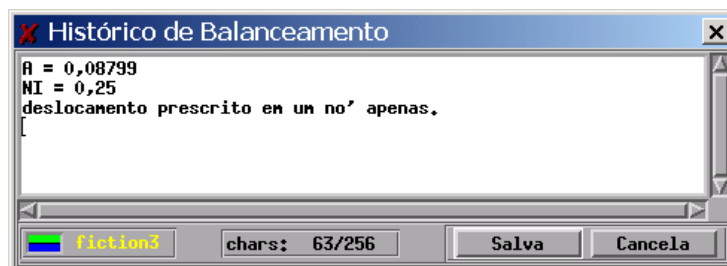


Figura 6.37 – Histórico de balanceamento: Nó fiction3.

A Figura 6.34 ilustra a diferença entre as geometrias dos blocos deformados nos dois exemplos. O bloco que apresenta as camadas pintadas em tons de cinza representa o resultado da análise com  $\nu$  igual a 0,49, enquanto que o bloco com fronteira em vermelho para  $\nu$  igual a 0,25. A diferença entre as duas geometrias pode ser explicada em função da rigidez maior que o sistema apresenta no primeiro caso. É possível observar que a curvatura do bordo superior para *fiction3* é maior do que a de *fiction2*, o que sugere o comentário acima. O mesmo comentário explica ainda o fato da deformação lateral apresentar-se maior para *fiction3*. Para valores de  $\nu$  superiores a 0,49 não foi possível obter convergência.

As figuras 6.35, 6.36 e 6.37 apresentam os históricos referentes aos nós da árvore *fiction1*, *fiction2* e *fiction3*, quando são apresentados os valores das áreas no bloco original e nos deformados, além dos valores de  $v$  para cada uma das análises.

Na análise *fiction2* foram registradas 188 trocas de tramo por parte dos nós que se deslocam sobre a falha, enquanto que na *fiction3* foram registradas 168 trocas de tramo. A diferença se deve ao fato do algoritmo de Relaxação Dinâmica oscilar durante a busca do equilíbrio do bloco. É comum observar um nó subindo de um tramo para um outro mais acima em uma iteração e na seguinte retornar para o tramo onde estava anteriormente. Na realidade, para cada troca de tramo, novas forças desequilibradas são introduzidas no sistema e, por conseguinte, a convergência do algoritmo pode ficar comprometida.

Um gráfico que pode representar de forma esquemática a busca do algoritmo de Relaxação Dinâmica até atingir o equilíbrio, em casos cuja condição de contorno é similar ao do exemplo discutido (bloco deslizando sobre uma falha lítrica) pode ser observado na Figura 6.38.

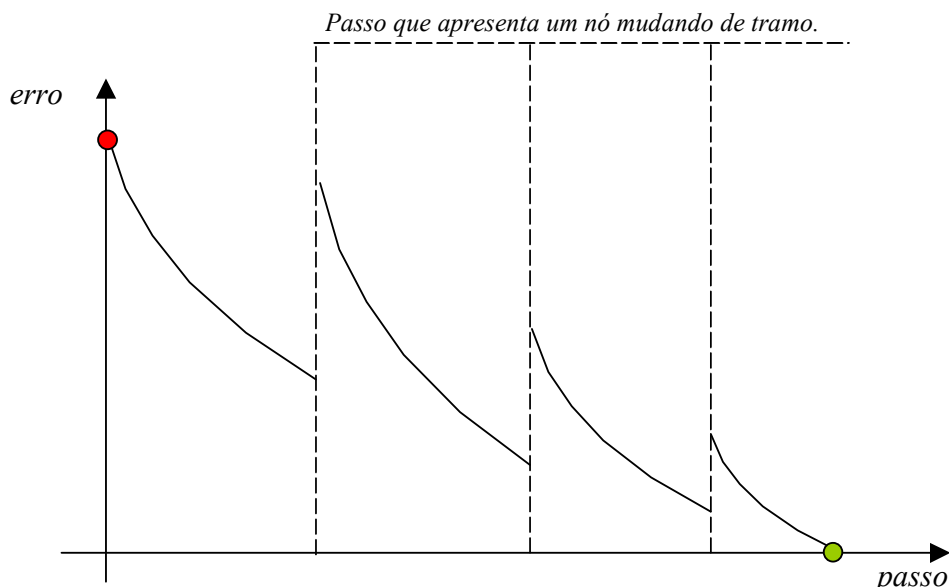
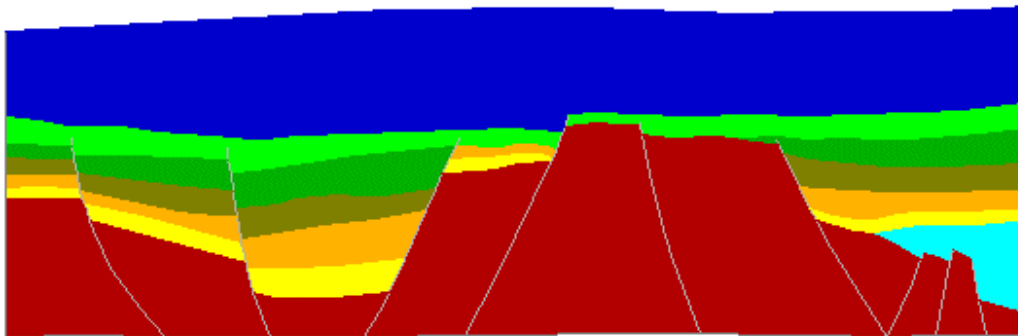


Figura 6.38 – Relax - Gráfico de Convergência.

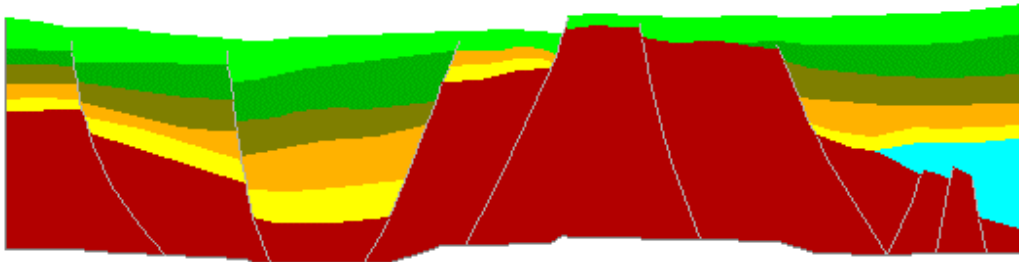
No gráfico que relaciona o erro para os passos envolvidos em uma análise, as linhas pontilhadas representam os passos nos quais ocorreu mudança de tramo em algum nó. Isso introduz um acréscimo das forças desequilibradas e compromete o tempo de convergência do algoritmo.

#### ***6.4. Campo de Parecis***

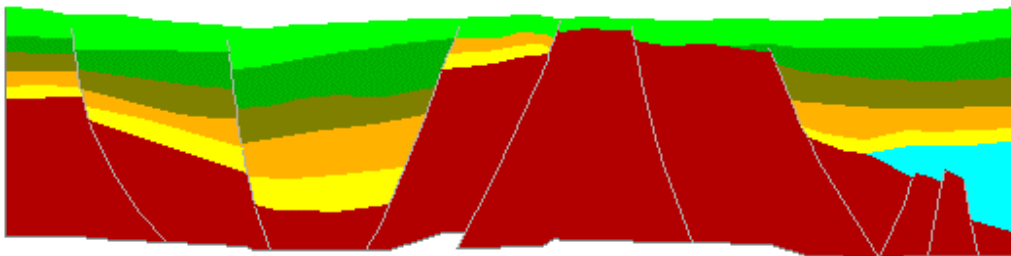
O último exemplo apresenta uma seção real, extraída da Bacia de Parecis, localizada na Região Centro-Oeste. Foi editada apenas uma parte da seção. Inicialmente descompactou-se as duas camadas superiores, conforme pode ser observado nas figuras 6.40 e 6.41. Na seqüência, também é descompactada a camada representada pela cor verde claro (Figuras 6.42 e 6.43). Nessa etapa do balanceamento editou-se os 3 blocos situados a esquerda da seção (Figuras 6.44 e 6.45) e, em seguida, realizou-se um move-sobre-falha utilizando-se o algoritmo de Relaxação Dinâmica (Figuras 6.46 e 6.47) e depois através da modelagem convencional. O resultado das diferentes geometrias pode ser visualizado na Figura 6.48.



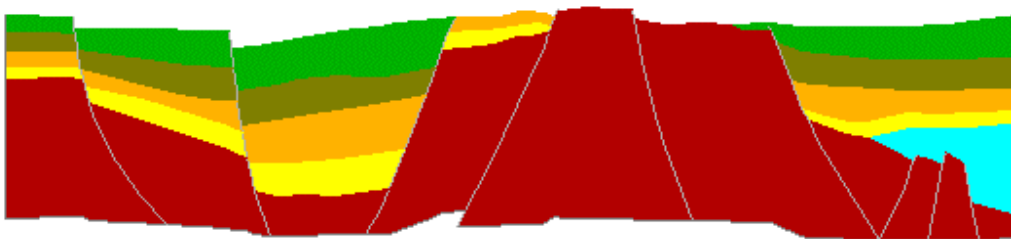
*Figura 6.40 – Campo de Parecis: Etapa 1.*



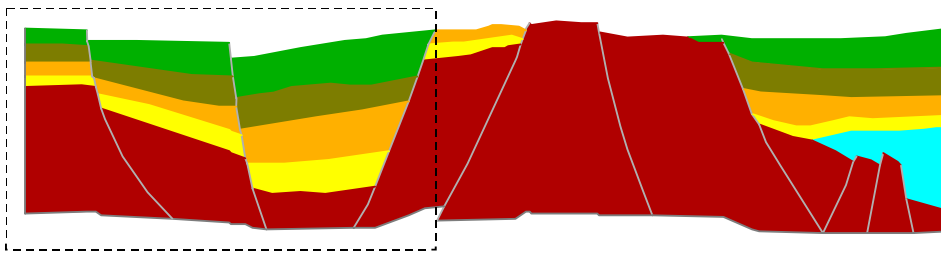
*Figura 6.41 – Campo de Parecis: Etapa 2.*



*Figura 6.42 – Campo de Parecis: Etapa 3.*



*Figura 6.43 – Campo de Parecis: Etapa 4.*



*Figura 6.44 – Campo de Parecis: Sistema de falhas em destaque.*

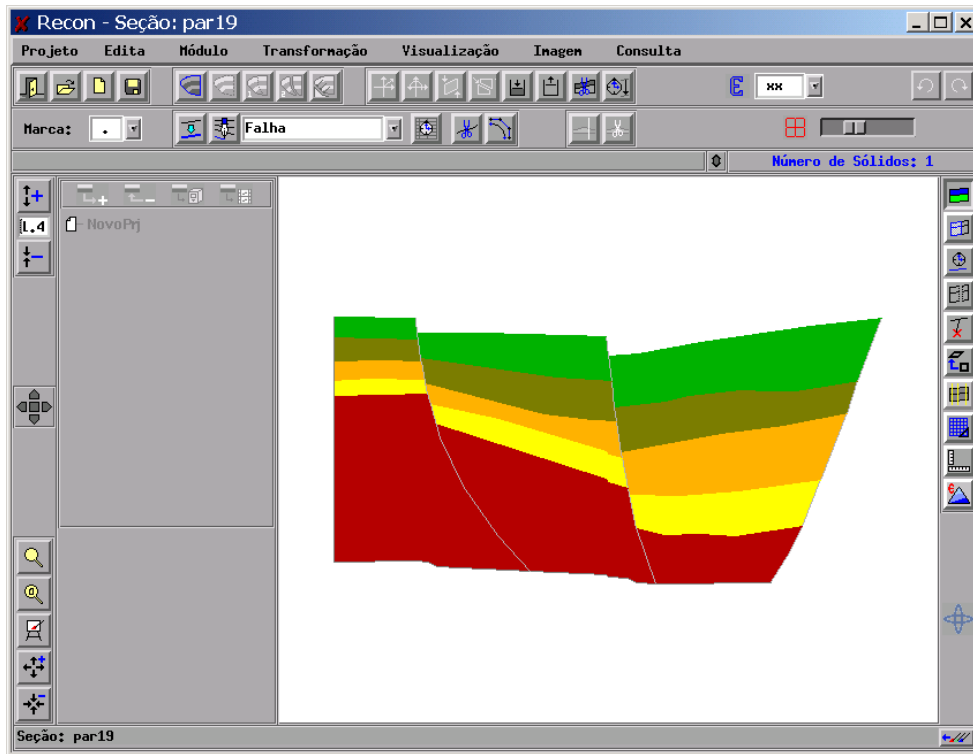


Figura 6.45 – Sistema Recon: Sistema de falhas em destaque.

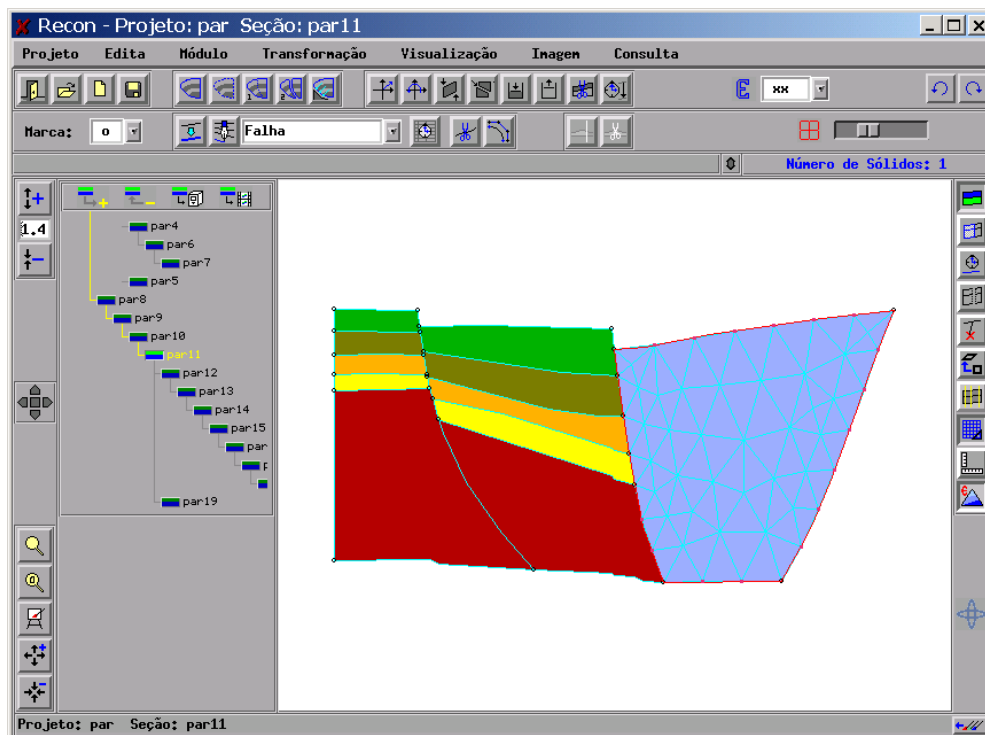
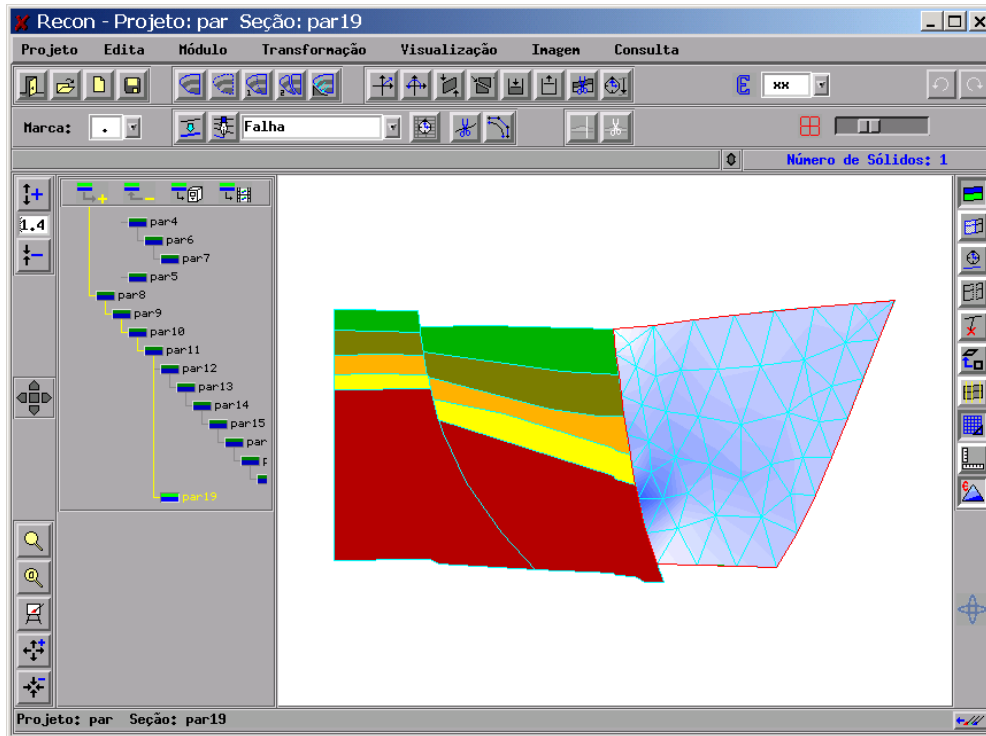
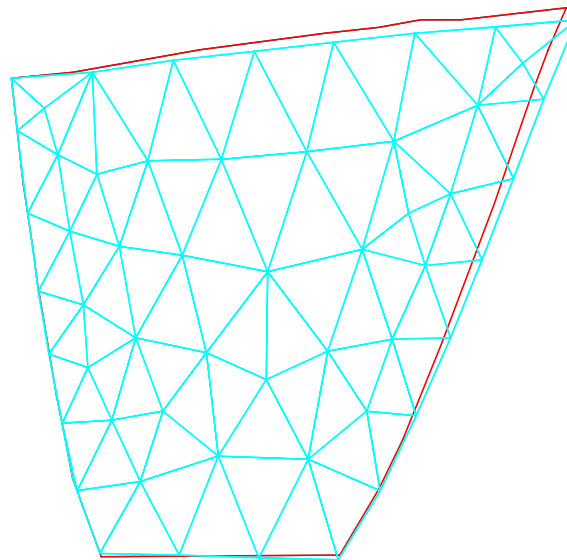


Figura 6.46 – Sistema Recon: Discretização do bloco à direita.





*Figura 6.47 – Sistema Recon: Resultado da análise.*



*Figura 6.48 – Comparação Entre o Algoritmo Geométrico e o Físico.*

Na Figura 6.48 observa-se em contorno vermelho a geometria do bloco obtida pelo move-sobre-falha convencional. Percebe-se através da Figura 6.48 que a transformação

realizada pelo algoritmo de Relaxação Dinâmica é menos rígida do que a realizada pela abordagem convencional. Adotou-se o valor máximo de  $\nu$  que garantia convergência do algoritmo de Relaxação Dinâmica ( $\nu = 0,49$ ) sem gerar deslocamentos espúrios. Neste exemplo a convergência foi obtida com menos de 1000 passos em função do perfil da falha apresentar um menor número de tramos, além de ângulações mais suaves. Prescrevendo-se apenas o deslocamento do nó do topo do módulo em contato com a falha, constatou-se que não foi possível obter comportamento mais rígido do bloco deformado pelo algoritmo de Relaxação Dinâmica do que o observado na figura 6.48 através da variação dos parâmetros relativos às propriedades do material.

Refez-se portanto a análise aplicando-se deslocamentos prescritos em todo o bordo superior e comparou-se os campos de deformação entre o algoritmo convencional e o algoritmo proposto.

A análise dos campos de deformações para o exemplo acima revelou que o move-sobre-falha convencional apresenta algumas inconsistências, conforme observado nas Figuras 6.49 e 6.50. A geometria da falha apresenta uma variação angular acentuada na região onde as deformações principais máximas apresentam valores maiores (iso-faixas em tons de vermelho). A Figura 6.49 apresenta o resultado da análise do move-sobre-falha proposto, enquanto que na Figura 6.50 são visualizados os valores referentes ao move-sobre-falha convencional, quando as deformações de caráter localizado na região da falha propagaram-se diagonalmente até o topo do bloco, enquanto que na modelagem física o mesmo não ocorreu.

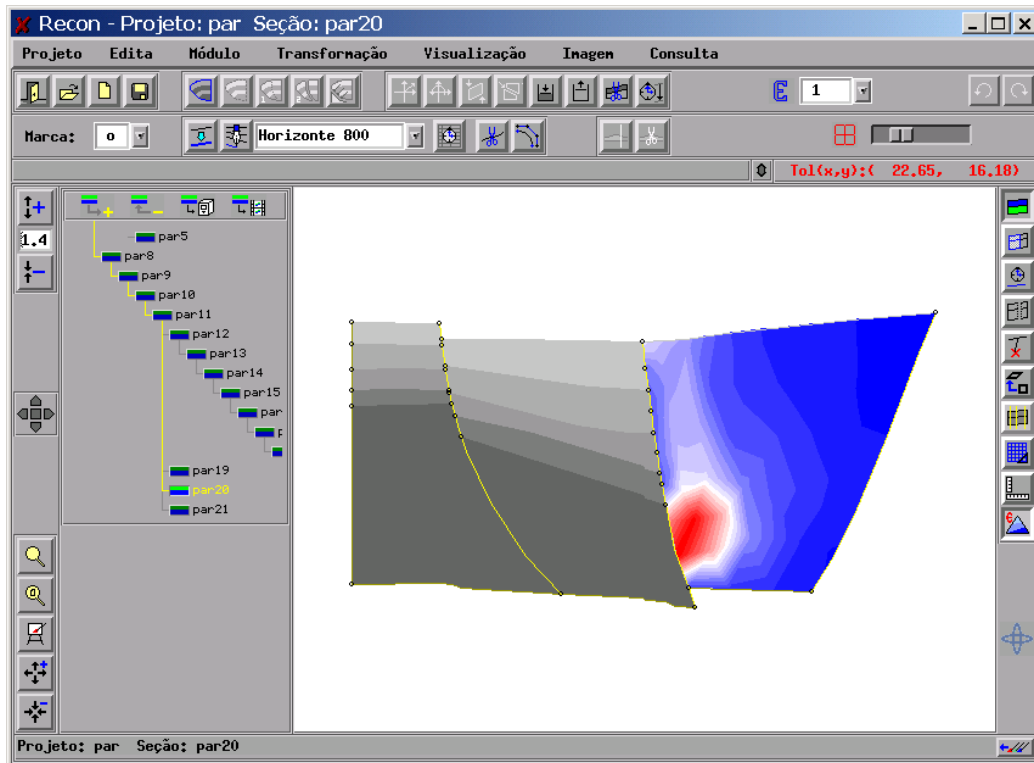


Figura 6.49 – Sistema Recon: Visualização das deformações.

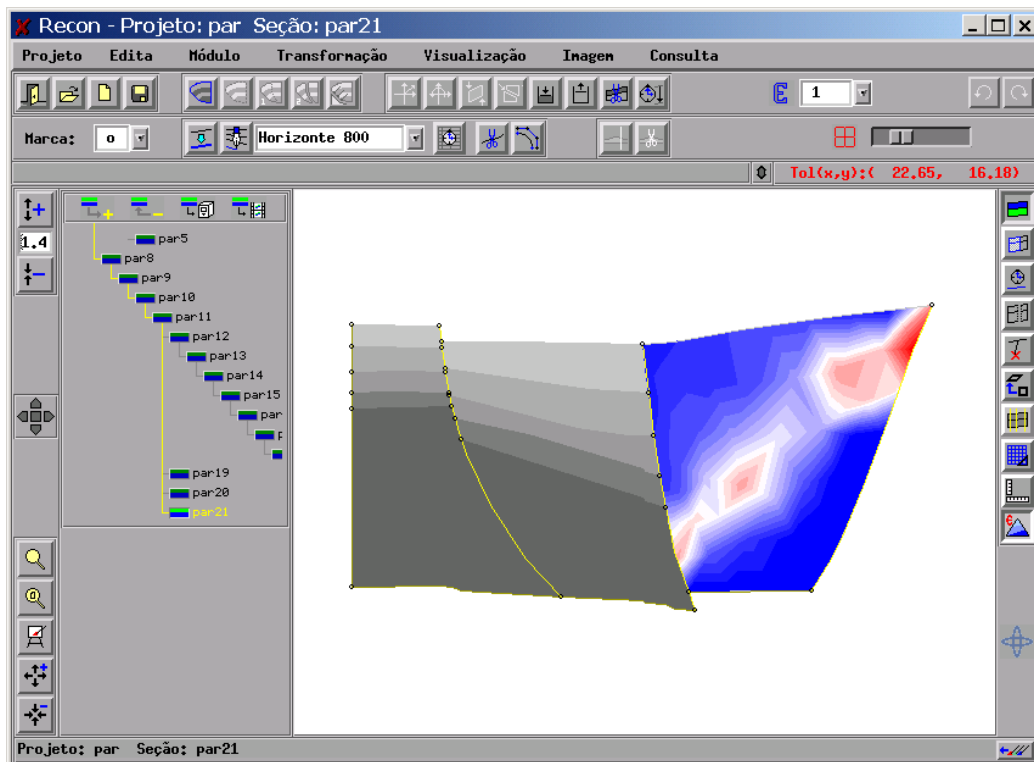


Figura 6.50 – Sistema Recon: Visualização das deformações.

# 7

---

## Conclusões

### 7.1 *Resumo*

Esta tese propõe um método para a construção de um ambiente de balanceamento de seções geológicas, fundamentado em uma modelagem não empírica e coerente com os mecanismos que geraram as estruturas geológicas encontradas na natureza. Acredita-se que a aplicação, à técnica de balanceamento, de um método numérico que considere as relações constitutivas dos materiais geológicos em sua formulação, determina uma nova abordagem para o problema em questão, avaliando com maior embasamento o comportamento mecânico das rochas. O objetivo principal imediato foi introduzir alguns conceitos da Mecânica do Contínuo no processo de restauração geológica. O objetivo final, visto como uma perspectiva para o futuro, foi obter a base para a construção de um sistema de balanceamento tridimensional automatizado, ou seja, necessitando o mínimo possível de interação com o usuário e ainda consistente sob o ponto de vista da reologia das rochas.

O trabalho introduziu inicialmente o leitor dentro do contexto da Geologia Estrutural apresentando sucintamente aspectos básicos fundamentais para a compreensão da técnica de balanceamento de seções geológicas. Em seguida descreveu-se o sistema de balanceamento *Recon* [27], o ambiente computacional de desenvolvimento deste trabalho.

Inicialmente foram feitos alguns desenvolvimentos, em especial, no que se refere à interface gráfica, visando uma utilização mais amigável do sistema sob o ponto de vista do usuário. Cabe destacar, o gerenciador de balanceamento, bastante adequado para a natureza palinspática do processo de balanceamento.

Para dar suporte a abordagem proposta para o problema, as classes originais da estrutura de dados do sistema *Recon* foram reescritas de forma a armazenar os atributos requeridos para a análise por elementos finitos.

A modelagem baseada nas propriedades físicas do material geológico foi feita por meio de um Algoritmo de Relaxação Dinâmica combinado com o Método dos Elementos Finitos [4]. Utilizou-se o programa *Relax*, desenvolvido originalmente por Figueiredo [28]. Para simular a movimentação de um bloco de rocha sobre uma falha foi implementado, dentro do programa *Relax*, um novo tipo de restrição para o deslocamento dos nós da malha em contato com a falha, em função da sua geometria.

Em paralelo, dentro do sistema *Recon*, foram implementados um pré- e um pós-processador, dedicados a essa modelagem.

## **7.2 Observações**

A integração total entre o sistema de balanceamento e o programa de análise foi fundamental dentro da abordagem proposta, já que para se obter uma seção restaurada, são necessárias normalmente várias etapas, ou seja, ao final de uma análise é necessário obter a nova geometria do modelo, a qual por sua vez, será a geometria inicial de uma outra possível análise. A não integração entre os programas representaria um esforço muito grande por parte do usuário, pois entre cada etapa do balanceamento seria obrigado a sair de um programa e entrar em outro, o que é contrário a um dos objetivos deste trabalho, qual seja prover um ambiente gráfico interativo adaptado as características do balanceamento.

A estrutura de dados topológica HED [40] foi indispensável no desenvolvimento do sistema integrado. Não só no auxílio ao gerenciamento dos atributos, como nas facilidades que a estrutura provê ao usuário programador no sentido de percorrer a topologia do modelo reduzindo o esforço computacional [12]. Por exemplo, na hora de gerar a malha unificada, exportá-la com os atributos referentes aos seus elementos

devidamente associados e fazer o mapeamento entre a malha deformada, obtida pelo programa de análise, e a nova geometria do modelo mantendo a mesma consistência topológica.

A utilização de um algoritmo de Relaxação Dinâmica [61] dentro desse contexto mostrou-se eficiente, uma vez que resolve o problema mecânico utilizando uma formulação dinâmica, ou seja, baseada na solução das equações de movimento de forma explícita no tempo, garantindo assim que essas equações, referentes a cada ponto nodal, sejam resolvidas de forma independente, ou seja, desacopladas. Essa consideração garantiu a simulação do problema, para grandes deslocamentos, sem os complicadores inerentes a uma formulação convencional, qual seja, resolvendo simplesmente o problema estático e por conseguinte exigindo a montagem da matriz de rigidez.

Apesar disso, foram identificados alguns fatores complicadores para a convergência do algoritmo bem como o seu tempo de processamento:

- ***O número de tramos da falha:*** quando um nó muda de tramo na falha durante o processo ocorre um acréscimo de magnitude das forças desequilibradas considerável, o que atrapalha a convergência do algoritmo. Isso sugere que quanto mais curvas forem as falhas, mais lento torna-se a obtenção do equilíbrio do bloco de rocha deformado.
- ***Ângulos maiores entre tramos da falha:*** quanto maior for o ângulo entre tramos adjacentes da falha, mais distante ficará da falha o nó que mudar de tramo. Quanto maior for essa distância, maior será o ajuste geométrico, que pode ser considerado uma intervenção externa ao algoritmo e que introduz acréscimo das forças desequilibradas, prejudicando com isso a sua convergência.
- ***Discretização do modelo:*** Quanto mais refinada for a malha, mais precisa será a análise e mais suave será a geometria do bloco deformado. Em contrapartida, o tempo de processamento, em especial para a resolução das equações algébricas geradas pela análise aumenta, além é claro dos recursos computacionais que se tornam mais requisitados. Caberá ao usuário portanto ter sensibilidade na hora de

gerar a malha de forma a não comprometer nem a geometria, nem o tempo de processamento.

- ***Coefficiente de Poisson:*** Análises cujo valor atribuído ao coeficiente de Poisson seja próximo a 0.5, determina uma maior rigidez do meio. No limite, esta rigidez tende a infinito. Os parâmetros requeridos para o critério ótimo de convergência ( $\Delta t$  requerido e o coeficiente de amortecimento) são obtidos também em função da rigidez do problema [61]. Quando essa tende a infinito, é possível comprometer-se a estabilidade da solução, podendo até mesmo gerar-se deslocamentos espúrios.

### ***7.3. Principais Contribuições***

- Proposta de uma nova abordagem para o balanceamento de seções geológicas fundamentada em algumas teorias da Mecânica do Contínuo [18], introduzindo com isso novos parâmetros, associados as propriedades físicas dos materiais geológicos, para a retrodeformação dos blocos de rocha.
- Desenvolvimento de um gerenciador para o balanceamento de seções geológicas. O uso desta ferramenta dentro do sistema de reconstituição permite maiores facilidades para o processo, essencialmente de tentativa e erro, até a obtenção do melhor caminho de balanceamento. Permite também a documentação do processo durante as diversas etapas e tomadas de decisão, sendo por isso considerada bastante apropriada para esse contexto.
- Adição de mais uma restrição nodal, apoios inclinados, para deslocamentos no programa de análise *Relax*, que implementa o Método da Relaxação Dinâmica, bem como a atualização dessas condições de contorno durante a execução da análise.
- Desenvolvimento de uma primeira versão de um sistema integrado de balanceamento baseado em modelagem física, contendo acoplados a um mesmo

ambiente um pré-processador, um módulo de análise e um pós-processador. A importância dessa integração dentro do contexto desse trabalho reside no fato de serem necessárias uma série de transformações (rodadas do programa de análise) para se obter uma seção balanceável. Ou seja, os dados de entrada da etapa subsequente são o resultado na análise da etapa anterior. Sem a integração, seria necessária a importação e exportação de arquivos para cada etapa do balanceamento.

- A implementação do sistema proposto utilizando-se de uma disciplina de programação orientada a objetos [55], em especial para as classes de atributos e as classes que representam as abstrações para as transformações em geral (geométricas e físicas), garantem a extensibilidade do programa no sentido de se incorporar com facilidade novos tipos de análise, através de mecanismos de herança das classes já implementadas.

#### ***7.4. Sugestões Para Trabalhos Futuros***

Este trabalho propõe o balanceamento de seções geológicas utilizando-se como ferramenta simulações numéricas em Mecânica Computacional. Foi implementado no módulo responsável pelo pré-processamento rotinas para a modelagem da movimentação de um bloco sobre uma falha. Existem no entanto, como foi possível observar nos Capítulos 2 e 3, outras operações associadas ao balanceamento, como por exemplo compactação e descompactação. Para obter-se um sistema de balanceamento baseado em modelagem física, que execute todas as operações inerentes ao processo, propõe-se como sugestão para trabalhos futuros a implementação do pré-processamento para a compactação e descompactação. Para descompactar a seção, por exemplo é bastante, antes de retirar a camada, calcular o seu peso próprio e distribuir esses esforços em todo o restante da seção, aplicando as condições de contorno adequadas.

Adotou-se a hipótese simplificadora de comportamento linear-elástico para o material geológico na formulação da modelagem física desse trabalho. Isso deveu-se ao fato de



não saber-se precisar quais os parâmetros associados a uma análise não-linear para o comportamento do material geológico. No entanto, o *Relax* provê análises que considerem a não-linearidade física do material. Propõe-se a incorporação no módulo de pré-processamento do sistema de balanceamento a possibilidade de se fazer simulações físicas considerando-se um comportamento plástico para o bloco de rocha deformado, aproximando-se assim do comportamento mecânico intrínseco a ambientes geológicos discutido no Capítulo 2.

Para modelar-se a movimentação do bloco sobre a falha de forma direta, ou seja, aplicando-se os esforços atuantes e obtendo-se a geometria atual, é necessária a consideração das forças de fricção existentes na interface do bloco com a falha. Essas forças são proporcionais ao peso da coluna de rocha que atua sobre o contato, bem como o ângulo de deslizamento. Essa informação angular já é conhecida durante a análise em função da implementação das restrições variáveis ao deslocamento nodal ao longo da sua movimentação sobre a falha. Propõe-se a definição de uma metodologia para obter-se a carga de peso em cada nó em contato com a falha e com isso introduzir-se a consideração de forças friccionais na modelagem do problema direto. Essa ferramenta pode ser útil no sentido de permitir uma melhor avaliação do problema inverso, ou seja, da retrodeformação dos blocos, inerente ao processo de balanceamento.

A sugestão anterior sugere que se lance mão futuramente de princípios de otimização para resolver o mesmo problema que esse trabalho se propõe a resolver. Para se formular o problema de balanceamento de seções geológicas como um problema de otimização é necessário definir as variáveis de projeto do problema, a função objetivo (aquela que se quer minimizar) e as restrições do problema. As variáveis do problema são as coordenadas dos vértices do polígono fechado que define a geometria original do bloco. A função objetivo do problema poderá ser definida como a diferença entre a união das áreas da geometria original e final do bloco e a interseção dessas mesmas áreas, ou seja, o algoritmo de otimização deverá obter uma geometria original que, depois de analisada pelo *Relax*, deverá coincidir com a geometria interpretada do bloco. Nesse caso a função objetivo definida acima será nula. As restrições do problema são: a área da geometria do

bloco deve permanecer constante ou variando de uma taxa a ser definida como parâmetro de entrada, o bloco deve deslizar sobre a falha, um trecho da geometria original do bloco deve ter alguma relação com o horizonte geológico, etc. Isso determina um processo mais automático e fisicamente bem mais consistente do que o adotado para resolver esse problema.

Uma vez resolvidos os demais problemas no domínio bidimensional acima mencionados, propõe-se o desenvolvimento de um sistema de balanceamento tridimensional fundamentado nos mesmos conceitos discutidos neste trabalho. A motivação para tal desenvolvimento está primeiro no fato do programa de análise *Relax* já resolver problemas 3D.

Além dessas diretrizes, cabe salientar que a proposta básica do trabalho é fornecer a geólogos e geofísicos uma ferramenta nova para o balanceamento de seções. Como trata-se ainda de um primeiro passo neste sentido, acredita-se que a utilização do sistema proposto como um laboratório de observações e pesquisas seja de extrema valia para se apontar algumas das direções a serem tomadas. O que os resultados vão apresentar devem ser analisados por geólogos e geofísicos para uma melhor compreensão dos fenômenos que levaram a formação das estruturas geológicas encontradas na natureza. Daí talvez surjam as mais relevantes propostas para trabalhos futuros.

---

## Referências Bibliográficas

- [1]. Allen, P.A., Allen, J.R., "Basin Analysis. Principles & Applications", Blackwell Science, Oxford, 1990.
- [2]. ANP - Terceira Rodada de Licitações, <http://www.brazil-round3.com>
- [3]. Bally, A. W., Gordy, P. L., Stewart, G. A., "Structure, Seismic Data, and Orogenic evolution of southern Canadian Rocky Mountains", Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v. 14, p.337-381, 1966.
- [4]. Bathe, K. J., "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [5]. Baumgart, B.G. - A Polyhedrom Representation for Computer Vision. AFIPS Proc., vol. 44, pp, 1990.
- [6]. Bedregal, R.P., Azevedo, M.F., A Técnica de Balanceamento de Seções Geológicas em Ambientes Distensionais, PETROBRAS, 1987.
- [7]. Bourgeois, O., Cobbold, P. R., Rouby, D., Thomas, J. C., Shein, V., "Least-squares restoration of Tertiary thrust sheets in map view, Tajik depression, central Asia", Journal of Geophysical Research, v. 102, p.27,553-27,573, 1997.
- [8]. Carvalho, P. C. P., Figueiredo, L. H. De, "Introdução a Geometria Computacional", 18º Colóquio Brasileiro de Matemática, IMPA.
- [9]. Cavalcanti, P.R., Criação e Manutenção de Subdivisões - SIBGRAPI' 91, USP, São Paulo, SP, Jul. 1991, pp. 13-24, 1991.
- [10]. Cavalcanti, P.R., Criação e Manutenção de Subdivisões do Espaço, Dissertação de mestrado, Departamento de Informática, PUC-Rio, 1992.
- [11]. Cavalcanti, P.R., Martha, L.F., Carvalho, P.C., Nonmanifold Modeling: An Approach Based on Spatial Subdivision", Computer-Aided Design, Volume 29, March, p. 209-220, 1997.
- [12]. Cavalcanti, P.R.; Carvalho, P.C.P.; Martha, L.F., "Construção de Decomposição do Espaço e Objetos Heterogêneos", Anais do VII Simpósio Brasileiro de

- Computação Gráfica e Processamento de Imagens, UFPR/SBC, Curitiba, PR, Nov. 1994, pp. 279-285, 1994.
- [13]. CD, Canvas Draw - A 2D Graphic Library, ”, <http://www.tecgraf.puc-rio.br/cd>
- [14]. Celes, W., Curso de C e Estrutura de Dados, 1993.
- [15]. Cobbold, P. R., “Removal of finite deformation using strain trajectories”, *Journal of Structural Geology*, v. 1, p. 67-72, 1979.
- [16]. Cook, R. D., “Finite Element Modeling for Stress Analysis”, John Wiley & Sons, 1995.
- [17]. Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., “Concepts and Applications of Finite Element Analysis”, John Wiley & Sons, 1989.
- [18]. Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., “Concepts and Applications of Finite Element Analysis”, John Wiley & Sons, 1989.
- [19]. Cook, R. D.; Malkus, D. S. e Plesha, M.E;”Concepts and Applications of Finite Element Analysis”, Third Edition, John Wiley & Sons, 1989.
- [20]. Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L., Introduction to Algorithms.
- [21]. Dahlstron, C.D.A., “Balanced cross sections.” *Canadian journal of earth sciences*. No6, pp.743-757, 1969.
- [22]. Danderfer, A. Filho, Introdução ao Balanceamento Estrutural, Programa de pós-graduação em geologia estrutural, UFOP, 1994.
- [23]. Desai.C.S., Siriwardane, H.J., Constitutive laws for engineering materials with emphasis on geologic materials. Prentice-Hall, New Jersey, 1984
- [24]. Dula Jr., W. F., “Geometric models of listric normal faults and rollover folds”, *AAPG Bulletin*, v. 75, p. 1609-1625, 1991.
- [25]. Erickson, S. G., Hardy, S., Suppe J., “Sequential Restoration and Unstraining of Structural Cross Sections: Applications to Extensional Terranes”, *AAPG Bulletin*, v. 84, No. 2, p. 234-249, 2000.
- [26]. Etchecopar, A., “A plane kinematic model of progressive deformation in a polycrystalline aggregate”, *Tectonophysics*, v. 39, p. 121-139, 1974.
- [27]. Ferraz, M. F. R., “Reconstituição de Seções Geológicas Utilizando Subdivisões Planares, Transformações Geométricas e Computação Gráfica Interativa”,

- Dissertação de mestrado, Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1993.
- [28]. Figueiredo, R. P., “Aplicação da técnica de relaxação dinâmica à solução de problemas geotécnicos”, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1991.
- [29]. Fischer, M. W., Coward, M. P., “Strains and fold within thrust sheets: an analysis of the Heilam sheet, northwest Scotland”, *Tectonophysics*, v. 88, p.291-312, 1982.
- [30]. Gibbs, A. D., “Balanced section constructions from seismic sections in areas of extensional tectonics”, *Journal of Structural Geology*, v. 5, p.153-160, 1983.
- [31]. Gibbs, A. D., “Structural evolution of extensional basin margins”, *Journal of the Geological Society of London*, v. 141, p. 609-620, 1984.
- [32]. Goguel, J., *Tectonites*: San Francisco, W. H. Freeman and Company, 384 p, 1962.
- [33]. Howard, J. H., “Restoration of cross-sections through unfaulted, variable strained strata“, *Journal of Structural Geology*, v. 15, p. 1331-1342, 1993.
- [34]. Ierusalimschy, Figueiredo, L. H. de, Celes, W.; ”Reference manual of the programming language Lua 4.0”, <http://www.tecgraf.puc-rio.br/~lua>.
- [35]. IM, Biblioteca de Acesso à Arquivos de Imagens Bitmaps, <http://www.tecgraf.puc-rio.br/im>.
- [36]. Kautz, S. A., Sclater, J. G.”Internal deformation in clay models of extension by block faulting”, *Tectonics*, v.7, p.823-832, 1988.
- [37]. Kernigham, B. W., e Ritchie, D. M., “C - A Linguagem de Programação”, EDISA, Editora Campus, 1986.
- [38]. Kernigham, B. W., e Ritchie, D. M., “The C – Programming Language”, Prentice Hall, New Jersey, 1988.
- [39]. Levy, C. H., Figueiredo, L. H., Gattass, M., Lucena, J.P e Cowan, D.D, “IUP/LED: A Portable User Interface Development Tool”, *Software: Practice & experience*, vol. 26 – 7, pp 737-762, 1996.
- [40]. Mäntylä, Martti – “An Introduction to Solid Modeling”. Computer Science Press, 1988.

- [41]. Martha, L.F., Carvalho, M.T.M., Seixas, R.B., "Volume Contouring of Generic Unstructured Meshes"
- [42]. McKenzie, D. P., "Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins", *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1978.
- [43]. Miranda, A.C.O.; Cavalcante Neto, J.B.; Martha, L.F., "An Algorithm for Two-dimensional Mesh Generation for Arbitrary Regions with Cracks", SIBGRAPI'99 - XII Brazilian Symposium on Computer Graphics, Image Processing and Vision, UNICAMP/SBC, Campinas, SP, Oct. 1999, IEEE Computer Society Order Number PRO0481, ISBN 0-7695-0481-7, Eds.: J. Stolfi & C. Tozzi, pp. 29-38, 1999.
- [44]. Otter, J. R. H., Cassel, A. C., Hobbs, R. E., "Dynamic relaxation", *Proc. Instn. Civ. Engrgs.*, 35, 633-665, 1966.
- [45]. Owen D.R.J., Hinton, E., *Finite Elements in Plasticity*. Pineridge Press, Inc., Swansea, UK, 1980
- [46]. Park, R., "Foundations of Structural Geology", Chapman and Hall, 1989.
- [47]. Protzman, G. M., Mitra G., "Strain fabric associated with the Meade thrust sheet: implications for cross-section balancing", *Journal of Structural Geology*, v. 12, p. 403-417, 1990.
- [48]. Rostirolla, S. P., "Análise de Margens Passivas Por Meio do Balanceamento de Seções Geológicas Transversais: Discussão Teórica e Aplicação na Bacia de Campos", *Boletim de Geociências, PETROBRAS*, 1995.
- [49]. Rostirolla, S. P., "Geologia Estrutural: Conceitos Básicos e Aplicações na Análise de Sistemas Petrolíferos", UFRJ-COPPE, 2001.
- [50]. Rouby, D., Cobbold, P. R., Szatmari, P., Demercian, S., Coelho, D., Rici, J. A., "Least-squares palinspastic restoration of regions of normal faulting-application to the Campos basin (Brazil)", *Tectonophysics*, v. 221, p. 439-452, 1993.
- [51]. Rowan, M.G. & Kligfield, R., "Cross Section Restoration and Balancing as Aid to Seismic Interpretation in Extensional Terranes". *Amer. Assoc. Petrol. Geol.* 75:832-844, 1989.
- [52]. Schwerdtner, W. M. "Geometric interpretation of regional strain analyses", *Tectonophysics*, v. 39, p. 515-531, 1977.

- [53]. Sclater & Christie - Journal of Geophysical Research, VOL.85 No.B7, páginas 3711-3739, 1980.
- [54]. Smith, G. P., "Numerical solution of partial differential equations: finite difference methods", 3<sup>rd</sup> edn. New York: Oxford Applied Mathematics and Computing Science Series, 1985.
- [55]. Stroustrup, B., "The C++ Programming Language", Second Edition, Addison Wesley, 1997.
- [56]. Stroustrup, B., "The C++ Programming Language", Special Edition Addison Wesley, 2000.
- [57]. Suppe, J., Geometric and Kinematics of fault-bend folding. American Journal of Science, 283:684-721, 1983.
- [58]. Suppe, J., Principles of structural geology. Englewood Cliffs, Prentice-Hall. 537p, 1985.
- [59]. Tearpock, D.J. & Bischke, R.E., Applied Subsurface Geological Mapping, 1991.
- [60]. TecGraf/PUC-Rio, <http://www.tecgraf.puc-rio.br>, 1994
- [61]. UnderWood, P., "Dynamic relaxation", Computational methods for transient analysis, 245-265, Amsterdam: Elsevier, 1983.
- [62]. Varella L., E., "Especificação do Formato BIG", E&P, PETROBRAS, 1996.
- [63]. Varella L., E., "Manual de Utilização do SIGEO", E&P, PETROBRAS, 1995.
- [64]. Vlack, L. H.V., "Elements of Materials Science and Engineering", Addison-Wesley Publishing Co, 1983.
- [65]. Weijermars, R., "Principles of Rock Mechanics Lectures in Geoscience", Alboran Science Publishing, 1997.
- [66]. Wernicke, B., Burchfiel, C., "Modes of Extensional Tectonics", J. Struct. Geol., 4:105-115, 1982.
- [67]. White, N., Jackson, J. A., McKenzie, D. P., "The relationship between the geometry of normal faults and that of the sedimentary layers in their hanging walls", Journal of Structural Geology, v.8, p.897-909, 1986.
- [68]. Wickham, J., Moeckel, G., "Restoration of structural cross-section", Journal of Structural Geology, v. 19, p.975-986, 1997.

[69]. Woodward, N. B., Gray, D. R., Spears, D. B., "Including Strain data in balanced cross-sections", *Journal of Structural Geology*, v. 8, p. 313-324, 1986.