



PUC

MARCOS FERNANDO RIBEIRO FERRAZ

**RECONSTITUIÇÃO DE SEÇÕES GEOLÓGICAS
UTILIZANDO SUBDIVISÕES PLANARES,
TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS E COMPUTAÇÃO
GRÁFICA INTERATIVA**

Dissertação de Mestrado
Orientador: Paulo Cezar Pinto Carvalho

[CONTINUA =>](#)

DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
Rio de Janeiro, Setembro de 1993

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO
RUA MARQUÊS DE SÃO VICENTE, 225 - CEP 22453
RIO DE JANEIRO - BRASIL**

Marcos Fernando Ribeiro Ferraz

e-mail: marcosferraz@ep.petrobras.com.br

***Reconstituição de Seções Geológicas Utilizando
Subdivisões Planares, Transformações Geométricas e
Computação Gráfica Interativa***

Dissertação apresentada ao Departamento de
Informática da PUC-Rio como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre
em Informática: Ciência da Computação.

Orientador: Paulo Cezar Pinto Carvalho

Departamento de Informática
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, setembro de 1993

AGRADECIMENTOS

A Paulo Cezar P. Carvalho, como professor durante o curso de mestrado, como orientador desta dissertação de mestrado e pela contribuição, principalmente na área da geometria computacional, ao trabalho conjunto desenvolvido pela PETROBRÁS e o TeCGraf.

Aos professores Luiz Fernando Martha e Marcelo Gattass, também pela orientação.

Ao geólogo André A. Bender e ao colega analista Luciano Pereira dos Reis, pais da idéia que gerou este trabalho. Boa parte dos algoritmos de transformação geométrica são de autoria do Luciano. Ao Bender também pela orientação na área da geologia. Ao colega de trabalho, geólogo Olavo Colela, pelas eventuais consultas na área da geologia

e ao geólogo Marcos da Cunha Lana por participar da banca.

Ao Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica (TeCGraf) da PUC-Rio pela implementação e suporte do sistema RECON, principalmente Luiz Fernando Martha e as contribuições de Waldemar Celes Filho.

Aos demais colegas do trabalho pelo incentivo e pelas eventuais ajudas.

Ao geólogo Benito Leonízio Fuschilo e ao analista Geraldo de Oliveira dos Santos e à PETROBRÁS pela oportunidade de realizar o mestrado.

RESUMO

Este trabalho descreve técnicas de balanceamento de seções geológicas sob um ambiente de computação gráfica interativa, explorando as vantagens de uma estrutura de dados topológica bem como de um conjunto de funções que manuseiam a subdivisão planar representada por esta estrutura. Os atributos das entidades que constituem a seção podem ser relacionados com as informações de adjacência mantidas na estrutura. Esta ferramenta permite a simulação das deformações naturais sofridas pela seção, através de um conjunto de transformações geométricas, cujos algoritmos são baseados em modelos geológicos.

ABSTRACT

This work describes interactive computer graphics techniques for balancing geological sections. The advantages of a set of functions to handle the planar subdivision represented by a topological data structure are explored. The attributes of the entities that constitute the section are related to the adjacency information maintained in the data structure. This tool allows the simulation of natural deformations suffered by the section, described by a set of geometric transformations, using algorithms based in geological models.

SUMÁRIO

1 - [INTRODUÇÃO](#)

- 1.1 - Motivação
- 1.2 - Conteúdo

2 - [INTRODUÇÃO AO BALANCEAMENTO DE SEÇÕES](#)

- 2.1 - Estruturas Geológicas
- 2.2 - A Seção Geológica
- 2.3 - Camadas Geológicas
- 2.4 - Falhas
- 2.5 - O Balanceamento
- 2.6 - Técnicas Clássicas de Balanceamento

- 2.6.1 - Preservação do Volume
- 2.6.2 - Preservação da Área
- 2.6.3 - Preservação de Comprimento e Espessura

- 2.7 - Compactação das Camadas Geológicas
- 2.8 - Ferramentas Básicas Para o balanceamento

3 - ESTRUTURA DE DADOS TOPOLÓGICA

- 3.1 - Representação de Estruturas Geológicas
- 3.2 - Subdivisões Planares
- 3.3 - Estrutura de Dados *Half-Edge*
- 3.4 - Operadores de Euler
- 3.5 - Modelagem da Subdivisão Planar
 - 3.51 - Inclusão de Curvas
 - 3.52 - Ordem de Complexidade
 - 3.53 - Campo de Atração
- 3.6 - Subdivisão Hierárquica para Balanceamento de Seções Geológicas
- 3.7 - Atributos Geológicos

4 - TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS

- 4.1 - Transformações Rígidas
 - 4.1.1 - Translação
 - 4.1.2 - Rotação
- 4.2 - Transformações Não-Rígidas
 - 4.2.1 - Cisalhamento Simples
 - 4.2.2 - Deslizamento Flexível
 - 4.2.2.1 - Projeção em Profundidade da Geometria de Superfície
 - 4.2.2.2 - Montagem das Florestas
 - 4.2.2.3 - Localização Geométrica na Árvore
 - 4.2.2.3.1 - Conversão de Posição Cartesiana em Profundidade e Distância
 - 4.2.2.3.2 - Conversão de Profundidade e Distância em Posição Cartesiana 60
 - 4.2.2.4 - Preparação da Transformação de Deslizamento Flexível
 - 4.2.2.5 - Aplicação da Transformação de Deslizamento Flexível
 - 4.2.3 - Descompactação
 - 4.2.4 - Compactação

4.3 - Filtro Geométrico

5 - RECUPERAÇÃO DA CONSISTÊNCIA TOPOLÓGICA - O AJUSTE

5.1 - O Ajuste

5.2 - Conclusão

6 - [O SISTEMA RECON](#)

6.1 - Funções do Sistema

6.1.1 - Edição da Seção Via Inserção de Linhas

6.1.2 - Camadas

6.1.3 - Módulos

6.1.4 - Transformações

6.1.5 - Consultas

6.1.6 - Marcadores

6.1.7 - Ajuste

6.2 - Resultados Experimentais

7 - [CONCLUSÕES](#)

7.1 - Avaliação da Implementação

7.2 - Desenvolvimentos Futuros

[REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS](#)

[BANCA EXAMINADORA](#)

<u><- VOLTA</u>	<u>SEGUE -></u>
para a capa	para a introdução

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Esta dissertação de mestrado foi resultado de um esforço iniciado por um grupo na PETROBRÁS com o objetivo de desenvolver na Companhia tecnologia na área de balanceamento de seções geológicas em computador. Posteriormente a este grupo associou-se o Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica (TeCGraf) da PUC-Rio. Deste esforço conjunto foi criado um sistema chamado RECON. A participação do autor desta dissertação foi principalmente na parte de transformações geométricas. Este trabalho teve também a função de documentar toda a tecnologia desenvolvida pela equipe citada acima.

1.1 - Motivação

Este trabalho aborda a aplicação de técnicas de modelagem geométrica, mais especificamente subdivisões planares e algoritmos geométricos no tratamento de problemas de deformações genéricas de blocos, especialmente tendo em vista aplicações geológicas.

Existe uma área da geologia que se volta para o estudo das formações geológicas do ponto de vista estrutural, ou seja, que se preocupa com o comportamento, ao longo do tempo, da geometria destas formações, que se deforma devido a fenômenos de origem tectônica. Dentro da área de geologia estrutural, surgiram as técnicas de balanceamento, ou restauração de uma estrutura atual de volta à sua conformação original do passado. É abordado neste trabalho a implementação destas técnicas de balanceamento utilizando recursos computacionais, baseada numa estrutura de dados topológica e em algoritmos geométricos específicos.

São discutidas diversas técnicas aplicadas ao balanceamento, abordando algumas áreas da computação gráfica, tais como modelagem geométrica, geometria computacional e interface com o usuário, pois todo o processo de balanceamento é realizado sob um ambiente interativo.

A estrutura de dados topológica utilizada, armazena a subdivisão planar que representa as vistas bidimensionais das formações geológicas. Esta estrutura fornece as relações de adjacência entre as entidades topológicas da subdivisão. Uma série de operadores criam e mantêm a subdivisão planar, modelando a formação geológica. Esta estrutura de dados também armazena atributos não geométricos das entidades geológicas. Neste trabalho, um dos pontos fortes é o uso da modelagem geométrica aplicada à geologia estrutural.

Os algoritmos geométricos usados são voltados para problemas específicos de deformação de blocos e fazem uso extensivo de conceitos de geometria computacional, obedecendo a modelos geológicos e técnicas clássicas de balanceamento.

O balanceamento é, por natureza, um processo interativo que depende muito da interpretação humana. Neste processo, 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 ser realizada no computador.

Apesar deste trabalho se voltar para a aplicação específica em geologia estrutural, as técnicas desenvolvidas podem ser aplicadas a problemas correlatos em outras áreas. Por exemplo, alguns dos algoritmos geométricos podem ser usados no tratamento de problemas de deformações genéricas de blocos, não necessariamente na área da geologia.

1.2 - Conteúdo

No capítulo 2 são introduzidos alguns conceitos básicos de geologia estrutural e de técnicas de balanceamento clássicas, e discutidos os requisitos esperados por um sistema que se proponha a realizar balanceamento de seções.

No capítulo 3 são expostas as vantagens do uso de subdivisões planares na representação de estruturas geológicas. São apresentados alguns conceitos de modelagem geométrica, bem como o pacote HED, adotado neste trabalho para o armazenamento da estrutura da seção e seus atributos, além das funções de manipulação da estrutura. É apresentado também o conceito de módulo de transformação geológica.

No capítulo 4 são discutidos em detalhe os algoritmos que são aplicados à estrutura da seção, todos baseados em modelos geológicos. São discutidos algoritmos aplicados a problemas geométricos diversos, tais como a deformação de blocos bidimensionais sob restrições (por exemplo, conservação de área) e descompactação de blocos baseada em leis físicas.

O capítulo 5 é dedicado aos algoritmos de colagem de módulos, a qual geralmente ocorre após a aplicação dos algoritmos de transformação a estes módulos.

O sistema RECON, que implementa os conceitos e algoritmos discutidos neste trabalho, é abordado no capítulo 6.

Uma conclusão do trabalho é feita no capítulo 7, com uma rápida dissertação sobre uma possível evolução do sistema e tendências nas técnicas de balanceamento.

<u>SUMÁRIO</u>	<u>SEGUE -></u>
para o índice	para o capítulo 2

CAPÍTULO 2 - INTRODUÇÃO AO BALANCEAMENTO DE SEÇÕES GEOLÓGICAS

2.1 - Estruturas Geológicas

Na figura 2.1 observa-se alguns tipos de estruturas geológicas. Diversos fatores determinam a formação destas estruturas: os movimentos tectônicos, sedimentação e compactação, erosão, evolução termoquímica, migração, etc. As camadas geológicas são depositadas ao longo do tempo e simultaneamente vão sofrendo todos os processos geológicos deformadores citados. Os principais agentes são os movimentos tectônicos ocorridos na crosta terrestre. Estes podem ser classificados em diversas categorias, mas basicamente existem a tectônica *extensional* (ou *distensional*), a *compressional* e a *transcorrente* (figura 2.2).

O símbolo "+" indica que o bloco está se afastando do observador e o "-" que está se aproximando.

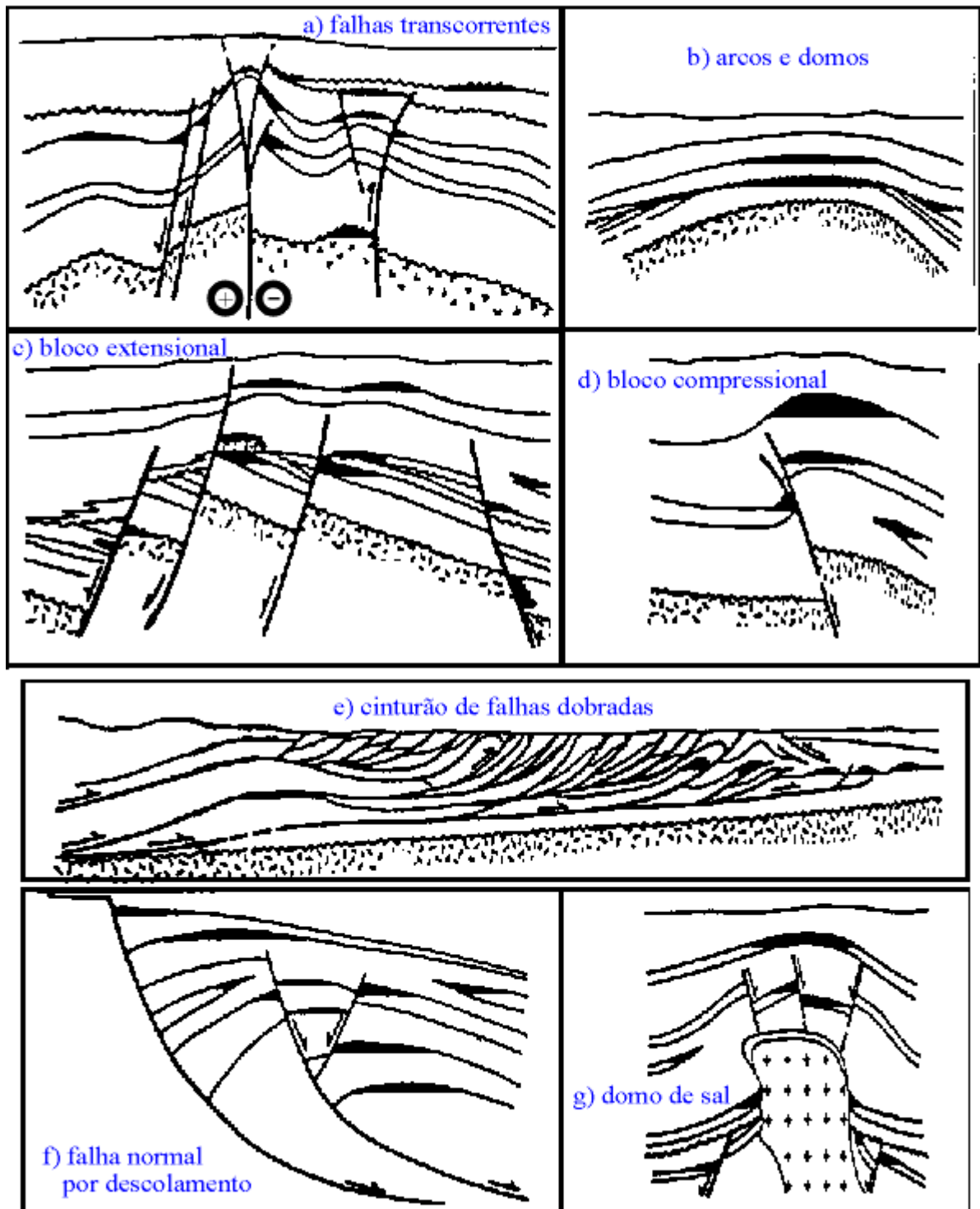


figura 2.1 - Diversos tipos de estruturas que podem funcionar como armadilhas de hidrocarbonetos.

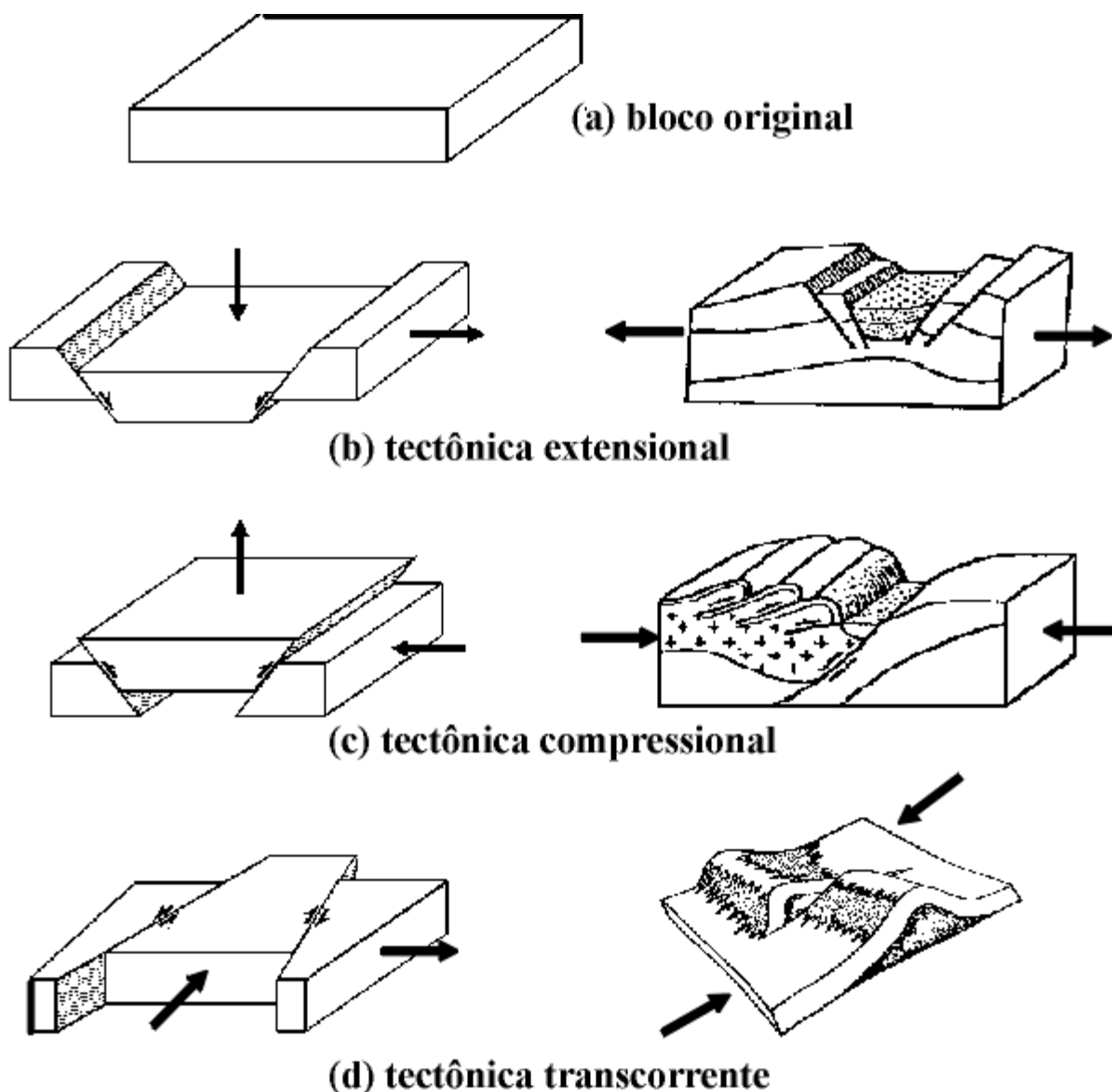


figura 2.2 - Classificação dos movimentos tectônicos.

Em terrenos extensionais (figuras 2.1.c, 2.1.f, e 2.1.g), os esforços tectônicos atuantes provocam estiramento (alongamento) e afundamento da crosta terrestre. São geradas falhas (chamadas normais, de gravidade ou extensionais) que dividem estes blocos, ocorrendo o afundamento de alguns (blocos baixos) com relação a outros (blocos altos).

Em áreas compressionalis (figura 2.1.b, 2.1.d e 2.1.e), 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.

Em regimes transcorrentes (figura 2.1.a), os blocos se deslocam paralelamente entre si, ocorrendo uma zona de atrito ou cisalhamento. O deslocamento pode não ser exatamente paralelo. Se os blocos convergirem durante este deslocamento, pode ser gerado um regime transpressional, caracterizado pela presença de falhas

transpressionais e dobras (anticlinais) que constituem excelentes armadilhas para hidrocarbonetos. No caso dos blocos divergirem, caracteriza-se um regime transtensional, responsável pela geração de falhas transtensionais e baixos estruturais (cinclinal).

O petróleo, por ser menos denso que a água, migra no meio formado pelas diversas camadas geológicas, sempre que encontra um meio permeável ou um canal, e se aloja em armadilhas naturais formadas por barreiras impermeáveis. Na exploração do petróleo, busca-se identificar estruturas que possam funcionar como armadilhas. Um exemplo são as formadas pelas dobras e falhas.

As deformações que os blocos sofrem são estudadas pela geologia, que procura entender o mecanismo do processo. Estas transformações geométricas aplicadas em ordem reversa, na tentativa de reconstituir o terreno original, constituem o balanceamento ou reconstituição. Estas deformações são fenômenos tridimensionais, mas como é bastante complexa a operação em três dimensões, trabalha-se em geral com seções bidimensionais; daí o chamado *balanceamento de seção*.

2.2 - A Seção Geológica

Nas figuras 2.3.c e 2.3.d são apresentadas seções geológicas. A seção é um plano de visualização vertical de um corte na crosta terrestre. As seções ajudam muito no estudo das formações de subsuperfície. Sobre a superfície da crosta é traçada a linha da seção (figuras 2.3.a e 2.3.b), que é a interseção da seção vertical com a superfície. A trajetória da linha deve ser escolhida de forma que as seções apresentem o melhor ponto de vista para o estudo das estruturas de subsuperfície 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.

Existem dois tipos de seções. A estrutural tem como referência o nível do mar e representa as posições relativas de feições de camadas, falhas, dobras, etc, ou seja, basicamente a geometria. A seção estratigráfica mostra a posição das camadas em relação a um nível horizontalizado, 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.

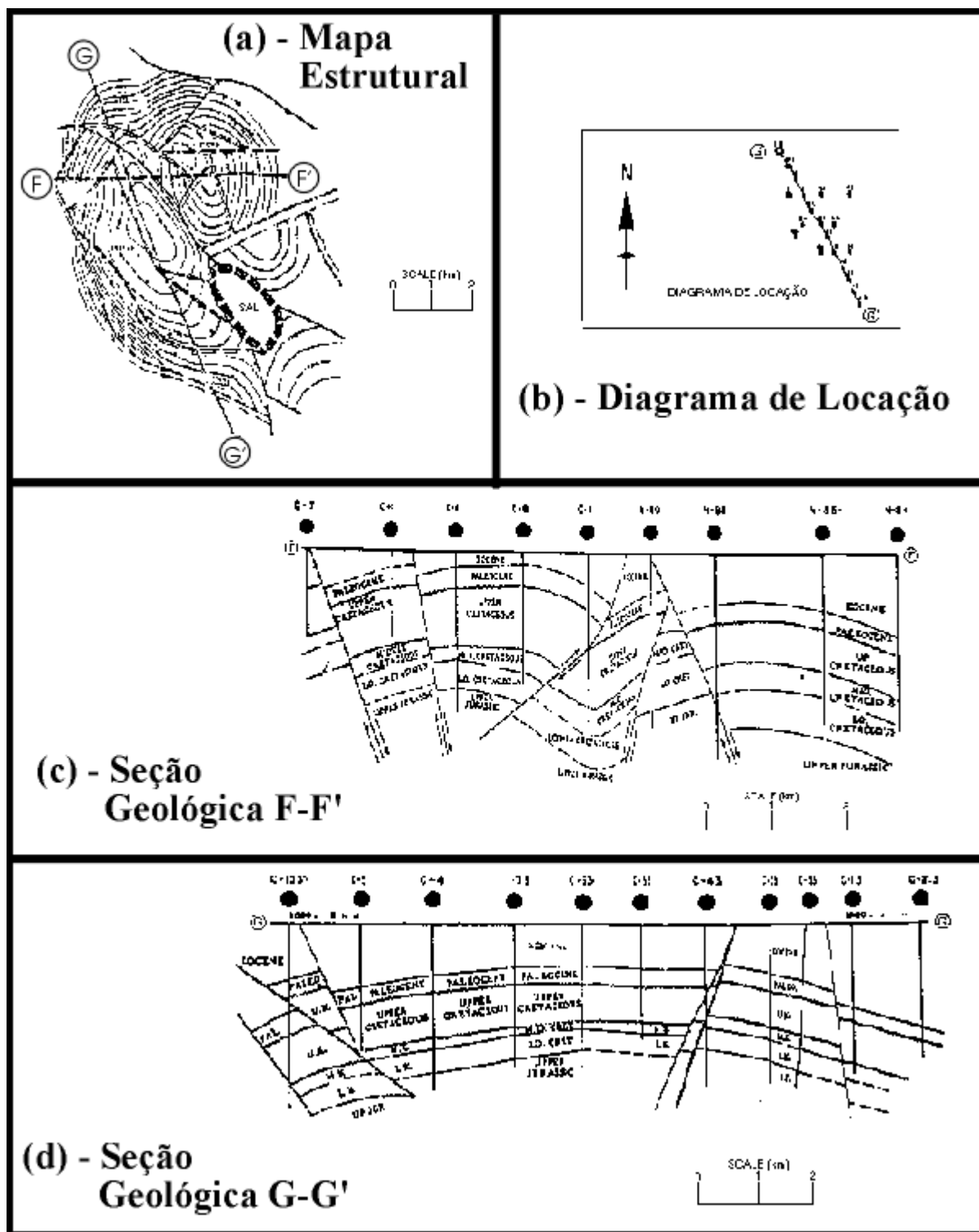


figura 2.3 - Seção geológica.

O mapeamento geológico em subsuperfície consiste na predição de estruturas geológicas existentes abaixo da superfície, com a maior precisão possível, 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 (figura 2.6). Os dados de poços são obtidos a partir de perfilagem, amostragem, testes de formação. Mas estas técnicas só dão informações

sobre a região próxima aos poços. As informações obtidas com a sísmica de reflexão, a partir da qual se obtém as seções sísmicas ou perfis sísmicos, complementam o mapeamento de subsuperfície. A partir destas informações, o intérprete (geofísico ou geólogo) constrói a seção geológica. 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 dos dados e da interpretação, aceitando ou invalidando a suposta seção.

2.3 - Camadas Geológicas

As camadas geológicas vão se depositando ao longo do tempo e, naturalmente, por ação gravitacional são horizontais, isto é, paralelas entre si. São constituídas de rochas de tipos diferentes. Os limites que separam uma camada de outra são chamados de 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 e estão associadas a eras geológicas. Na figura 2.4, é apresentado uma seção geológica em dois momentos diferentes: um na sua forma original (fig. 2.4.a), apenas erodida, e no outro, a seção após sofrer deformações devido ao movimento tectônico (fig. 2.4.b).

Cada camada possui características (atributos) próprias como porosidade, litologia (tipo de rocha de que é constituída), idade, etc.



(a) - Situação inicial



(b) - Situação após atuação da tectônica e deposição da camada superior.

figura 2.4 - Camadas Geológicas.

2.4 - Falhas

Falhas são criadas a partir de movimentos tectônicos de compressão ou extensão sofridos pela crosta terrestre ou localmente em bacias sedimentares, gerando descontinuidades nas mesmas. A estes movimentos combina-se o movimento gerado pela gravidade, abatendo blocos que perdem a estabilidade (sustentação).

Os componentes básicos da geometria de uma falha extensional estão ilustrados na figura 2.5. Nela são apresentados os termos usados para descrever as estruturas resultantes do movimento no plano de falha.

Falhas extensionais são geradas com a movimentação ao longo de uma superfície de mergulho do bloco baixo da falha, que desliza relativamente ao bloco alto. As falhas compressionais são geradas pela movimentação do bloco alto da falha, que é empurrado ao longo do plano de mergulho da falha, emergindo e se posicionando acima do bloco baixo.

O ângulo de mergulho da falha diminui com a profundidade, e em geral o leito da falha termina em um plano tendendo à horizontal. A este formato comum de falha dá-se o nome de falha lítrica.

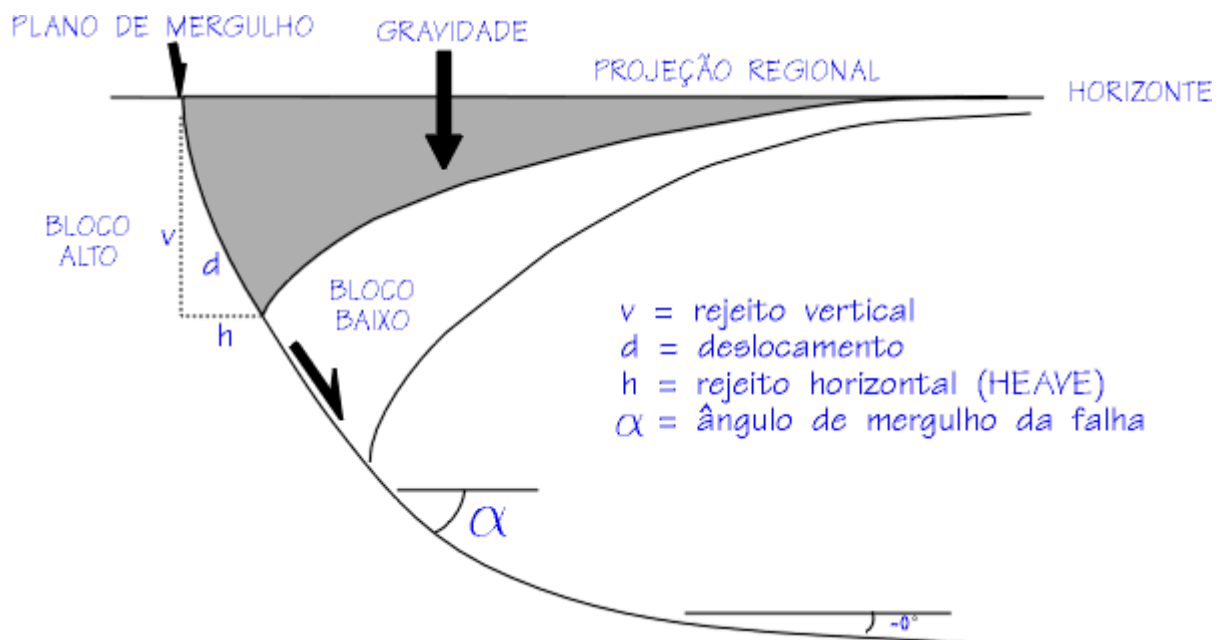


figura 2.5 - Componentes da geometria da falha.

2.5 - O Balanceamento

O balanceamento de uma seção geológica consiste na tentativa de reconstituição da geometria original que as camadas desta seção possuíam antes das deformações sofridas ao longo do tempo. Como se tem muito pouco conhecimento sobre os mecanismos de deformação ocorridos no passado, o balanceamento se baseia em premissas geológicas que podem ser simuladas utilizando princípios geométricos.

O balanceamento de seções feito à mão é uma tarefa muito meticulosa, desgastante e demorada, pois são necessários muitos desenhos, o que dá margem a muitos erros. O balanceamento usando recursos computacionais torna-se mais rápido e preciso. Podem ser testadas mais facilmente soluções alternativas.

Como mencionado na seção 2.2, a seção geológica é uma projeção criada a partir da seção sísmica e/ou dados de poços através de uma interpretação pessoal feita pelo geólogo ou geofísico (figura 2-6). Partindo das mesmas informações, pode-se chegar a diversas interpretações. O geólogo necessita de ferramentas para que possa eliminar interpretações que não façam sentido. O balanceamento é uma ferramenta que pode verificar a aceitabilidade de uma interpretação; a precisão de uma seção geológica é muito importante comercialmente quando um grande investimento está em jogo. É o que ocorre, em geral, no processo de exploração do petróleo, onde os custos envolvidos são altíssimos.

O balanceamento é baseado no conceito de que não ocorre perda ou acréscimo de volume nos processos deformacionais, exceto a perda de água que ocupa o volume poroso, decorrente da compactação dos sedimentos à medida em que são soterrados. Além disso, a seção restaurada não deverá possuir sobreposições ou vazios, pois na natureza não existem buracos ou sobreposição de massa. Uma seção que não pode ser balanceada não faz sentido. Infelizmente uma seção balanceada, mesmo que faça sentido, não precisa necessariamente resultar na interpretação correta. Dois geólogos podem também produzir dois balanceamentos diferentes. No entanto quanto mais completos forem os dados e melhores as técnicas de interpretação, mais realista será a interpretação da seção.

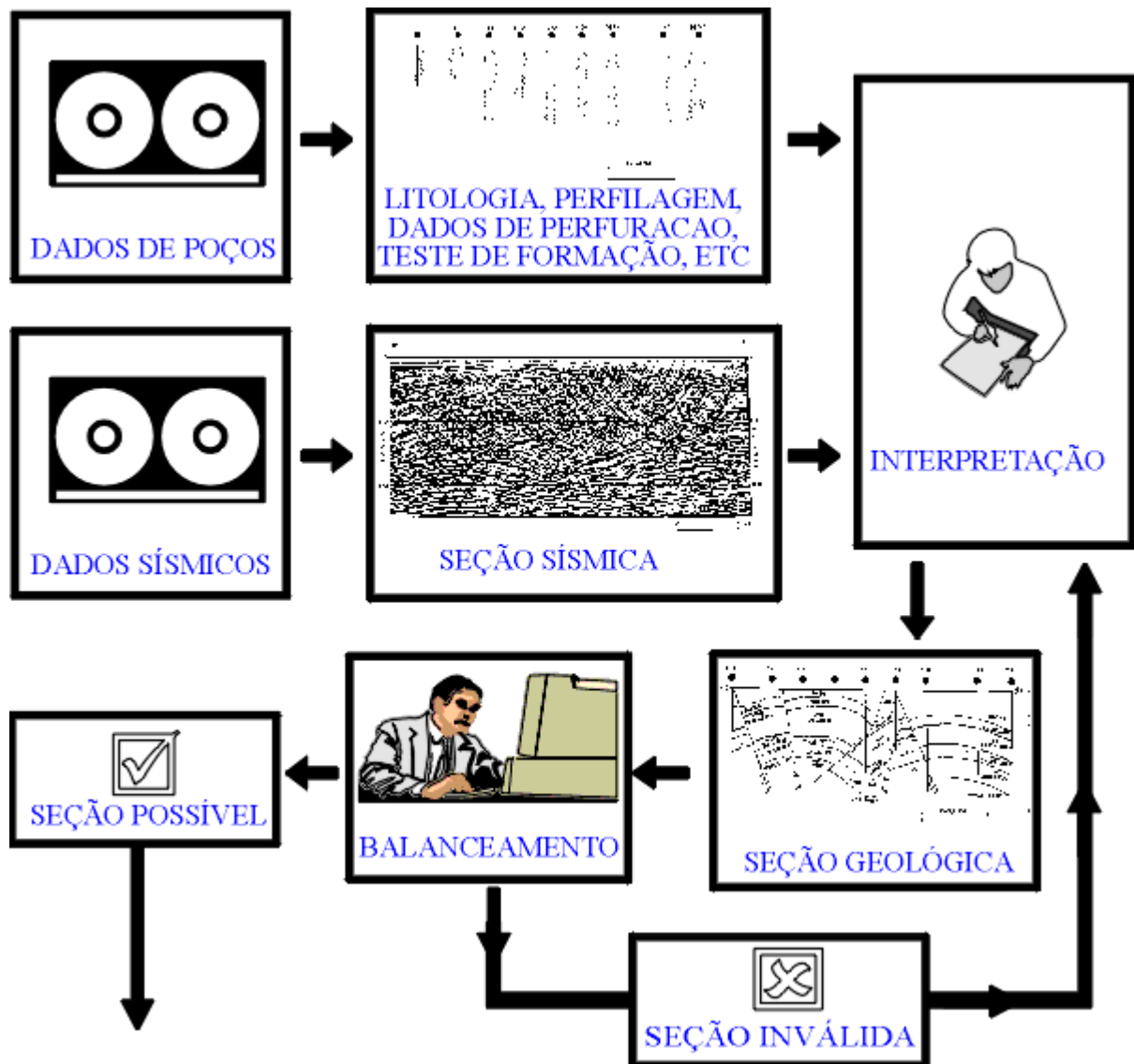


figura 2.6 - Processo de interpretação e validação de uma seção geológica.

O balanceamento, além de levar a um melhor mapeamento dos reservatórios, também dá uma idéia da sequência dos eventos estruturais ocorridos ao longo do tempo, que são importantes nos estudos de migração do óleo e definem como, quando e onde os fluídos podem ter se deslocado nas estruturas.

Segundo [TEAR91] as técnicas de balanceamento podem ser divididas em duas linhas: balanceamento clássico, cujos princípios foram desenvolvidos por Goguel (1962) e Dahlstrom (1969) e seus colaboradores, e balanceamento não clássico, desenvolvido por Suppe (1983,1985) e seus colaboradores.

2.6 - Técnicas Clássicas de Balanceamento

A base das técnicas de balanceamento são as leis de conservação de volume, área e comprimento das camadas geológicas. O balanceamento é uma disciplina relativamente nova e as primeiras pesquisas eram direcionadas para terrenos de regime compressional. As premissas básicas também podem ser aplicadas para regimes extensionais [GIBB83]

porém existem algumas diferenças importantes devido aos diferentes processos deformacionais atuantes [SCHU92]. Por ser mais recente o balanceamento de seções em áreas extensionais não está tão bem compreendido como nas regiões compressionais [BEAC92].

O plano de corte escolhido deve ser paralelo ao do deslocamento das estruturas, para que a quantidade de massa que entra seja igual a que sai da seção, possibilitando o balanceamento de massa da seção, pelas leis de conservação.

2.6.1 - Preservação de Volume

Apesar da regra geral da preservação do volume, as camadas de rocha são compactadas pela pressão que sofrem das camadas superiores a elas. Outra forma de perda de volume é através de fluidos que atravessam as rochas e removem material. O fenômeno da compactação pode ser englobado no processo de balanceamento, pois pode ser estimado.

Se a seção não balanceia volumetricamente, então o intérprete já sabe que não levou em conta algum fenômeno como os citados acima. Mais ainda: ele pode quantizar o erro e por exemplo estimar a compactação.

2.6.2 - Preservação de Área

Em uma seção, se forem desprezados certos processos de menor importância e for bem escolhido o plano da seção, de maneira a ficar paralelo ao do deslocamento dos materiais, então o problema tridimensional do volume pode ser reduzido a duas dimensões. 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.

Existem exceções à regra, tais como os domos de sal que têm comportamento tridimensional, se deslocando fora do plano bidimensional da seção. Estes fenômenos são exceções à regra da preservação de área, mas são cada vez mais compreendidos e cada vez mais integrados ao processo de balanceamento.

2.6.3 - Preservação de Comprimento e Espessura

Se não houver muito fluxo de material entrando ou saindo da seção bidimensional, então o comprimento das camadas (figura 2.7) antes e depois da deformação deve ser o mesmo. Mesmo que a camada seja dobrada ou segmentada, o comprimento total *l* se preservará. O mesmo vale para a espessura *e* da camada.

A premissa de preservação da espessura das camadas pode não ser válida em áreas extensionais, especificamente no caso de falhamento sindeposicional. Por exemplo, em falhas de crescimento, a sedimentação ocorre de forma muito mais intensa, ou até mesmo fica restrita ao bloco baixo.

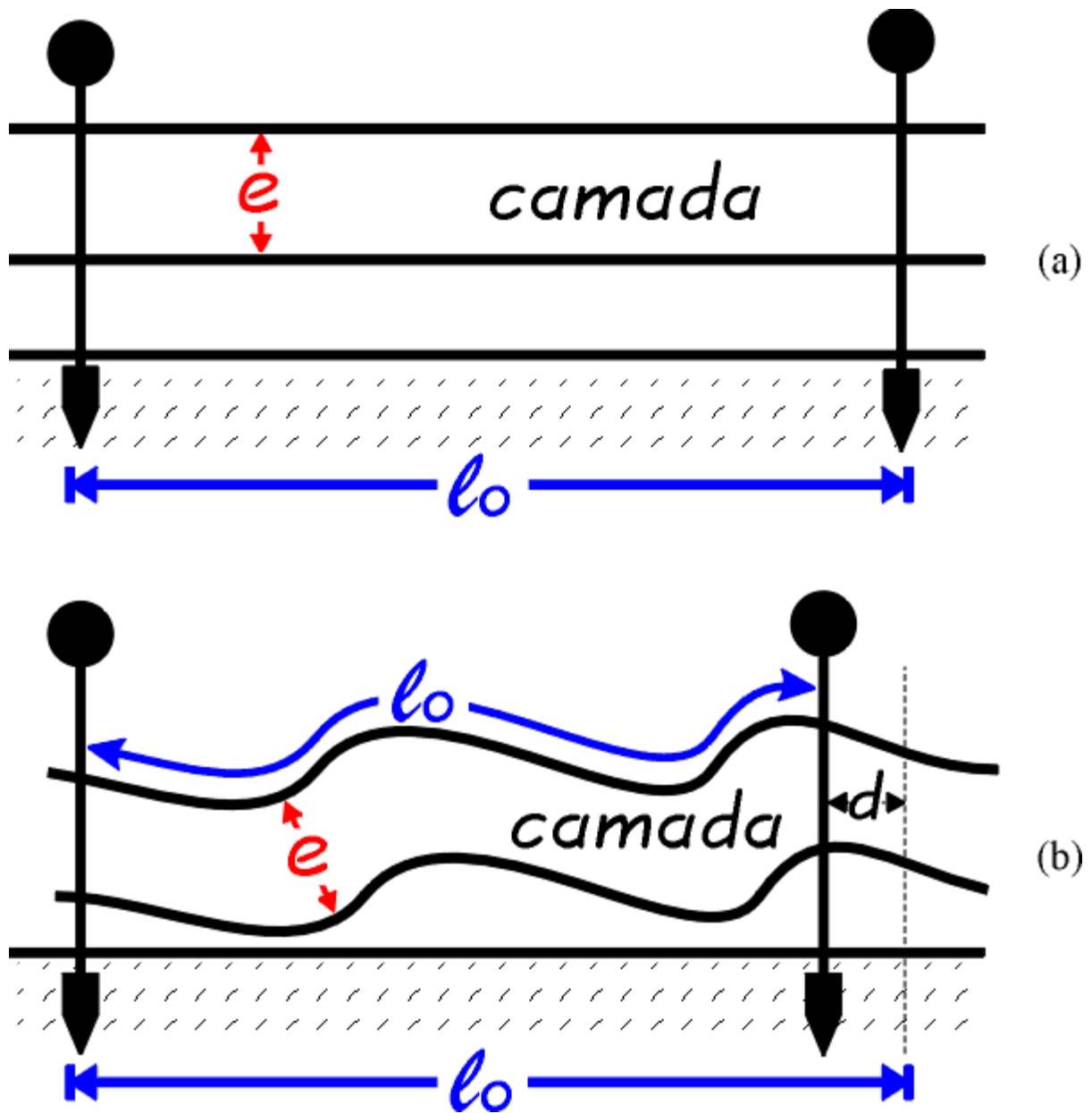


figura 2.7 - Conservação de comprimento.

2.7 - Compactação das Camadas Geológicas

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

As camadas sedimentares originalmente se depositaram sobre um embasamento (litosfera), que é uma camada de rocha sólida com de cerca de 30 km de espessura, que por sua vez está assentada em um fluido (astenosfera). Na verdade, o embasamento também está sujeito a deformações. Estes fenômenos, ditos isostáticos [BEND89], não são, no entanto, abordados aqui.

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 de amostras recuperadas na perfuração. Infelizmente estas medidas se aplicam apenas a pequenos intervalos e freqüentemente somente a uma dada litologia. Um outro método é estimar a compactação diretamente a partir do perfil sônico.

O modelo comumente utilizado [SCLA80] para estimar a compactação estabelece que a porosidade ρ decai exponencialmente com a profundidade (z). Isto é,

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

onde ρ_0 é a porosidade inicial e dec é o fator de decaimento (figura 2.8.a). Estes parâmetros podem ser extraídos de perfis elétricos e acústicos.

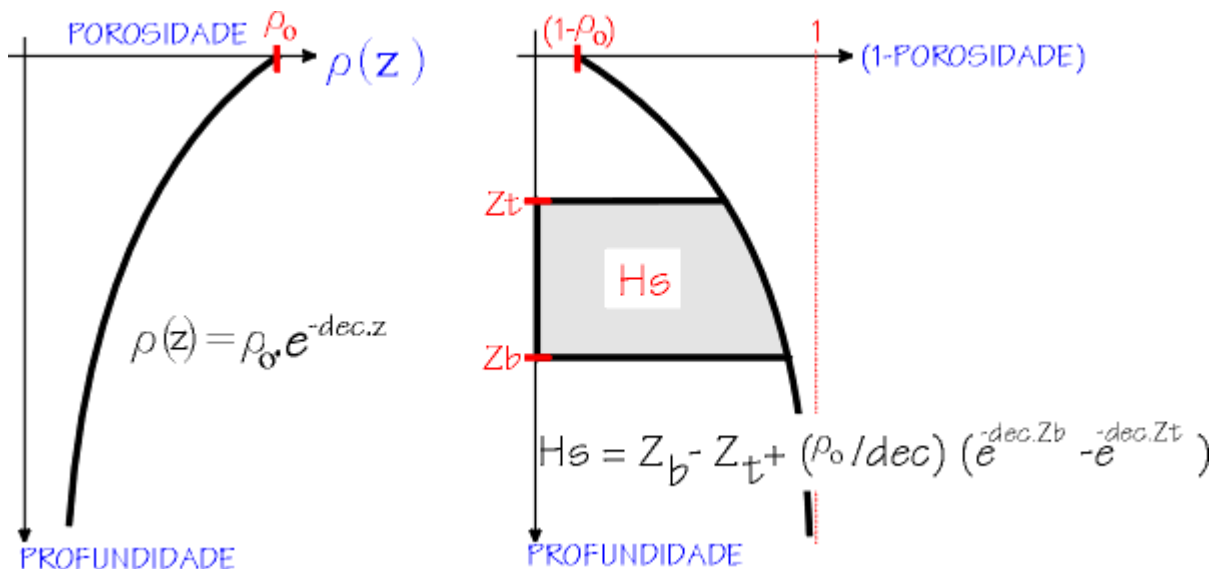


figura 2.8.a - Curva de porosidade versus profundidade e curva de complemento de porosidade (% de matriz) versus profundidade.

No processo de balanceamento, os métodos de estimação da compactação citados são utilizados na descompactação das camadas, que é o processo inverso ao 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 2.8.(b).

(1-POROSIDADE)=razão (volume de material/volume total)

$$H_s = \int_{Z_b}^{Z_t} (1 - \rho(z)) dz = \int_{Z_{b'}}^{Z_{t'}} (1 - \rho(z)) dz = CTE \quad h < h'$$

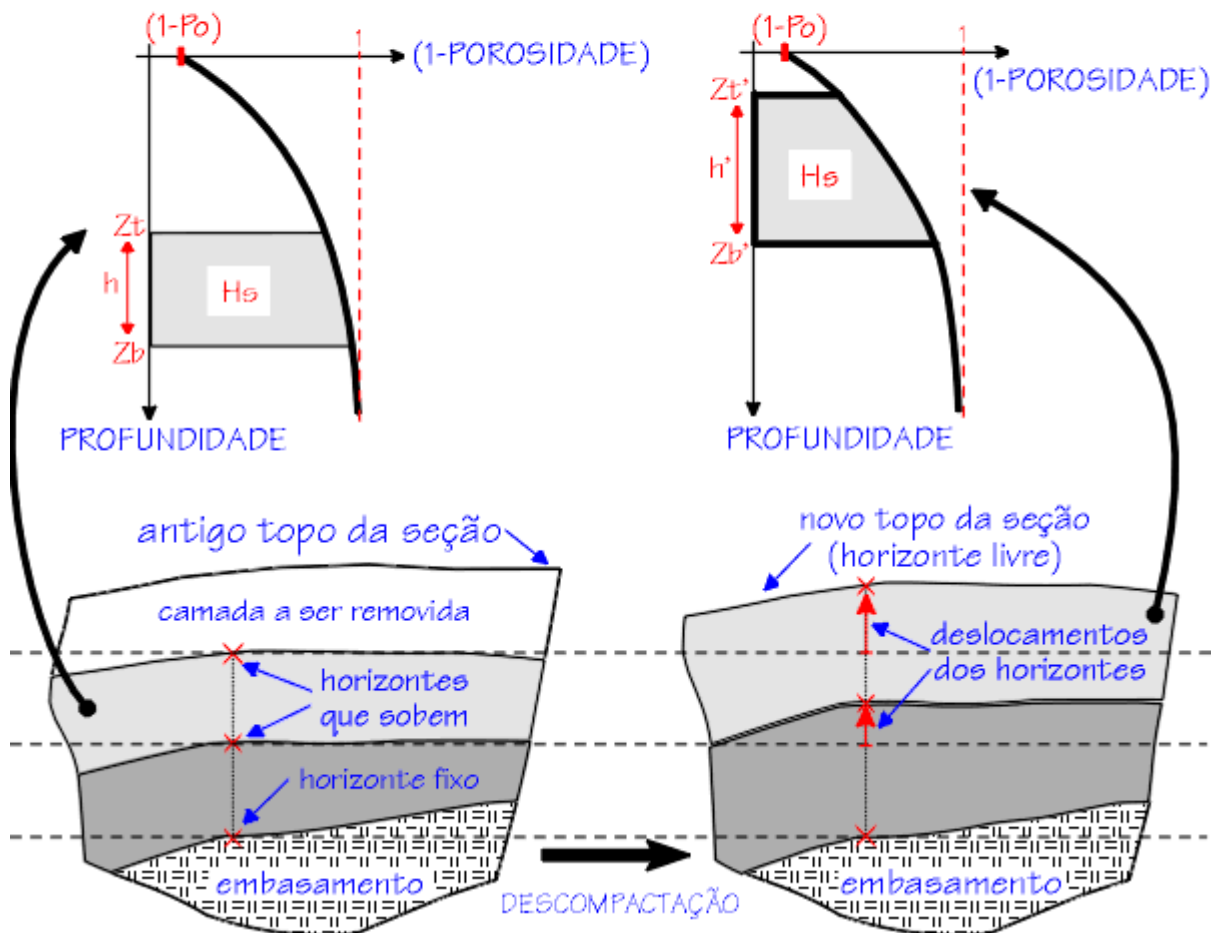


figura 2.8.b - Camadas antes e após a descompactação.

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

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

é a altura equivalente de sedimento da camada. Assim,

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

O processo de descompactação é feito da seguinte maneira. Calcula-se o H_s da coluna da camada abaixo da camada que vai ser removida a partir das suas profundidades de topo e base antes da remoção da camada superior. Após a remoção da camada superior, 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 acima e 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.

Observa-se que na descompactação de uma camada genérica, tal como mostrado na figura 2.8.b, a profundidade de topo (Z_t') após a descompactação é sempre menor que a profundidade (Z_t) antes da descompactação. Assim, como a integral H_s é constante, pode-se também notar nesta figura que há uma expansão da camada, isto é, $h' > h$.

2.8 - Ferramentas Básicas para o Balanceamento

Em terrenos de regime extensional, o trabalho de balanceamento pode, à grosso modo, ser resumido a rejuntrar blocos de rocha, remover sedimentos depositados e descompactar camadas. Já em terrenos compressionais, 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.

Um sistema que se proponha a restaurar seções deve possuir um conjunto básico de ferramentas. Na realidade, são um conjunto de transformações geométricas, onde cada uma simula um tipo de deformação que pode ser aplicada a uma estrutura geológica. As deformações sofridas pelas estruturas geológicas podem ser classificadas da seguinte forma [DAVI84]:

- Deformações Rígidas (deslocamento homogêneo das partículas do corpo)
 - Translação
 - Rotação
- Deformações Não-Rígidas (deslocamento não homogêneo das partículas)
 - Distorção
 - Dilatação/Contração

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 linear [DULA91] [ROWA89] permite restaurar blocos que sofreram deformações paralelas a um eixo, que geralmente é próximo da vertical. Por exemplo o bloco baixo da falha mostrada na figura 2.9 se abateu pela força da gravidade, segundo um eixo vertical, cisalhando-se. 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 2.9, a geometria destino é uma linha horizontal, correspondente a parte superior do bloco baixo, no seu estado deposicional original. Nesta transformação, a área do bloco cisalhado deverá ser mantida pelo algoritmo que realizará a deformação.

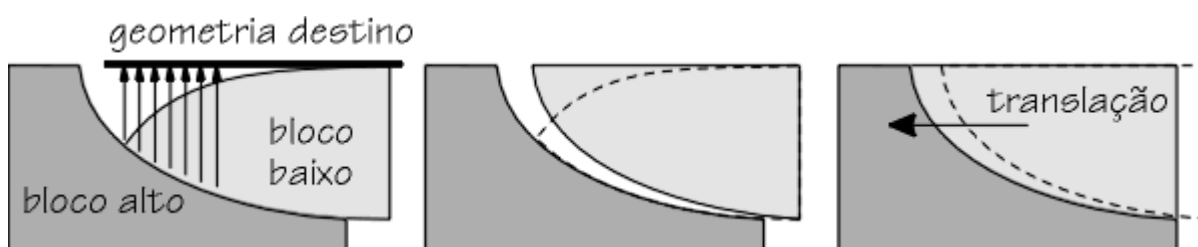


figura 2.9 - Cisalhamento e translação de um bloco.

O deslizamento flexível [DONA64] pode ser observado na figura 2.10, onde na esquerda vê-se 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. Os comprimentos e espessuras das camadas deverão ser mantidos pelo algoritmo de deformação, obedecendo as leis de conservação.

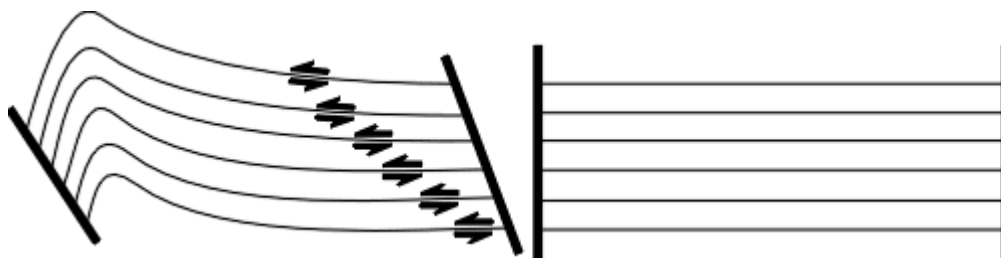


figura 2.10 - Deslizamento flexível.

Uma outra transformação é a descompactação, já citada no item anterior, que não é aplicada a um só bloco, mas a toda a estrutura. No caso do uso de curvas de porosidade versus profundidade, para cada camada o sistema deve possuir os parâmetros porosidade inicial e fator de decaimento, admitindo-se uma distribuição uniforme de porosidade para todas as profundidades de uma mesma camada.

[<- VOLTA](#)

para o
capítulo 1

[SUMÁRIO](#)

para o
índice

[SEGUE ->](#)

para o
capítulo 3

CAPÍTULO 3 - ESTRUTURA DE DADOS TOPOLÓGICA

3.1 - Representação de Estruturas Geológicas

As estruturas representadas na 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. Neste capítulo serão abordadas as subdivisões planares e as estruturas de dados usadas para representá-las.

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(a) 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.

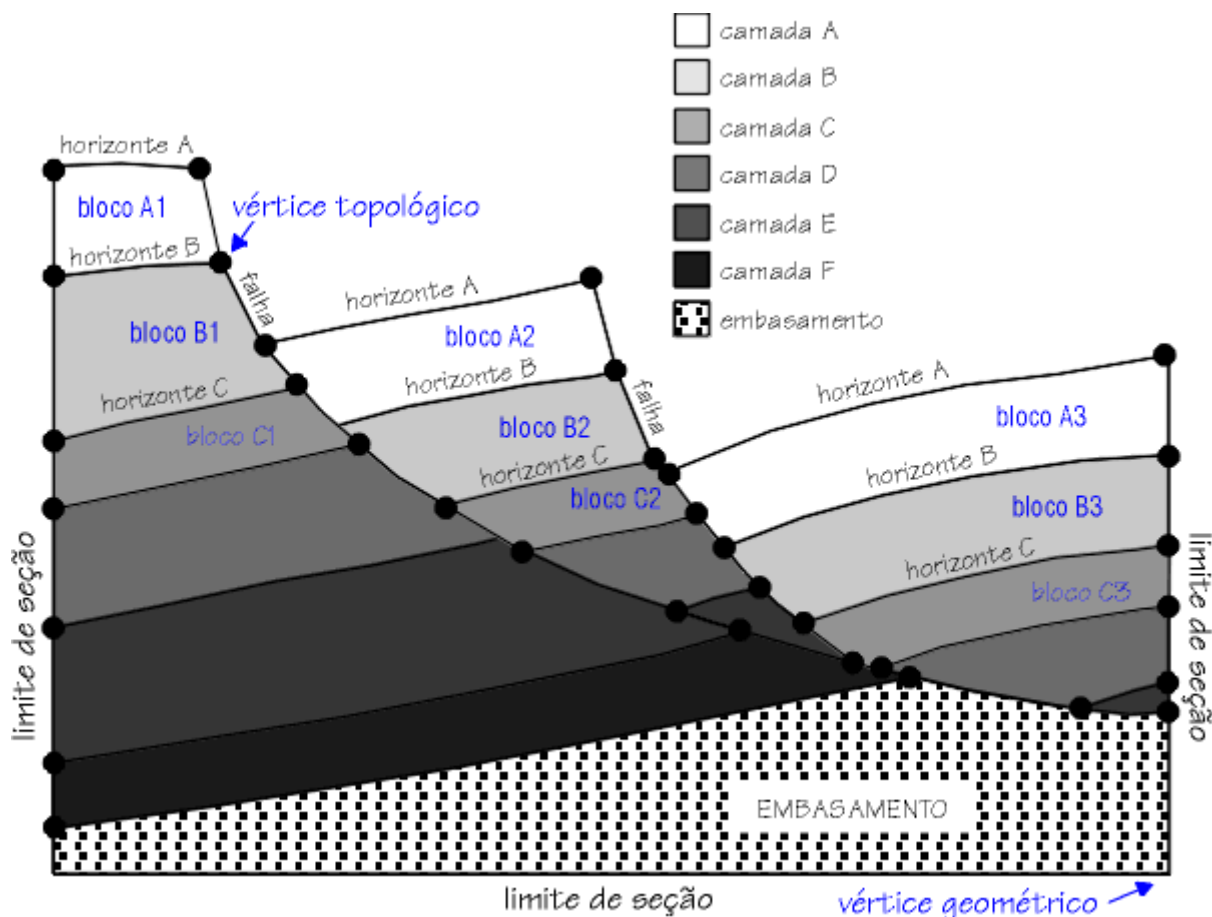


figura 3.1.a - Entidades topológicas de uma seção geológica.

Na figura 3.1(b), os blocos estão agrupados em módulos, segundo o tipo de movimento que sofreram. No caso, os módulos II e III deslizaram com relação ao módulo I, ocorrendo a formação de falhas entre eles. As transformações geométricas descritas no capítulo 2 são aplicadas a estes módulos, ou seja, todos os blocos integrados ao módulo sofrerão a mesma transformação em conjunto. Na verdade, como será visto adiante, cada módulo é uma subdivisão planar à parte, e todas são gerenciadas de maneira hierárquica.

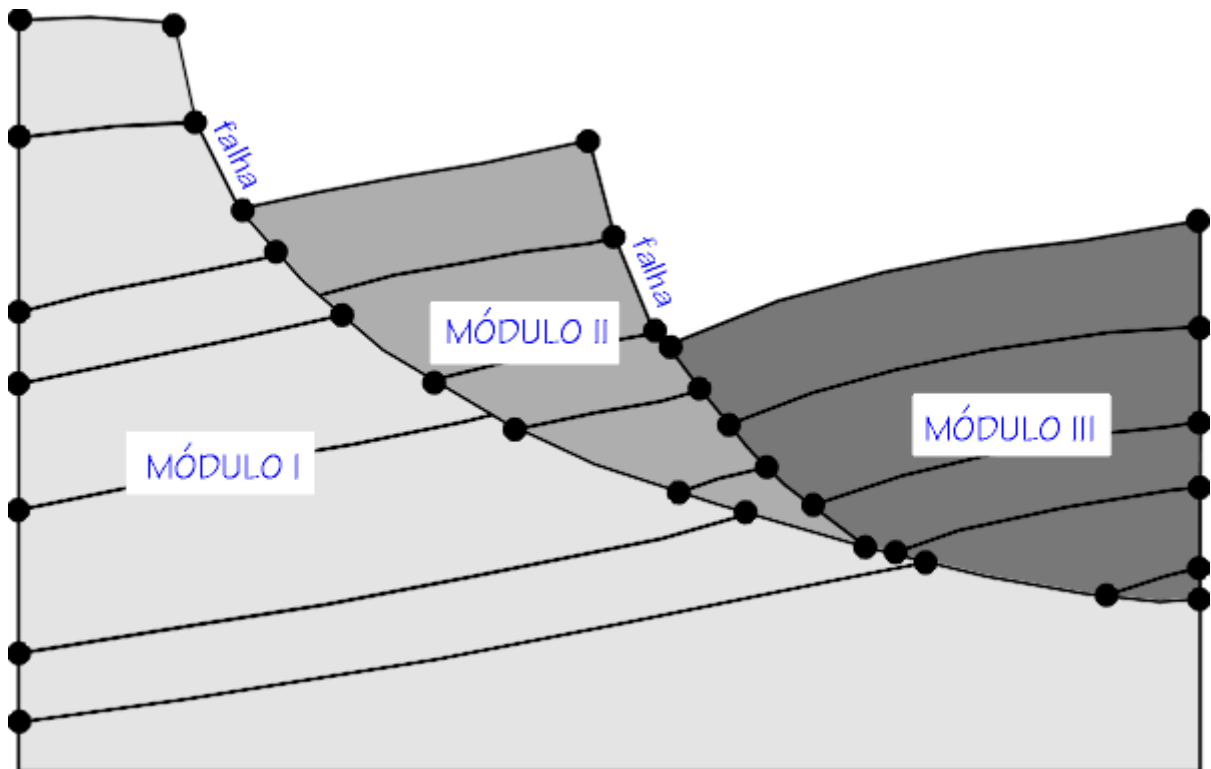


figura 3.1.b - Subdivisão hierárquica: a seção é dividida em diversas subdivisões planares chamadas de módulos.

3.2 - Subdivisões Planares

Uma subdivisão do \mathbf{R}^2 é apresentada na figura 3.2. Nela o plano é dividido em diversas regiões (faces f_1 , f_2 , f_3 e a face externa), sendo que cada uma delas é 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 que subdivisões planares representam a topologia da fronteira de sólidos homeomorfos a uma esfera [ROMA91] [ROMA92].

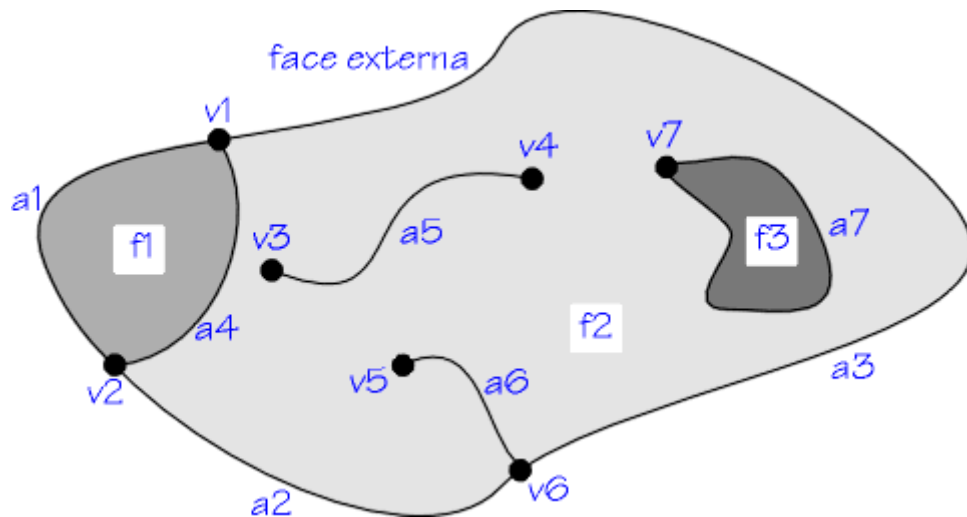


figura 3.2 - Exemplo de uma subdivisão do \mathbf{R}^2 .

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 destes 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.

Na figura 3.3 [WEIL85] são apresentadas as nove relações de adjacência, possíveis entre vértices, arestas e faces. De uma representação que tenha **suficiência de informação**, pode-se extrair todos os relacionamentos de adjacência entre os elementos da subdivisão planar. Mas a estrutura de dados usada em uma representação não precisa necessariamente armazenar explicitamente todas as nove relações de adjacência, bastando armazenar algumas delas, e a partir destas obter por derivação as restantes, contanto que em tempo razoável. O armazenamento explícito de todos os relacionamentos de adjacência exigiria uma quantidade maior de memória, apesar do rápido tempo de acesso às informações.

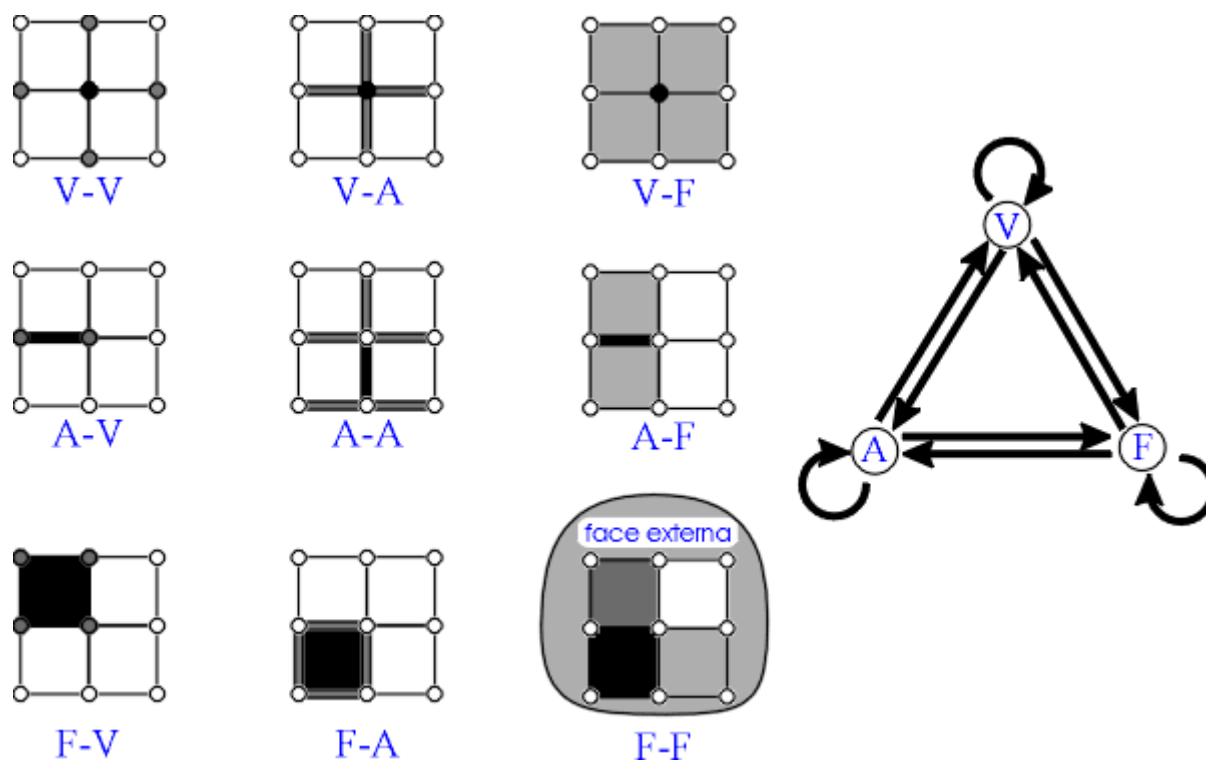


figura 3.3 - As nove relações de adjacência entre vértices, arestas e faces.

Na figura 3.4 vê-se uma curva com o clássico equilíbrio entre memória requerida versus tempo de acesso para uma estrutura de dados [WOOT85].

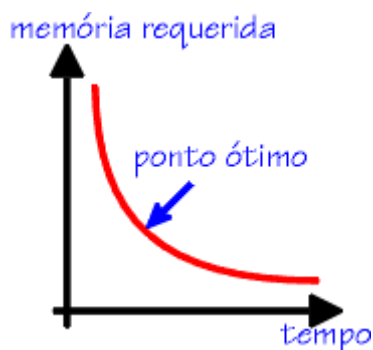


figura 3.4 - Curva de performance desejável para uma estrutura de dados [WOOT85].

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 (figura 3.3). 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 tamanho fixo (figura 3.5).

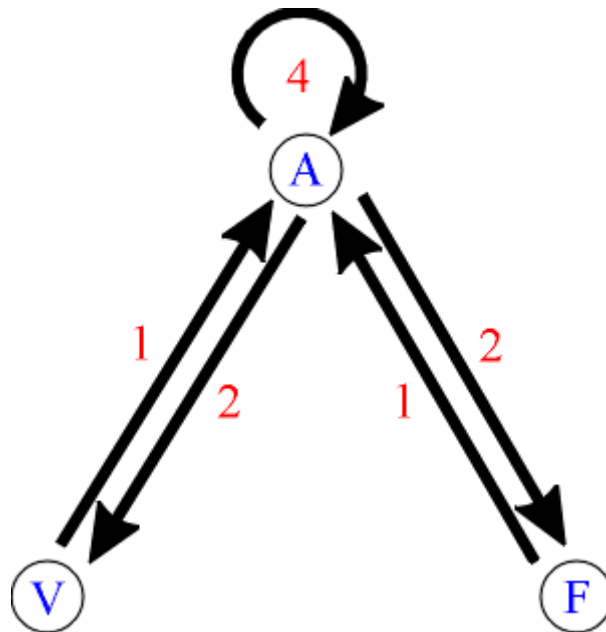


figura 3.5 - Relações de adjacência explicitamente armazenadas em uma estrutura baseada em arestas (os números indicam o número de entidades adjacentes explicitamente armazenadas).

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 3.6, 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.

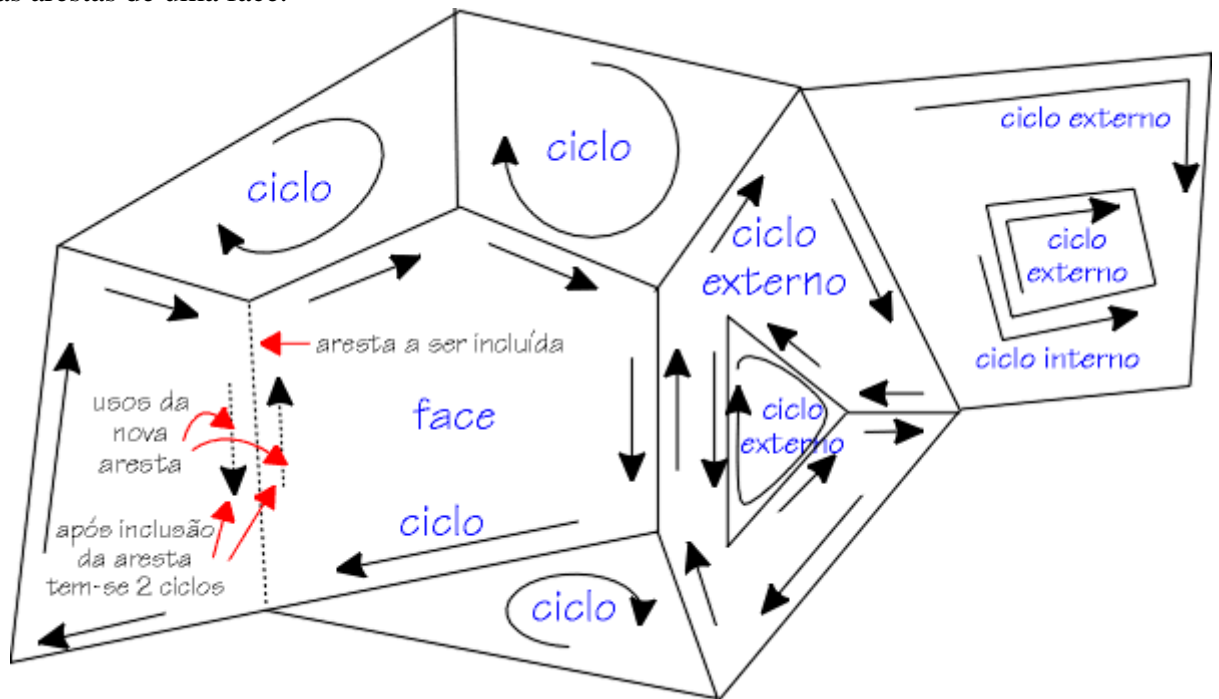


figura 3.6 - Orientação de usos e ciclos em uma subdivisão planar.

3.3 - Estrutura de Dados *Half-Edge*

Uma estrutura baseada em arestas muito conhecida é a *winged-edge*, que foi apresentada por Baumgart [BAUM75] (figura 3.7). 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. Já as estruturas *half-edge* [MANT88] e *face-edge* [WEIL85] utilizam este conceito. A estrutura *half-edge*, implementada pelo Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica (TeCGraf) da PUC-Rio, foi adotada neste trabalho como a estrutura de dados que armazena a subdivisão planar que representa a seção geológica a ser balanceada.

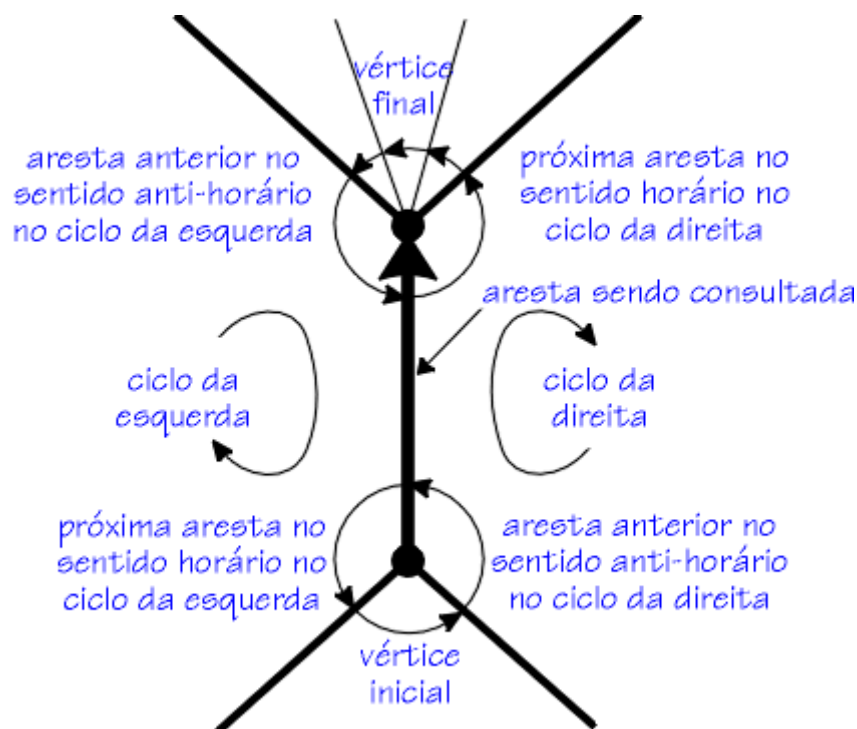


figura 3.7 - Estrutura de dados *winged-edge*.

Observa-se na figura 3.8.b 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 3.8.a). Mesmo não sendo completa, esta estrutura de dados permite que se obtenha as relações de adjacência com um desempenho que é, no pior caso, proporcional ao número de entidades topológicas envolvidas na busca.

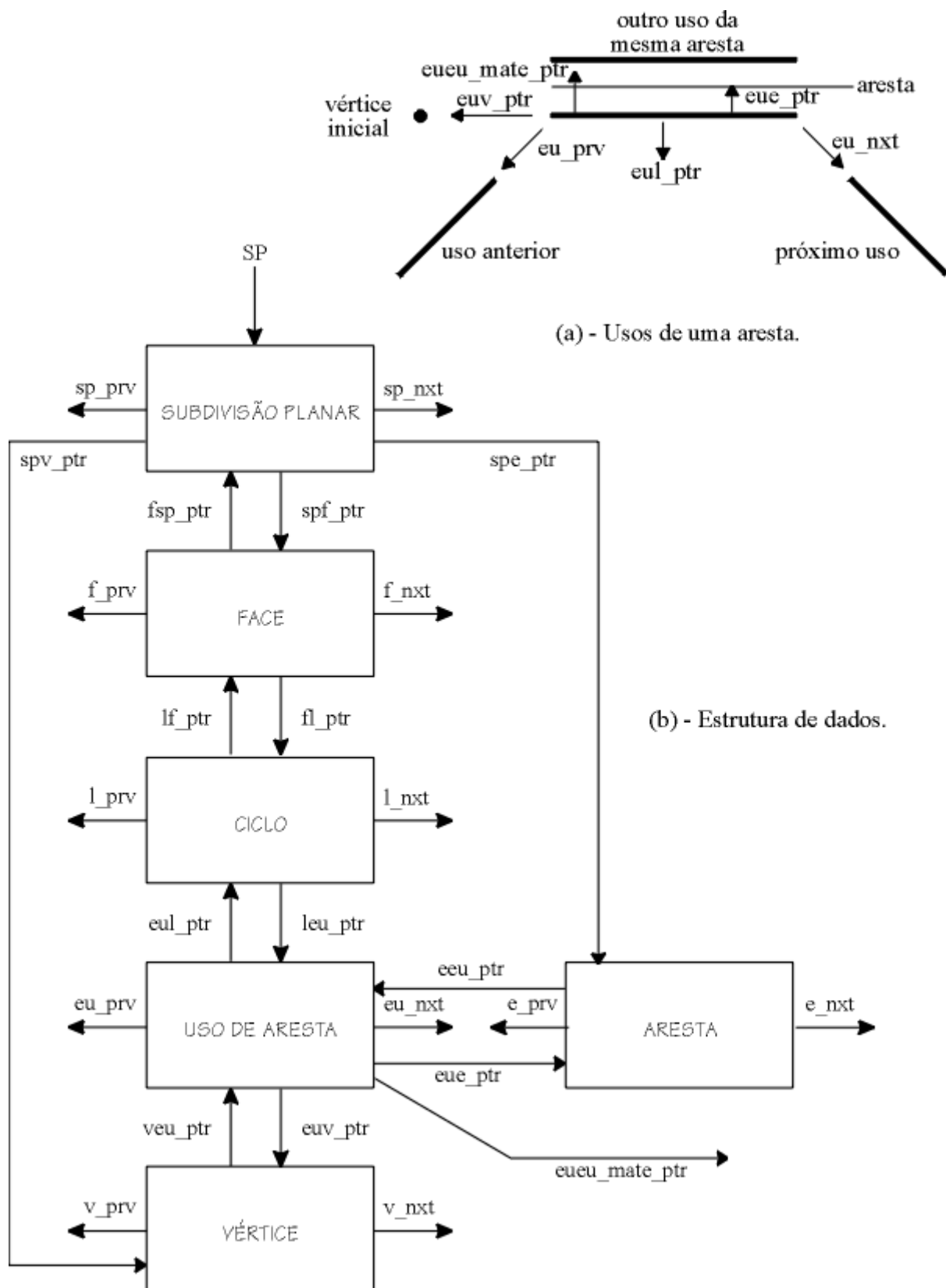


figura 3.8 - A estrutura *half-edge*.

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.

3.4 - Operadores de Euler

Com uma pequena coleção de operadores pode-se criar e manipular uma subdivisão planar. Uma característica interessante é a de que estes operadores possuem os seus inversos.

Estes operadores de subdivisões planares são chamados de **operadores de Euler**, e foram introduzidos por Baumgart junto com a estrutura *winged-edge* (o teorema de Euler estabelece que a relação entre o número de vértices, faces e arestas de um poliedro é uma invariante topológica). Estes operadores são independentes do formato da estrutura de dados sendo utilizada, manipulando a estrutura em alto nível. Por convenção estes operadores são referenciados por mnemônicos cujas letras chaves para as operações são:

m - *make* **k** - *kill* **s** - *split* **j** - *join*

e para as entidades topológicas são:

v - vértice **e** - aresta **f** - face

s - sólido (subdivisão planar no caso bidimensional) **r** - *ring* (ciclo interno da face)

As operações inversas a *make* e *split* são *kill* e *join* respectivamente. A partir de quatro operadores de Euler básicos pode-se criar e manter qualquer subdivisão planar. No entanto, um conjunto um pouco mais completo de operadores facilita a interface de programação. Um conjunto ideal [ROMA92] seria (figura 3.9):

OPERAÇÃO	OPERAÇÃO INVERSA
mvfs - <i>make vertex, face, sub. planar</i>	kvfs - <i>kill vertex, face, sub. planar</i>
mve - <i>make vertex, edge</i>	kve - <i>kill vertex, edge</i>
mef - <i>make edge, face</i>	kef - <i>kill edge, face</i>
mekr - <i>make edge, kill ring</i>	kemr - <i>kill edge, make ring</i>
mvr - <i>make vertex, ring</i>	kvr - <i>kill vertex, ring</i>
<i>split edge</i>	<i>join edges</i>

O operador **mvfs** cria uma subdivisão planar, a partir do nada, constituída de um vértice e uma face ilimitada (figura 3.9(a)). O **mve** (figura 3.9(b)) cria um vértice e uma aresta que é delimitada também por um vértice já existente. O **mef** (figura 3.9(c)) cria uma aresta entre dois vértices de um mesmo ciclo, gerando uma nova face. O **mekr** (figura 3.9(d)) cria uma aresta conectando dois vértices de ciclos distintos e assim estes tornam-se um único ciclo. O operador **mvr** (figura 3.9(e)) cria um ciclo pontual em uma face. E, finalmente, o **split edge** (figura 3.9(f)) divide em duas uma aresta, através de um vértice criado entre elas.

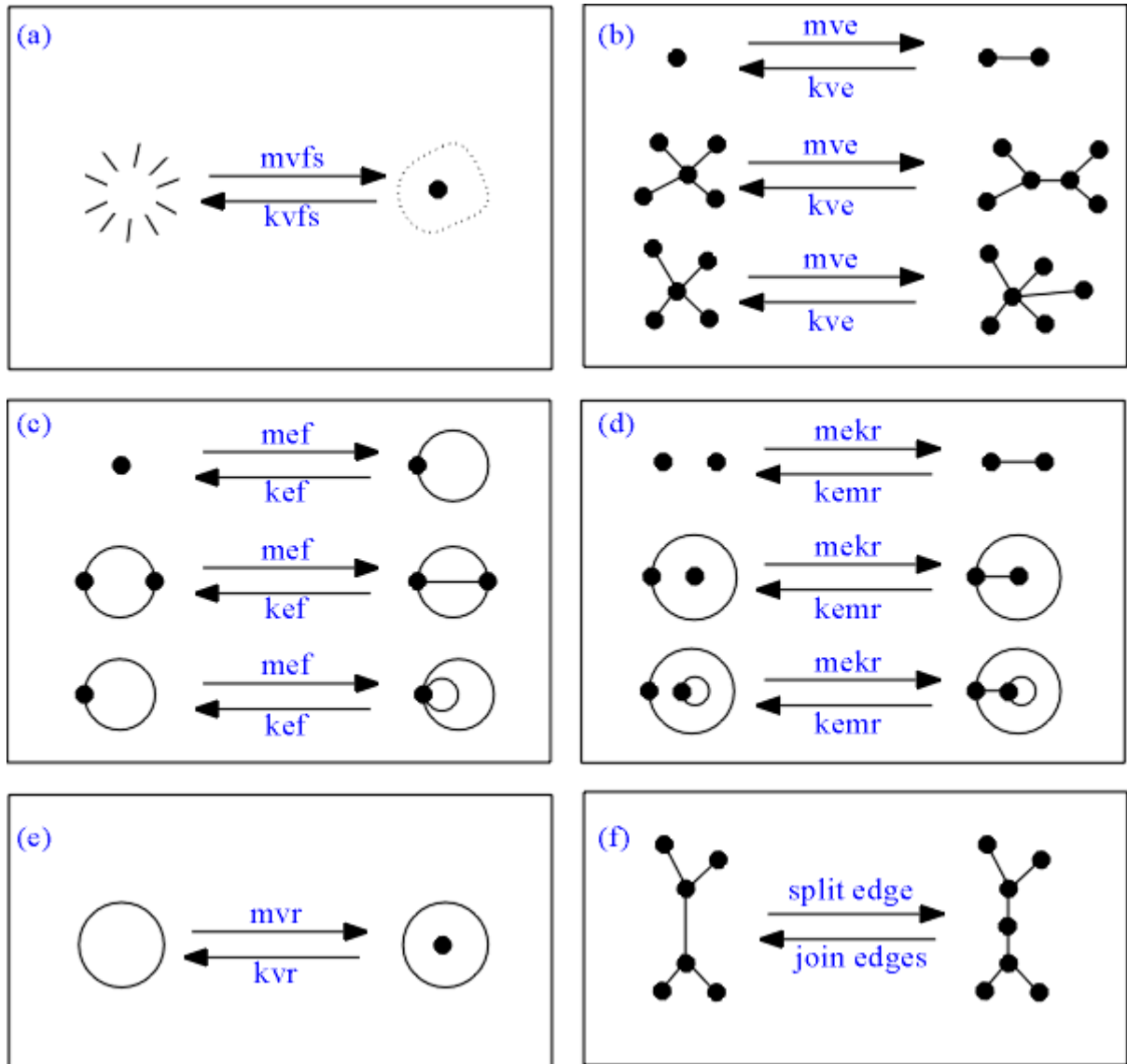


figura 3.9 - Alguns operadores de Euler.

Todos os operadores de Euler descritos acima possuem seus operadores inversos, o que permite que uma longa sequência de operações possa ser desfeita, bastando aplicar os operadores inversos na sequência inversa. Esta propriedade pode ser aproveitada no armazenamento da estrutura de dados na memória em meio permanente como um arquivo em disco, via uma desmontagem usando operadores apropriados na estrutura de dados durante a escrita e usando os operadores inversos, na sequência inversa durante a leitura, para a remontagem da estrutura. Outra vantagem seria a implementação de comandos do tipo desfazer (*undo*) no sistema, para comodidade do usuário. O aproveitamento destas características será discutido em mais detalhes nos próximos capítulos.

3.5 - Modelagem da Subdivisão Planar

A criação da subdivisão planar pode ou não ser um processo interativo. No caso interativo, um processo natural de modelagem [ROMA92] 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. Neste trabalho, a modelagem da subdivisão planar utiliza a biblioteca de rotinas HED desenvolvida pelo TeCGraf da PUC-Rio.

O pacote HED oferece os recursos necessários à 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 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.

3.5.1 - Inclusão de Curvas

Para que um segmento de curva possa ser acrescentado à uma subdivisão, deverá haver um pré-processamento geométrico, para que este segmento seja decomposto em segmentos simples que são arestas, contidos inteiramente nas faces da subdivisão já existente. Estas arestas poderão então ser adicionadas à subdivisão através de operadores de Euler, mantendo assim a consistência topológica da mesma. Este pré-processamento deverá determinar todos os pontos de interseção entre o novo segmento e as arestas já existentes. Este processo pode ser feito por partes conforme observado na figura 3.10. O segmento S é delimitado pelo vértice inicial v_i e o final v_f . Se o vetor tangente ao segmento S no ponto v_i está contido em uma face F , então obrigatoriamente a primeira interseção a partir de v_i será com um vértice ou aresta desta face F . No caso de ser uma aresta, a mesma será topologicamente dividida e um novo vértice será criado (figura 3.10(b)). Assim o segmento de curva é dividido em um segmento simples S_a e o mesmo processo de divisão será aplicado ao resto do segmento que vai da interseção até o vértice v_i , até que só restem os segmentos simples S_a , S_b , S_c e S_d .

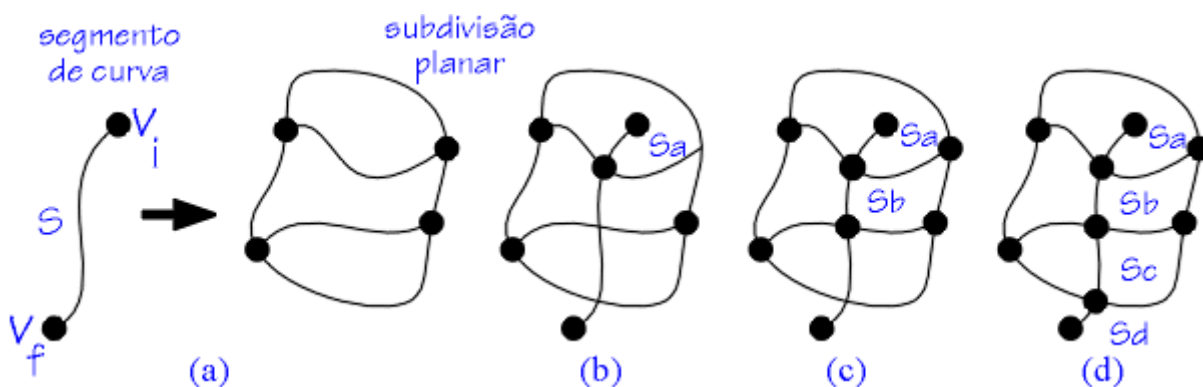


figura 3.10 - Processo de divisão de um segmento de curva em segmentos simples.

Após a fragmentação em segmentos simples, cada um deve ser inserido na subdivisão planar. Primeiramente é verificado se o vértice inicial do segmento coincide com um já existente na subdivisão. Caso contrário, o vértice inicial pode estar sobre uma aresta, que deve ser dividida por um novo vértice a ser criado, ou o vértice inicial pode ser interior a uma face, sendo necessária a criação de um ciclo pontual na mesma. Dependendo da topologia, pode-se ter uma das três configurações da figura 3.11. Na figura 3.11.a o operador **mekr** deve ser aplicado, pois o segmento conecta dois ciclos diferentes. Na figura 3.11.b o operador **mef** é aplicado, pois o segmento conecta arestas

do mesmo ciclo. E na figura 3.11.c o operador **mev** é aplicado, pois o extremo do segmento não se conecta a nenhum elemento e um vértice é criado.

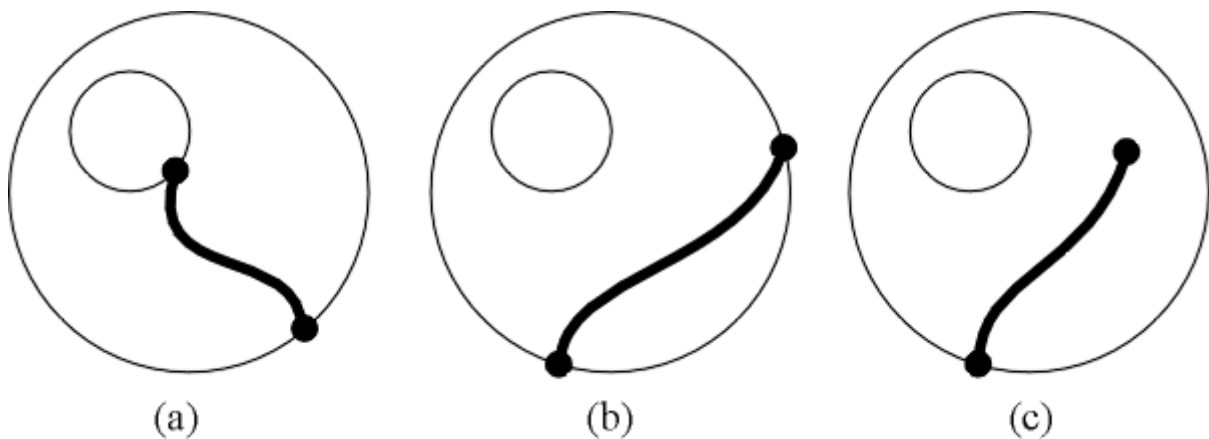


figura 3.11 - Inclusão de segmentos simples.

3.5.2 - Ordem de Complexidade

No processo de inclusão de um novo segmento numa subdivisão o ponto crítico em termos de tempo é a associação do extremo inicial do segmento com um vértice já existente na estrutura ou, caso não exista, com um que é criado neste processo. Após este processo, o tempo de inclusão é proporcional ao número de arestas de cada face interceptada. Uma maneira de otimizar o processo é fazer a busca do ponto dentro do retângulo que contém cada face da subdivisão. As coordenadas deste retângulo devem sempre ser atualizadas quando a geometria das faces for modificada. O algoritmo, no todo, tem ordem de complexidade proporcional ao número (A) de vértices ou arestas ou faces, já que o número de cada uma destas entidades topológicas estão relacionadas linearmente pela fórmula de Euler. Assim, a ordem de complexidade pode ser expressa como $O(A)$. E para a criação de uma subdivisão completa será necessário tempo $O(A_2)$.

3.5.3 - Campo de Atração

Para praticar verificações de proximidade geométrica e facilitar a interação do usuário durante a inclusão de segmentos de curva na subdivisão, adota-se o conceito de campo de atração em torno dos vértices e arestas, cujo raio de ação depende de uma dada tolerância. Se uma posição geométrica especificada pelo usuário estiver dentro do campo de atração, esta posição assumirá as coordenadas do vértice que atraiu ou da projeção da mesma na aresta que atraiu. Garante-se desta forma precisão na interação, e aumenta-se a robustez do sistema, diminuindo-se os erros de aritmética de ponto flutuante gerados no cálculo dos pontos de interseção das curvas.

3.6 - Subdivisão Hierárquica para Balanceamento de Seções Geológicas

As transformações geométricas citadas no capítulo 2 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 3.1(b), a seção está dividida

em três módulos, contituídos 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.

Os blocos correspondem às faces da subdivisão planar, ou blocos avulsos de rocha da seção geológica. Como ilustrado na figura 3.12, existe uma subdivisão hierárquica na representação da seção geológica.

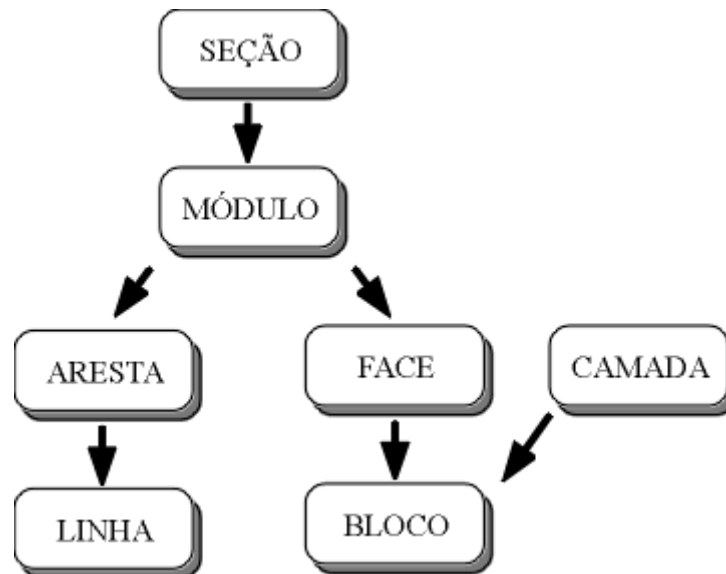


figura 3.12 - Subdivisão hierárquica da seção.

3.7 - Atributos Geológicos

Não basta que a estrutura de dados guarde apenas as informações de topologia. Cada elemento da seção necessita estar associado a um ou mais atributos geológicos.

Alguns atributos que uma camada e suas faces podem ter são:

- **Porosidade** - constante física usada na descompactação e compactação.
- **Taxa de decaimento** - constante física usada na descompactação e compactação.
- **Código de litologia** - informa tipo de litologia da camada.

Na realidade, estes atributos não são individuais para cada face. As camadas são compostas de diversos blocos que correspondem às faces da estrutura de dados (figura 3.1(a)). Estas faces herdam os atributos das camadas a que pertencem.

As arestas são formadas por curvas que são chamadas aqui de linhas. Estas linhas na seção geológica têm o atributo *tipo*, que pode ser:

- **horizonte** - linha que delimita o topo de uma camada geológica, em geral em contato com a base de outra camada acima.
- **falha** - marcam as descontinuidades dos horizontes.
- **limite de seção** - delimita a seção.

- **discordância** - similar ao horizonte, só que delimita o topo de camadas que sofreram erosão na sua superfície, após a deposição de sedimentos.
- **contato de intrusiva** - delimita o contato entre uma camada de rocha magmática ou uma camada de sal e outra rocha que sofreu a intrusão.

Outro atributo de linha é:

- **Idade** - idade geológica de formação da camada, associada ao horizonte no topo da camada.

Estes atributos podem ser aproveitados para se ter um sistema mais inteligente, realizando automaticamente operações com menor grau de intervenção do usuário, ou criticando operações inconsistentes solicitadas por ele.

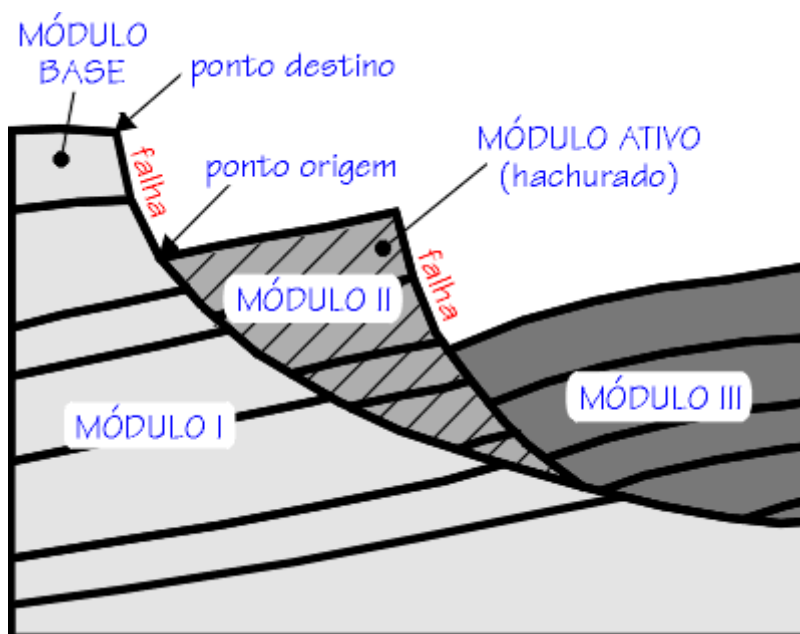
O HED provê mecanismos flexíveis que possibilitam o manuseio destes atributos [ROMA92]. O programador do aplicativo que usa o pacote HED passa para ele ponteiros de funções do aplicativo. Automaticamente estas funções serão disparadas quando ocorrer uma operação topológica sobre a subdivisão. Por exemplo, se uma face é dividida, uma função escrita pelo programador é chamada e, por exemplo, os atributos das duas faces podem ser herdados da face original.

<u><- VOLTA</u>	<u>SUMÁRIO</u>	<u>SEGUE -></u>
para o capítulo 2	para o índice	para o capítulo 4

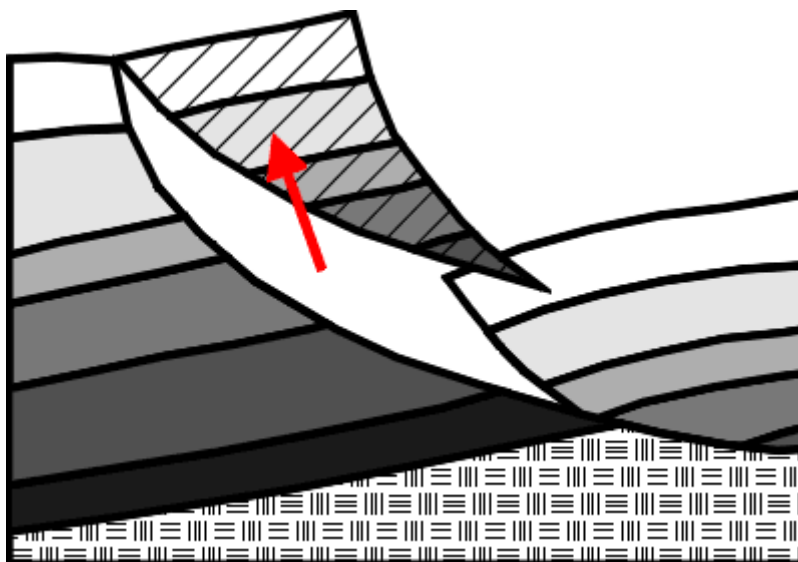
CAPÍTULO 4 - TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS

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.

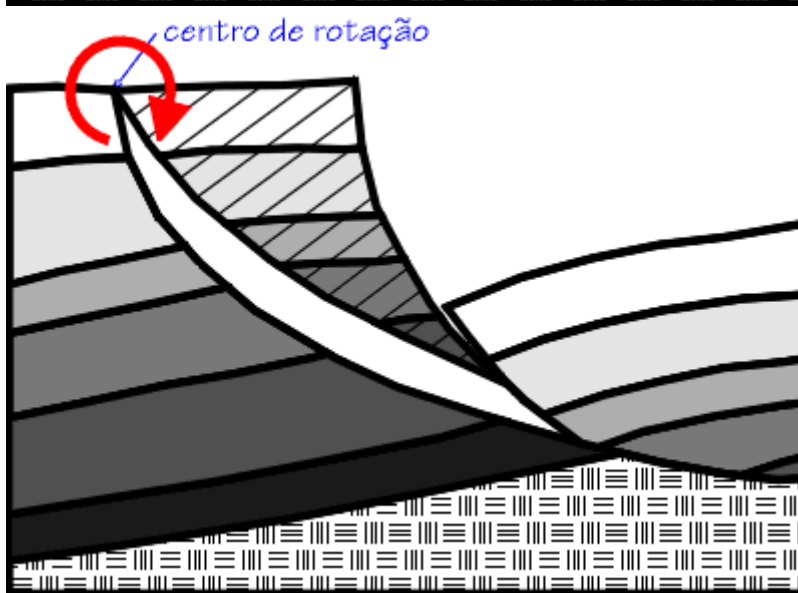
A aplicação das transformações geométricas requer, primeiramente, que sejam definidos módulos de trabalho (discutidos no item 3.1), sobre os quais serão aplicadas as transformações. O usuário, baseado na sua experiência em geologia, escolherá os blocos da seção que serão agrupados, formando o módulo. 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 iterativo natural de definição de um módulo é o apontamento, pelo usuário, das faces que representam os blocos a serem agrupados. Na figura 4.1 vê-se o exemplo de uma seção dividida em três módulos. O módulo 1 é o base e os módulos 2 e 3 deslizaram e se deformaram com relação ao módulo base. O módulo base, na verdade, é o que resta da seção, após a retirada de alguns módulos. O módulo base é um referencial fixo e, em geral, contém o embasamento, que é a rocha base onde se depositam as outras camadas geológicas.



(a) - Seção original a ser balanceada.



(b) - Exemplo de translação de um módulo.



(c) - Exemplo de rotação de um módulo.

figura 4.1 - Exemplos de transformações geométricas de corpos rígidos.

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 clássicos. Já as transformações não rígidas têm algoritmos relativamente complexos e são baseadas nos princípios geológicos discutidos no capítulo 2.

Os algoritmos abordados aplicam as transformações geométricas à seção representada pela subdivisão planar armazenada numa estrutura topológica.

Todas as operações de transformação, com exceção da descompactação, constam de três fases principais bem definidas:

- 1 - **Coleta**, via interação com o usuário, das informações necessárias próprias de cada uma das transformações.

2 - **Preparação** destas informações de forma que fiquem adequadas a serem aplicadas a cada uma das coordenadas que definem a geometria do módulo.

3 - **Aplicação** da transformação ponto a ponto.

Os algoritmos de transformação são puramente geométricos, mas constantemente são necessárias consultas à estrutura de dados topológica para obtenção de informações de adjacência.

4.1 - Transformações Rígidas

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 lítricos.

4.1.1 - Translação

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, só a movimentação.

A translação de um módulo promove a movimentação do mesmo em uma determinada direção e com uma determinada distância. Para isso, a interface do sistema deve coletar com o usuário estes dois parâmetros, para que o algoritmo de translação realize a transformação. Uma forma bem confortável de interação é o apontamento de um ponto origem e de um segundo ponto destino por parte do usuário. Este apontamento pelo usuário estará sempre sujeito ao campo de atração discutido no capítulo 3. Em geral o ponto origem pertencerá ao módulo a ser transladado e o de destino ao módulo base, como no exemplo da figura 4.1, onde procurou-se unir os extremos dos dois módulos, que originalmente, antes das deformações naturais que os separou, eram um só ponto.

O algoritmo é bem simples; primeiro calcula os deslocamentos em x e y a partir dos pontos de origem e destino coletados e depois recalcula todas as coordenadas dos vértices do módulo sendo transladado, adicionando estes deslocamentos.

4.1.2 - Rotação

O movimento ao longo do leito circular de uma falha promove a rotação dos blocos sobre a mesma, associada ao movimento de translação. Durante o deslizamento e 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.

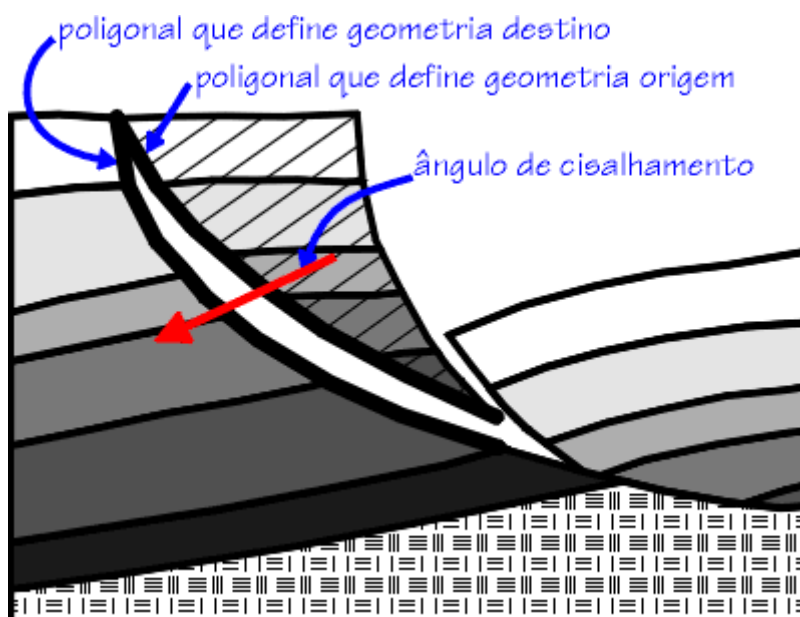
O usuário, além de indicar o módulo a ser transformado (tornar o módulo ativo), deverá passar outros dois parâmetros: o centro de rotação e o ângulo, necessários ao algoritmo que realiza a rotação. O ângulo é indicado através da construção de duas linhas de referência que o formam.

O algoritmo que realiza a rotação do módulo é semelhante ao da translação, aplicando a todos os vértices do módulo uma rotação das coordenadas.

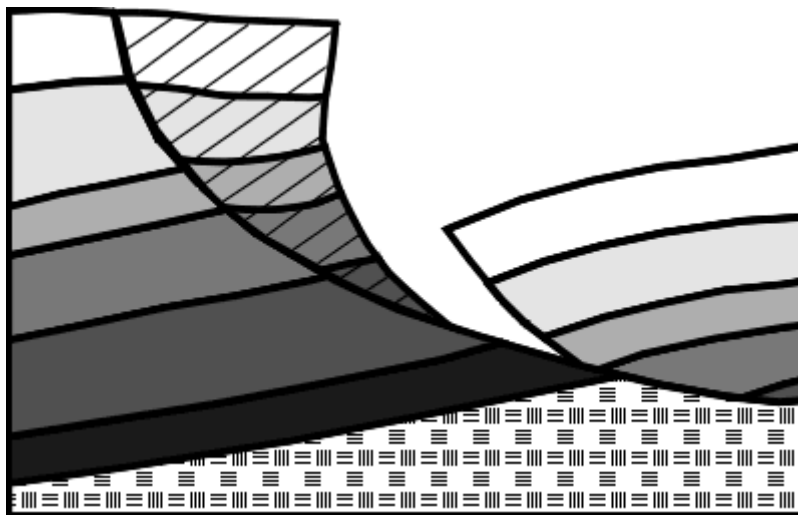
4.2 - Transformações Não Rígidas

4.2.1 - Cisalhamento Simples

Como discutido no capítulo 2, as falhas geradas pela movimentação tectônica são acompanhadas do abatimento de blocos, devido a falta de estabilidade dos mesmos, que perdem a sustentação com a separação dos blocos pela falha. Este abatimento ocorre segundo uma direção (ângulo). Em geral esta direção está próxima à vertical, que coincide com a força de gravidade. O bloco se abate sobre o leito da falha, pois se deforma plasticamente, ajustando-se ao perfil do leito, ou seja, o bloco cisalha numa 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 ao qual este bloco se ajusta. Na verdade, o cisalhamento pode ser aplicado a um módulo, ou seja, um grupo de blocos. A este módulo é aplicado um campo de deslocamentos (ou deformações). O campo é 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 4.3.(a)) 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.



(a) - Coleta de informações necessárias para a transformação.

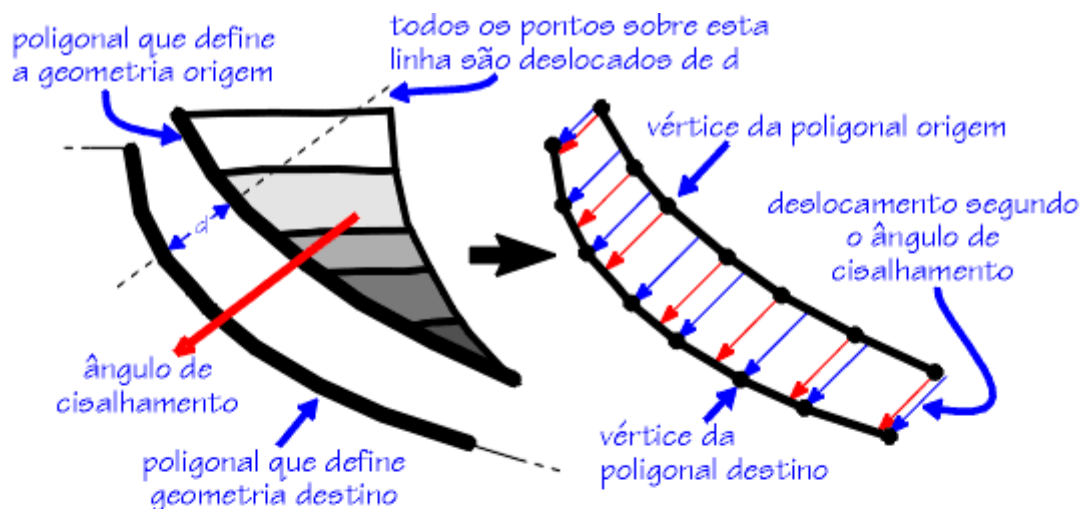


(b) - Módulo após o cisalhamento simples.

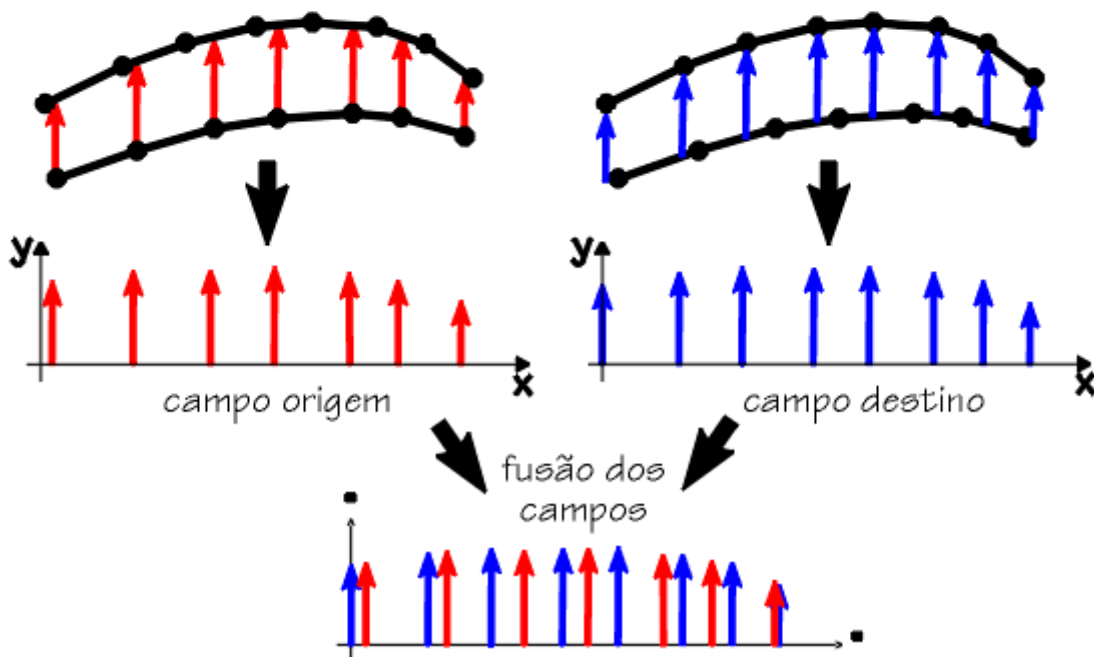
figura 4.2 - Exemplo de deformação por cisalhamento simples.

As informações coletadas com o usuário necessárias ao algoritmo de cisalhamento são uma geometria origem, uma geometria destino e um ângulo de cisalhamento, conforme ilustrado na figura 4.2(a). O cisalhamento transforma o perfil da geometria origem no perfil da geometria destino. Assim a geometria origem é uma parte da poligonal que delimita a fronteira do módulo a ser cisalhado, justamente a parte que fará contato com a geometria destino. No caso ilustrado, a geometria origem é parte do conjunto de arestas que formam a falha que divide os blocos alto (módulo base) e baixo (a ser cisalhado). Esta falha, após o descolamento do módulo correspondente ao bloco baixo do resto da seção, terá parte de suas arestas repetidas nos blocos alto e baixo, que tinham uma fronteira em comum antes da separação em módulos. A geometria destino não precisa necessariamente fazer parte das paredes (arestas) do bloco alto como no exemplo da figura 4.2(a). Como alternativa o usuário pode entrar com uma poligonal qualquer ao invés de montá-la a partir de arestas já existentes na seção. O último parâmetro a ser informado pelo usuário é a direção de cisalhamento, caracterizada pelo ângulo de ataque em que a geometria origem se deformará e se moldará ao perfil da geometria destino.

O algoritmo utilizado cria um **campo de deformações** (deslocamentos) a partir das poligonais que definem as geometrias origem e destino. Todos os vértices do módulo terão as coordenadas modificadas por este campo de deformações (figura 4.3).



(a) - Geometrias origem e destino montadas a partir das arestas da seção.



(b) - Mudança do sistema de coordenadas e fusão dos dois campos de deformação.

figura 4.3 - Montagem do campo de deformações.

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

A fase do algoritmo que **prepara** o campo de deslocamentos para posteriormente ser aplicado é a parte mais complexa segue o seguinte procedimento:

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 4.4). 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 retilineamente.

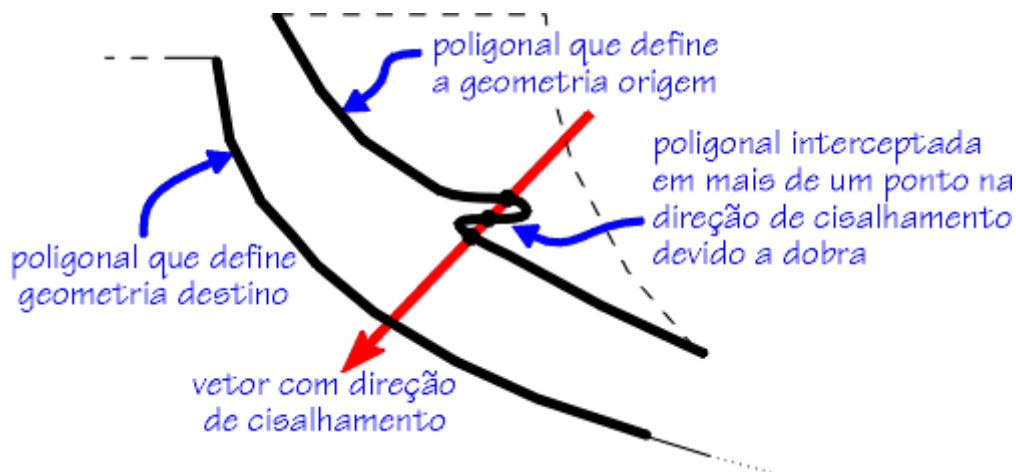


figura 4.4 - Dobras na geometria origem.

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 4.3(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 fase do algoritmo que **aplica** o campo de deslocamentos simplesmente repetirá o seguinte processo para todos os pontos do módulo a ser cisalhado:

Passo 1 - O ponto é transformado para o sistema de coordenadas auxiliar, que é o sistema do campo de deformações.

Passo 2 - O ponto é submetido ao campo de deformações, ou seja, é feita uma interpolação linear da abscissa, e é obtida uma ordenada correspondente à deformação naquela faixa do campo.

Passo 3 - O ponto, já deformado (deslocado), é levado ao sistema de coordenadas original da seção.

4.2.2 - Deslizamento Flexível

Este tipo de transformação se aplica a módulos formados por camadas que, por efeito de compressão, se dobraram em conjunto, sem a alteração das espessuras e dos comprimentos individuais de cada camada. Isto significa que houve conservação de área e comprimento de cada camada. O deslizamento flexível deverá ter o mesmo comportamento ao realizar a deformação inversa de restauração.

É coletado do usuário um módulo a ser transformado e as geometrias origem e destino. Cada uma destas geometrias está dividida nas linhas de referência e geratriz, conforme a figura 4.5.(a). A geometria origem faz parte da fronteira do módulo sendo transformado e se adaptará à geometria destino. A linha de referência da geometria origem é a fronteira do módulo correspondente a falhas ou limites de seção e ocorrem em geral na esquerda e na direita do módulo, de maneira que o usuário escolherá uma destas laterais como referência. A partir desta linha de referência é que são medidas as distâncias ao longo de linhas paralelas à geratriz. A linha geratriz origem poderá ser o topo ou a base do módulo que correspondem a horizontes das camadas da seção. A geometria destino pode ter uma parte criada (digitalizada) e uma parte aproveitada das arestas do resto da seção. Em geral a linha de referência destino será uma parede de falha à qual a linha de referência origem estava originalmente ligada. A linha de referência e esta parede de falha tinham, no passado, e devem novamente ter, após o balanceamento, perfis idênticos a serem rejuntados. Já a linha geratriz destino poderá ou não aproveitar parte da geometria já existente da seção. No exemplo da figura 4.5.(a), foi criada uma reta horizontal como geratriz destino. Poderia se aproveitar, por exemplo, o leito de uma seção como sendo a geratriz destino e, neste caso, a geratriz origem seria a base do módulo em transformação.

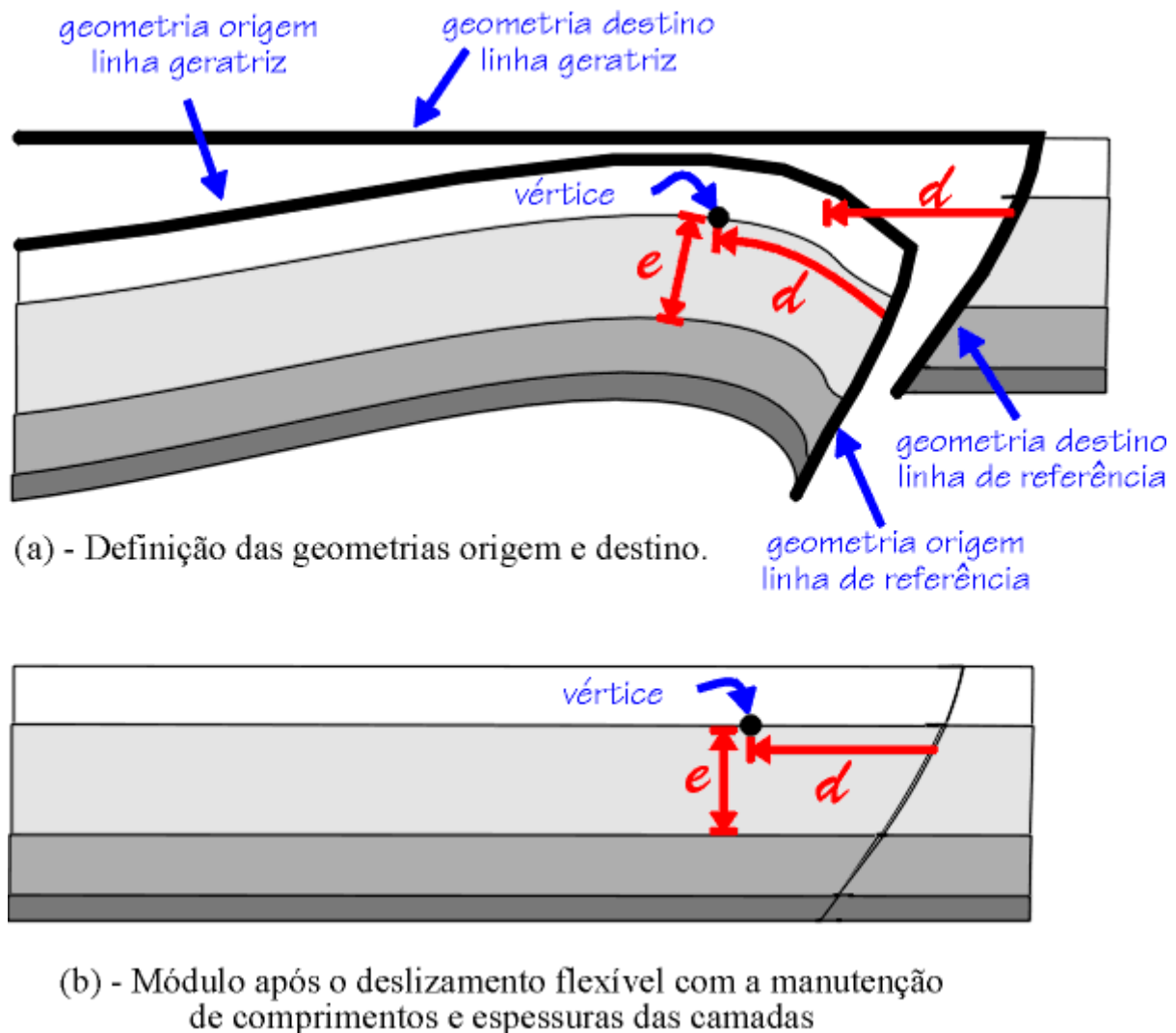


figura 4.5 - Transformação de deslizamento flexível.

O problema geométrico envolvido nesta transformação tem semelhança com o da transformação de cisalhamento simples, onde é criado um campo de deslocamentos e todos os vértices do módulo têm suas coordenadas transformadas em função deste campo. A grande diferença é que, no caso do cisalhamento simples, ocorre um deslocamento linear segundo uma dada direção, e no deslizamento flexível este deslocamento ou campo de deslocamentos é curvo, o que torna o problema mais complexo.

O algoritmo adotado considera que as camadas são paralelas à geratriz, ou seja, têm espessura constante. Assim sendo poderá ser utilizado em módulos cujas camadas mantenham uma espessura uniforme dentro de certa tolerância. Se esta condição não for respeitada, o algoritmo de deformação não vai modelar fielmente as transformações geológicas.

A operação de deslizamento flexível envolve vários procedimentos distintos. A figura 4.13 reúne estes procedimentos. A idéia básica é transformar os pontos de um módulo associado a uma geometria origem para gerar um novo módulo deformado associado a uma geometria destino. Assim, a partir de cada uma destas geometrias

(origem e destino) são geradas duas estruturas chamadas de florestas origem e destino, que são uma projeção em profundidade destas geometrias. Estas florestas permitem a conversão de posição entre dois sistemas de coordenadas: o cartesiano e um baseado em profundidade e distância. A aplicação da transformação consiste em a partir de uma posição cartesiana de um vértice do módulo origem (x_o, y_o) obter a partir da árvore origem a sua correspondente posição em termos de profundidade e distância (p_o, d_o) e em seguida, a partir desta profundidade e distância, só que agora usando a floresta destino, determinar a correspondente posição cartesiana para a geometria deformada. Após todos os vértices do módulo sofrerem estes procedimentos, o módulo estará transformado.

4.2.2.1 - Projeção em Profundidade da Geometria de Superfície

As camadas geológicas vão se depositando ao longo do tempo e mantendo, em geral, uma espessura constante ao longo da sua extensão. As estruturas formadas pela sobreposição destas camadas tendem então, pela própria natureza, a ser paralelas à superfície. A movimentação tectônica tende, em certos casos, a provocar o deslizamento destas camadas paralelas umas com relação às outras e a geração de dobras nestas camadas [KLIG86].

Uma boa aproximação para estimar o comportamento da geometria de camadas inferiores a uma superfície conhecida, que é chamada de geratriz (linha A-I), é ilustrada na figura 4.6.(a). As linhas formadas pelas bissetrizes dos ângulos das dobras da superfície prolongam-se em profundidade, unindo-se em certos pontos com outras bissetrizes, tal qual os ramos de uma árvore. As paralelas à geratriz (superfície) têm pontos de quebra exatamente quando interceptam as linhas das bissetrizes.

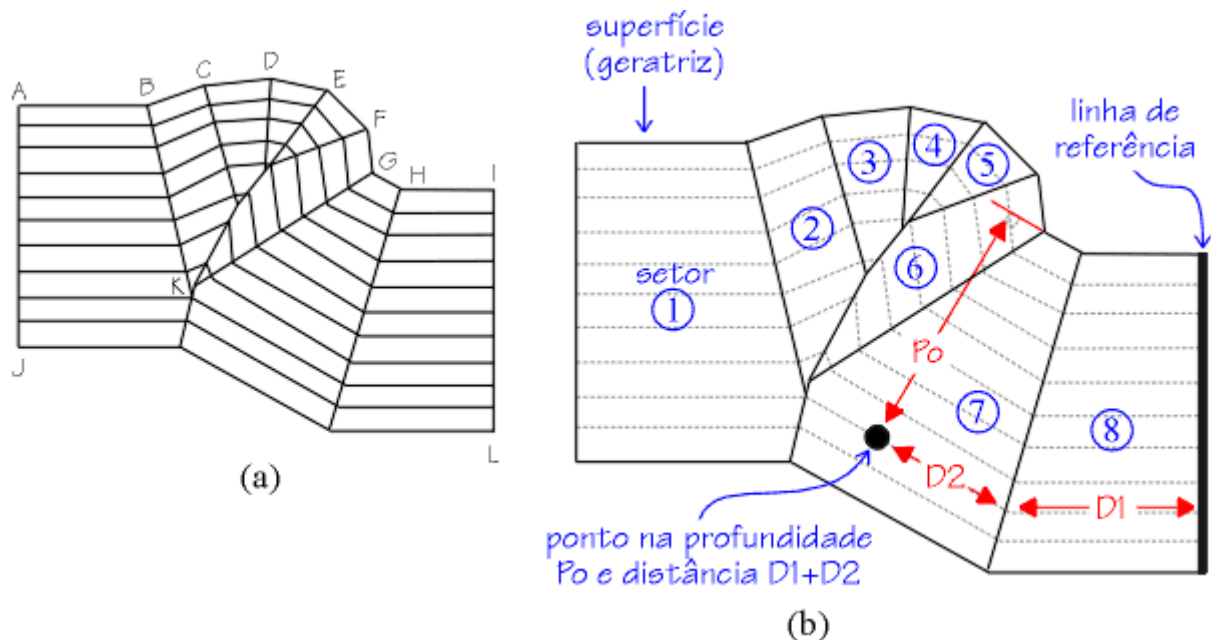


figura 4.6 - Projeção da geometria da geratriz em profundidade.

Será dado o nome de **setor** às regiões formadas e delimitadas pelas linhas das bissetrizes e as linhas que formam a envoltória do módulo. No caso do exemplo da figura 4.6.(b) existem 8 setores. Os setores de 2 a 6 são delimitados por bissetrizes e

segmentos da geratriz. Já os outros setores são delimitados também por segmentos das linhas laterais e da linha que forma a base do módulo. Para cada setor existe um único segmento da geratriz correspondente na superfície.

As bissetrizes formam **árvores**, isto é, grafos acíclicos e conexos. No exemplo da figura 4.7 existem duas árvores. A da direita tem apenas um segmento que é a bissetriz que separa os setores 7 e 8. A árvore da esquerda é formada pela união das bissetrizes que separam os setores de 1 a 7. As **folhas** da árvore correspondem aos nós terminais da árvore correspondentes aos vértices da geratriz. Uma **floresta** é o conjunto de todas as árvores criadas a partir de uma geratriz. Associado a cada árvore existe um **tronco**. Dele derivam todos os **ramos** da árvore. No caso da figura 4.7 existem dois troncos, um separando os setores 1 e 7 e outro que é formado pela bissetriz que divide os setores 7 e 8. Troncos são gerados quando não ocorrem mais uniões de ramos a partir de uma certa profundidade, o que pode ocorrer por duas razões: ou as bissetrizes não convergem nunca ou convergem (se unem) numa profundidade fora dos limites do módulo. Daí a necessidade da definição de uma **profundidade máxima**.

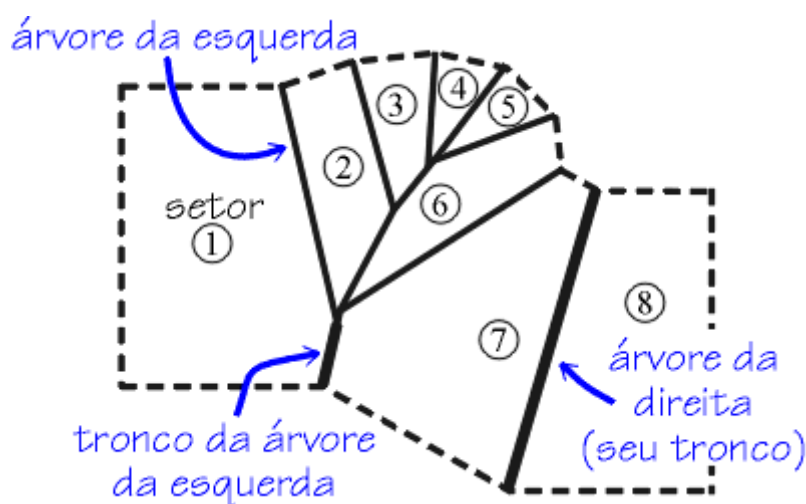


figura 4.7 - Definição de árvore e tronco.

A utilidade deste modelo para o algoritmo de deslizamento flexível é que, dada a posição de um certo ponto, (ou seja, a **profundidade** com relação à geratriz e a **distância** com relação à uma linha lateral de referência como a linha I-L por exemplo) após uma deformação desta geratriz pode-se recalcular a nova posição deste ponto na mesma profundidade e distância. Como, no modelo adotado, as espessuras e comprimentos se mantêm constantes apesar das deformações, as distâncias e profundidades também se manterão.

Para medir a **profundidade** de um ponto, determina-se o setor que contém o ponto e traça-se uma perpendicular ao segmento da geratriz deste setor, que passa pelo ponto como ilustrado na figura 4.6.(b). A profundidade P_o do ponto será a distância do ponto à interseção com a reta que suporta este segmento da geratriz.

Para calcular a **distância** do ponto à linha lateral de referência (I-L) calcula-se a distância $D1$ a partir da linha de referência até a interseção com a bissetriz que divide os setores 7 e 8, e a ela soma-se a distância $D2$ desta interseção até o ponto. Todas estas distâncias são medidas paralelamente aos segmentos correspondentes da geratriz, ou

seja, a uma profundidade constante dentro de cada setor. Esta profundidade é calculada pelo método citado no parágrafo anterior.

4.2.2.2 - Montagem das Florestas

A montagem das florestas requer duas informações: a poligonal que define a geometria de uma geratriz e a profundidade máxima. Não é considerada a geometria abaixo da profundidade máxima, pois apesar da geometria da geratriz se projetar indefinidamente em profundidade, o módulo sendo transformado tem dimensões finitas. Pode se adotar, para valor da profundidade máxima, a extensão vertical do módulo.

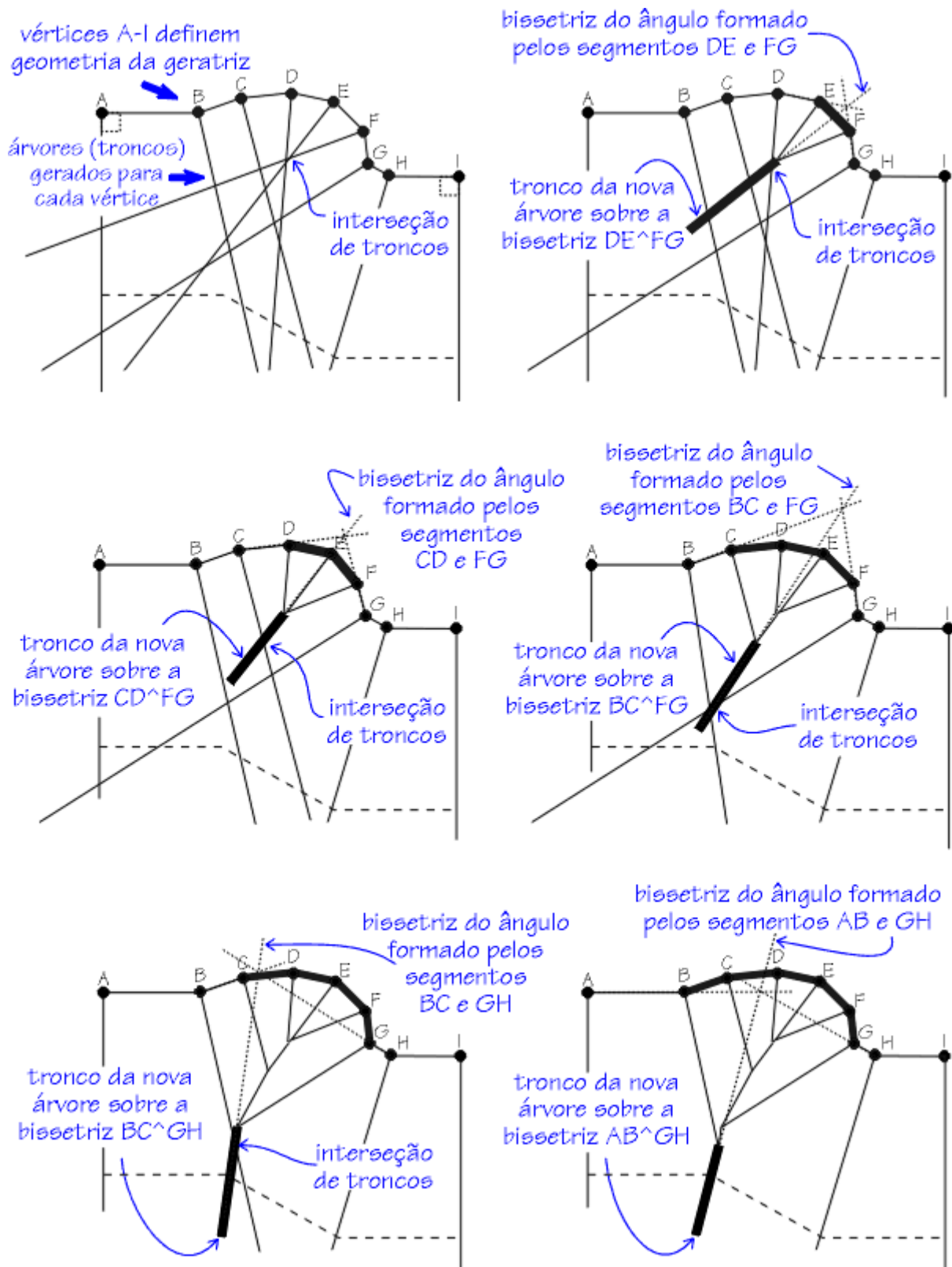


figura 4.8 - Construção de uma árvore de bissetrizes a partir da geratriz.

O algoritmo de geração da floresta tem os seguintes passos:

Passo 1. Para cada vértice da geratriz, criar uma árvore que nesta fase só tem o tronco (figura 4.8.(a)). Estes troncos ficam sobre as bissetrizes dos ângulos formados pelos segmentos da geratriz. No exemplo da figura, o tronco que nasce no vértice B é suportado pela bissetriz do ângulo entre os segmentos AB e BC. Para os dois vértices extremos são gerados troncos perpendiculares à geratriz (figura 4.8.(a)).

Passo 2. Iterativamente, tenta-se fundir as árvores até que não haja mais interseções de seus troncos, por estes não convergirem ou porque se interceptam em profundidades maiores que a profundidade máxima. As fusões dos troncos são feitas aos pares e, obviamente, sempre entre troncos de árvores vizinhas. A sequência de fusão tem como critério de prioridade a profundidade em que ocorre a interseção dos troncos. Deve ser feita primeira a fusão do par de troncos vizinhos que se interceptam na menor profundidade, em cada iteração. Na figura 4.8 são ilustrados os passos de fusão dos troncos (árvores) correspondentes aos vértices de B a G em um só tronco (uma árvore), pois se interceptam na menor profundidade. Na figura 4.8.(b) a bissetriz suporte do novo tronco é a do ângulo $DE^{\wedge}FG$. Na iteração seguinte, após a análise de todas as interseções de troncos possíveis, o tronco EF (gerado na fusão dos troncos dos vértices E e F) se intercepta com o tronco D (nasce no vértice D) na menor profundidade, formando o tronco DEF, e está sobre a bissetriz do ângulo $CD^{\wedge}FG$, ou seja, o ângulo formado pelos segmentos da geratriz externos aos vértices cujas árvores já foram fundidas.

Ao final do passo 2, que termina quando não ocorrerem mais fusões de árvores, tem-se um conjunto de árvores que constituem a floresta correspondente à geratriz dada. A forma de saída desta floresta pode ser uma lista encadeada de estruturas do tipo árvore, sendo que cada árvore tem associada a seus nós a posição geométrica correspondente à interseção dos ramos. A árvore, pela própria natureza da geometria do problema, é do tipo binária, mas os casos de interseção de mais de dois troncos em um mesmo ponto, devem ser tratados, apesar de dificilmente ocorrerem. Uma estrutura de dados possível para o armazenamento da floresta é a sugerida na figura 4.9, onde a floresta seria representada por uma lista duplamente encadeada de árvores binárias.

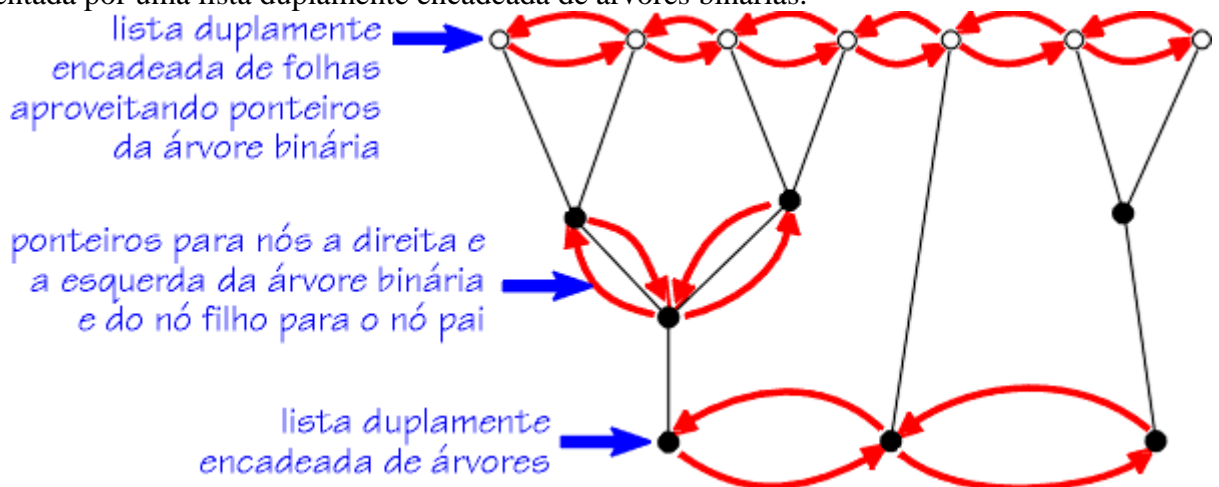


figura 4.9 - Estrutura de dados utilizada no armazenamento da floresta.

Os nós das árvores, além de apontarem para os nós à esquerda e à direita, também informam a posição geométrica do nó e a profundidade do mesmo. Esta profundidade é a profundidade acumulada de todos os segmentos, entre o nó em questão e os nós-folha. Esta profundidade será consultada no momento do cálculo de profundidade de um ponto qualquer do módulo a transformar. Os ponteiros dos nós-folha (terminais) apontam para os nós-folha à esquerda e à direita, mesmo que pertençam a outra árvore. Para diferenciar estes nós, uma variável com o tipo do nó também é armazenada para cada nó, que pode ser folha ou não. Cada nó também tem um ponteiro para o seu pai. Este ponteiro vai facilitar o caminhamento iniciado em um nó-folha, em direção à raiz, em busca de uma determinada profundidade.

O algoritmo deve testar a ocorrência de dobras com estrangulamento na linha geratriz, como ilustrado na figura 4.10. Geologicamente, o simples fenômeno do deslizamento e dobramento de camadas não cria uma estrutura deste tipo. Para que seja respeitado o princípio de se ter camadas paralelas e de espessura constante, não deve ser permitido o uso de uma geratriz com estrangulamentos, pois, na região onde ocorre o gargalo, não há profundidade suficiente para a passagem de todas as camadas encontradas ao longo do módulo sendo transformado.

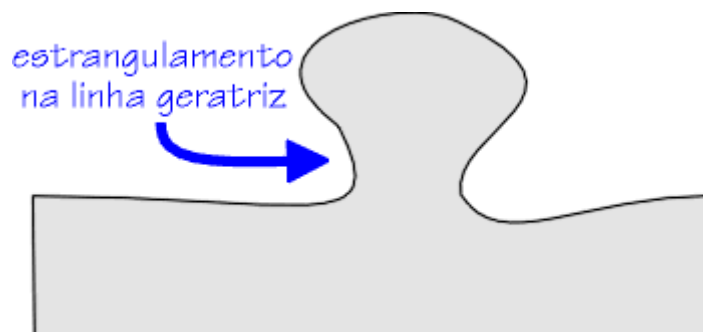


figura 4.10 - Caso particular do estrangulamento.

4.2.2.3 - Localização Geométrica na Árvore

Para a localização no plano precisa-se de duas coordenadas cartesianas. No caso da árvore, o posicionamento é dado pelo par profundidade e distância (p_o, d_o).

Um procedimento essencial para a transformação de deslizamento é a localização geométrica de um ponto dentro da árvore. Esta localização pode ser de dois tipos. No primeiro caso, dada a posição cartesiana (x_o, y_o) de um vértice, deve-se obter a mesma no sistema de coordenadas profundidade e distância. No segundo, é desejado o inverso: dados (p_o, d_o), obter (x_o, y_o).

Os ramos, troncos e os segmentos entre as folhas (vértices da geratriz), formam polígonos dentro dos quais situam-se os pontos a serem transformados. Estes polígonos delimitam os setores introduzidos no item 4.2.2.1.

4.2.2.3.1 - Conversão de Posição Cartesiana em Profundidade e Distância

O algoritmo de localização para obter (p_o, d_o) em função de (x_o, y_o) é o seguinte:

Passo 1 - Dado (x_o, y_o) **achar o setor** ao qual pertence o ponto. O ponto pode estar entre duas árvores ou entre os ramos de uma das árvores. Uma estratégia possível para determinar o setor é traçar uma semi-reta a partir de (x_o, y_o) e procurar, dentre as suas interseções com todos os segmentos da floresta, qual a interseção mais próxima. Os segmentos podem ser ramos de árvores, troncos, segmentos da geratriz ou o limite inferior do módulo (profundidade máxima). O segmento que foi interceptado faz parte do polígono que delimita o setor que contém (x_o, y_o) . Como o segmento interceptado em geral faz fronteira com dois setores, para determinar qual deles contém (x_o, y_o) , basta um teste de orientação. Se (x_o, y_o) está à direita do segmento então segue-se a árvore que se origina deste segmento, sempre escolhendo os ramos da direita até encontrar um nó folha e, finalmente, determinar o segmento da geratriz também à direita do nó folha, correspondente ao setor procurado. No caso de (x_o, y_o) estar à esquerda, seguir sempre pelo ramo da esquerda até o nó folha e achar o segmento da geratriz à esquerda deste nó folha. Como foi discutido, para cada setor existe apenas um segmento da geratriz associado.

Passo 2 - O segmento da geratriz do setor que contém (x_o, y_o) foi achado e, portanto, pode-se fazer o **cálculo da profundidade** p_o , que é a distância da perpendicular de (x_o, y_o) até a reta que passa por este segmento.

Passo 3 - Para **calcular a distância** d_o de (x_o, y_o) **até a linha de referência**, basta percorrer os segmentos da geratriz em direção à linha de referência, somando as distâncias entre as interseções das paralelas à geratriz na profundidade p_o com os segmentos das árvores, até a interseção com a linha de referência (figura 4.11). Os nós-folha são percorridos na direção da linha de referência, que pode estar à direita ou à esquerda. Entre cada um destes nós está o segmento da geratriz referente a um setor. Ou seja, ao percorrer os nós folha e os segmentos da geratriz determinados por eles estar-se-á visitando, seqüencialmente, cada um dos setores da floresta.

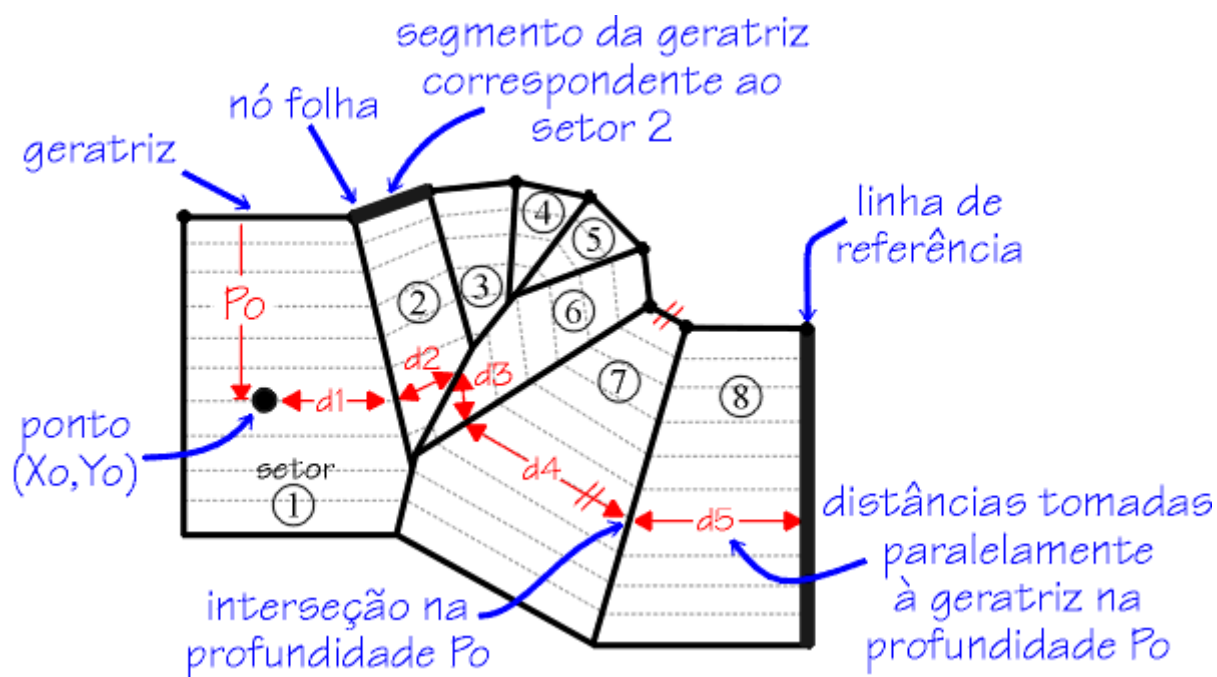


figura 4.11 - Localização geométrica de um ponto na floresta.

Descendo a partir de cada nó folha, através dos ponteiros para o nó pai, tenta-se alcançar a profundidade p_o . Como as profundidades de cada nó são previamente armazenadas durante a montagem da floresta, fica fácil determinar entre que dois nós está o segmento que intercepta a paralela à geratriz na profundidade p_o . É bom lembrar que os comprimentos dos segmentos (bissetrizes) das árvores não podem ser tomados como profundidades, pois não são necessariamente perpendiculares à geratriz. Mas existe uma proporcionalidade. Assim, para calcular em que posição cartesiana um dado segmento é interceptado numa dada profundidade p_o , basta se ter a posição cartesiana de cada um dos nós extremos do segmento, bem como as duas profundidades destes nós (figura 4.12).

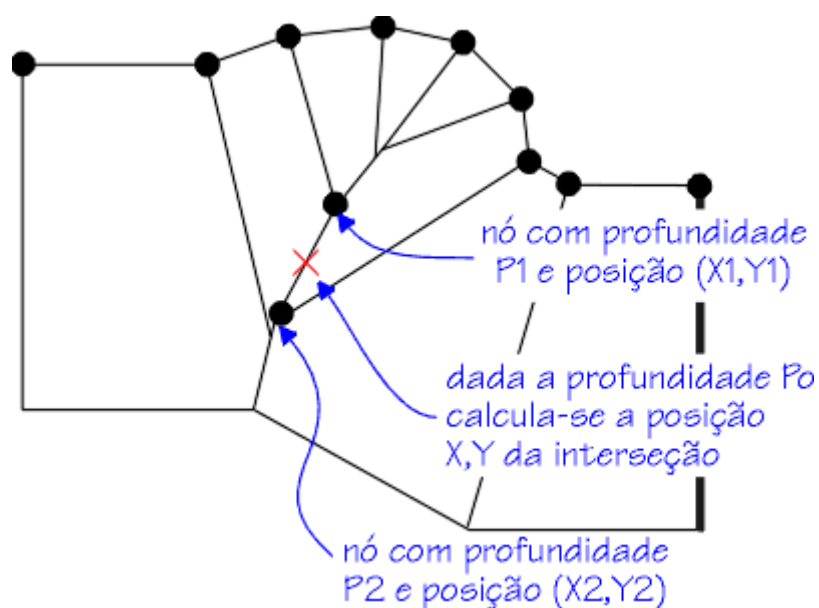


figura 4.12 - Cálculo da posição a uma dada profundidade.

Calculada esta interseção, calcula-se a distância da mesma com relação à interseção anterior. Estas distâncias vão sendo somadas (distâncias d_1 a d_5 da figura 4.11). A distância d_1 vai do ponto (x_0, y_0) até a primeira interseção e a distância d_5 vai até a interseção com a linha de referência.

4.2.2.3.2 - Conversão de Profundidade e Distância em Posição Cartesiana

O algoritmo de localização para obter (x_0, y_0) em função de (p_0, d_0) é semelhante ao do item anterior. Basta percorrer os segmentos da geratriz partindo da linha de referência, somando as distâncias entre as interseções das paralelas à geratriz na profundidade p_0 com os segmentos das árvores, até alcançar a distância d_0 .

4.2.2.4 - Preparação da Transformação de Deslizamento Flexível

A operação de deslizamento flexível coleta do usuário o módulo selecionado para transformação e as quatro poligonais que definem as geratrizes e linhas de referência origem e destino. Antes da aplicação da transformação é feito o seguinte procedimento:

- Dada a poligonal que define a geratriz **origem**, é gerada a floresta **origem**, usando o procedimento do item 4.2.2.2.
- Dada a poligonal que define a geratriz **destino**, é gerada a floresta **destino**, usando o procedimento do item 4.2.2.2.

Após esta preparação, tem-se as informações necessárias para a aplicação da transformação: o módulo cujos vértices terão suas posições modificadas, uma floresta origem com a sua linha de referência origem, e uma floresta destino com a sua linha de referência destino.

4.2.2.5 - Aplicação da Transformação de Deslizamento Flexível

O conjunto de procedimentos esquematizados na figura 4.13 realizam a transformação de deslizamento flexível. Basicamente são três procedimentos: a coleta das geometrias origem e destino; a montagem das árvores origem e destino, a conversão de posição cartesiana em profundidade e distância na floresta origem, e a conversão inversa a esta na floresta destino. A transformação segue o procedimento abaixo.

Para todo vértice do módulo sendo transformado:

- é achada a profundidade p_0 com relação à geratriz origem e a distância d_0 do vértice com relação à linha de referência origem. Para tal, são aplicados os procedimentos do item 4.2.2.3.1 a partir da floresta origem, da linha de referência origem e da posição do vértice.
- é calculada a nova posição do vértice relativamente à geometria destino, ou seja, é encontrado um ponto que esteja a distância d_0 da linha de referência destino e profundidade p_0 da geratriz destino. Para tal são aplicados os procedimentos do item 4.2.2.3.2 a partir da floresta destino, da linha de referência destino e de p_0 e d_0 .

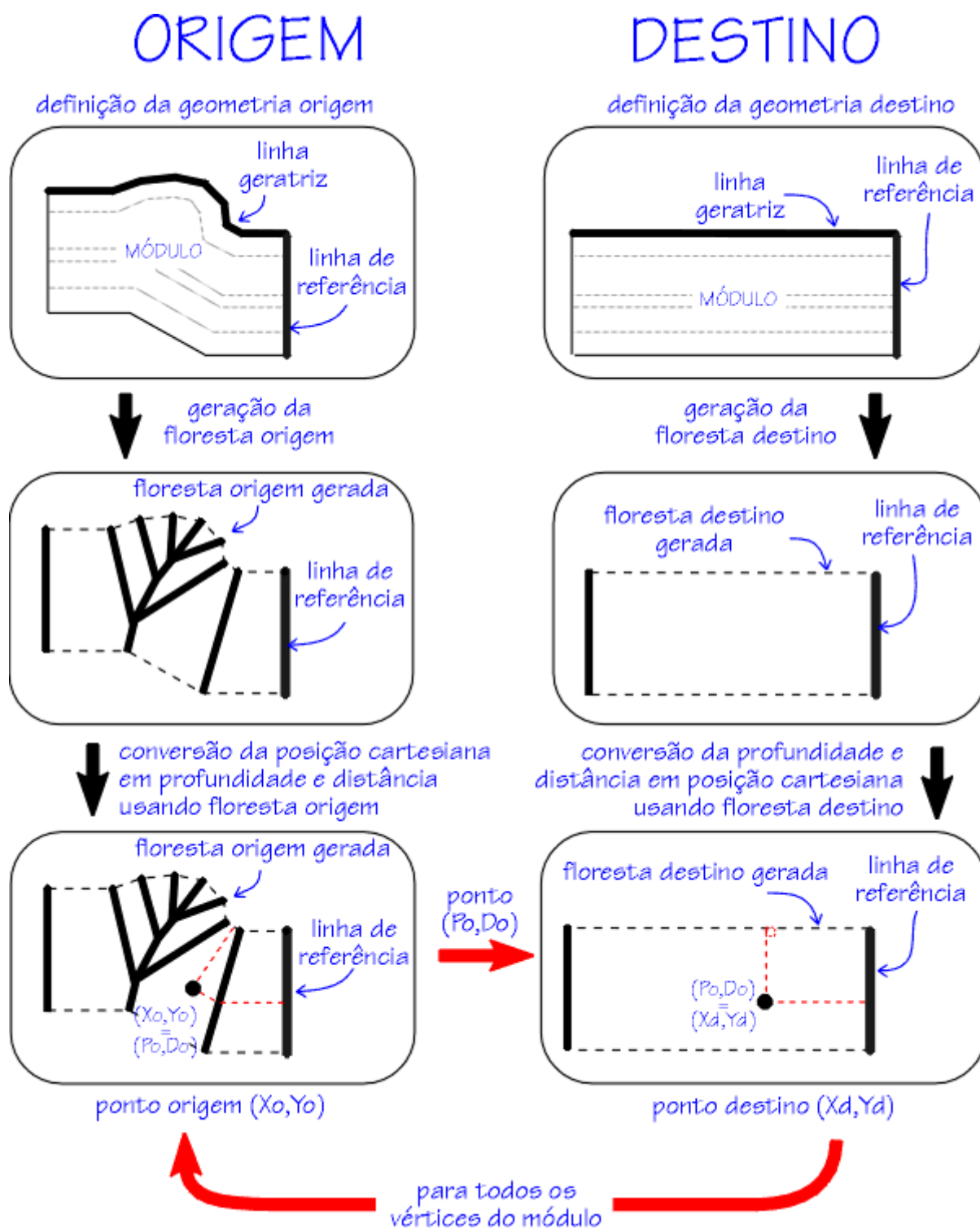


fig 4.13 - Procedimentos da transformação de deslizamento flexível.

4.2.3 - Descompactação

A operação de descompactação tem duas partes distintas: remoção da camada do topo (que possui a menor idade) e o cálculo de todos os topos e bases das camadas inferiores, que aumentam de espessura devido ao aumento da porosidade, que decai exponencialmente com a profundidade. Com a remoção da camada superior, as

profundidades dos horizontes abaixo **aumentam relativamente ao novo topo** da seção. Mas na verdade **se elevam** no sistema de coordenadas **absoluta**, pois o embasamento é tomado aqui como um referencial fixo. Na realidade esta camada de rocha não é fixa nem indeformável, mas o fenômeno da resposta isostática [BEND89] não será considerado no processo, e será assumido o embasamento como referência absoluta.

Para o cálculo da descompactação são necessários os parâmetros *porosidade inicial* (Po) e a *taxa de decaimento*, introduzidos no capítulo 2. Estes parâmetros são armazenados como atributos da estrutura de dados topológica descrita no capítulo 3.

A operação de descompactação consiste em uma verificação inicial de se é possível realizar a descompactação. Em caso afirmativo a camada superior é removida e é feito um refinamento da seção, que consiste na criação de vértices para evitar problemas geométricos. Após este pré-processamento, é feita a descompactação em si: todos os vértices da seção têm suas ordenadas transformadas, por um algoritmo iterativo baseado na curva porosidade versus profundidade descrita no capítulo 2.

O procedimento de descompactação segue os seguintes passos:

Passo 1 - Descobre-se qual a camada que está no topo. Varrem-se todas as faces da subdivisão que pertençam a camadas do tipo deposicional e aquela que tiver a menor idade geológica será a candidata a ser removida.

Passo 2 - Verifica-se se não existe nenhuma parte da seção que esteja acima da camada a ser removida. Caso contrário o procedimento é interrompido. A verificação é feita visitando-se todas as arestas da fronteira da camada do topo a ser removida no sentido horário; todos os segmentos que façam parte desta fronteira e que estejam orientados da esquerda para a direita devem ser adjacentes a face externa ou a uma face da mesma camada. O algoritmo na realidade visita todas as faces da seção e para cada face que pertença a camada topo, varre todas as arestas do ciclo externo no sentido horário. Para cada aresta é verificado se todo segmento da mesma que seja orientado da esquerda para a direita é adjacente à face externa da seção ou a alguma face da mesma camada. Se ocorrer pelo menos um caso onde isto não ocorra, significa que alguma parte da seção está acima da camada a ser removida, pois os segmentos orientados da esquerda para a direita formam a parte da fronteira que está voltada para cima conforme ilustrado na figura 4.14.

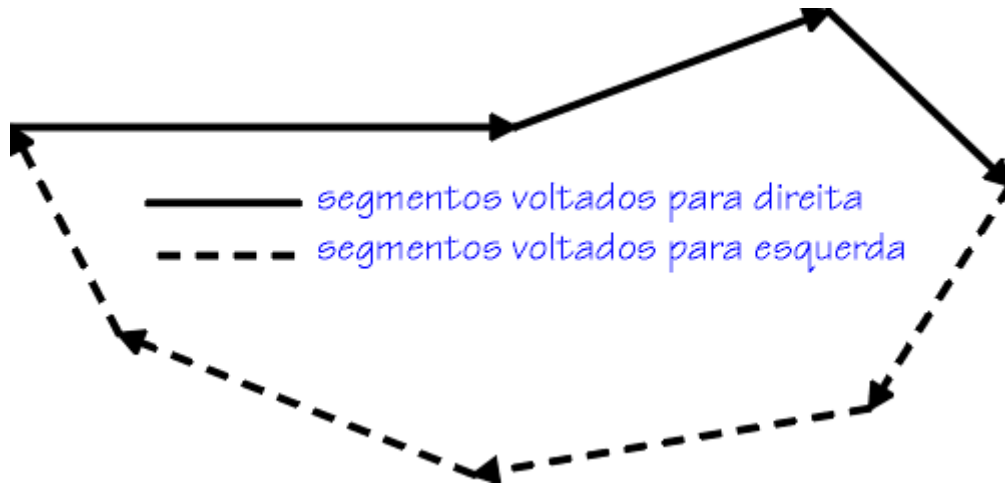


figura 4.14 - Determinação da parte superior de uma fronteira.

Passo 3 - É removida a camada do topo.

Passo 4 - (Refinamento) - Este pré-processamento torna-se necessário para evitar problemas como o ilustrado na figura 4.15. No mesmo intervalo horizontal entre os dois vértices do horizonte superior existe um vértice no horizonte inferior. Como a descompactação é aplicada aos vértices, e a camada de baixo pode se descompactar mais do que a de cima (depende de parâmetros de cada uma e da topologia da seção acima deste ponto), pode ser que o vértice central da camada inferior ultrapasse na descompactação o horizonte superior, fazendo com que os horizontes se sobreponham, como o pontilhado da figura 4.15 indica. Uma

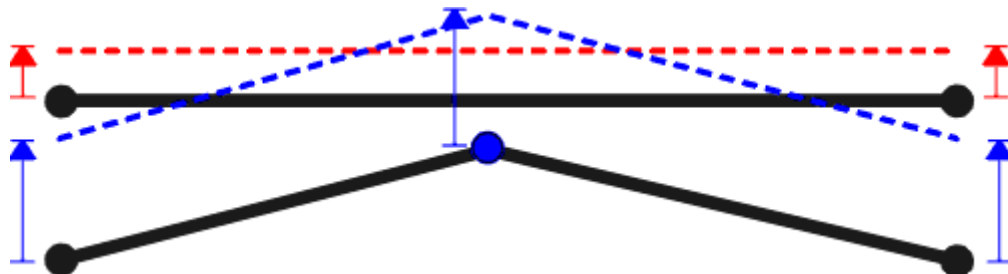


figura 4.15 - Sobreposição de horizontes.

forma de evitar isto é criar um vértice no horizonte superior na mesma abscissa do vértice do horizonte inferior. Este novo vértice também se deslocará com a descompactação, evitando a sobreposição. Assim, no refinamento, para todo o vértice de uma linha serão criados vértices nas outras linhas, nas interseções destas linhas com a vertical que passa pelo vértice que os gerou. Este procedimento, no pior caso, poderá multiplicar o número de vértices já existentes pelo número de linhas da seção, o que sobrecarregará muito a estrutura de dados. Por isto, para diminuir a sobrecarga, (após a descompactação) é feita uma filtragem que descarta vértices não significativos geometricamente. Ao final do processo de refinamento, a seção estará pronta para ter seus vértices transformados. O processo de refinamento é o seguinte:

- Varrem-se todos os vértices da seção e toma-se a abscissa de cada um, que é inserida em uma **lista de abscissas**. Após a inclusão de todas, a lista será ordenada crescentemente.
- Para todas as linhas, a partir da lista de abscissas, são criados novos vértices, refinando-as. Estes vértices serão criados nas interseções destas linhas com as verticais que passam pelas abscissas. Algumas das abscissas da lista correspondem a vértices que já existem nas linhas e, neste caso, não são recriados.

Passo 5 - Todos os vértices da seção são transformados, ou seja têm suas coordenadas alteradas. Como a descompactação ocorre na vertical, somente a ordenada do ponto é alterada, e segue o seguinte procedimento:

Para toda abscissa x da lista de abscissas

- Achar todos os vértices com esta mesma abscissa x e os colocar numa **lista de interseções** (figura 4.16). Serão armazenadas todas as interseções da vertical que passa por esta abscissa com os horizontes da seção, onde foram criados vértices pelo refinamento. Para cada interseção, guardar a ordenada absoluta do vértice, os parâmetros porosidade inicial e decaimento da camada cortada abaixo da interseção. Mais uma vez, o uso de uma estrutura de dados com topologia vai facilitar as consultas de adjacência, na busca das interseções e obtenção dos parâmetros.

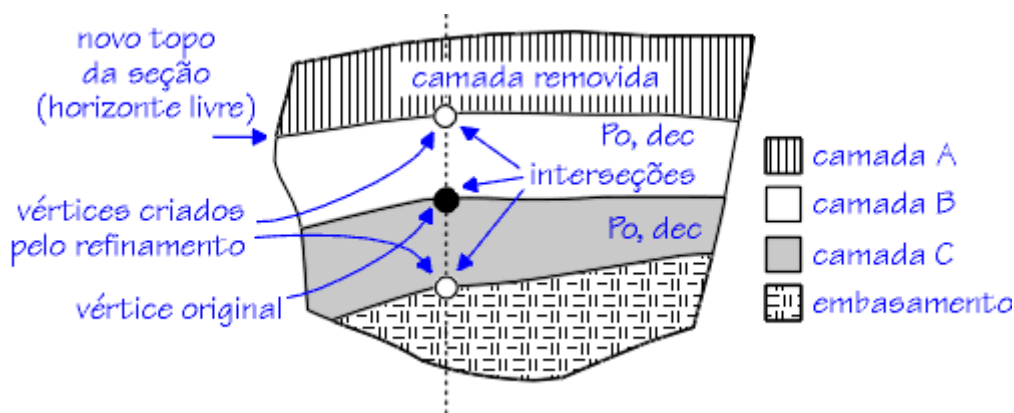


figura 4.16 - Pesquisa das interseções.

Se no momento da descompactação houver módulos de transformação geológica destacados da seção base, pode acontecer que não exista uma ligação topológica entre o ponto inferior de uma camada e o superior da camada logo abaixo. Neste caso, para viabilizar o processo de descompactação, é considerado que existe uma ligação rígida entre estes dois pontos de uma mesma abscissa x . Isto é feito, internamente ao algoritmo, considerando-se uma camada fictícia entre estes dois pontos com porosidade nula.

- Calcular o **deslocamento sofrido pelos vértices**. Para isso usa-se a curva de porosidade versus profundidade apresentada no capítulo 2. Considera-se que o novo topo da seção passa a ser o topo da nova camada livre que antes estava

abaixo da camada removida. Apesar deste horizonte do topo não ter necessariamente ordenada zero absoluto no ponto de interseção com a vertical que passa pela abscissa x , para efeito de cálculo este ponto terá profundidade relativa zero. Ou seja, é usado um sistema relativo de ordenadas, que tem como referência para profundidade a base da camada a ser removida (novo horizonte livre), cuja ordenada é zero para efeito de aplicação da fórmula baseada na curva de porosidade versus profundidade. Um algoritmo iterativo recalcula as novas ordenadas das interseções com os horizontes, baseando-se nos parâmetros colocados na lista de interseções montada no item anterior. Cada camada é expandida em função da nova profundidade com relação ao novo horizonte livre.

O processo iterativo é iniciado com o deslocamento da profundidade relativa do novo horizonte livre para a ordenada zero. Em seguida, com base na manutenção da altura da coluna de sedimentos da camada abaixo no novo horizonte livre, é calculada a nova profundidade relativa da base desta camada. O mesmo processo é aplicado iterativamente para a camada inferior, a partir do novo valor da profundidade de base obtido para a camada superior.

Será usada a seguinte nomenclatura na descrição do algoritmo que recalcula as profundidades:

n_i - número de interseções da lista de interseções

i - índice da interseção na lista de interseções

$i = 1$ - interseção com o horizonte menos profundo (horizonte livre)

$i = n_i$ - interseção mais profunda (topo do embasamento)

Z_i - ordenada absoluta da interseção de índice i na lista de interseções

Z_1 - ordenada absoluta correspondente ao topo da camada removida

Z_i - profundidade relativa do topo de uma camada antes da descompactação (relativa ao topo da camada removida)

Z_b - profundidade relativa da base de uma camada antes da descompactação (relativa ao topo da camada removida)

Z_i' - profundidade relativa do topo de uma camada após a descompactação (relativa ao novo horizonte livre - começa com valor zero)

Z_b' - profundidade relativa da base de uma camada após a descompactação (relativa ao novo horizonte livre)

dz_i - deslocamento (expansão) da interseção i devido a descompactação

P_{oi} - constante porosidade inicial da camada i da lista

dec_i - constante taxa de decaimento da camada i da lista

H_s - altura da coluna de sedimento entre duas profundidades Z_i e Z_b

D_a - deslocamento acumulado dos pontos de interseção em relação ao topo do embasamento

O algoritmo para cada abscissa é o seguinte:

$Z_i' \leftarrow \text{zero}$

para $i = 1$ **até** $n_i - 1$ (varrer lista de interseções da menos para a mais profunda)

início

$Z_i \leftarrow Z_i - Z_1$ (profundidade relativa da interseção i antes da descompactação)

$Z_b \leftarrow Z_{i+1} - Z_1$ (profund. relativa da interseção $i+1$ antes da descompactação)

$H_s \leftarrow (Z_b - Z_i) + P_{oi}/dec_i (e^{-dec_i \cdot Z_b} - e^{-dec_i \cdot Z_i})$ (da curva porosidade x profundidade)

$Z_b' \leftarrow$ valor de Z_b' que satisfaz a equação $Z_b' = H_s + Z_i' - P_{oi}/dec_i (e^{-dec_i \cdot Z_b'} - e^{-dec_i \cdot Z_i'})$

$dz_i \leftarrow Z_b' - Z_b$ (deslocamento=nova profund. base-antiga profundidade base)

$Z_i' \leftarrow Z_b'$ (atualiza a profundidade relativa do topo da próxima camada)

fim

$Da \leftarrow$ zero (deslocamento acumulado)

para $i = n_i - 1$ **até** 1 (atualiza ordenadas vértices horizontes acima embasamento)

início

$Da \leftarrow Da + dz_i$ (deslocamento das camadas inferiores são acumulados)

deslocar ordenada do vértice da interseção i somando o valor Da

fim

No algoritmo acima, o cálculo da nova profundidade relativa da base de uma camada ($Z_{b'}$) é feito de forma iterativa. Observa-se que a altura da coluna de sedimentos (H_s) entre o topo e a base de uma camada é sempre mantida constante, tal como discutido no capítulo 2. Também com base no que foi discutido naquele capítulo, pode-se verificar pelo cálculo de $Z_{b'}$ que há uma expansão da camada ($(Z_{b'} - Z_{t'}) > (Z_b - Z_t)$), visto que a nova profundidade relativa do topo da camada ($Z_{t'}$) é sempre menor que a antiga profundidade relativa (Z_t).

Passo 6 - É aplicado um filtro geométrico em toda a seção, com o objetivo de descartar vértices não significativos geometricamente, que possam ter sido gerados desnecessariamente no processo de refinamento da descompactação.

Após a descompactação, as camadas se expandem diferenciadamente em função das suas constantes físicas porosidade inicial e taxa de decaimento. Os vértices transformados, apesar de terem sua **profundidade relativa** ao horizonte livre da camada do topo **aumentada**, tem a sua **profundidade absoluta diminuída**, pois o horizonte base da camada mais inferior está em contato com o embasamento, que não se compacta. Assim, as camadas se elevam em relação a ele, conforme a figura 4.17.

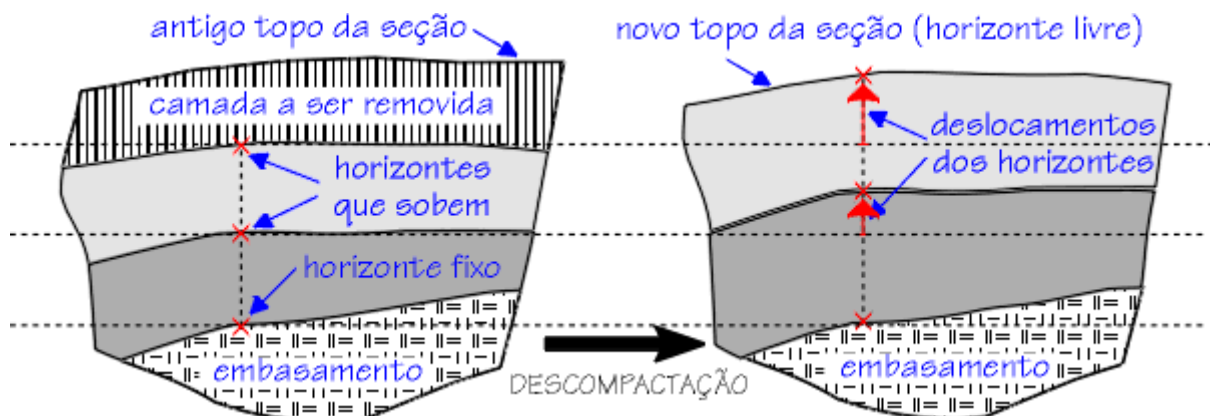


figura 4.17 - Camadas antes e após a descompactação.

4.2.4 - Compactação

A operação de compactação de uma seção geológica devido à deposição de uma camada sedimentar no topo da seção pode ser simulada pelo mesmo algoritmo que simula a descompactação. Neste caso, as camadas abaixo da camada do topo se comprimem devido à diminuição de porosidade provocada pela sobrecarga.

A única diferença entre as operações de compactação e de descompactação está no processo de inicialização do algoritmo que calcula os deslocamentos verticais sofridos pelos pontos de uma determinada abscissa x . Considera-se que o novo topo da seção passa a ser o topo da atual camada do topo e que o antigo topo da seção era o topo da camada logo abaixo desta. O novo topo da seção, para efeito de cálculo, terá profundidade relativa zero. Também é considerado que a camada do topo não se compacta com o seu próprio peso.

O processo iterativo é iniciado com o deslocamento do antigo topo da seção para uma profundidade relativa igual à espessura da camada do topo atual, que é supostamente adicionada. Em seguida, em um processo análogo ao processo de descompactação, cada camada é comprimida em função da nova profundidade com relação ao novo horizonte livre (novo topo da seção).

A nomenclatura usada na descrição do algoritmo que recalcula as profundidades para o processo de compactação é a seguinte:

n_i - número de interseções da lista de interseções da linha vertical de abscissa x

i - índice da interseção na lista de interseções

$i = 1$ - interseção com o antigo horizonte de topo

$i = n_i$ - interseção mais profunda (topo do embasamento)

Z_i - ordenada absoluta da interseção de índice i na lista de interseções

Z_1 - ordenada absoluta correspondente ao antigo horizonte de topo

Z_t - profundidade relativa do topo de uma camada antes da compactação (relativa ao antigo horizonte de topo)

Z_b - profundidade relativa da base de uma camada antes da compactação (relativa ao antigo horizonte de topo)

Z_t' - profundidade relativa do topo de uma camada após a compactação (relativa ao novo horizonte de topo - começa com valor igual à espessura da nova camada do topo)

Z_b' - profundidade relativa da base de uma camada após a compactação (relativa ao novo horizonte de topo)

os demais são iguais ao da descompactação.

O algoritmo para cada abscissa é o seguinte:

$Z_t' \leftarrow$ espessura da nova camada do topo

para $i = 1$ **até** $n_i - 1$ (varrer lista de interseções da menos para a mais profunda)

início

$Z_t \leftarrow Z_i - Z_1$ (profundidade relativa da interseção i antes da compactação)

$Z_b \leftarrow Z_{i+1} - Z_1$ (profund. relativa da interseção $i+1$ antes da compactação)

$H_s \leftarrow (Z_b - Z_t) + Poi/dec_i (e^{-dec_i \cdot Z_b} - e^{-dec_i \cdot Z_t})$ (da curva porosidade x profundidade)

$Z_b' \leftarrow$ valor de Z_b' que satisfaz a equação $Z_b' = H_s + Z_t' - Poi/dec_i (e^{-dec_i \cdot Z_b'} - e^{-dec_i \cdot Z_t'})$

$dz_i \leftarrow Z_b' - Z_b$ (deslocamento=nova profund. base-antiga profundidade base)

$Z_t' \leftarrow Z_b'$ (atualiza a profundidade relativa do topo da próxima camada)

fim

$Da \leftarrow$ zero (deslocamento acumulado)

para $i = n_i - 1$ **até** 1 (atualiza ordenadas vértices horizontes acima embasamento)

início

$Da \leftarrow Da + dz_i$ (deslocamento das camadas inferiores são acumulados)

deslocar ordenada do vértice da interseção i somando o valor Da

fim

Pode-se verificar pelo algoritmo acima que há uma compressão de uma camada genérica ($(Z_b' - Z_t') < (Z_b - Z_t)$). Isto se deve, conforme visto no capítulo 2, ao fato que a nova profundidade relativa do topo da camada (Z_t') é sempre maior que a antiga profundidade relativa (Z_t).

4.3 - Filtro Geométrico

Após a aplicação de transformações geométricas, a geometria da seção pode conter vértices geometricamente não significativos. Um filtro geométrico é aplicado de forma a descartar estes vértices da estrutura. São eliminados apenas vértices não topológicos. Basicamente, dois vértices contíguos em uma poligonal que estejam a uma distância menor que uma distância mínima especificada são convertidos em um só; ou seja, um deles é descartado. Também são descartados vértices que dividam dois segmentos que sejam quase colineares; ou seja, se o ângulo entre estes segmentos for menor que um dado ângulo mínimo.

<u><- VOLTA</u>	<u>SUMÁRIO</u>	<u>SEGUE -></u>
para o capítulo 3	para o índice	para o capítulo 5

CAPÍTULO 5 - RECUPERAÇÃO DA CONSISTÊNCIA TOPOLÓGICA - O AJUSTE

Uma operação que se faz necessária a um sistema de balanceamento, além das transformações discutidas anteriormente, é a de colagem de blocos (na verdade, conjunto de blocos, chamados de módulos).

Quando um módulo é destacado da seção (ou de um outro módulo isolado) e sofre uma das transformações discutidas no capítulo 4, ele pode ter, no caso geral, a geometria de sua fronteira modificada em relação ao trecho do qual foi destacado. Para continuar o processo de balanceamento, pode ser desejável que este módulo destacado seja novamente unido a outro módulo ou à seção base. Para garantir uma consistência topológica, as duas subdivisões planares que representam os dois módulos a serem unidos devem ter uma fronteira em comum. A geração desta fronteira em comum é feita a partir da adaptação da fronteira do módulo origem (módulo destacado) ao perfil da fronteira do módulo destino (ou seção base). A esta operação é dado o nome de **ajuste** entre módulos (figura 5.1).

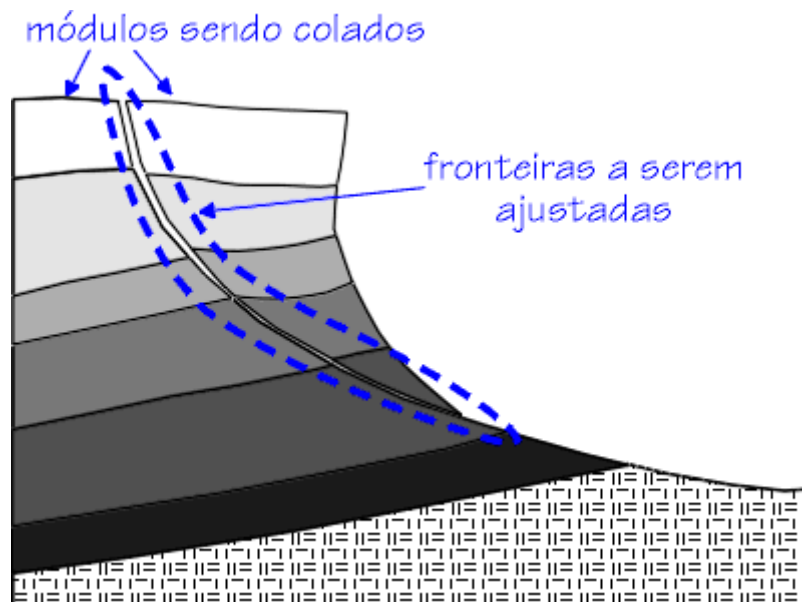


figura 5.1 - A necessidade do ajuste da fronteira dos módulos.

O algoritmo utilizado na operação de ajuste da geometria não leva em conta nenhuma restrição geológica, como por exemplo conservação da área dos dois módulos envolvidos na colagem. Mas pode-se passar ao usuário o controle do processo, permitindo uma tolerância por ele arbitrada. Em geral, pela própria filosofia do balanceamento, as fronteiras a serem coladas deveriam ser idênticas, caso o processo de balanceamento fosse ideal. Mas devido a diversos fatores - como imprecisão dos dados de entrada, transformações baseadas em modelos geológicos que não reproduzem exatamente a realidade, erros na interpretação do usuário e outros - as duas fronteiras deverão ter um perfil com geometria apenas aproximadamente igual, o que justifica a necessidade do processo de ajuste. De todo o modo, as aproximações feitas pelo algoritmo de ajuste não introduzem grandes erros ao processo de balanceamento.

O algoritmo utilizado consiste no ajuste da geometria de parte da fronteira de uma poligonal origem à parte da fronteira de uma poligonal destino, respeitando-se uma tolerância especificada pelo usuário.

O algoritmo adotado é apenas um dos possíveis. A comparação de algoritmos diferentes é dificultada por não ser simples definir de maneira concisa o que seria o melhor resultado para este problema geométrico. A estratégia utilizada envolve uma parte heurística, onde algumas decisões são arbitradas e podem não trazer os melhores resultados para casos particulares.

5.1 - O Ajuste

Uma vez especificados os módulos origem e destino, o algoritmo consiste em aplicar os seguintes passos:

Passo 1 - Montam-se dois polígonos representando as fronteiras dos dois módulos a serem ajustados. Para tal, para cada um dos módulos, varre-se a estrutura topológica em busca da face livre da subdivisão planar que representa o módulo. O ciclo desta face é a fronteira do módulo. Percorrem-se as semi arestas do ciclo, montando-se a geometria do polígono vértice a vértice, incluindo os topológicos e os pontos geométricos das poligonais das arestas. Pela própria forma de armazenagem na estrutura topológica, ambos os polígonos são montados no mesmo sentido (no sentido horário, por exemplo). Esta orientação é importante, pois será consultada no algoritmo.

Passo 2 - Este passo é puramente geométrico e constitui o ajuste propriamente dito. A **poligonal origem é ajustada** ao perfil da poligonal destino, recebendo novos vértices. Além disso, alguns dos vértices já existentes têm suas coordenadas modificadas. Uma tolerância especificada pelo usuário é utilizada no processo de ajuste e representa o raio de influência em torno de um vértice. O algoritmo geométrico é descrito a seguir:

- Testa-se a **interseção de todos os segmentos** da poligonal destino com todos os segmentos da poligonal origem. Todas as interseções passam a ser novos vértices que são inseridos na poligonal origem (figura 5.2).

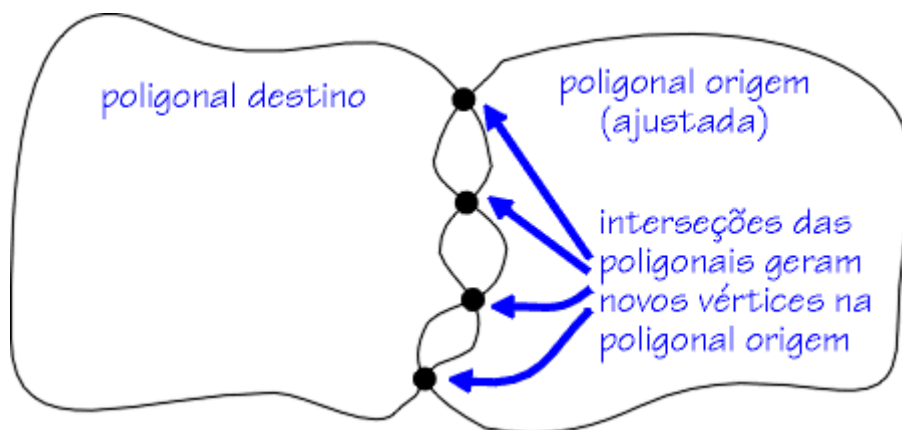


figura 5.2 - Inclusão das interseções na poligonal origem.

- Faz-se o **refinamento** da poligonal origem, criando-se vértices nos segmentos da poligonal que estejam dentro do alcance de influência da tolerância de vértices da poligonal destino (figura 5.3). As posições destes novos vértices são dadas pela projeção ortogonal dos vértices da poligonal destino. O vértice só é criado no segmento se nenhum dos dois vértices extremos do segmento estiver dentro do alcance da tolerância. Isto evita a criação de vértices desnecessários. A inclusão destes vértices não altera a geometria da poligonal neste passo, mas estes vértices poderão ter suas coordenadas modificadas nos passos seguintes.

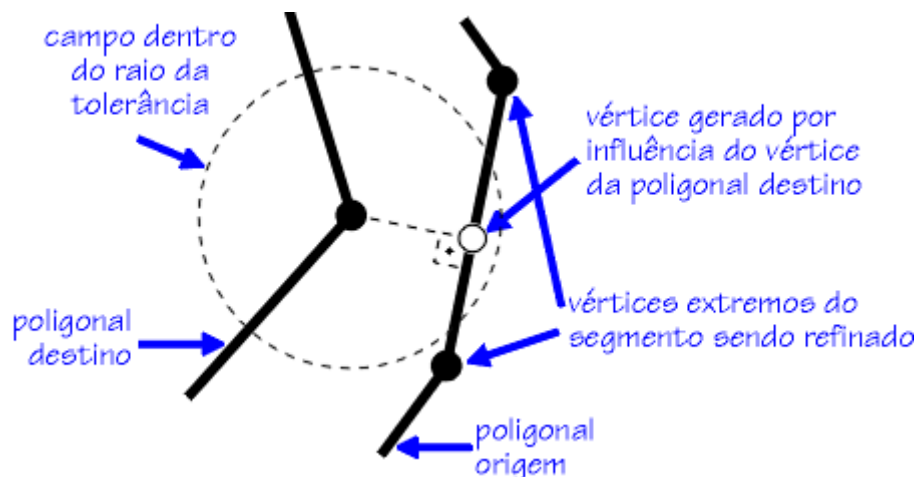


figura 5.3 - Refinamento da poligonal origem.

- Para todos os vértices V_o da poligonal origem é executado o seguinte procedimento (figura 5.4):
 - são percorridos os vértices da poligonal destino e encontrado aquele que é mais próximo a V_o . Se os trechos das poligonais a que estes dois vértices pertencem têm orientação diferente, é calculada a distância de vértice a vértice D_{vv} ; senão faz-se $D_{vv} = \text{infinito}$. O teste da orientação evita que sejam ajustados vértices que não pertençam a fronteira sendo ajustada, como no exemplo da figura 5.4.
 - são percorridos os segmentos da poligonal destino e encontrado o ponto que é mais próximo a V_o . Este ponto é dado pela projeção ortogonal do vértice V_o sobre o segmento. Se os trechos das poligonais a que o vértice e o ponto pertencem têm orientação diferente, é calculada a distância de vértice a ponto D_{vp} ; senão faz-se $D_{vp} = \text{infinito}$.
 - se $D_{vv} < \text{tolerância}$ então V_o é atraído (ajustado) para a posição do vértice mais próximo da poligonal destino.
 - se $D_{vp} < \text{tolerância}$ e $D_{vp} < D_{vv} / 2^{1/2}$ então V_o é atraído (ajustado) para o ponto mais próximo do segmento da poligonal destino. O valor 0,2 é um fator de ponderação que dá ao vértices maior prioridade para a atração do que aos pontos. Isto evita a criação desnecessária de vértices, no caso de já existir um vértice suficientemente próximo. Se este fator for muito reduzido, a atração só será feita para um ponto de segmento no caso de não existir nenhum vértice mais próximo dentro do campo de tolerância.

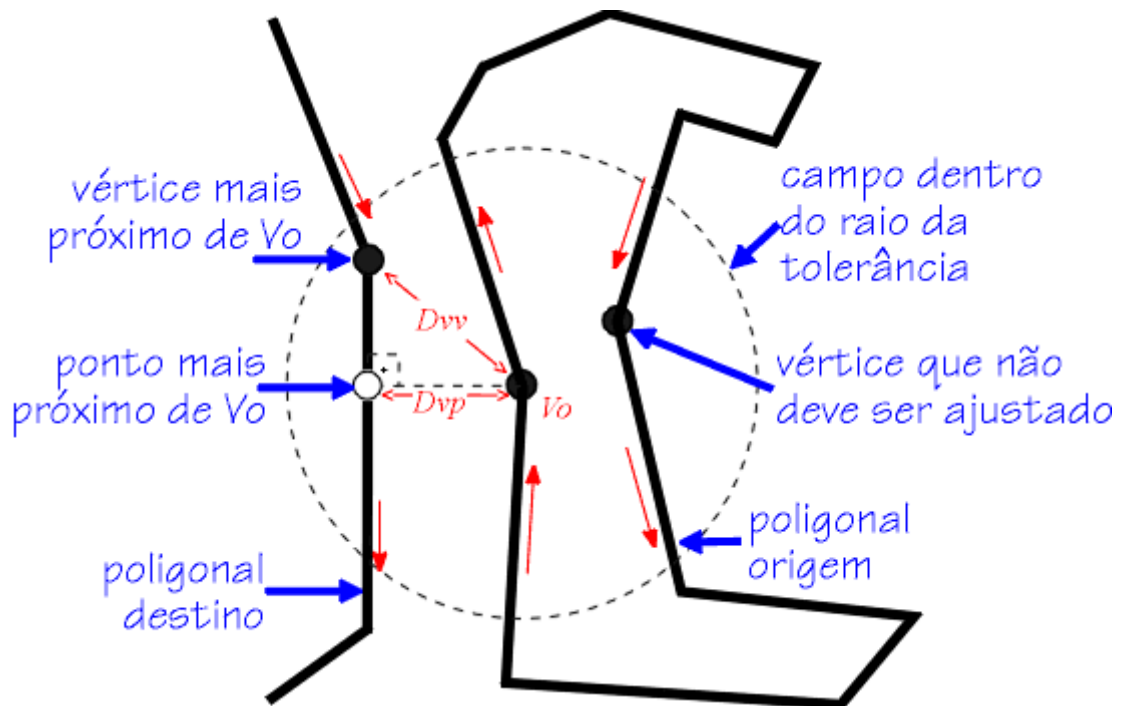


figura 5.4 - Ajuste para vértice ou ponto e o teste da orientação.

• Uma filtragem é feita nos pontos da poligonal origem que foi modificada. Esta filtragem evita aglomeração de vértices por efeito do ajuste (atração) de vários vértices dentro do campo de tolerância de um mesmo ponto (figura 5.5). Neste ponto do algoritmo o usuário já pode criticar o resultado do ajuste, através de uma inspeção visual dos perfis das poligonais ajustadas. Caso não aceite o ajuste, pode alterar a tolerância e repetir o procedimento a partir do passo 2. No caso de aceitar o ajuste, o procedimento é completado no passo seguinte.

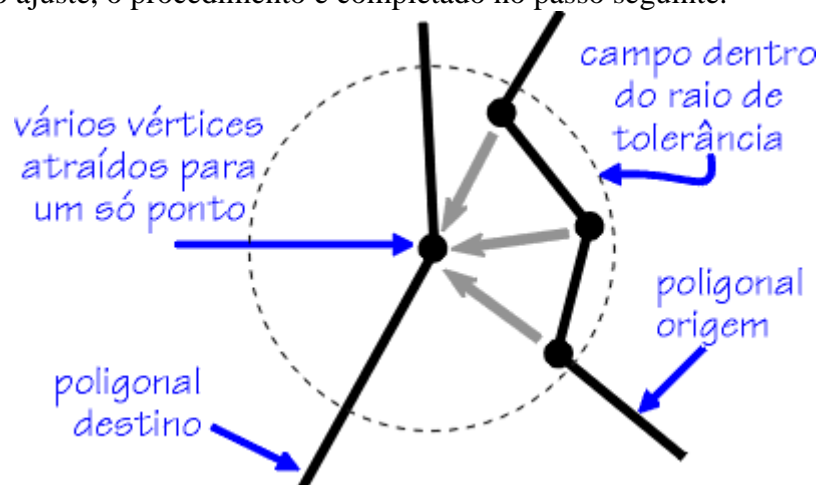


figura 5.5 - Aglomeração de vértices causada pelo ajuste.

Passo 4 - A partir da poligonal ajustada (origem), altera-se a geometria dos vértices correspondentes da fronteira do módulo origem.

5.2 - Conclusão

Com o conjunto de transformações geométricas sobre módulos, a remoção de camadas e descompactação da seção e o ajuste geométrico para a colagem dos módulos transformados, o ferramental para o processo de balanceamento está completo.

Na figura 5.6 estão as principais operações do processo de balanceamento e a sequência natural das mesmas, apesar do usuário não seguir necessariamente este fluxo.

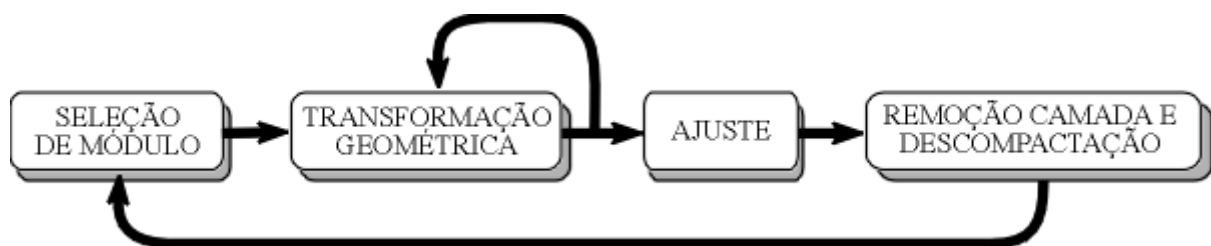


figura 5.6 - Sequência de operações no balanceamento.

O ajuste antes da operação de descompactação é opcional, pois a descompactação pode ser feita mesmo existindo módulos desconectados da seção base.

<- VOLTA	SUMÁRIO	SEGUE ->
para o capítulo 4	para o índice	para o capítulo 6

CAPÍTULO 6 - O SISTEMA RECON

OBSERVAÇÃO

O RECON atualmente dispõe de novos recursos e interface. Assim, o sistema aqui descrito se refere ao disponível na época da confecção desta tese.

Um sistema de balanceamento deve primeiramente oferecer ao usuário uma série de facilidades de edição que permitam a criação da seção geológica, realizando tarefas como inclusão e remoção de linhas, associação de atributos às entidades da seção, facilidades como desfazer comandos (*undo*), etc.

Neste capítulo, faz-se um perfil das principais funções que um sistema de balanceamento deve realizar. O sistema implementado, chamado RECON, tem este perfil. Faz-se também o acompanhamento de experimentos com o sistema, com exemplos de balanceamento.

O maior parte da implementação do sistema RECON foi realizada pelo Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica (TeCGraf) da PUC-Rio.

6.1 - Funções do Sistema

As funções básicas e recursos que o sistema proposto de balanceamento oferece são descritos nos itens seguintes.

6.1.1 - Edição da Seção Via Inserção de Linhas

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

O sistema provê funções de inserção e deleção de linhas. As linhas têm atributos próprios, como o seu tipo (falha, um horizonte, etc). Se for um horizonte, existe uma idade associada ao mesmo. O sistema permite ao usuário montar uma tabela geológica com nomes de horizontes e as idades das mesmas. Esta tabela serve para selecionar os atributos das linhas.

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 no capítulo 3, tornam a interface com o usuário muito amigável, além de embutir no sistema um certo grau de inteligência. O reconhecimento automático das novas regiões formadas, em tempo real, torna o processo de comunicação com o usuário isento de possíveis erros de interpretação. No caso de ocorrer um erro, a função de desfazer (*undo*) suportada pelo HED, pode ser chamada.

O campo de atração, discutido no capítulo 3 e que pode ser modificado interativamente, torna mais fácil e menos sujeita a erros a inserção de linhas.

A facilidade oferecida pela interface torna também quase imediato o processo de aprendizagem de utilização do sistema por um novo usuário.

6.1.2 - Camadas

No sistema implementado, 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. Existe também a possibilidade do usuário forçar a atribuição geológica de um determinado bloco, sobrepondo a atribuição automática.

Existem dois tipos de camadas geológicas no sistema: camada sedimentar e camada intrusiva. Quando o sistema não consegue identificar automaticamente o atributo geológico de um bloco, este fica associado a uma **camada indefinida**. Isto pode ocorrer durante o processo de criação da seção geológica, onde, temporariamente, algumas camadas podem não ser consistentes com a tabela geológica previamente construída.

Optou-se por não se definir uma camada de embasamento explicitamente. O embasamento da seção pode ser considerado abaixo do horizonte com maior profundidade (que deve corresponder ao horizonte com maior idade) ou pode corresponder a uma camada intrusiva que foi modelada.

6.1.3 - Módulos

O sistema permite o agrupamento de faces (blocos de rocha) em módulos. Uma forma simples de definir um módulo é a indicação pelo usuário das faces que devem ser incluídas no novo módulo. Operações como destruir e juntar módulos também são suportadas. Para que dois módulos sejam unidos, suas fronteiras devem ser ajustadas, usando o procedimento de ajuste discutido no capítulo 5.

6.1.4 - Transformações

As transformações são as funções mais importantes do sistema de balanceamento. O conjunto de transformações, no caso da implementação no RECON, pode ser facilmente ampliado, devido à forma modular como são chamadas pelo sistema.

Um sistema que se proponha a realizar balanceamento deve possuir um conjunto mínimo de transformações geométricas. As básicas, discutidas no capítulo 4, foram implementadas no sistema, com excessão do deslizamento flexível.

6.1.5 - Consultas

Um conjunto de ferramentas de consulta é de grande valia para o usuário do sistema de balanceamento. Podem ser consultados os atributos das entidades da seção, tais como tipos e idades de linhas, parâmetros de uma camada, etc.

Outra consulta importante diz respeito à geometria da seção. Ferramentas tais como medidas de comprimento de linhas, valor de ângulos e totalização de área podem ser usadas pelo usuário na escolha do melhor caminho de balanceamento.

6.1.6 - Marcadores

Uma outra ferramenta útil para o processo de balanceamento é o marcador, que consiste de uma figura geométrica regular, que é associada a um módulo. Todas as deformações geométricas sofridas pelo módulo são também sofridas pelo marcador. Assim, o usuário acompanha visualmente o efeito acumulado das deformações aplicadas ao módulo. Na figura 6.1 é mostrado um exemplo de um marcador circular.

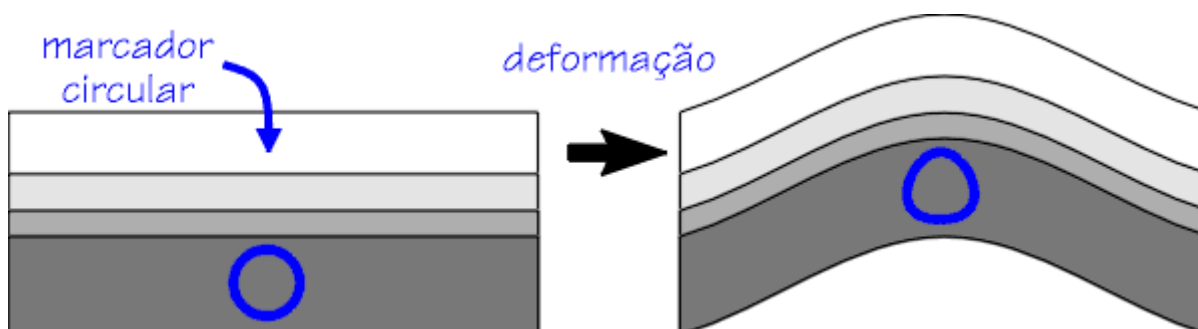


figura 6.1 - Exemplo de deformação de um módulo e seu marcador.

6.1.7 - Ajuste

A operação de ajuste, como discutido no capítulo 5, usada na colagem de módulos, é um procedimento interativo onde o usuário visualmente define a tolerância a ser usada no ajuste. Assim, o usuário pode fazer tentativas com várias tolerâncias, de forma a obter um ajuste que considere mais aceitável.

6.2 - Resultados Experimentais

A seguir é descrito, passo a passo, um procedimento de balanceamento de uma seção bem simples. As figuras 6.2.(a) a 6.2.(p) ilustram as alterações sofridas pela seção ao longo do balanceamento.

A seção atual tem a forma da figura 6.2.(a). Observa-se a ocorrência de falhamentos típicos de terrenos extensionais. Para efeito de balanceamento, os blocos formados pelas camadas e falhas podem ser agrupados, dividindo a seção em quatro módulos. Com a extensão do terreno, ocorreu o falhamento e o afastamento entre estes módulos, provocando a instabilidade das partes dos módulos, que ficaram em balanço, perdendo a sustentação e, por efeito de gravidade, se abateram sobre os leitos das falhas. O módulo 1 (figura 6.2.b) pode ser tomado como módulo de referência e aparentemente não precisa ser restaurado. Os outros módulos deslizaram totalmente ou parcialmente ao longo dos leitos das falhas. O módulo 2, confinado por duas falhas, sofreu translação (deslizamento) e se abateu (cisalhamento) sobre o leito destas duas falhas. O módulo 3 teve sua lateral esquerda abatida sobre o leito da falha que o separa do módulo 1. O módulo 4, após a separação do módulo 3 pelo falhamento, se abateu sobre o leito da falha que o separa deste módulo 3.

O primeiro passo será a remoção da camada que se depositou no topo da seção, e preencheu os buracos formados na superfície, que ficou irregular, após se deformar

(figura 6.2.(b) e (c)). A descompactação da seção após a remoção de uma camada é opcional pelo usuário no sistema RECON.

A seguir o módulo 4 é montado, indicando-se os blocos que o compõem (figura 6.2.(d)). Um marcador circular é colocado neste módulo. A primeira transformação aplicada é a de cisalhamento (figura 6.2(e)). É escolhida como geometria origem o horizonte abaixo do horizonte do topo e como geometria destino uma linha horizontal, na altura correspondente ao mesmo horizonte no módulo 3. Assim, tenta-se tornar o módulo horizontal, pois as camadas do mesmo, originalmente, foram se depositado horizontalmente. Não foi tomado o horizonte do topo como geometria origem, pois o mesmo foi erodido, ou seja, não é representado por uma linha horizontal perfeita. Se fosse usado como geometria origem, as regiões erodidas iriam provocar deformações na transformação do módulo. Pode-se observar que a boa escolha nas geometrias para a transformação resultou num módulo com camadas quase horizontais (figura 6.2.(f)). Foi escolhida uma direção de cisalhamento vertical (90º). Para terminar com este módulo 4, ele é transladado e ajustado ao módulo 3 (figuras 6.2.(f) e (g)). A translação restaura o afastamento dos módulos 3 e 4, que ocorreu no passado e que provocou o abatimento do módulo 4.

O próximo módulo a ser trabalhado é o módulo 2. Uma combinação de transformações de cisalhamento e translação e mais uma operação de ajuste são a ele aplicados conforme a figuras 6.2.(h) a (j).

O último módulo a ser trabalhado é o 3 (figuras 6.2.(l) a (o)). Neste ponto os módulos 3 e 4 são unidos, formando um novo módulo 3, pois posteriormente serão deslocados em conjunto. Apenas a porção da sua extrema esquerda sofreu um abatimento vertical sobre o leito da falha que o separa do módulo 1. Na aplicação do cisalhamento, foi tomada, como geometria origem, o horizonte logo acima do horizonte mais inferior (figura 6.2.m). A parte esquerda deste pertence a faixa vertical do módulo, que sofreu abatimento. Como geometria destino, usa-se uma linha horizontal que coincide com a altura do próprio horizonte que é usado como geometria origem. Assim, a faixa direita do bloco não sofrerá deformação, pois o deslocamento da geometria origem à destino nesta faixa direita é nulo (eles coincidem). Já a faixa esquerda do módulo será deformada, pois, nesta faixa, as geometrias origem e destino são diferentes. E como a porção esquerda do horizonte usado como geometria origem era horizontal no passado (antes do abatimento) e a geometria destino é horizontal, a faixa esquerda do módulo será tornada horizontal, como pode ser observado no ótimo resultado da figura 6.2.(n). Após o cisalhamento, o módulo é transladado e ajustado aos módulos 1 e 2 (figuras 6.2.(n) e (o)).

Na figura 6.2.(p) é apresentada a seção após o balanceamento. A figura 6.2.a da seção atual é mostrada novamente para possibilitar uma comparação. Geologicamente ela parece fazer sentido, pois tem-se um conjunto de camadas paralelas, sendo que as duas camadas do topo sofreram um processo de erosão. Obviamente, uma validação confiável da seção não é tão simples assim e envolve uma série de outras considerações, que o geólogo leva em conta no seu trabalho sobre a região que está em estudo.

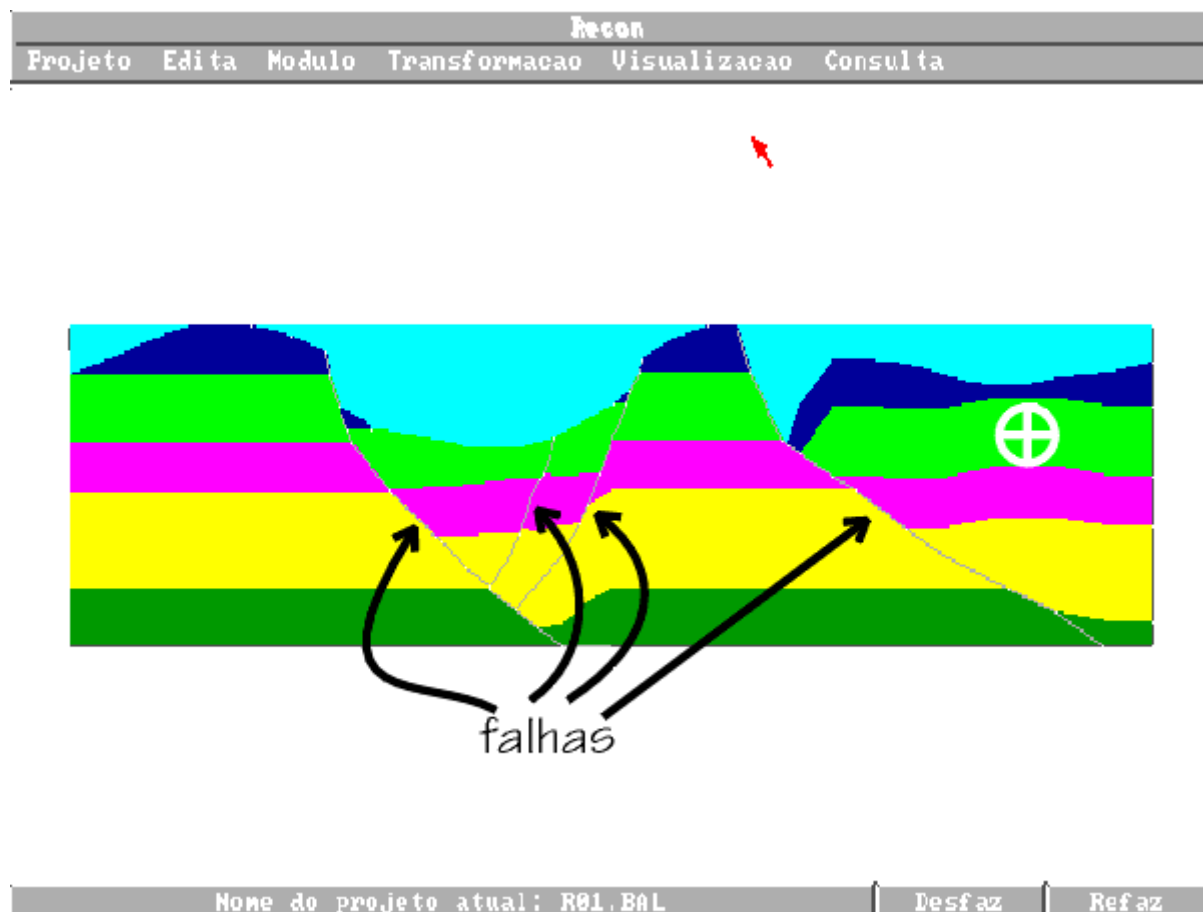


figura 6.2 (a) - Seção a ser balanceada.

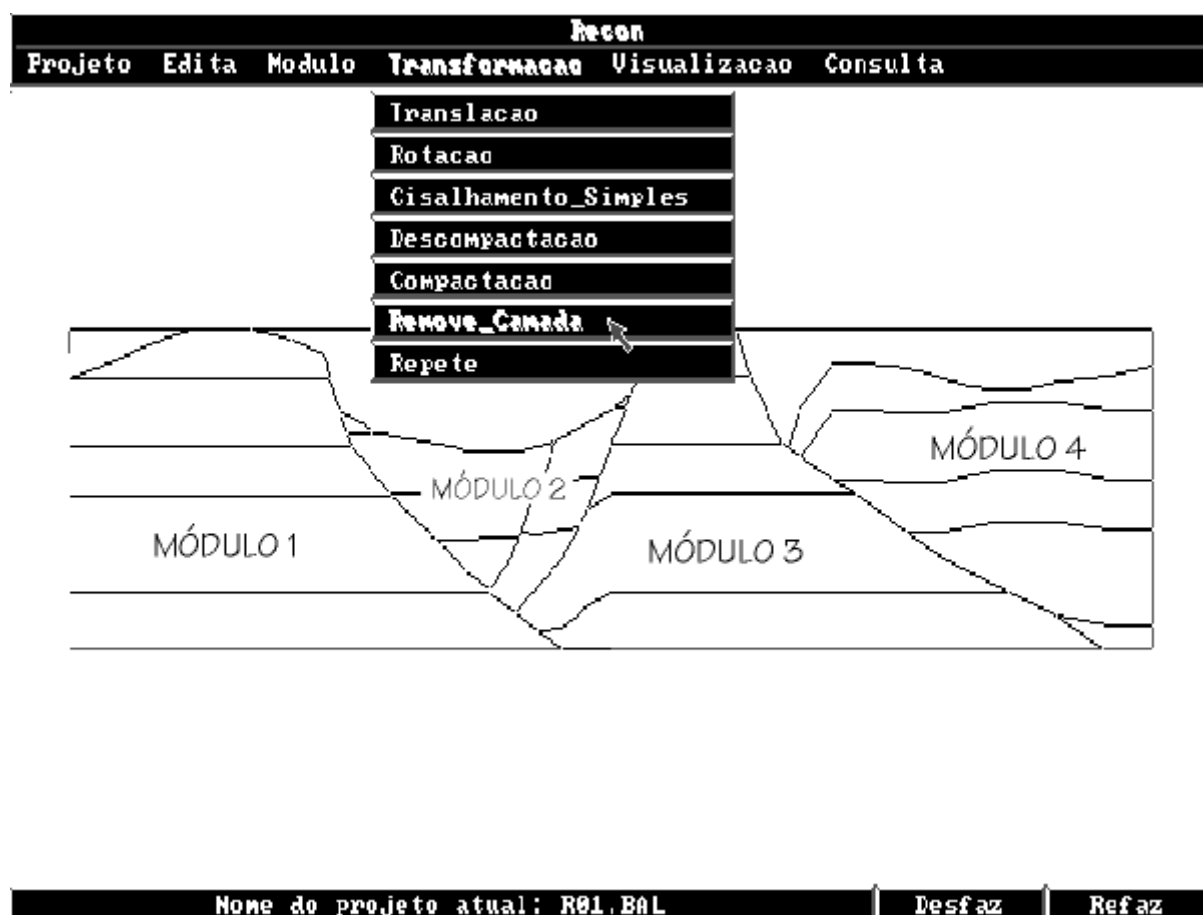


figura 6.2 (b) - Definição dos módulos.

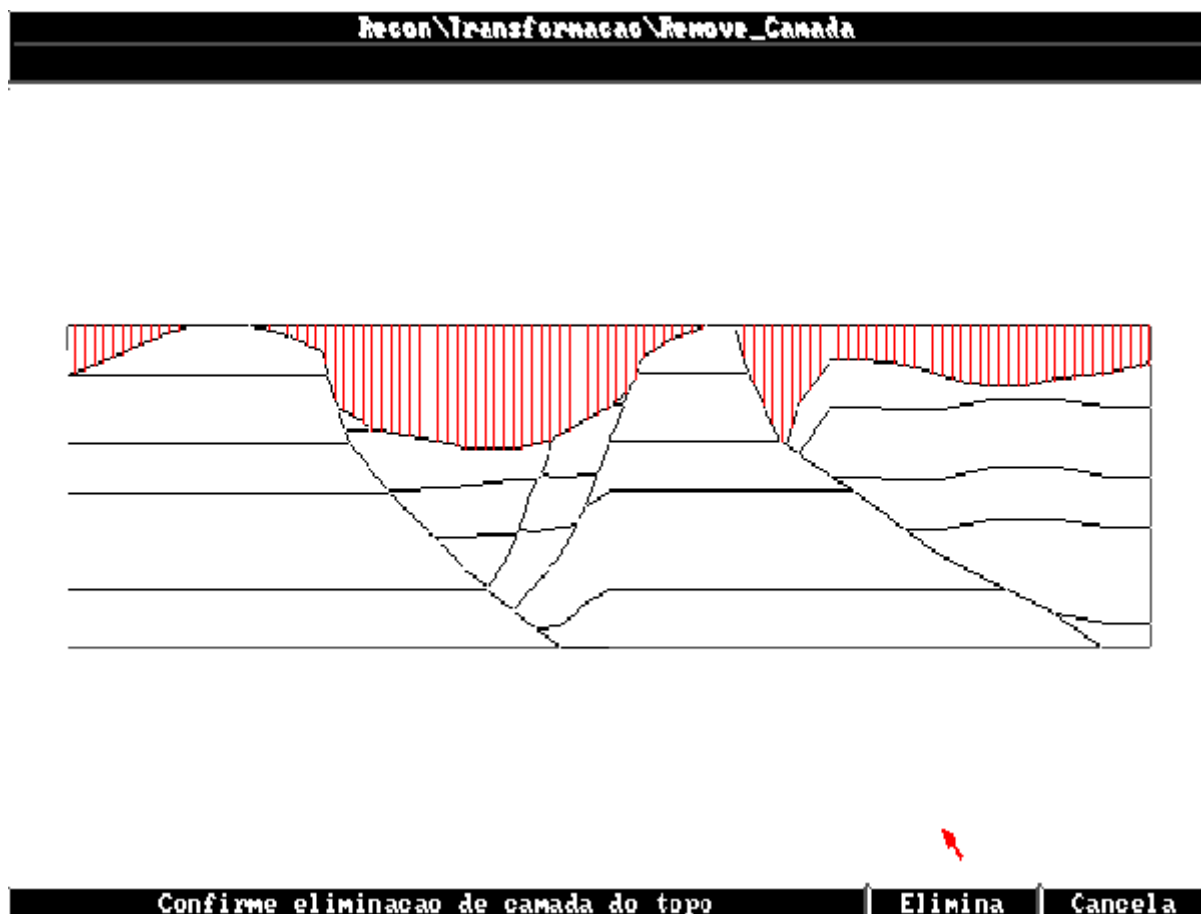


figura 6.2 (c) - Remoção da camada superior.

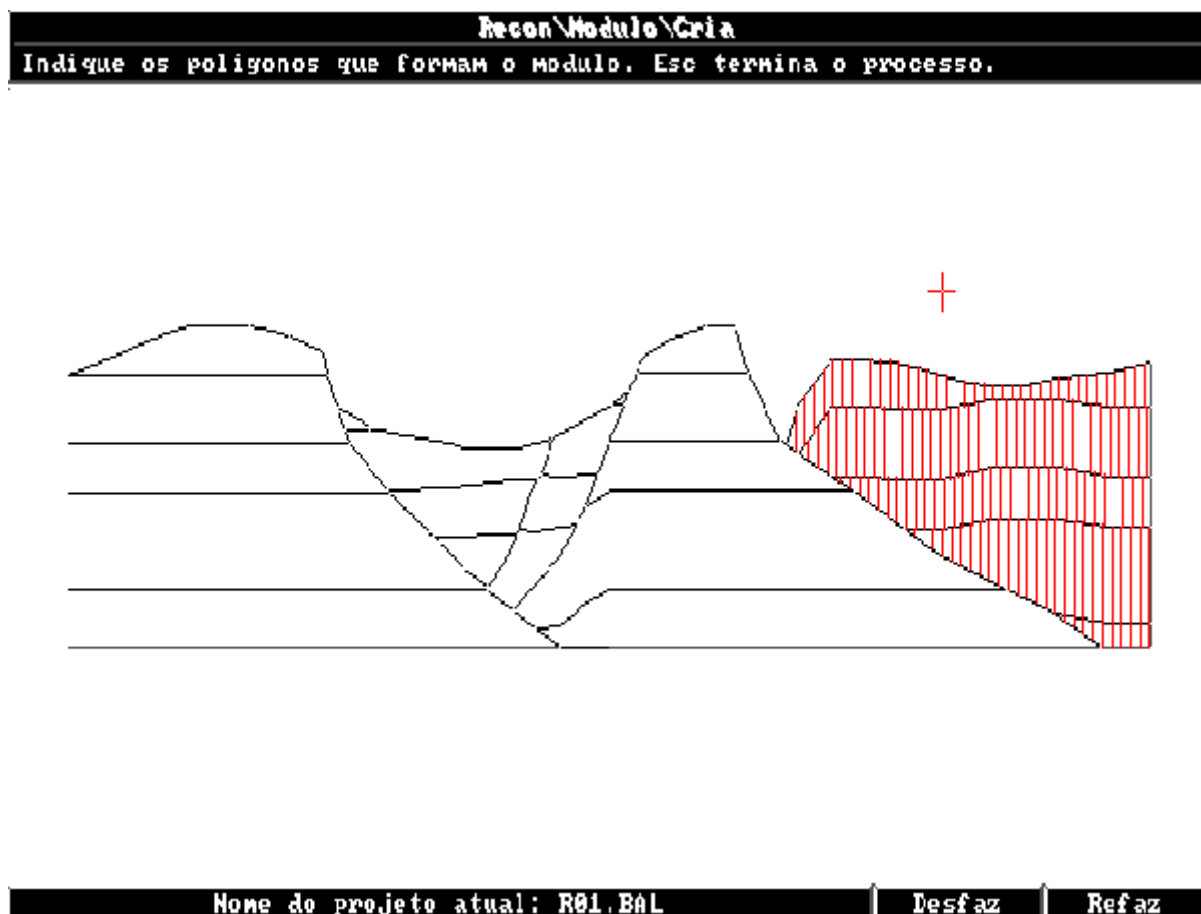


figura 6.2 (d) - Seleção do módulo 4.

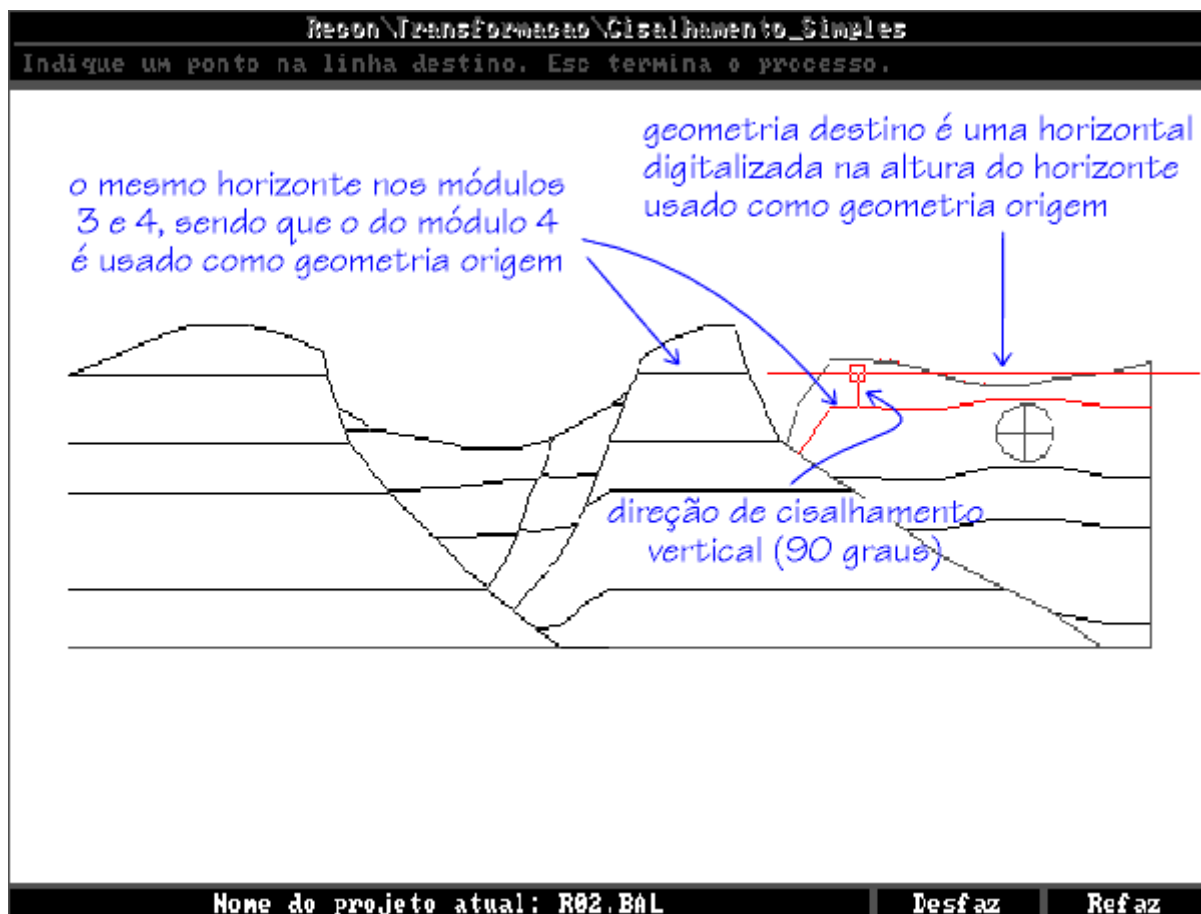


figura 6.2 (e) - Cisalhamento do módulo.

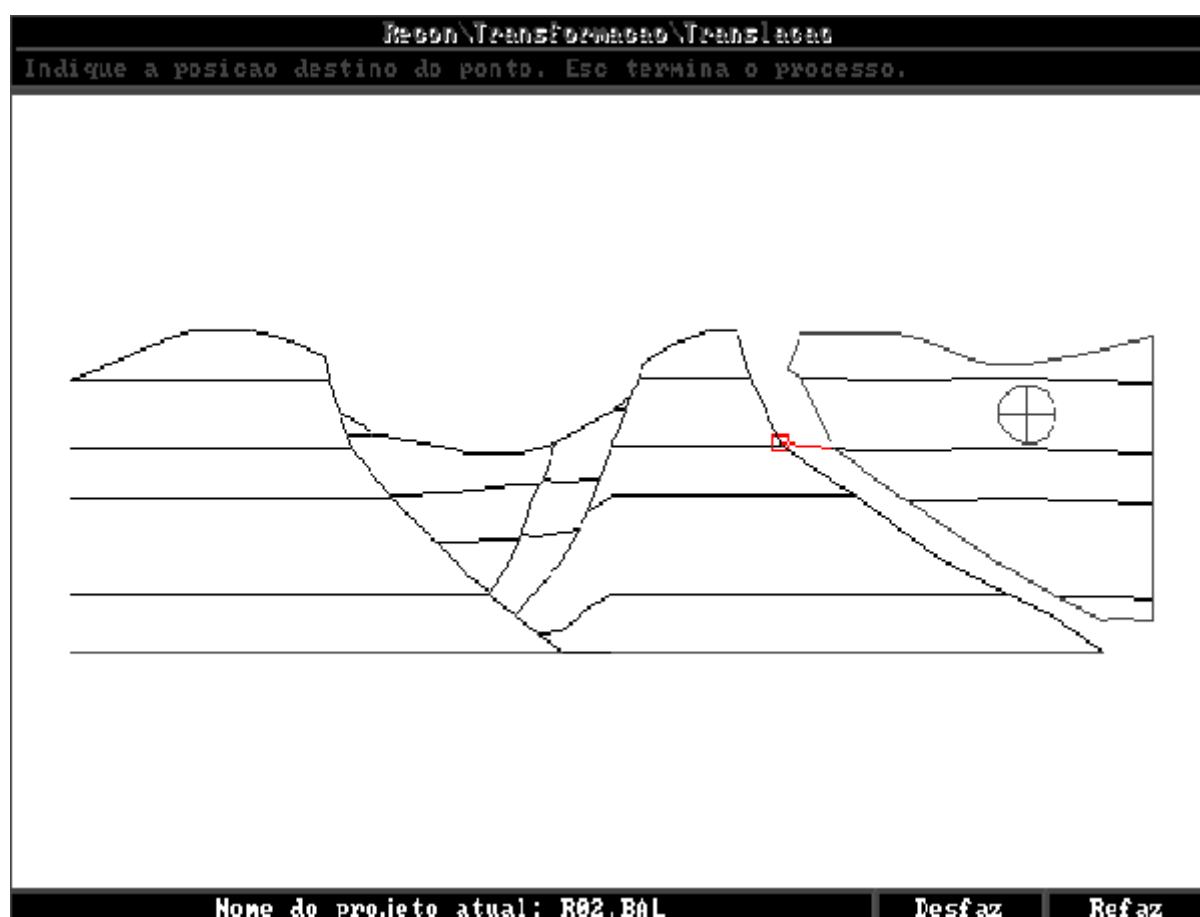
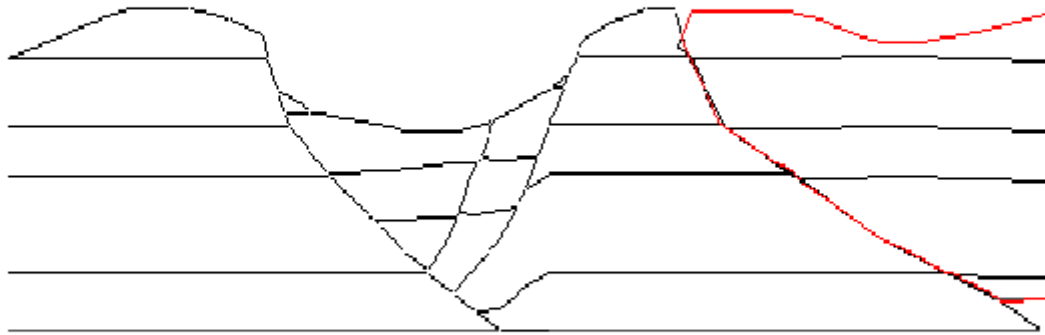


figura 6.2 (f) - Translação do módulo.



Confirme o ajuste do modulo indicado

Ajusta

Tolerancia

Cancela

figura 6.2 (g) - Ajuste.

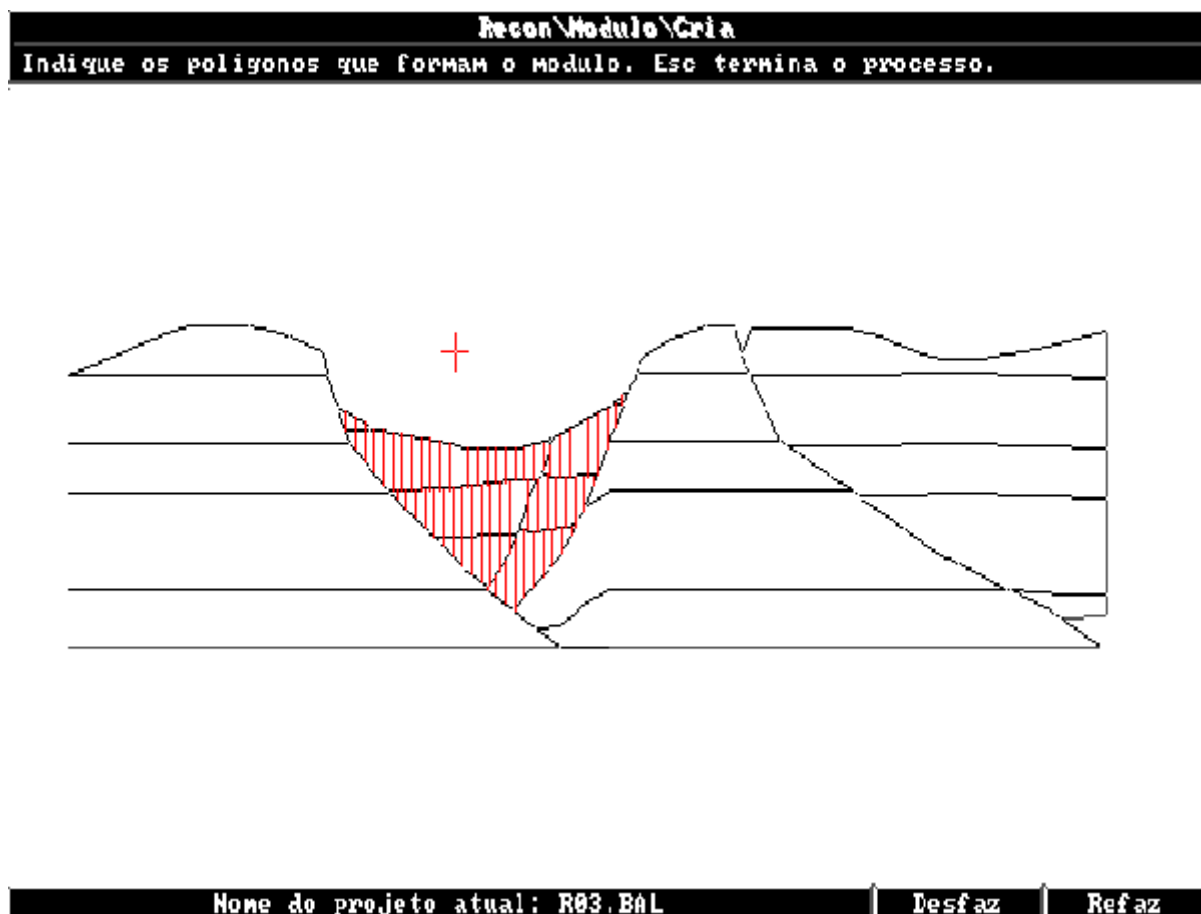


figura 6.2 (h) - Seleção do módulo 2.

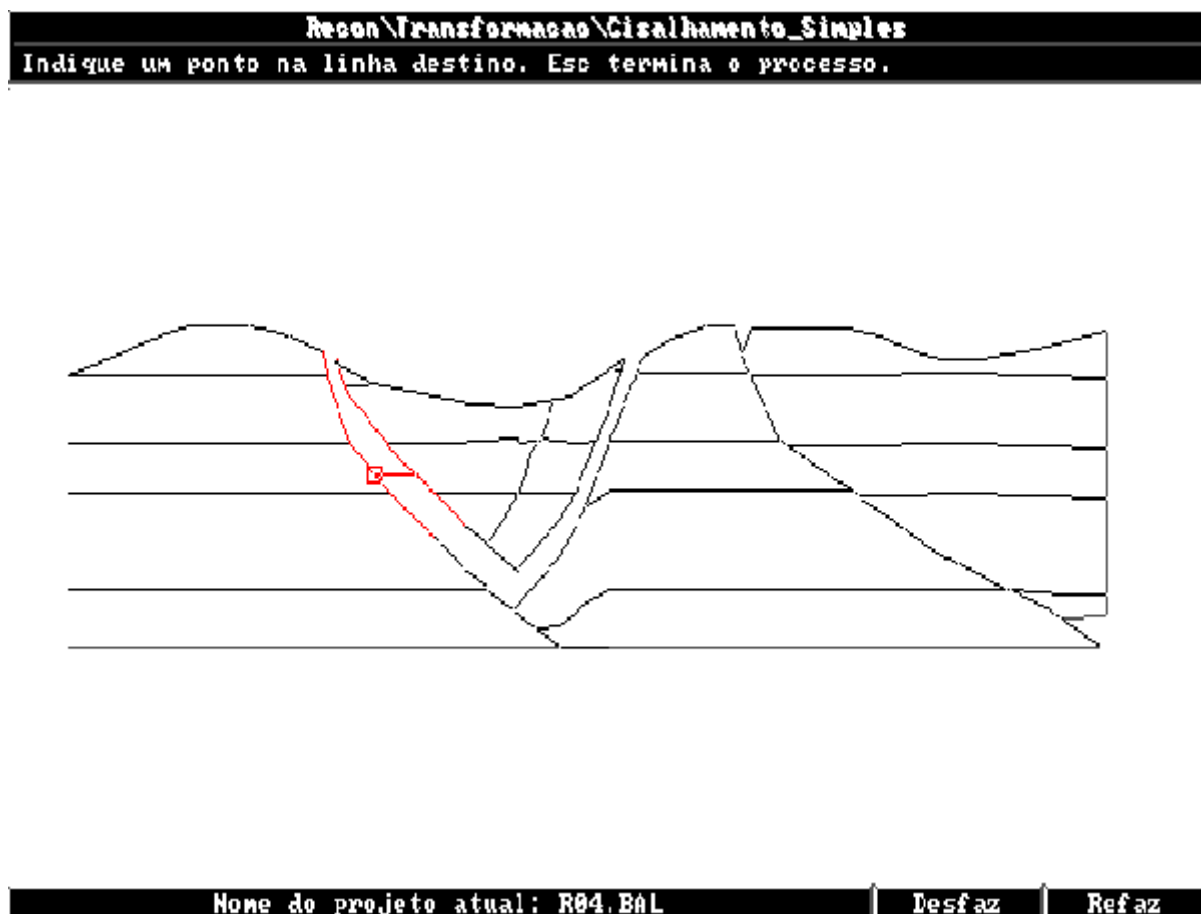
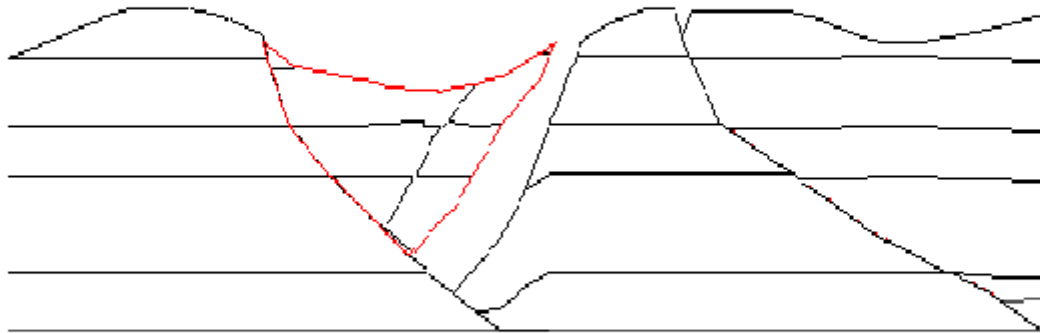


figura 6.2 (i) - Cisalhamento do módulo 2.

Recon\Modulo\Ajusta



Confirme o ajuste do modulo indicado

Ajusta

Tolerancia

Cancela

figura 6.2 (j) - Ajuste do módulo 2.

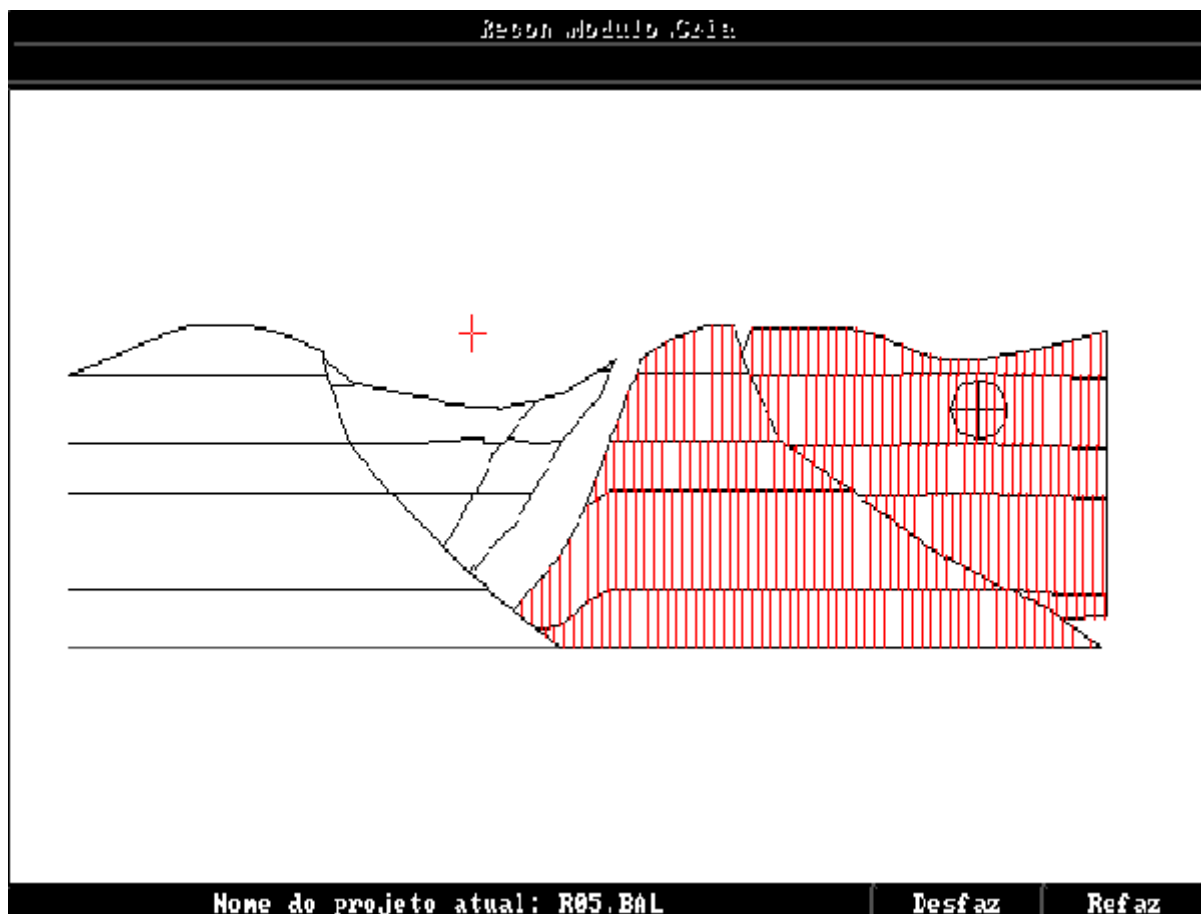
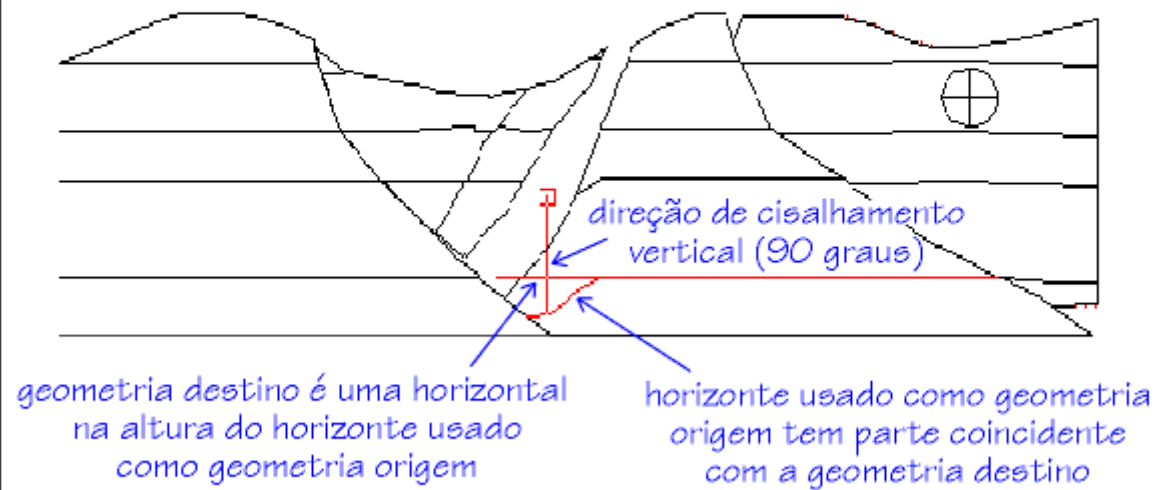


figura 6.2 (I) - Criação do módulo (3+4).



Nome do projeto atual: R06.B0L

Desfaz

Refaz

figura 6.2 (m) - Cisalhamento do módulo (3+4).

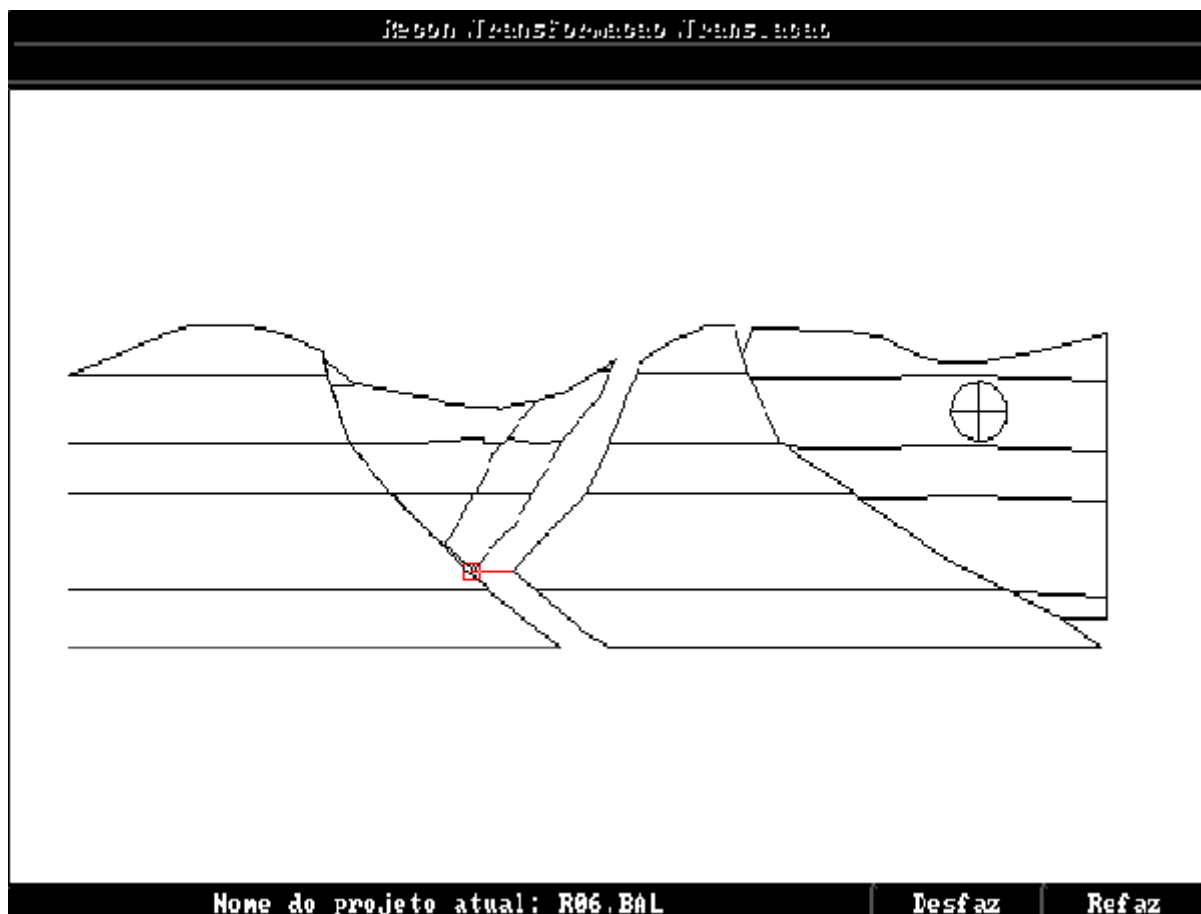


figura 6.2 (n) - Translação do módulo (3+4).

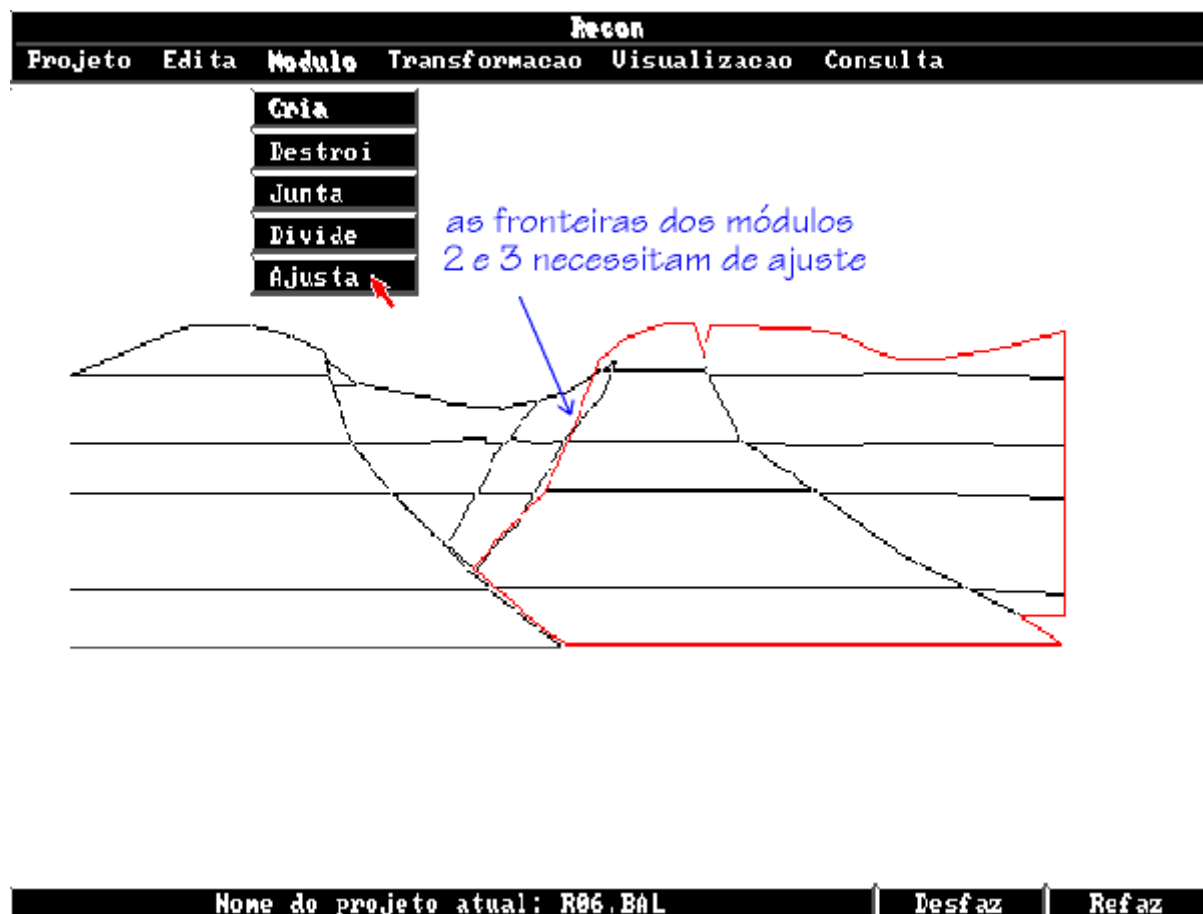


figura 6.2 (o) - Ajuste do módulo (3+4).

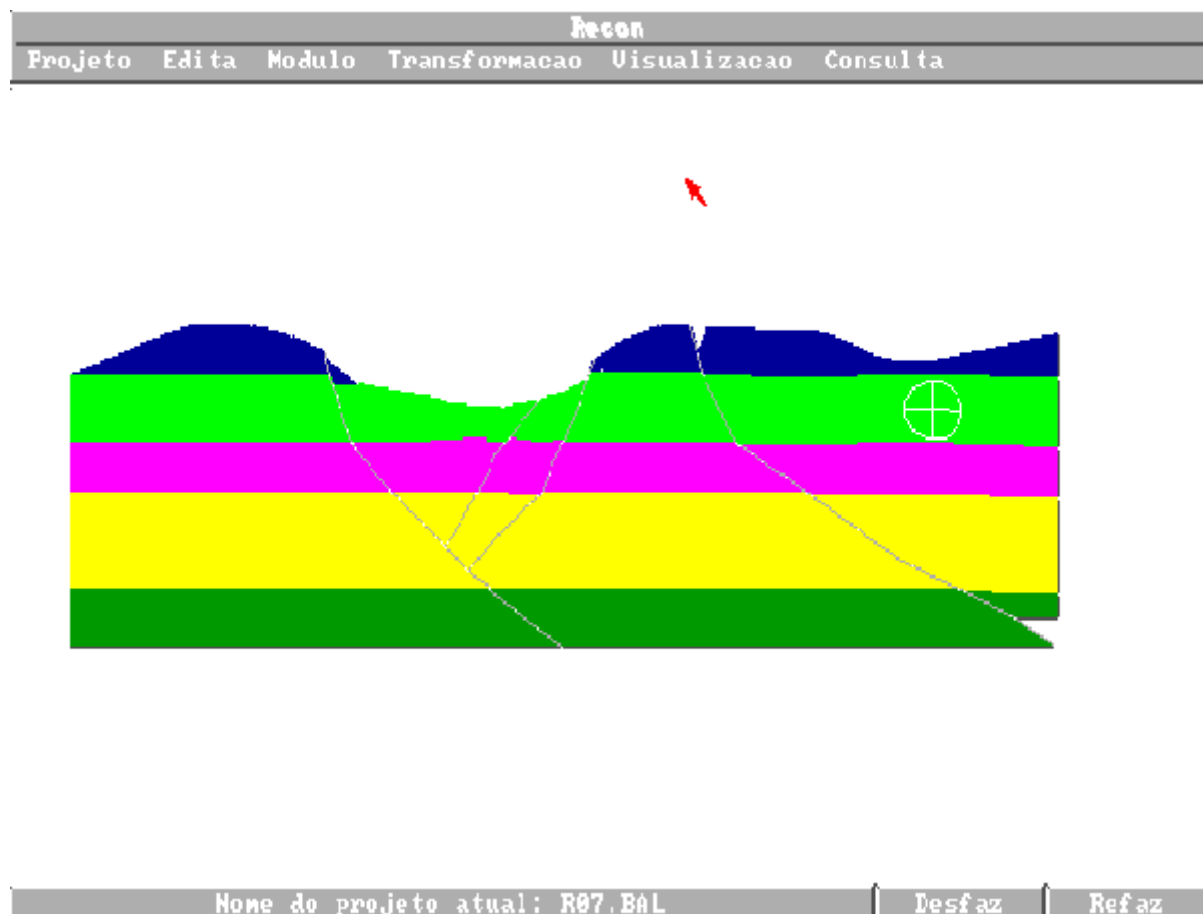


figura 6.2 (p) - Seção ao final do balanceamento.

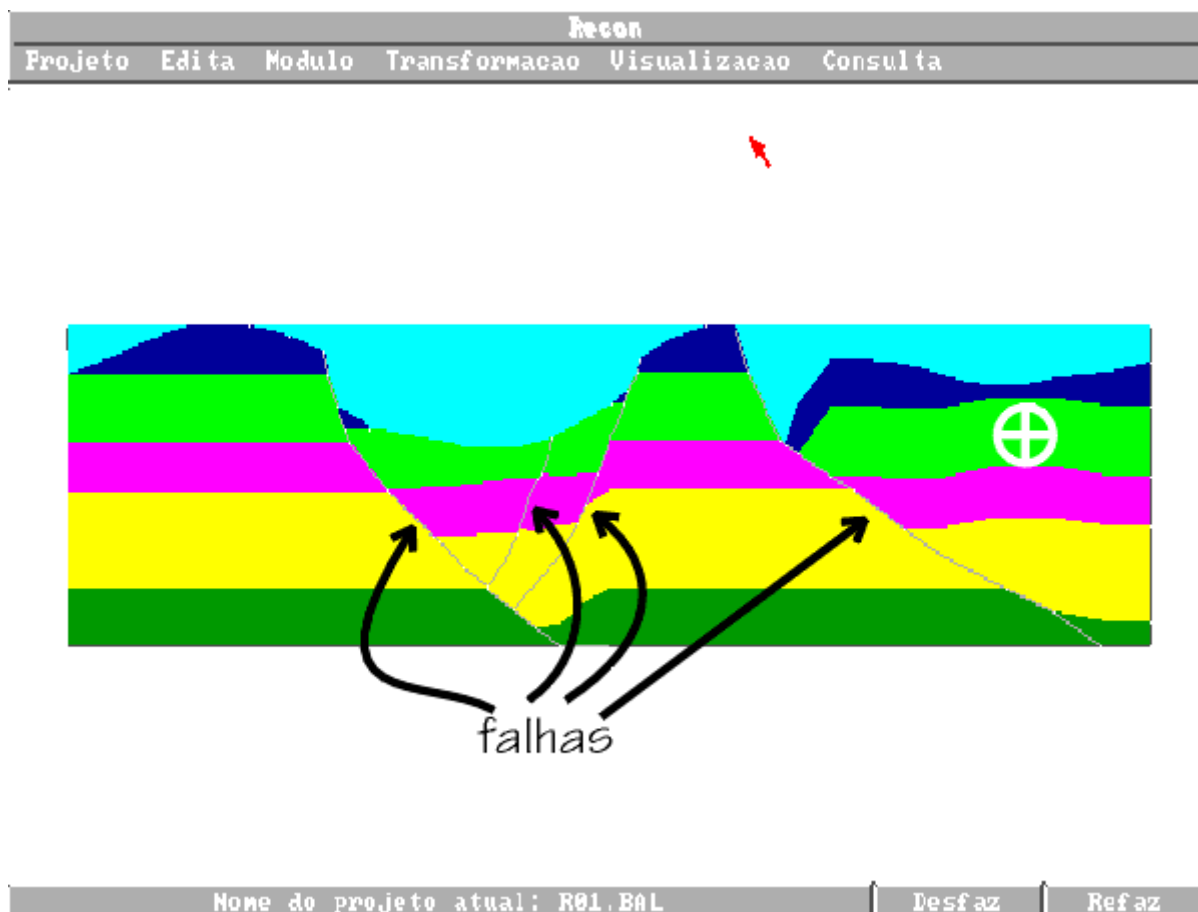


figura 6.2 (a) - Seção a ser balanceada.

[<- VOLTA](#)

para o
capítulo 5

[SUMÁRIO](#)

para o
índice

[SEGUE ->](#)

para o
capítulo 7

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

Este trabalho descreve um ambiente computacional gráfico interativo para gerenciar uma simulação de reconstituição de uma seção geológica, processo este denominado de balanceamento. Este ambiente está fundamentado no uso de estruturas de dados topológicas e em técnicas de geometria computacional. Nesta tese, uma maior ênfase é dada aos algoritmos de transformação geométrica para fazer a reconstrução.

Foram obtidos resultados interessantes com o uso de estruturas topológicas na representação de seções geológicas, permitindo a edição gráfica inteligente das seções, tanto na criação como na sua manipulação durante o balanceamento, livre de diversos problemas de consistência. A própria interação com o usuário ganha muito em simplicidade e agilidade. Outros sistemas de balanceamento impõem ao usuário regras rígidas de interação, tanto na criação da seção quanto no processo de balanceamento. Com o uso de uma estrutura de dados topológica e uma camada de *software* que gerencia a manipulação da subdivisão planar que representa a seção, o usuário interage com o sistema de uma forma mais inteligente e mais flexível, tornando a interface mais agradável.

Os algoritmos de transformação geométrica implementados forneceram respostas esperadas, respeitando os modelos geológicos em que se basearam, inclusive com boa performance em termos de tempo. A interação com a estrutura de dados topológica permitiu consultas rápidas, necessárias em partes do processamento, de atributos geométricos e não-geométricos por parte dos algoritmos.

Para concluir este trabalho, é feito neste capítulo um comentário sobre os resultados experimentais obtidos com o sistema de balanceamento implementado e uma dissertação sobre possíveis caminhos a serem seguidos no desenvolvimento do trabalho que foi iniciado.

7.1 - Avaliação da Implementação

Os resultados experimentais obtidos com o sistema se mostraram satisfatórios. A validade de um balanceamento não pode ser medida de forma fácil e direta, pois o processo no seu todo envolve e depende de várias componentes, cada uma com um certo grau de confiabilidade. Os dados que servem como entrada para o processo de balanceamento são dependentes de uma interpretação humana, que por sua vez se baseia em dados geofísicos com um grau limitado de precisão. O próprio balanceamento deveria ser um processo tridimensional e não apenas restrito ao plano de uma seção. Os algoritmos de deformação utilizados são baseados em modelos geológicos, que são uma aproximação ou simplificação dos fenômenos complexos que realmente ocorrem na natureza. A isso tudo, ainda pode-se somar erros introduzidos pela interpretação humana do usuário que escolhe o procedimento de balanceamento.

Como esperado, a operação do sistema foi facilmente assimilada pelos usuários com conhecimentos de técnicas de balanceamento.

7.2 - Desenvolvimentos Futuros

Foi criado um conjunto básico de transformações geométricas, ou seja, o mínimo de ferramentas necessárias para realizar um trabalho de balanceamento. Este conjunto pode vir a ser expandido com novos algoritmos de deformação. Um exemplo seria a incorporação do algoritmo de deslizamento flexível no sistema. Além disso, os algoritmos já escritos podem ter os seus modelos geológicos revistos e aperfeiçoados. Por exemplo, a descompactação discutida no capítulo 4 poderia, numa futura versão, levar em conta o fenômeno da resposta isostática da litosfera ao carregamento pelas camadas geológicas. Na verdade foi usado um modelo mais simplificado. Uma outra operação a ser incorporada seria o *move on fault*, que nada mais é do que uma combinação das transformações de translação e cisalhamento aplicadas a blocos que se deformaram e deslocaram ao longo do leito de uma falha.

Uma linha de desenvolvimento mais ambiciosa seria a extensão do balanceamento bidimensional para o tridimensional, pois o próprio balanceamento sobre seções bidimensionais, é uma aproximação, que não leva em conta o fluxo de material que entra e sai da dimensão fora do plano da seção. Esta mudança implica na adoção de uma estrutura de dados mais complexa, bem como novos algoritmos de deformação geométrica, que por extensão, ao invés de conservarem área, conservam o volume. Com relação à estrutura de dados, poderia ser empregada a estrutura RED (*Radial Edge*) criada por Kevin Weiler [WEIL88] ou uma variante da mesma. Esta estrutura de dados é capaz de armazenar as relações de adjacência de uma subdivisão espacial. Ela também é discutida no trabalho de Paulo Roma Cavalcanti [ROMA92]. Um outro problema a ser resolvido nesta extensão para 3D, é o da interface com o usuário, que diz respeito à visualização e manipulação das entidades geológicas pelo usuário. Também a camada de *software* que acessa a estrutura, responsável pela consistência geométrica, deveria lidar com robustez dos problemas peculiares da operação em 3D, tais como interseções de superfícies de vários tipos diferentes.

[<- VOLTA](#)

para o
capítulo 6

[SUMÁRIO](#)

para o
índice

[SEGUE ->](#)

para a
bibliografia
