

1

Introdução

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

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

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

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

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

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

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

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

1.2. Motivações

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.3. Objetivos

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

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

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

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

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

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

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

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

1.4. Organização da Dissertação

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

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

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

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

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

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

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

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