

# 7

---

## Conclusões

### 7.1 *Resumo*

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

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

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

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

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

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

## **7.2 Observações**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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