

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



**RESTAURAÇÃO E BALANCEAMENTO DE SEÇÃO NO CONTEXTO DO SINCLINAL
MOEDA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG**

Rafael Moreti Arantes Vieira

Monografia de Trabalho de Formatura
(TF- 2020/22)

Orientador: Prof. Dr. Claudio Alejandro Salazar Mora

SÃO PAULO

2020

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**RESTAURAÇÃO E BALANCEAMENTO DE SEÇÃO NO CONTEXTO DO SINCLINAL
MOEDA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG**

Rafael Moreti Arantes Vieira

Monografia de Trabalho de Formatura
apresentada ao Instituto de Geociências da
Universidade de São Paulo para Graduação em
Geologia.

Área de concentração:

Geologia Estrutural.

Orientador: Prof. Dr. Claudio Alejandro Salazar
Mora

SÃO PAULO

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP. Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a) via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação: Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Vieira, Rafael Moreti Arantes

Restauração e balanceamento de seção no contexto do sinclinal moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG / Rafael Moreti Arantes Vieira. - São Paulo, 2020.

61 p.: il. + mapa

Trabalho de formatura : IGc/USP

Orient.: Salazar Mora, Claudio Alejandro

1. Geologia estrutural 2. Quadrilátero Ferrífero
3. Modelagem geológica 4. Restauração de seção I.
Título

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**RESTAURAÇÃO E BALANCEAMENTO DE SEÇÃO NO CONTEXTO DO SINCLINAL
MOEDA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG**

Rafael Moreti Arantes Vieira

Orientador: Prof. Dr. Claudio Alejandro Salazar Mora

Monografia de Trabalho de Formatura
(TF- 2020/22)

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Ciro Alexandre Ávila (UFRJ)

Dr. Carlos José Archanjo

SÃO PAULO

2020

*Aos meus pais, Fernando e
Rosi, por tudo.*

À minha irmã Mari e toda a família, por serem ótimas pessoas e companhia, sempre. Especialmente meus tios Roseli, Valdeir e seus filhos, que acompanharam nos eventos deste ano.

Ao meu avô Joaquim F. Xavier pela inspiração e incentivo dado a meu pai e a mim ao amor e dedicação pelo conhecimento.

Ao Prof. Dr. Claudio Mora, pela presença, atenção e pelo conhecimento passado. Orientador e amigo incrível, ainda que num ano de trabalho atípico e desafiador como esse.

Ao Prof. Dr. Mário Campos pela contribuição e discussões nesse trabalho e na minha formação. Pela ajuda, conversa e paciência, junto à doutoranda Gabriella Frugis.

A todos que compartilharam esse caminho pela geologia. Aos amigos Vitor (Kibe), Victor (Paul), Felipe (Menoseu), Bianca (Bombom), Bassan, Sara (Tey), Mariana (Kiwi), Victor (Bibifa), Camila (Mim), por tantas conversas e momentos compartilhados durante a graduação e nesse ano. Aos amigos do “quarto”, Ana (Caracu), João P. (Pana), João P. (Durval), Mikhael, Thales, Alexandre (Xaropinho), Leonardo (Frígido) e Gustavo (Cuvest) por todas risadas, conversas e amizade.

Aos amigos de vida, Lucas Poi, André Alves, Edu, Pitarelli, Leo (Parma), Gabriel (9gold), Gabriel (Titixa), Murilo (Mw), Serginho, Fael, Victor (Barba), Melzi e Felipe (Cabeça).

A todos professores do IGc, em especial Miguel Basei, Paulo Boggiani, Marcos Egídio, Renato Moraes, André Negrão e ao agora diretor, Caetano Juliani.

Ao Prof. Issamu Endo, pela disposição e informações na interlocução remota que a quarentena permite.

A todos os funcionários do IGc, que tornaram a experiência de estudar e estar no instituto ainda melhores. Aos motoristas Bira, Adriano e Marciano, pelas conversas e companhia em trabalhos de campo.

A todos da turma 58 com a qual compartilhei tantos bons momentos em aulas, conversas, laboratórios, campos e momentos.

À *Petroleum Experts* pela licença do software concedida ao IGc – USP.

Resumo

O Sinclinal Moeda é uma estrutura geológica localizada na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. O Quadrilátero Ferrífero é formado por uma trama estrutural entre corpos dômicos de complexos granítico-gnássicos TTG, e quilhas preenchidas por sequências do tipo *greenstone* e por rochas metassedimentares entre os domos. As sequências metassedimentares supracrustais se organizam em estruturas sinformais de escala quilométrica. O objetivo do trabalho foi de investigar e interpretar a estrutura em subsuperfície das rochas do Supergrupo Minas no Sinclinal Moeda através das metodologias de construção, modelagem, restauração e teste de balanceamento em três seções geológicas em setores diferentes da estrutura.

As seções geológicas foram construídas e interpretadas com base em dados de mapeamentos e pesquisa disponíveis sobre a região. As seções foram digitalizadas e modeladas no ambiente do *software* Move, utilizando o método das isógonas. A restauração foi realizada através dos algoritmos *Line Length* e *Flexural Slip* e analisadas a cada etapa com a ferramenta *Section Analysis*, permitindo um detalhamento dos dados de espessura, comprimento e área das camadas e seção. A Seção Central é a de maior detalhe em subsuperfície e apresentou, junto à Seção Norte, um bom balanceamento em área e comprimento de linha no método *Flexural Slip*, com erros próximos e menores que 5%. O algoritmo *Line Length* é não-cinemático e não mantém a espessura das camadas no desdobramento, resultando em diferenças de área de aproximadamente 10% entre seções deformadas e desdobradas. O desdobramento por *Flexural Slip* da Seção Sul produziu um bom balanceamento no comprimento de linha, porém, em área o erro foi próximo a 10%, não estando balanceada. As seções apresentam geometrias complexas com diferentes estilos e escalas de dobramento que foram eficientemente restauradas e analisadas utilizando o *software* Move. As seções Central e Norte são consideradas balanceadas.

Os encurtamentos calculados para as Seções Norte, Central e Sul foram de 20, 30 e 30% respectivamente. Considerando-se o modelo geológico discutido, com presença de ascensão dômica e a geometria 3D, os valores calculados não representam necessariamente um encurtamento tectônico horizontal. O desdobramento em porcentagem foi utilizado para modelar uma possível evolução da estrutura nesse modelo.

Abstract

The Moeda syncline is a geological structure located in the western portion of the Quadrilátero Ferrífero, MG. The Quadrilátero Ferrífero is formed by a structural framework of dome-like bodies of TTG granitoid-gneissic complexes and keels filled with greenstone type and metasedimentary sequences between the domes. The supracrustal metasedimentary sequences are organized in kilometer-scale synclines. The aims of this study were to investigate and interpret the subsurface structure of the Minas Supergroup in the Moeda syncline based on the methodologies of cross section construction, modeling, restoration and balancing test in three geological cross sections in different sectors of the structure.

The cross sections were built and interpreted based on mapping and research data available from previous works. The sections were digitized and modeled in the Move software environment, using the isogon method. The restoration was performed using the Line Length and Flexural Slip algorithms and analyzed at each stage with the Section Analysis tool, allowing the inspection of layer thickness, length and the cross-section area. The Central Section is the most detailed section in terms of subsurface data and along with Northern Section, presented a good bed length and area balance with Flexural Slip method with errors close to and below 5%. The Line Length algorithm is non-kinematic and does not maintain layer thickness during the unfolding, resulting in area differences of approximately 10% between the deformed and unfolded sections. The Flexural Slip unfolding of the Southern Section resulted in good bed length balance but area error was close to 10%, meaning that this section is not area balanced. The sections feature complex geometries with different folding style and scale that have been efficiently restored and analyzed using the Move software. Central and Northern sections are considered to be balanced.

The shortening values estimated for the North, Central and South sections were 20, 30 and 30% respectively. Considering the geological model discussed with the presence of a dome ascension and 3D geometry, the calculated values do not necessarily represent a tectonic horizontal shortening. The percentage unfolding feature was utilized for modelling a possible structural evolution for the discussed model.

Sumário

1) INTRODUÇÃO	1
1.1) Localização	1
2) METAS E OBJETIVOS	2
2.1) Justificativa	3
3) TRABALHOS PRÉVIOS	3
3.1) Restauração e balanceamento de seções: revisão	3
3.1.1) Modelos cinemáticos	4
3.1.2) Erro e incertezas no método	6
3.1.3) Partição da deformação, metamorfismo e restauração	7
3.2) Contexto Regional	8
3.2.1) Complexos graníticos-gnáissicos	8
3.2.2) Supergrupo Rio das Velhas	9
3.2.3) Supergrupo Minas	10
3.3) Modelos de Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero	12
3.3.1) Arcabouço e evolução estrutural	13
3.3.2) Sinclinal Moeda	14
3.3.3) Metamorfismo nas rochas supracrustais do Quadrilátero Ferrífero	15
4) MATERIAS E MÉTODOS	16
4.1) Levantamento Bibliográfico	16
4.2) Mapas e Sistema de Informação Geográfica (SIG)	16
4.2.1) Análise e construção de dobras em seção geológica	16
4.3) Software Move	17
4.3.1) Construção de seção e modelagem de dobras no Move™	17
4.3.2) Area Depth e Measure	18
4.3.3) Section Analysis	19
4.3.4) Line Length	19
4.3.5) Flexural Slip	19
5) RESULTADOS OBTIDOS	20
5.1) Modelo e seção geológica	20
5.1.1) Seção Central	20
5.1.2) Seção Norte	22
5.1.3) Seção Sul	22
5.2) Resultados no Move	24
5.2.1) Modelo 3D	24
5.2.2) Seção Central	25
5.2.3) Seção Norte	29

5.2.4) Seção Sul	32
5.3) Discussão Preliminar	34
5.3.1) Dobras parasitas e erosão	35
5.3.2) Teste de restauração em geometria ideal.....	37
5.3.3) Distribuição do encurtamento: Seção Central	38
5.4) Testes e preparo do modelo cinemático	39
5.4.1) Desdobramento em porcentagem.....	39
5.4.2) Modelo simétrico	41
6) INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	43
6.1) Viabilidade teórica: Por que o Sinclinal Moeda?	43
6.2) Desdobramento por <i>Flexural Slip</i>	44
6.3) Balanceamento de seção geológica dobrada	45
6.4) O deslizamento como resposta à diferença nos comprimentos de linha? .	47
6.5) <i>Line Length</i> e encurtamento tectônico	49
6.6) Modelo geológico-estrutural.....	50
6.7) Relação do Domo/Bloco Bação com o encurtamento.....	52
7) CONCLUSÕES	54
8) REFERÊNCIAS	56

Anexo I: Mapa geológico e legenda de Braga (2006)

Anexo II: Mapa com medidas estruturais de Braga (2006)

Anexo III: Folha Itabirito, SF-23-X-A-III-1 e Casa de Pedra, SF-23-X-A-III-3

1) INTRODUÇÃO

A construção de seções geológicas é uma das mais importantes e precursoras formas de inferir a estrutura geológica em subsuperfície. Essa representação tem qualidade ou maior proximidade com a realidade à medida que estão disponíveis dados estratigráficos e estruturais precisos, desde medidas de campo a métodos geofísicos e furos de sondagem. Há, no entanto, processos interpretativos nessa inferência geológica, gerando mais de uma interpretação possível para uma dada seção geológica. Esse processo pode ser aprimorado com métodos de validação.

O balanceamento e restauração de seções é um método de validação que permite testar as premissas envolvidas na construção de uma seção geológica. Através da restauração ou retrodeformação de uma seção geológica, ou seja, revertendo as alterações geométricas produzidas durante a deformação, é possível testar e utilizar os modelos cinemáticos corretos que geraram a geometria deformada bem como estimar o encurtamento ou extensão sofrida. Se a restauração resultar em uma seção representando seu estado pré-deformacional e for geologicamente razoável em relação ao contexto da região, seguindo as premissas da deformação plana e manutenção de espessura e comprimento de camadas, ela está balanceada (Groshong, 2006). Uma seção balanceada, se as hipóteses forem consistentes, é a interpretação mais provável para uma seção (Groshong et al., 2012).

A restauração e balanceamento serão realizados no ambiente do *software Move™* (*Petroleum Experts*) aplicados a seções geológicas no contexto do Sinclinal Moeda, no Quadrilátero Ferrífero. O método contribui para testar e validar modelos para a complexa evolução estrutural da região. O *software Move™* é uma ferramenta de modelagem estrutural promissora ainda pouco utilizada no contexto de orógenos brasileiros.

1.1) Localização

A área de estudo localiza-se no sudeste brasileiro, região central do Estado de Minas Gerais, a sul da capital Belo Horizonte e a noroeste de Ouro Preto. Está inserida no chamado Quadrilátero Ferrífero, um conhecido e importante distrito da mineração brasileira. Tendo como referência a capital do Estado, o acesso a área de estudo pode ser realizado por rodovias, através da BR-356 com rumo ao sul. A BR-356 segue, de Belo Horizonte, em direção a borda da estrutura estudada para leste, podendo-se seguir a sul pela Rodovia Presidente Juscelino Kubitschek (BR-40), possibilitando acesso a grande parte da área e a vias secundárias. A estrutura se encontra entre a Serra das Serrinhas e a Serra da Moeda (Figura 1).

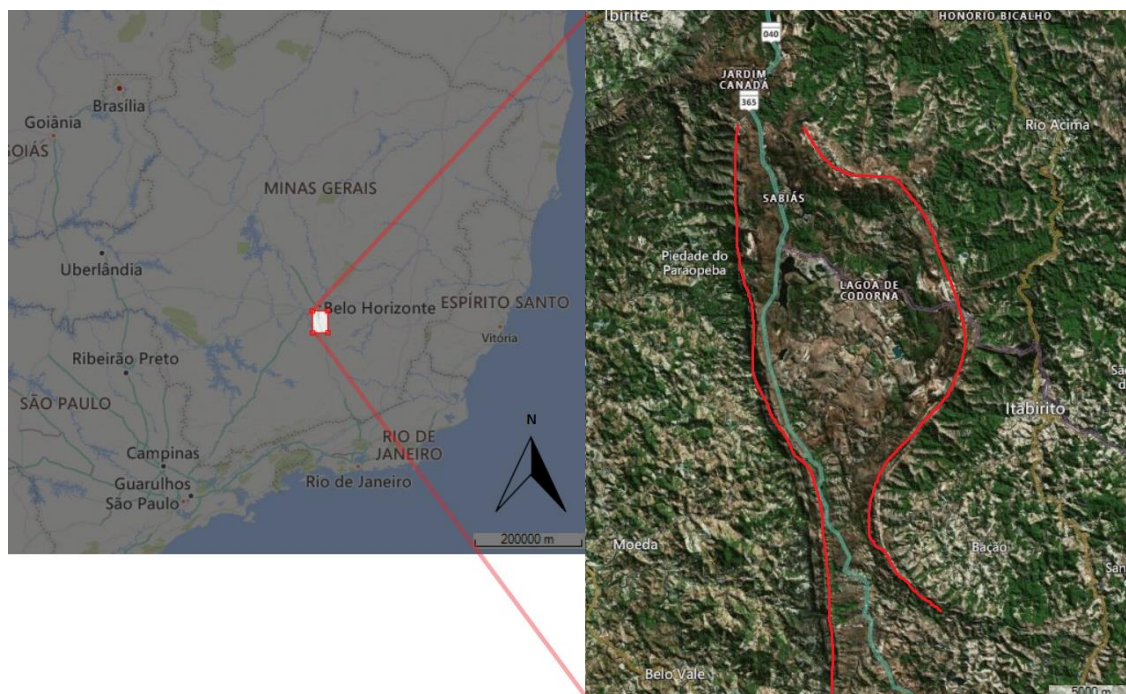


Figura 1: Localização da área de estudo a partir do mapa do Estado de Minas Gerais, Brasil. As linhas vermelhas cheias representam as feições topográficas de borda aproximadas da estrutura em estudo, correspondendo aproximadamente às Serras da Moeda e Serra das Serrinhas, a oeste e leste, respectivamente. Imagens obtidas pelo *software* Terra Incognita e através do site www.bing.com/maps.

2) METAS E OBJETIVOS

As metas do trabalho podem ser resumidas nos seguintes itens:

- (1) Elaboração de seções geológicas no contexto do Sinclinal Moeda, utilizando-se do grande volume de dados produzidos em mapeamentos e pesquisa na região;
- (2) Desenvolvimento do domínio do *software* Move™ para modelagem estrutural;
- (3) Restauração e balanceamento das seções em questão através do *software* Move™;
- (4) Obtenção de estimativas de encurtamento sofrido pelas camadas nas seções investigadas;
- (5) Avaliar e testar modelos cinemáticos para a deformação nas seções;
- (6) Aprofundar e investigar o uso do *software* Move™ como ferramenta para restauração de seção geológica e se possível comparar sua eficácia aos métodos consolidados na literatura;

O objetivo é a comparação e discussão dos resultados obtidos com os modelos estruturais/tectônicos já existentes para a região e a elaboração de um estudo metodológico.

2.1) Justificativa

O uso de seções balanceadas e restauradas, apesar de presente na literatura geológica mundial, não é tão explorado no contexto da geologia no Brasil, e menos ainda em províncias e terrenos pré-cambrianos. O projeto visa contribuir para o conhecimento geológico-estrutural do contexto do Sinclinal Moeda, testando e validando modelos de evolução estrutural nessa região. O uso do *software* Move™ (*Petroleum Experts*) em modelagem estrutural para o contexto descrito é pouco documentado, gerando um enriquecimento também desse acervo de aplicações. O projeto possibilita, portanto, ganhos no conhecimento geológico e estrutural da região tanto para finalidade acadêmica quanto para possíveis aplicações; e ganhos também na descrição do uso dessa nova metodologia em seções dobradas e falhadas pré-cambrianas no Brasil, com um baixo custo operacional.

3) TRABALHOS PRÉVIOS

3.1) Restauração e balanceamento de seções: revisão

De uma seção geológica balanceada, afirma-se que ela pode ser restaurada ao seu estado pré-deformacional de acordo com as hipóteses sobre os modelos estruturais envolvidos e mantendo a área constante entre a seção deformada e restaurada. Suas estruturas devem ser geologicamente razoáveis, sendo coerentes ao estilo deformacional do contexto em que se insere, local e regionalmente. Uma seção que está de acordo com o estilo deformacional do contexto geológico é descrita como admissível (Elliot, 1983). Restaurar uma seção é produzir uma retrodeformação utilizando hipóteses sobre os modelos cinemáticos envolvidos na geração das estruturas descritas. Em uma seção dobrada e falhada, isso significa que ao remover o encurtamento, desdobrando e revertendo rejeitos de falhas, a seção representaria um estado pré-deformacional razoável, sem apresentar hiatos ou sobreposições de camadas, apresentando uma geometria de camadas paralelas horizontais no caso de sequências sedimentares, por exemplo. Esse requisito torna a seção viável. Uma seção balanceada não é necessariamente uma representação da realidade, mas é mais próxima da realidade do que uma seção não balanceável, e demonstra que a estrutura é internamente consistente (Groshong, 2006).

O balanceamento de seções é uma técnica de validação para interpretações estruturais de uma dada área (Groshong, 2006) e ela apresenta certas premissas para sua realização. É necessário que a deformação envolvida seja plana, ou seja, não apresente transporte de massa para fora ou para dentro da seção escolhida (Dahlstrom, 1969). Em um trabalho seminal Chamberlain (1910) *apud* Hossack (1979) calcula uma seção balanceada a partir da premissa da conservação de área (Figura 2), utilizando o conceito para estimar profundidade do descolamento basal em uma seção dobrada. O uso mais comum do balanceamento se dá através de dois métodos, em geral executados manualmente: Restauração de linha (hipótese do comprimento constante) e de área (hipótese da área

constante). É essencial que a restauração seja feita em uma seção com direção paralela à direção de transporte tectônico, ou seja, na direção de máximo deslocamento (falhas) e encurtamento (dobras) para a correta estimativa dos parâmetros e do encurtamento envolvidos.

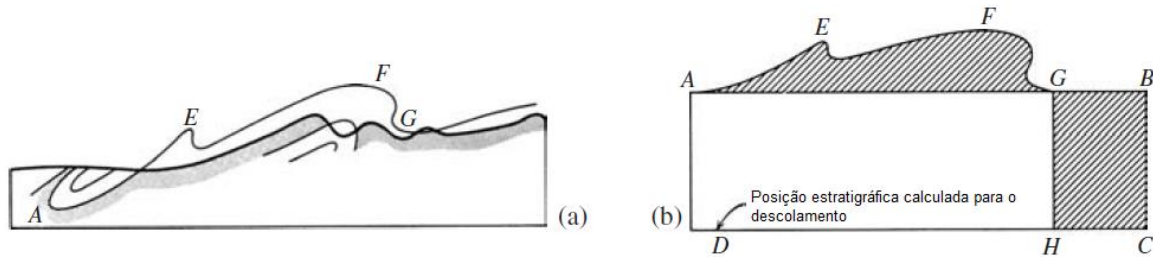


Figura 2: Exemplo de Dahlstrom (1969) para o cálculo por balanceamento de área constante. Em (b), a área no interior de AEFG seria a da figura GBHC, e sabendo-se o deslocamento ($HC=GB$), é possível estimar a profundidade do descolamento. Retirado de Ragan (2009).

Ainda que a restauração seja a mais utilizada metodologia para o balanceamento de seções, balanceamento e restauração têm significados distintos. Nessa revisão, vale ressaltar um trecho de Groshong et al. (2012) que afirma: “o processo de restauração é tomado como sinônimo (erroneamente) de balanceamento de seção: na maioria das metodologias, a restauração é necessária para o balanceamento, mas uma seção restaurável não é necessariamente balanceada”.

3.1.1) Modelos cinemáticos

Os modelos cinemáticos são utilizados para adequar a geometria e evolução de uma estrutura. Eles são descrições simplificadas dos processos mecânicos envolvidos na formação de uma dada estrutura (Groshong, 2006.). Quatro modelos básicos (Figura 3) são utilizados para descrever as estruturas, podendo-se utilizar um ou uma combinação deles para adequadamente restaurar uma estrutura: (a) rotação e translação de corpos rígidos; (b) deslizamento flexural; (c) cisalhamento simples; (d) cisalhamento puro.

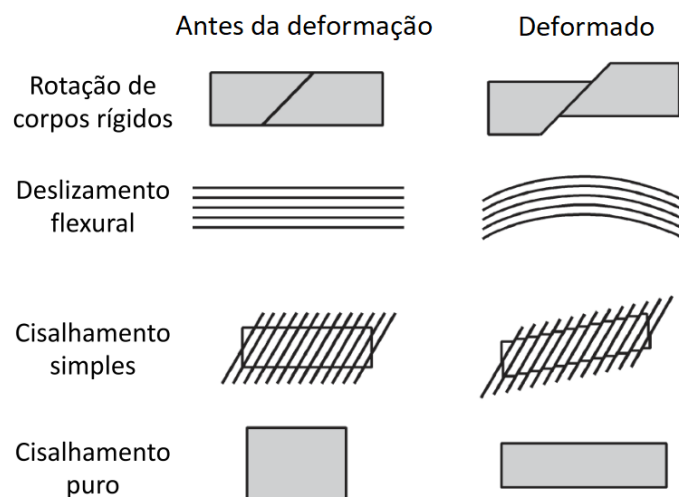


Figura 3: Modelos cinemáticos básicos. Retirado de Groshong (2006). Tradução livre.

Um importante uso do balanceamento de seções é a estimativa do encurtamento ou estiramento ocorrido em uma dada seção. Gwinn (1970) *apud* Hossack (1979) foi um dos primeiros a utilizar o balanceamento para estimar a contração orogênica que atuou sobre uma seção nos Apalaches. A premissa é simples, supondo-se deformação plana, a contração ou extensão em uma direção pode ser descrita através da relação entre o comprimento da seção restaurada (L_0) e o comprimento da seção deformada (L_1) na equação:

$$e = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

Onde e = elongação, sendo encurtamento se $e < 0$, e estiramento se $e > 0$.

Flexural slip

Para restauração de seções dobradas o modelo *flexural slip* ou deslizamento flexural é particularmente importante pois é baseado em um mecanismo de dobramento no qual a deformação é acomodada por cisalhamento simples entre as camadas. Esse é o mecanismo que justifica a manutenção da espessura e comprimento das camadas e consequentemente da manutenção de área. A restauração por *flexural slip* consiste em, após medir a espessura e comprimento das camadas, tornar reta a linha do comprimento antes dobrada enquanto mantém a espessura das camadas.

Groshong (2006) descreve a metodologia de restauração de seção a partir da delimitação de uma *pin line* e uma *loose line* que servirão como referências (Figura 4a). A *pin line* é uma linha que deve ser colocada em posição perpendicular às camadas, permanecendo imóvel mesmo após a restauração. A *loose line* é uma linha que deve ser paralela à *pin line* antes da restauração, e pode assumir formas distintas após a restauração/retrodeformação. A forma da *loose line* após a restauração é um indicativo da qualidade da restauração. Uma alta qualidade de restauração apresenta *loose line* e *pin line* paralelas (Figura 4b). Uma *loose line* irregular indica má qualidade da seção restaurada ou uma seção inválida (Figura 5a). Uma restauração com erro sistemático é representada em uma *loose line* inclinada, porém aproximadamente reta (Figura 5b).

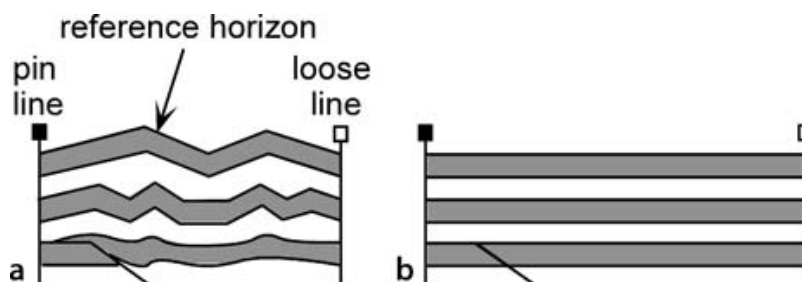


Figura 4: Restauração de seção com *pin line* (topo preenchido) e *loose line* (topo em branco). a) Seção em estado deformado entre a *pin* e *loose line*; b) Seção após a retrodeformação com comportamento da *loose line* ideal.

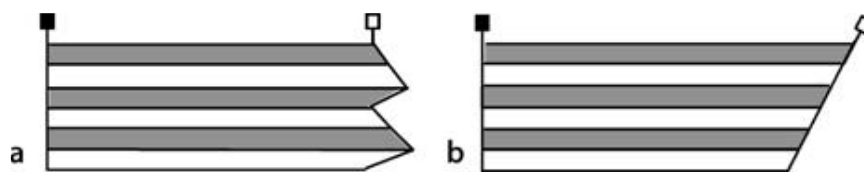


Figura 5: Seções imperfeitas após a restauração. a) Seção de má qualidade ou inválida com *loose line* irregular; b) Seção restaurada apresentando erro sistemático, com *loose line* inclinada.

Groshong (2006) também descreve a importância do posicionamento dessas linhas para a otimização do resultado. A *pin line* deve ser colocada na superfície axial da dobra na seção deformada pois é nesse ponto da charneira que não há deslocamento entre as camadas no *flexural slip*. A *pin* e *loose line* devem ser colocadas em paralelismo e sobre camadas com aproximadamente mesmo mergulho. Muito dos erros descritos tem relação com o posicionamento inadequado dessas linhas. A premissa da espessura e comprimento de camadas constantes é utilizada no método, porém pequenas violações causam poucos efeitos na restauração (Groshong, 2006). Parte dos resultados e do processo interpretativo é justificar as possíveis formas da *loose line* resultante.

3.1.2) Erro e incertezas no método

Os mais relevantes erros e incertezas no método, em especial, do balanceamento são quanto à garantia das premissas dado a realidade dos dados disponíveis para formulação de um modelo estrutural. As principais fontes de erro foram resumidas por Marret e Allmendinger (1992) em termos de: (i) modelo estrutural para subsuperfície incorreto; (ii) incertezas quanto a estratigrafia inicial; (iii) deformação em escalas menores que a resolução da seção. O método do balanceamento por área (Mitra e Namson, 1989) não depende de uma interpretação geométrica específica da subsuperfície e teoricamente já inclui as deformações em diferentes escalas, desde que exista uma estratigrafia precisa para o estado pré-deformação.

A deformações em escalas menores que a resolução da seção podem ser resumidas em: encurtamento paralelo a camada (cisalhamento puro), falhamento e dobramentos pervasivos em pequena escala, dissolução por pressão e formação de clivagem penetrativa (Groshong, 1994; Groshong e Epard, 1994; Hossack, 1979). Judge e Allmendinger (2011) mostram com métodos quantitativos que, em termos de propagação de erro, o erro na estimativa de espessura das camadas é mais relevante na alteração do cálculo de encurtamento, tendo 10% de incerteza na espessura resultando em 50 a 75% do erro no cálculo do encurtamento. Judge e Allmendinger (2011) recomendam para melhor identificação e quantificação dos erros reais, o uso de mais de uma seção geológica na área em análise por restauração e balanceamento.

Hossack (1979) sumariza e discute as principais fontes de erro nas estimativas de encurtamento orogênico, que seriam seções onde não se mantém o princípio da deformação

plana e, portanto, não apresentariam área constante. Os principais processos são: (i) compactação durante a litificação; (ii) compactação tectônica; (iii) dissolução por pressão; (iv) estiramento/elongação ao longo do eixo orogênico. Um dos grandes pontos discutidos em Woodward et al. (1986) é a concentração de efeitos de deformação penetrativa diferenciais sobre certas camadas, podendo gerar uma perda diferencial de volume entre os estratos ou mesmo zonas de deformação a depender da composição e comportamento mecânico/reológico. A diferenciação entre os efeitos de cimentação, compactação gravitacional e uma compactação tectônica de fato, requerem uma análise microestrutural de detalhe (Groshong, 2019).

3.1.3) Partição da deformação, metamorfismo e restauração

A partição da deformação em zonas orogênicas ocorre desde a microescala, com a perda da porosidade, a resposta da plasticidade e da dissolução e recristalização mineral em decorrência de compressão, até dobramentos e empurrões em escalas regionais. A restauração e cálculo do encurtamento se aplicam nas macroescalas porém tem sua precisão e eficiência de quantificação dependentes da micro e mesoescala (como dobras em escala de afloramento).

A geração de clivagem como resposta à deformação resulta em problemas para a premissa de espessura e comprimento de camada constante. A formação de uma clivagem deve produzir uma alteração nas dimensões da camada de maneira não isotrópica (Hossack, 1979), podendo ainda ter a perda do material dissolvido por pressão, resultando em problemas na premissa de área constante. Se os fluidos gerados durante a dissolução por pressão, com nenhum ou até baixo grau metamórfico, se mantêm próximos à fonte, ou se são transportados e removidos (Etheridge et al., 1984); Wright e Platt (1982), é um debate. É importante ressaltar que Gray (1997) demonstra que a perda de volume por dissolução nos leitos de clivagem pronunciada é remobilizada para os domínios de *microlithons*, produzindo mudanças de volume total menores que 10%, tendo Erslev e Ward (1994) chegado a uma conclusão semelhante. A distribuição de zonas de clivagem e interclivagem é controlada pela forma dos grãos, como na elongação de grãos de quartzo e feldspatos e filossilicatos com orientação preferencial (Gray, 1997). Além da dissolução por pressão, o crescimento ou neocristalização de minerais micáceos também é um fator importante na formação da clivagem (Weber, 1981), mas Kerrich et al. (1978) coloca a dissolução por pressão como principal mecanismo em temperaturas entre 300-400°C. Xistos de um *greenstone belt* Arqueano apresentaram resultados semelhantes quanto à perda de volume (4,5% a 11,5% de perda de volume), apresentando uma deformação aproximadamente plana (Barr e Coward, 1974).

Os efeitos do metamorfismo para a restauração de seções passam a ser críticos à medida que o mecanismo de deformação principal atuante seja dado pelas reações

metamórficas com neoformação de minerais e por um comportamento plástico dos minerais em microescala. Woodward et al. (1989) descrevem que acima da zona da biotita, o balanceamento em si torna-se muito mais difícil de garantir pelo domínio de deformações não-planas e da recristalização metamórfica como fonte de alterações na massa e volume das camadas. Em presença de deformação penetrativa e metamorfismo, ainda que de baixo grau, torna-se mais razoável o objetivo de seções restauráveis acima de estritamente balanceáveis (Woodward et al. 1989). A construção de seções restauráveis e mesmo balanceadas com rochas que sofreram metamorfismo de baixo grau não são incomuns (Boyer, 1976; Boyer e Elliot 1982; Namson e Wallace, 1986; Kirkwood, 1999).

Ao assumir que uma deformação é plana e sem alterações de volume, utiliza-se um recurso metodológico que evidencia na seção já restaurada as possíveis imprecisões como no comportamento da *loose line*, descrito para restauração de comprimento de linha constante. Em termos de cálculo de encurtamento, Hossack (1979) mostra que o método, ainda que se evidencie mudanças de área e volume pelos diversos processos tanto tectônicos quanto diagenéticos que afetam as rochas da seção em análise, possibilita chegar a uma estimativa razoável. Essa estimativa pode ser aprimorada através do estudo detalhado de caso, quantificando a partição da deformação nas diferentes escalas e reduzindo o erro.

3.2) Contexto Regional

O Sinclinal Moeda encontra-se na porção oeste do chamado Quadrilátero Ferrífero (Figura 6) que compõe a região sudeste do Cráton São Francisco, que, onde exposto, é um grande escudo estruturado em blocos de embasamento predominantemente Arqueanos limitados por zonas de sutura de 2100 a 2000 Ma (Almeida et al., 1981; Barbosa e Sabaté, 2004). O Quadrilátero Ferrífero (QFe) é delimitado a sul pelo Cinturão Mineiro, terreno juvenil que representa exposição de um orógeno Paleoproterozóico nesse setor do cráton (Teixeira et al., 2000). Esses terrenos encontram-se limitados a leste pelo cinturão neoproterozoico Faixa Araçuaí (Alkmim e Marshak, 1998). As exposições no QFe são constituídas de rochas de complexos gnáissicos e granitoides, que chegam a fácies anfibolito (Blocos Bonfim, Belo Horizonte, Bação, Santa Bárbara e Caeté), rochas metavulcanossedimentares do tipo *greenstone belt* Arqueanas (Rio das Velhas e Pintagui) e sequências supracrustais Paleoproterozoicas (Alkmim e Martins-Neto, 2012).

3.2.1) Complexos graníticos-gnáissicos

Os complexos gnáissicos são representados por rochas TTGs (Farina et al., 2015). As idades identificadas nesse grupo de rochas estão associadas a pelo menos três eventos regionais: (i) Santa Bárbara (3220 a 3200 Ma) identificada em rochas do domo Santa Bárbara; (ii) Rio das Velhas I (2930 a 2850 Ma); (iii) Rio das Velhas II com idades entre 2800 e 2760 Ma (Lana et al., 2013). Nessa sequência tectono-magmática, o primeiro evento associa-se a um estágio inicial com magmatismo de formação de crosta, o segundo estágio adiciona rochas

juvenis da série TTG (compondo os domos Bação, Belo Horizonte e Bonfim) e o terceiro evento marcaria uma produção final de crosta, com um magmatismo de ambiente convergente (Lana et al., 2013). O último estágio estaria também associado à deposição e colocação das rochas máficas-ultramáficas, komatiíticas e sequências vulcano-químicas do Supergrupo Rio das Velhas.

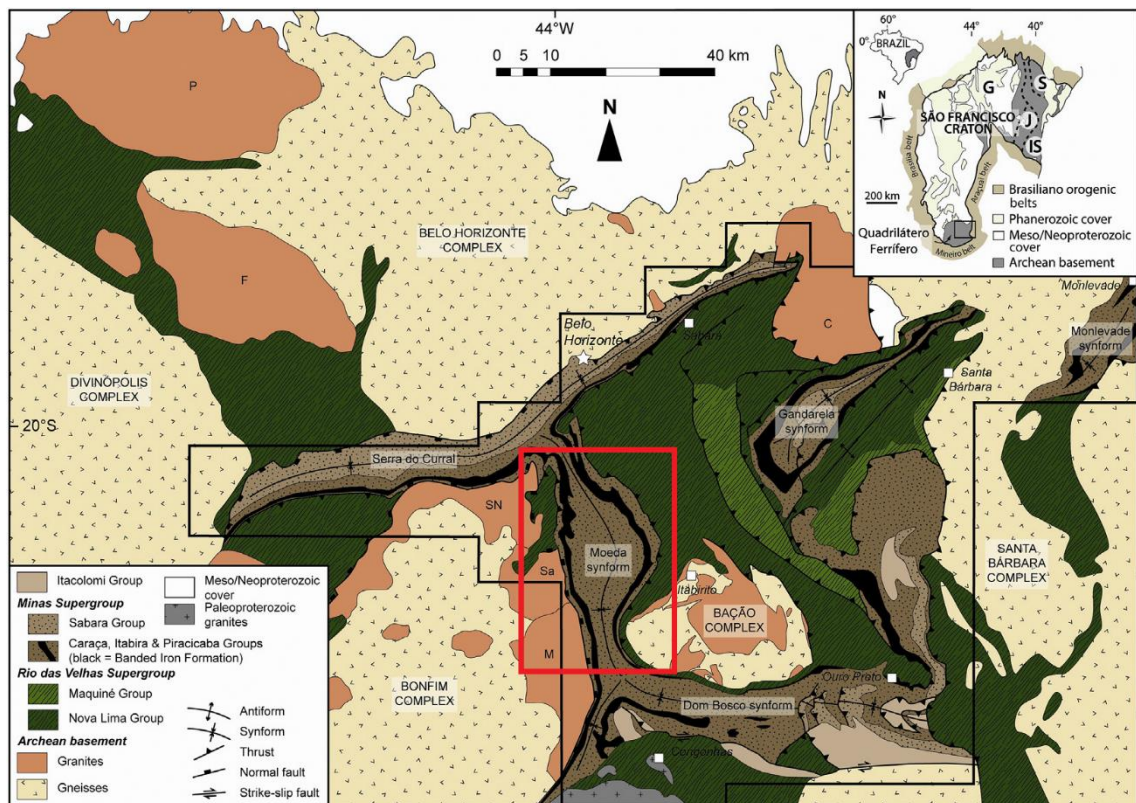


Figura 6: Mapa geológico do Quadrilátero ferrífero de Alkmin e Marshak (1998) modificado por Farina et al. (2015). Abreviações de plútons e batólitos: C – Domo de Caeté, F- Florestal, M- Mamona, P- Pequi, Sa- Samambaia, SN- Souza-Noschese. Na direita superior há um esquema da compartimentação tectônica relacionada ao CSF, com as abreviações: G, J, IS e S sendo, respectivamente os blocos Gavião, Jequié, Itabuna-Salvador-Curaçá e Serrinha. Destaque em um retângulo vermelho para a área de estudo.

3.2.2) Supergrupo Rio das Velhas

Foi definido inicialmente por Dorr et al. (1957) como Série Rio das Velhas, abrangendo as sequências metavulcanossedimentares de fácies xisto verde, em geral, no QFe. Schorcher (1976) *apud* Schorcher (1992) sugere a definição dessas sequências como um *greenstone belt* e caracteriza a unidade basal como Grupo Quebra Osso, composto por metakomatiitos e metavulcânicas máficas/ultramáficas intercaladas a metavulcano-químicas subordinadas. Loczy e Ladeira (1976) classificam a sequência como Supergrupo Rio das Velhas. O contato basal com os complexos TTG é descrito como de natureza tectônica e localmente intrusiva.

A coluna estratigráfica típica de Dorr (1969) subdivide essas rochas, da base para o topo em Grupo Nova Lima e Grupo Maquiné. O Grupo Nova Lima seria composto de rochas metaígneas máficas e ultramáficas com afinidade N-MORB (Zucchetti et al., 1998), e

metassedimentares de natureza química-exalativa como formações ferríferas e tufos, além de metapelitos carbonosos ou não. A espessura do Grupo Nova Lima não tem um cálculo definitivo, porém há estimativas em torno de 3.400 m segundo as colunas construídas por Baltazar e Zucchetti, (2007). Em uma não-conformidade há o Grupo Maquiné acima, de associação clástica, subdividido em Formação Palmital, com sericita filitos, quartzo-sericita xistos e xistos, na base, e a Formação Casa Forte ao topo com metaconglomerados e metarenitos, interpretados como sequências do tipo *flysch* a molássica (Dorr, 1969) com aproximadamente 2000 m de espessura. Em uma proposta alternativa, o contato entre esses grupos foi descrito por Baltazar e Zucchetti (2007) como gradacional, propondo uma evolução contínua, em ciclos tectono-deposicionais entre as unidades da sequência, variando de um ciclo inicial de vulcânicas máfica-ultramáficas, evoluindo para vulcano-exalativa, clasto-química e gradando para sequência sedimentares costeiras e por fim não-marinhas, que corresponderiam ao topo do Grupo Maquiné. A idade máxima de deposição do Grupo Maquiné foi estimada em 2730 Ma (Moreira et al., 2016).

3.2.3) Supergrupo Minas

Definido como Série Minas por Dorr et al. (1957), essa sequência de supracrustais metassedimentares é descrita em um contato discordante com o Supergrupo Rio das Velhas, frequentemente tectônico (Tabela 1). Essa unidade se encontra em geral nos sinclinais do QFe e nas Serras do Caraça e Cambotas. A base da sequência é caracterizada por rochas metassedimentares clásticas, com caráter continental, representadas pelos grupos Tamanduá e Caraça. O Grupo Itabira representaria um membro de ambiente marinho plataformar com presença dos BIFs (*Banded Iron Formation*). O aprofundamento do ambiente deposicional seria caracterizado pelos psamitos e pelitos do Grupo Piracicaba (Bizzi et al. 2003). Sobre o Grupo Piracicaba há as rochas metassedimentares clásticas interpretadas tipicamente como depósitos do tipo *flysch* com idades Paleoproterozoicas do Grupo Sabará. Ao topo há o Grupo Itacolomi também com associações clásticas, porém de natureza molássica, interpretado como sedimentação pós-tectônica. Endo et al. (2019) apresentam uma nova subdivisão dessas unidades, resultando no Supergrupo Estrada Real, sendo este composto pelos Grupos Sabará e Itacolomi.

Grupo Tamanduá

O Grupo Tamanduá é uma unidade controversa na estratigrafia da Série Minas, proposta como base da Série Minas por Dorr (1969), tendo sido também posicionado ao topo do Supergrupo Rio das Velhas (Maxwell, 1972). Simmons e Maxwell (1961) *apud* Dorr (1969) definem o grupo como contendo quartzitos, xistos quartzosos e argilosos na Formação Cambotas, basal, e xistos quartzosos e filíticos, itabiritos filíticos e dolomíticos subordinados na Formação Morro Grande, ao topo (Endo et al., 2019). Nunes (2016) detalha sua ocorrência na Serra do Caraça e correlaciona o Grupo Tamanduá ao Caraça.

Tabela 1: Coluna estratigráfica simplificada tendo como principal base Dorr et al. (1957), Dorr (1969), Endo et al. (2019), Renger et al. (1994) e subordinadamente Reis et al. (2002), Bizzi et al. (2003), Madeira et al. (2019).

Grupo	Fm.	Descrição/Litologia	Ambiente	Espessura
Itacolomi	Indiviso	Ortoquartzitos, quartzitos, filitos quartzosos ou não, quartzitos com seixos, metaconglomerados e xistos. Contato basal: discordância regional	Pós-orogênico molássico	Até 2000 m
Sabará	Indiviso	Clorita-xistos, filitos cloríticos, metatufos, metagrauvacas, metaconglomerados, quartzitos, metavulcânicas félsicas a intermediárias, formações ferríferas bandadas granulares. Caracteriza uma mudança no regime de deposição na bacia para um depósito do tipo flysch com a inversão da bacia Minas Contato basal: hiato deposicional/discordância erosiva	Sin-orogênico	3000 a 3500 m
Piracicaba	Barreiro	Filitos e filitos carbonosos/grafitosos e ricos em pirita	Ambiente redutor	0 a 150 m
	Taboões	Ortoquartzitos finos de aspecto maciço	Ciclo regressivo	0 a 120 m
	Fecho do Funil	Filitos quartzosos, filitos dolomíticos, metadolomitos silicificados ou argilosos Contato basal: gradacional	Marinho-deltaico	~400 m
	Cercadinho	Filitos ferruginosos ou não, sericita-quartzitos, quartzitos ricos em Fe ou não,, metacherts, metaconglomerados, e metadolomitos Contato basal: discordância erosiva	Marinho-deltaico	150 a 600 m
Itabira	Gandarela	Metadolomitos/calcários, itabiritos dolomíticos, metapelitos dolomíticos, itabiritos manganésíferos, filitos e itabiritos subordinados Contato basal: transicional	Marinho	~600 m
	Cauê	Formações ferríferas bandadas metamorfisadas do tipo Lago Superior (itabiritos) itabiritos dolomíticos, metadolomitos e metapelíticas subordinadas Contato basal: conforme ou de paraconformidade	Marinho/transgressivo	~250 m
Caraça	Batatal	Filitos grafitosos ou não, metacherts e itabiritos subordinados Contato basal: abrupto a transicional	Transgressão marinha	0 a 250 m
	Moeda	Ortoquartzitos, quartzitos, metaconglomerados polimíticos, sericita quartzitos, filitos quartzosos. Ocorrências de pirita detrítica. Contato basal: discordância regional com Sgp. Rio das Velhas	Estágio rifte	60 a 1000 m

3.3) Modelos de Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero leva esse nome devido a sua complexa trama estrutural, que apresenta uma geometria pouco comum, descrita como resultante de dois grandes eventos tectônicos compressivos que afetaram as três sequências principais descritas na estratigrafia (Alkmim e Marshak, 1998). A arquitetura estrutural pode ser dividida em duas componentes: (i) estruturas dômicas compostas pelos complexos metamórficos de caráter gnáissico-granitoide, comportando-se como anteparos, em geral, apresentando baixa penetração dos efeitos térmicos e deformacionais no interior desses corpos; (ii) quilhas com as sequências supracrustais distribuídas em camadas deformadas em sinclinais e anticlinais e mesmo homoclinais entre os corpos dômicos. O primeiro evento é conhecido como orogênese Paleoproterozoica, apresentando idades entre 2.1 e 1.9 Ga e é descrita nessa região como um encurtamento de vergência para noroeste que gerou um cinturão de empurrões e dobramentos de caráter *thin-skinned*, nucleou as sinclinais e anticlinais e representaria o fechamento da bacia Minas (Alkmim e Marshak, 1998). Segundo esses autores haveria um colapso orogênico que seria responsável por estruturas de caráter extensional como zonas de cisalhamento normais. Ainda dentro desse modelo um segundo evento compressivo Brasileiro ocorreu entre 700-500 Ma, gerando sobreposição e reativação de diversas estruturas, com cavalgamentos de vergência para oeste e a reativação de zonas de cisalhamento e falhas de eventos anteriores (Chemale et al., 1994).

Um modelo recente para a evolução e estruturação do QFe é descrito por Cutts et al. (2019), os quais reafirmam e comparam aspectos de modelos anteriores como os de Chemale et al. (1994), Alkmim e Marshak (1998) e Marshak et al. (1997), e enriquece com uma compilação de dados, principalmente, geocronológicos de Farina et al. (2015), Lana et al. (2013) e Aguilar et al. (2017), sugerindo um modelo tectônico abrangente. O modelo estrutural que explicaria a geometria do QFe seria o de domos e quilhas híbrido entre um *metamorphic core complex* (Chemale et al. 1994 e Lana et al. 2010) e um modelo de domeamento diapírico/magmático. Segundo Cutts et al. (2019), o domeamento de caráter magmático teria origem durante os processos colisionais que inverteram a sequência Rio das Velhas, gerando uma cobertura espessa de rochas máficas em 2770 Ma, concentrando calor radiogênico no embasamento sob a cobertura e gerando fusão na crosta inferior durante o colapso orogênico em 2700 Ma. Essa granitogênese geraria um padrão inicial de domos e quilhas, com as quilhas preenchidas por rochas do Supergrupo Rio das Velhas. Após esse período, ocorreria toda a evolução da Bacia Minas, descrita na estratigrafia, como uma evolução de margem passiva. Em seguida, ocorreriam eventos colisionais e acrecionários de idades Paleoproterozoicas que inverteriam a bacia Minas. O colapso orogênico e a consequente extensão ocorreram em aproximadamente 2050 Ma, gerando uma reativação das estruturas pretéritas de domos e quilhas, interceptando quilhas da sequência Rio das Velhas e colocando lado a lado as rochas do Supergrupo Minas aos domos aquecidos durante a orogênese (Cutts

et al., 2019 e Aguilar et al., 2017), gerando feições de metamorfismo de contato junto às zonas de cisalhamento normal (Jordt-Evangelista et al., 1992).

3.3.1) *Arcabouço e evolução estrutural*

Os modelos com base em dados geocronológicos e geoquímicos conferem detalhe aos eventos tectônicos atuantes até o Evento Paleoproterozoico. A sequenciação e caracterização de eventos posteriores tem como base principal o estudo da evolução estrutural da área e nesse contexto foram propostos diferentes modelos, por vezes irreconciliáveis entre si. Ladeira e Viveiros (1984) propõem um dos primeiros modelos em termos de eventos deformacionais e subdividem seis eventos que teriam afetado as unidades supracrustais. Um primeiro evento pré-Minas afetando as rochas do Supergrupo Rio das Velhas caracterizados por dobras vergentes para NE. Um segundo evento afetando também o Supergrupo Minas registrado em zonas de cisalhamento inicialmente subhorizontalizadas e dobramentos de orientações de eixos aproximadas a NE e SE. Os eventos D3 e D4 seriam de natureza coaxial com compressão gerando dobras com eixos E-W, redobrando estruturas préteritas. O quinto evento seria caracterizado por dobras e falhas de orientação aproximada NNE e por fim um sexto evento de natureza rúptil. Nesse modelo os eventos D3 e D4 seriam responsáveis por tornar os grandes sinclinais do QFe, como Moeda e Dom Bosco, por exemplo em dobras reclinadas.

Marshak e Alkmim (1989) descrevem a história da deformação em termos de quatro eventos pré-Itacolomi. O primeiro seria de natureza compressiva com dobramentos e empurrões vergentes para NW. O segundo apresentaria uma compressão de vetores N-S envolvendo o embasamento com falhas reversas e de empurrão que teriam como resposta dobras nas supracrustais. O evento seguinte teria natureza distensional caracterizada por zonas de cisalhamento normais. O terceiro evento compressional seria de compressão com vetores E-W afetando principalmente a porção leste do QFe, gerando sistemas de dobras e falhas de orientação N-S.

Chemale et al. (1994) propuseram um modelo de evolução estrutural integrado para as diferentes porções do QFe e pode ser subdividido em dois grandes eventos deformacionais. O primeiro de natureza distensional após o Evento Paleoproterozoico, no qual teriam sido formadas as estruturas do tipo *metamorphic core complex* e um segundo evento de natureza compressiva associado ao Ciclo Brasileiro que teria dado origem ao cinturão de dobramentos e empurrões como vergência para oeste, que afetariam os sinclinais gerados durante o primeiro evento, invertendo, amplificando e mesmo rotacionando essas estruturas.

Endo (1997) formula um modelo para a estruturação regional combinando geocronologia e estrutural/cinemática categorizando dez eventos deformacionais, sendo oito transpressionais e dois transtracionais. Os eventos que afetam as unidades metassedimentares iniciam-se na Orogênese Paleoproterozoica que compreenderia quatro

fases em alternância entre regimes transpressoriais e transtracionais entre 2.520 Ma e 1900 Ma. A primeira seria a Orogênese Minas com dobramentos em escala regional com vergência SW e SE com uma fase extensional posterior que daria origem aos sinclinais e estruturas dômicas. A Orogenia Itacolomi seria caracterizada por empurrões de vergência NNW e SSE com fase posterior extensional com falhas normais. Endo (1997) descreve duas fases durante o Ciclo Brasileiro: i) a primeira com dobramentos, redobramentos e falhas reversas com vergência para oeste e cisalhamento normal pós-orogênico para leste; ii) dobramentos suaves e uma clivagem espaçada aproximadamente E-W.

Endo et al. (2005) reinterpreta o arcabouço estrutural em termos de uma megaestrutura alóctone chamada *Nappe Curral*. O modelo descreve as sequências do Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupo Minas em termos de uma mega dobra recumbente que teria como charneira a junção Curral-Moeda na região NW do QFe. A Serra do Curral seria o flanco inverso, enquanto o Sinclinal Moeda representaria o flanco normal da estrutura, estando o Sinclinal Moeda redobrado. O transporte se daria por superfícies internas aos complexos granítico-gnáissicos e por descolamento das supracrustais. A *nappe* Curral seria anterior e sendo superposta pela *nappe* Ouro Preto (Almeida, 2004) a sul, com movimentação para SW.

3.3.2) *Sinclinal Moeda*

Descrito como um sinclinal de primeira ordem em Dorr (1969), está localizado na “quilha” entre os domos Bonfim (Falha Bonfim-Moeda) e Bação. Chemale et al. (1991) descrevem o Sinclinal Moeda como produto do colapso das sequências crustais em resposta ao soerguimento do embasamento granito-gnáissico. Endo e Nalini Jr. (1992) descrevem a estrutura como acomodação da extensão, com falhas normais no embasamento, dobrando as sequências por cisalhamento flexural entre as camadas. O Sinclinal Moeda apresenta *trend* aproximadamente N-S e é truncado, com uma estrutura de interferência complexa ao norte pela Serra do Curral e a sul pelo sinclinal Dom Bosco, com uma inflexão para leste. Endo (1997) descreve a inversão do flanco leste do sinclinal como produto de um evento compressivo com transporte para oeste, sendo uma possível influência do Brasileiro como descrito em Alkmim e Marshak (1998), também afetando a zona de constricção ao sul da estrutura, sob domínio do Domo/Complexo Bação. Endo (1997) descreve o mecanismo de dobramento como deslizamento flexural para as estruturais sinclinais no evento distensivo. As dobras descritas em campo apresentam como principal mecanismo de dobramento descrito, o deslizamento flexural e não necessariamente associadas a uma clivagem plano axial (Rosière et al., 1993, 1996; Hippert e Davis, 2000; Hippert et al., 2001).

Hippert e Davis (2000) sugerem um modelo de evolução cinemática separado em dois momentos. Um primeiro de ascensão dos domos e movimento descendente das supracrustais no interior das quilhas, gerando os sinclinais principalmente por deslizamento flexural entre

as camadas e movimentação normal nas zonas de cisalhamento marginais entre os domos e as quilhas. Em um segundo momento, haveria a compressão E-W com vergência para oeste, que no Sinclinal Moeda resulta na inversão do flanco leste, gerando uma inversão dos indicadores de cisalhamento puro no flanco invertido e menor intensidade de *finite strain* nesses domínios.

3.3.3) Metamorfismo nas rochas supracrustais do Quadrilátero Ferrífero

Apesar do Supergupo Rio das Velhas sofrer efeitos tectonometamórficos anteriores ao Evento Paleoproterozoico, ambos supergrupos Minas e Rio das Velhas encontram-se na zona da clorita da fácies xisto verde, gradando para anfibolito baixo nas bordas leste e sudeste (Noce, 1995). Herz (1978) define e mapeia esse zoneamento metamórfico de fácies xisto verde baixo a oeste, chegando a anfibolito na porção central e até fácies granulito na porção leste, sendo reafirmados por Noce (1995) para os complexos metamórficos e por Roeser (1987) também para supracrustais. Herz (1978) define isógrads que iniciam em zona da clorita na porção oeste, gradando até estauroлита na porção leste, com variação de magnitude térmica aproximada de 300 a 600° C. Pires (2005) descreve na base do Supergupo Minas, na porção oeste, um metamorfismo com assembleias de muscovita/sericita e pirofilita. As isógrads definidas por Herz (1978) foram redefinidas por Pires (1995) para as formações ferríferas (Figura 7), mostrando a divisão entre as zonas de baixa e alta deformação, além das isógrads.

Rosière et al. (2001) descrevem a zona de baixa deformação como apresentando estruturas sedimentares evidentes e preservando texturas e estruturas diagenéticas, preservando microbandamentos. Nas zonas de contato entre os sinclinais e os domos são descritas auréolas de metamorfismo de contato (Jordt-Evangelista et al., 1992).

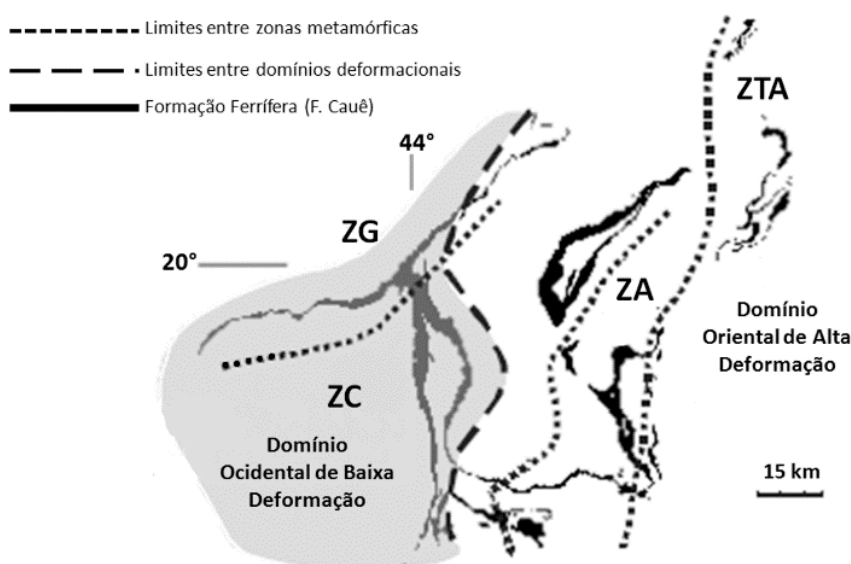


Figura 7: Zoneamento metamórfico e estrutural proposto por Pires (1995). Retirado de Ferreira et al. (2015). ZC: Zona da Cummingtonita; ZG: Zona da Grunerita; ZA: Zona da Actinolita; ZTA: Zona da Tremolita-Antofilita.

4) MATERIAS E MÉTODOS

4.1) Levantamento Bibliográfico

A primeira e contínua etapa desenvolvida no trabalho foi o levantamento e revisão bibliográfica buscando fundamentar e enriquecer os temas relacionados e desenvolvidos no trabalho. Os principais temas são: contexto geológico regional e local, geologia estrutural, modelagem tectônica e estrutural, restauração e balanceamento de seções e suas aplicações, uso de métodos modernos de restauração de seções, aplicações do *software* Move, principalmente em seções dobradas e com falhas. Essa etapa é realizada através da revisão de artigos científicos, livros-texto, relatórios, mapas e do material disponibilizado no Move com licença acadêmica.

4.2) Mapas e Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Para a visualização, análise e manejo de mapas geológicos, levantamentos geofísicos e topográficos utiliza-se o *software* QGIS. Com esses softwares serão visualizados e manipulados os mapas hipsométricos da área que podem ser integrados aos dados geológicos para criar um modelo digital de terreno. Os principais mapas geológicos utilizados são as folhas Itabirito (SF-23-X-A-III-1) e Casa de Pedra (SF-23-X-A-III-3) de Lobato et al. (2005). A obtenção de mapas hipsométricos e *hillshade* se dá através dos portais da USGS (*United States Geologic Service*) e ALOS-Palsar.

4.3.1) Análise e construção de dobras em seção geológica

O método das isógonas é utilizado na construção de dobras utilizado através do Move com uma abordagem realista para as formas de dobras baseadas em conceitos geológicos. São utilizadas relações geométricas entre a espessura das camadas e os ângulos de mergulho segundo as definições e classificações de Ramsay (1967). O método das isógonas possibilita construções de maior complexidade e realidade como dobramentos híbridos ou em camadas com variações geomecânicas internas. Fundamentalmente, as isógonas refletem os padrões de variação e espessura em camadas dobradas. A classificação por isógonas mostra a relação geométrica entre a superfície interna e externa das camadas dobradas através da curvatura e a distância entre as superfícies.

A linha que conecta dois pontos de igual mergulho em cada uma das superfícies é chamada de isógona de mergulho (Ramsay e Huber, 1987). A classificação é representada na Figura 8, sendo divididas em três classes:

Classe 1: Dobras representadas com isógonas convergentes, ou seja, isógonas que convergem do arco externo para o arco interno da camada dobrada. Essa classe tem três subdivisões, sendo elas fortemente convergentes (Classe 1A), isógonas perpendiculares à camada, conhecidas como paralelas (1B) e fracamente convergentes (1C).

Classe 2: As curvaturas do arco externo e interno são idênticas, resultando em isógonas paralelas entre si e ao plano axial. São chamadas de dobras similares

Classe 3: Dobras com isógonas divergentes, apresentando curvatura do arco interno menor que a curvatura do arco externo.

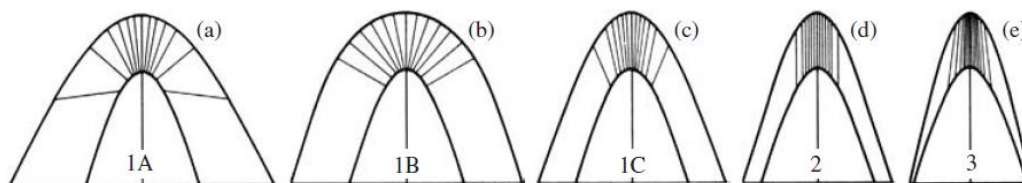


Figura 8: Representações dos estilos de dobras pela classificação de Ramsay (1967) por isógonas: (a) fortemente convergente; (b) paralelas; (c) fracamente convergentes; (d) similares; (e) divergentes. Retirado de Ragan (2009).

4.3) Software Move

O Move™ (*Petroleum Experts*) é um *software* desenvolvido para geólogos que serve como uma eficiente ferramenta na construção de interpretações geometricamente válidas baseadas em princípios geológicos. É um ambiente de modelagem e análise estrutural, possibilitando também estimativas precisas de incertezas nos processos envolvidos. São disponibilizadas plataformas de integração e interpretação de dados, construção de modelos 3D, construção de seções geológicas, restauração e validação a partir de modelos cinemáticos, modelagem geomecânica, modelagem de sistemas de fraturas, falhas e de tensão.

4.3.1) Construção de seção e modelagem de dobras no Move™

O método de construção de dobras por isógonas tem no Move um ambiente de modelagem pelos algoritmos das *Ramsay Folds*. A modelagem é realizada com o uso das camadas de geometria mais confiável e embasada como *template* para modelar as dobras segundo o padrão de isógonas descritos ou esperados para cada uma das outras camadas e também podendo-se utilizar de medidas estruturais como referência. A seção construída a mão é digitalizada e trabalhada a partir desse método para corrigir possíveis imperfeições, sendo possível durante a modelagem avaliar as elipses de deformação de todos os setores da camada, além das isógonas, permitindo ajustar e retificar a geometria.

A modelagem é feita a partir do ajuste do padrão de isógonas de cada camada segundo o gráfico da Figura 9b. Dobras de padrão homogêneo são traçadas como retas partindo da origem, como no exemplo de dobras similares. Dobras mais complexas e híbridas são representadas em padrões curvos (linha preta) como o exemplo de dobras em *chevron* no mesmo gráfico.

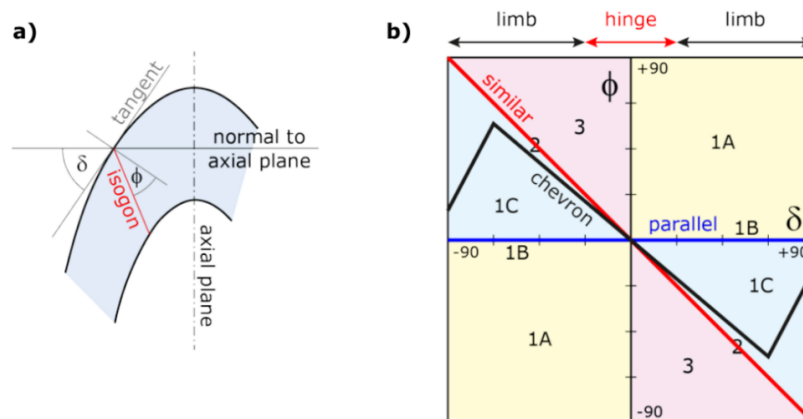


Figura 9: a) Relações geométricas utilizadas na determinação das classes de dobras; (b) Gráfico com as classificações a partir dos dados geométricos nos estilos descritos. Retirado das notas mensais do Move™ (2016).

4.3.2) Area Depth e Measure

A ferramenta do *Area Depth* é usada para técnicas de natureza não-cinemática e tem dois conhecidos métodos de uso: *Depth to detachment* e *Area-Depth Calculation*. Ambos métodos seguem as premissas teóricas da literatura clássica como Chamberlin (1910) para o primeiro e Groshong (1994) para o segundo. O *Depth to detachment* é um método simples de cálculo no qual se usa o balanceamento de igual área para descobrir a profundidade do descolamento. A área é dividida pelo deslocamento para obter a profundidade considerando que o comprimento das camadas permaneceu constante antes e depois da deformação. O método de *Area Depth* também é voltado para calcular a profundidade do descolamento, porém considerando os efeitos de cisalhamento puro que geram uma área deformada progressivamente maior em direção a superfície.

Como não há interesse em um descolamento profundo, o algoritmo é utilizado pelo seu balanceamento de área, no qual calcula com precisão a área dentro de polígonos complexos definidos pelo formato das camadas entre dois *pins* verticais que delimitam as bordas laterais da área. A ferramenta permite cálculo de área de formato sinuoso e complexo e quando selecionadas as camadas de interesse, calcula o encurtamento sofrido por cada camada.

A ferramenta *Measure* também é utilizada para estimativas de encurtamento, porém é mais simples para uma medição localizada. A ferramenta, além de medir ângulos, coordenadas e comprimentos, também mede simultaneamente o comprimento sinuoso de uma linha de um ponto definido até o outro e o comprimento da linha reta de menor distância entre os pontos escolhidos. O encurtamento é calculado nessa direção subtraindo-se o comprimento da linha reta ao da sinuosa e dividindo o resultado pelo comprimento da sinuosa multiplicado por 100, resultando em uma porcentagem de encurtamento.

4.3.3) *Section Analysis*

É uma ferramenta que pertence ao módulo *2D Kinematic Modelling* e sua função é fazer restaurações de comprimento de linha por desdobramento de camadas e removendo rejeitos de falha de maneira automática, além de calcular as espessuras das camadas. O seu uso resulta em uma imagem das camadas desdobradas com a medida de comprimento de linha de cada uma delas e suas espessuras e variações ao longo da linha. A ferramenta também gera uma tabela com informações sobre a espessura, área, comprimento das camadas da estratigrafia.

A ferramenta é utilizada para verificações de primeira ordem de inconsistências nos comprimentos de linha e espessura, além de mostrar os efeitos da erosão nas camadas superiores e resultar em predições para erros no modelo proposto. A ferramenta é utilizada entre as várias etapas de restauração para a verificação de inconsistências e quantificação. As quantificações precisas de comprimento de linha são realizadas com o *Section Analysis* nas seções já desdobradas pelos outros algoritmos.

4.3.4) *Line Length*

O algoritmo do *Line Length* realiza o desdobramento por comprimento de linha em qualquer conjunto de linhas. O desdobramento é realizado relativamente à interseção entre as linhas e um *pin line* que deve ser posicionado. O algoritmo trabalha por uma rotação e desdobramento mantendo o comprimento das linhas até atingir a forma de uma linha reta. As linhas são desdobradas de forma independente umas das outras, porém controladas pelo *pin* selecionado, com desdobramento a partir do *pin*. As linhas podem ser restauradas por uma porcentagem de desdobramento, permitindo a visualização e análise de várias etapas entre a seção restaurada e a seção deformada.

4.3.5) *Flexural Slip*

O algoritmo do *Flexural Slip Unfolding* é o principal método para avaliar o balanceamento de seções dobradas no Move, pois permite a restauração preservando a área das camadas em 2D. As camadas são desdobradas preservando suas variações e relações de espessura entre si. Esse método permite desdobrar geometrias mais complexas de dobramento e permite avaliar, a cada estágio, a presença de deformação remanescente.

O algoritmo utiliza um *pin line* e um sistema de deslizamento paralelo à camada escolhida como *template*, que é a referência para o desdobramento. A camada *template* é completamente restaurada a uma geometria de linha reta e as camadas e objetos passivos são desdobrados por deslizamentos paralelos à geometria da camada *template*. O sistema

de deslizamento é gerado por a partir dos domínios de mergulho coletados da camada *template*. Os *flowpaths* são calculados para todos pontos dos objetos passivos garantindo a manutenção das espessuras ortogonais a eles e preservando, portanto, a área do dobramento. O *pin line* intersecta os pontos onde estima-se que não houve deslizamento entre as camadas. O *pin line* é referido num sentido de “pino” para o uso no *software* pois atua na fixação e referência para a restauração das camadas.

5) RESULTADOS OBTIDOS

5.1) Modelo e seção geológica

As seções geológicas do Sinclinal Moeda no Quadrilátero Ferrífero apresentam grandes variações de interpretação e a maioria das seções publicadas tem caráter esquemático, privilegiando certos aspectos geológicos e tendo menor rigor em outros. As premissas interpretativas utilizadas no projeto têm base no fato de que é possível interpretar a estrutura em subsuperfície a partir da interação entre largura de afloramento em mapa, medidas estruturais, dados aeromagnéticos e sem a necessidade de supor expressivas mudanças nas espessuras das camadas aflorantes na região. As atitudes utilizadas foram apenas de acamamento, utilizando as clivagens para auxiliar as interpretações de dobras. As camadas das Fm. Batatal e Moeda são generalizadas como Grupo Caraça e as Fm. Barreiro e Taboões foram desenhadas em conjunto, pela pequena espessura da Fm. Taboões.

As medidas estruturais utilizadas encontram-se nos Anexos II e III. Os mapas geológicos de base encontram-se no Anexo III.

5.1.1) Seção Central

Essa é a seção geológica do Sinclinal Moeda que serve como base para as outras, pois além de apresentar aspectos claros de certas dobras em superfície, tem dados de subsuperfície de aeromagnetometria. A região do Quadrilátero Ferrífero é uma das mais bem estudadas com as ferramentas de geofísica no Brasil. Os dados geofísicos em questão foram tratados e interpretados na dissertação de Braga (2006) e não foram modificados ou retrabalhados em termos de metodologia geofísica neste trabalho, reservando-se o escopo para reinterpretação dos dados já tratados em um sentido estritamente geológico.

A Figura 10 representa uma seção geofísica retirada diretamente de Braga (2006) com a seção com as unidades mapeadas em superfície e os pontos em subsuperfície que representam os resultados do tratamento dos dados aeromagnetométricos pelo método da Deconvolução de Euler realizado e descrito pela autora. Em linhas gerais, o método utilizado por Braga (2006) pode ser descrito em termos de pontos que representam sinais, em profundidade, de anomalias magnéticas, ou seja, de contraste expressivo de susceptibilidade magnética. As anomalias detectadas foram interpretadas em termos de falhas e zonas de contato entre rochas de alta e baixa susceptibilidade magnética. O perfil aeromagnético tem uma direção com aproximadamente 20° de diferença em relação à direção principal da

estrutura (C-D, Figura 11), que pelo caráter de variação tridimensional, incorre em possíveis distorções aparentes.

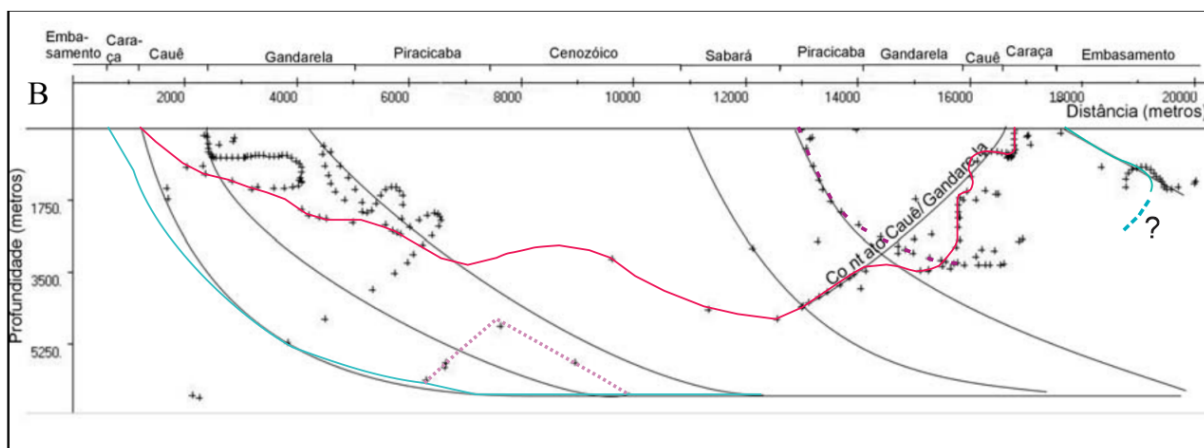


Figura 10: Seção geofísica retirada de Braga (2006) modificada. As linhas em preto são interpretações de Braga (2006). A linha cheia vermelha representa a interpretação do contato da Fm. Cauê com as rochas do Grupo Caraça; As linhas em cor azul cheias representam as falhas interpretadas de borda; as linhas pontilhadas em roxo escuro representam uma falha inferida sem rejeito visível e o pontilhado claro representa um possível sinal de uma estrutura em hemigraben do embasamento. As camadas em superfície estão subdivididas segundo o mapa de base de Braga (2006) que se encontra no Anexo I.

No contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, é possível interpretar essas anomalias magnéticas como sinal de formações ferríferas bandadas, que apresentam teores variáveis de hematita e magnetita. Mais de uma unidade na região tem ocorrência de formações ferríferas, mas a de magnitude mais expressiva é a Formação Cauê do Grupo Itabira. O sinal aproximadamente contínuo em profundidade foi interpretado como o contato basal da Formação Cauê com as rochas de natureza clástica do Grupo Caraça pois as linhas de pontos em subsuperfície coincidem com os contatos aflorantes quando se aproximam da superfície. As interpretações em subsuperfície foram realizadas com base no estilo estrutural conhecido da superfície e da geologia.

O setor oeste da seção inicia com a falha Bonfim-Moeda descrita com evidências de movimentação normal, demarcando o contato do complexo granítico-gnáissico a oeste generalizado como o Domo Bonfim com as rochas do Supergrupo Minas, nessa porção do sinclinal. A Fm. Gandarela, nesse setor, ocorre com largura de afloramento expressivamente maior que no flanco leste. Isso pode ser explicado em termos de uma espessura aparente devido aos baixos mergulhos. Esse setor apresenta poucas medidas de acamamento, mas há evidências do baixo mergulho, sendo as medidas de alto mergulho e mergulhos contrastantes interpretadas como dobramentos de menor escala. A largura de afloramento da Fm. Fecho do Funil (parte do Grupo Piracicaba na Figura 10) é explicada por uma sequência de sinformes e antiformes suaves com o núcleo da geometria sinformal representado pelo afloramento da Fm. Taboões/Barreiro. Medidas de clivagem na charneira foram utilizadas

para interpretar a forma junto às medidas de acamamento dos flancos. Entre os núcleos das sinformes oeste e principal, há uma antiforme aberta na qual aflora a Fm. Cercadinho. A profundidade do sinal geofísico da Fm. Cauê foi o principal critério para a construção da sinforme principal, tendo em seu núcleo, na superfície, rochas do Grupo Itacolomi/Sabarã e fica evidente, nesse ponto, um pequeno espessamento de natureza deposicional da Fm. Taboões/Barreiro. A geometria do flanco leste é mais complexa, consistindo em sequências de diferentes escalas de dobras parasíticas tanto interpretadas em superfície quanto pela geofísica. A estrutura em profundidade reproduz o sinal magnético discutido, sendo compatível com as medidas e afloramentos de superfície. A alternância em superfície da Fm. Cercadinho e Gandarela, no flanco leste, confirmam e dimensionam uma estrutura em antiforme e sinforme detectadas pelos dados geofísicos. Os espessamentos de charneira locais foram descritos por Rosière et al. (2008) na Fm. Cauê nesse domínio. A charneira inclinada no limite leste da seção é o que causa a largura de afloramento do Grupo Caraça e representa a inversão dessa borda. As dobras parasitas de menor escala nessa charneira são interpretações de medidas de acamamento locais. O contato no flanco leste entre as sequências do Sgp. Minas e Rio das Velhas é interpretado como tectônico no mapa, com a inversão da falha que delimitava as sequências de ambas unidades, que ocorrem em organização espacial interna distinta.

5.1.2) Seção Norte

A seção no setor norte (A-B na Figura 11) é a que se encontra mais distante da influência do domo Bação e mais próxima da terminação periclinal na Fm. Taboões/Barreiro a norte. A seção é delimitada a oeste pela falha Bonfim-Moeda e toda sua porção oeste tem uma periodicidade de dobras semelhante a seção central. A Fm. Gandarela apresenta uma grande largura de afloramento com interpretação semelhante a seção central, porém com menor amplitude. O núcleo do sinclinal apresenta um espessamento recorrente do flanco leste na Fm. Taboões/Barreiro, novamente interpretado como de natureza deposicional. Como não há uma seção geofísica nessa porção, a interpretação foi baseada principalmente nas medidas de superfície e na coerência de estilo estrutural com a seção central. O flanco leste em geral apresenta menor mergulho interpretado, em relação às outras seções. Esse flanco também apresenta dobras parasitas em menor escala como reflexo das medidas de acamamento, concentrando-se nas camadas filíticas/quartzíticas da Fm. Cercadinho e nos itabiritos da Fm. Cauê.

5.1.3) Seção Sul

A seção sul (E-F na Figura 11) é a que apresenta a constrição relacionável ao papel do domo Bação durante o regime compressivo. Nessa seção praticamente não há medidas de acamamento, apenas de clivagem/foliação indicando ação penetrativa da deformação maior em relação às outras. A estrutura no geral é interpretada com menor profundidade, indicado pelo afloramento da Fm. Cercadinho no núcleo do sinclinal como camada de topo.

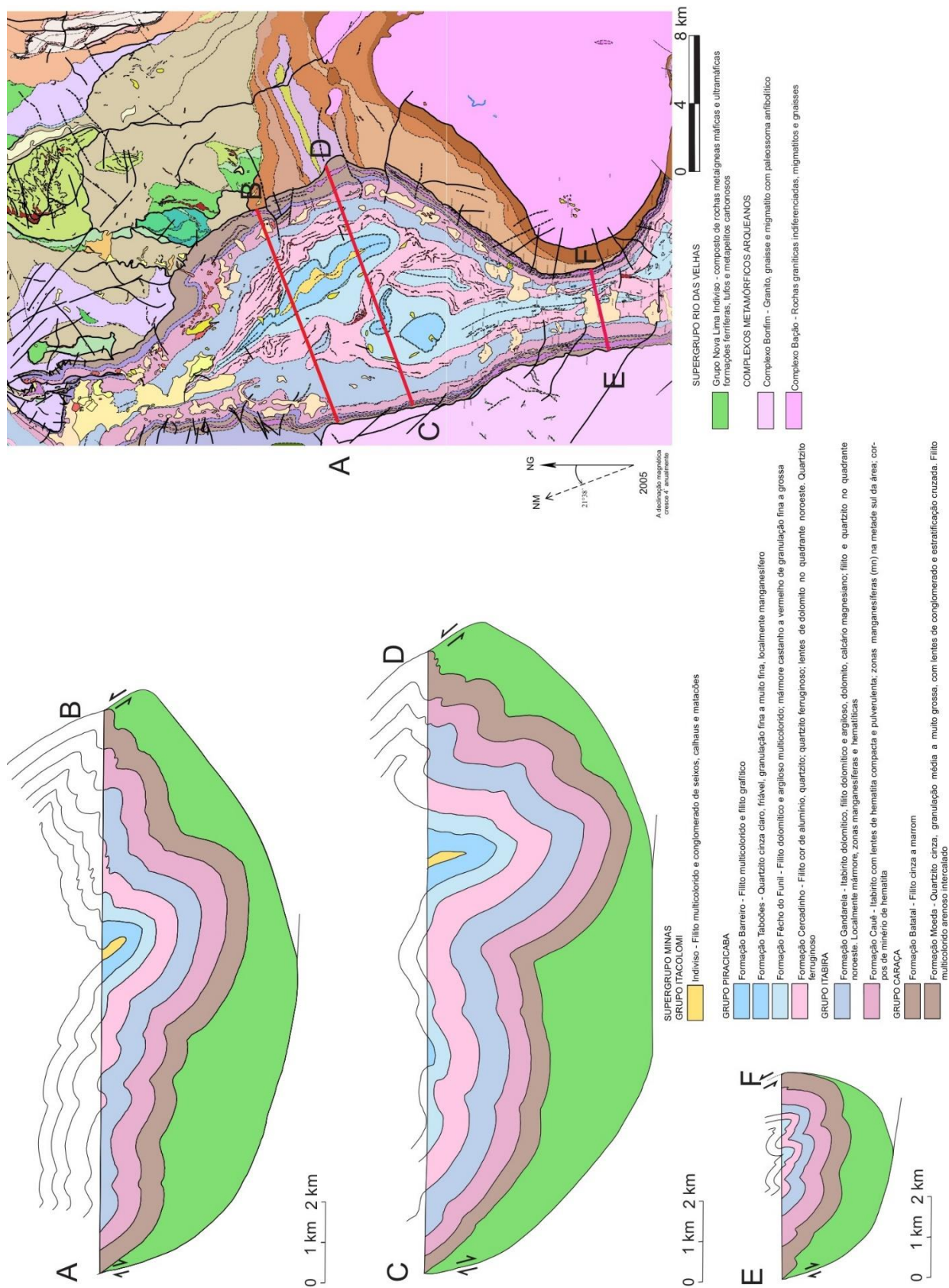


Figura 11: Seções geológicas elaboradas e mapa geológico modificado de Lobato et al. (2005) unindo as folhas Casa de Pedra e Itabirito (Anexo III), a sul e norte respectivamente. Legenda adaptada, abrangendo as sequências Paleoproterozoicas e simplificando as Arqueanas. O Sgp. Rio das Velhas foi generalizado com representação em verde nas seções. A Fm. Barreiro foi unida à Taboões e o Grupo Caraça foi generalizado como camada. A legenda do mapa do Sgp. Rio das Velhas encontra-se no Anexo III.

As dobras de segunda ordem na Seção Sul foram interpretadas das medidas de superfície, assumindo-se com base no fato de serem subparalelas ao acamamento como descrito por Hippert e Davis (2000). As camadas afloram com espessura expressivamente menor no flanco leste.

5.2) Resultados no Move

Os resultados das aplicações dos diferentes métodos e algoritmos será apresentada subdividida pelas seções e pelo método utilizado. Os modelos presentes na Figura 11 foram aprimorados e tiveram certos aspectos reinterpretados com o uso das ferramentas de modelagem do Move e com a evolução das discussões.

5.2.1) Modelo 3D

O modelo de elevação em 3D foi construído com o uso de mapas hipsométricos no Move, aplicando o mapa geológico da área de estudo como *overlay*.

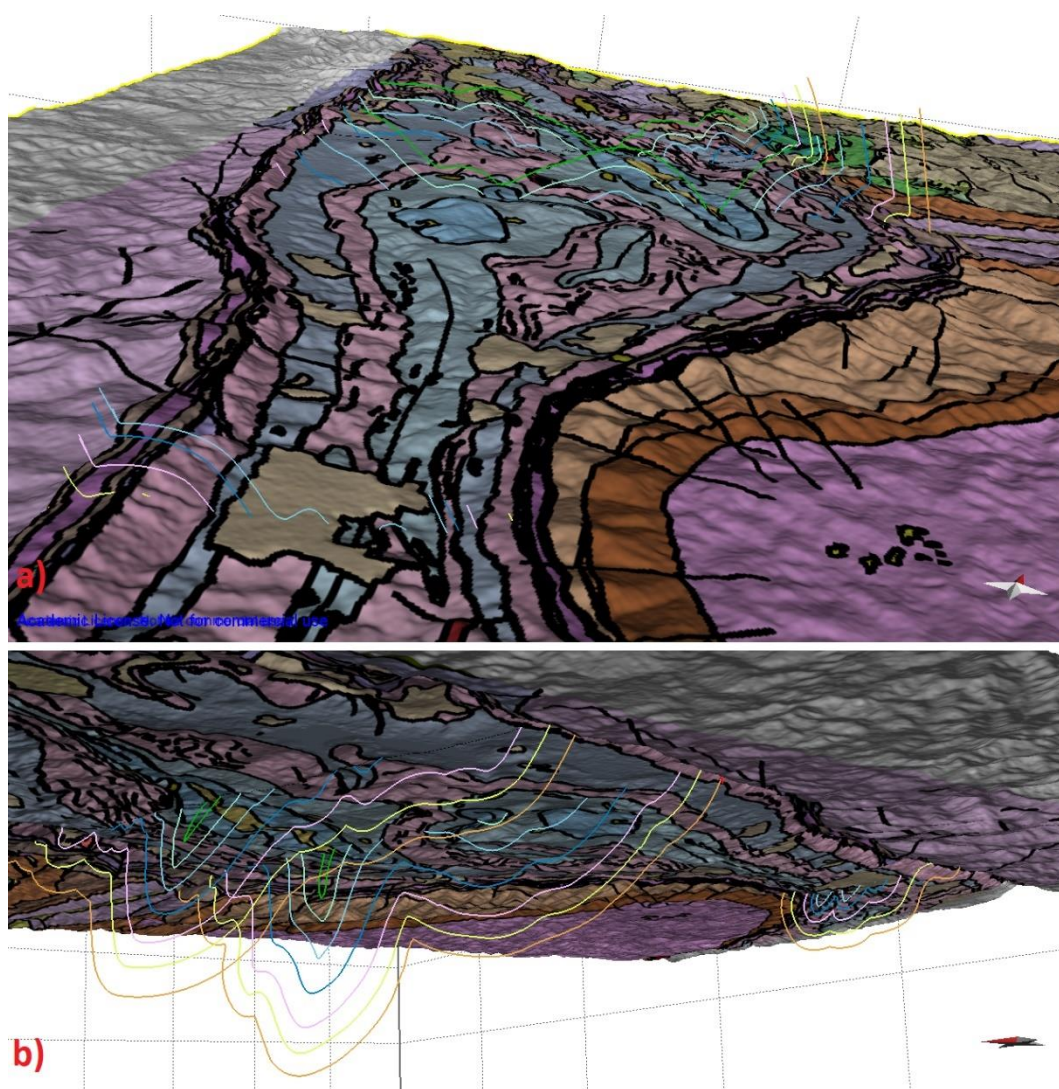


Figura 12: Imagens do modelo 3D contendo as seções e o mapa hipsométrico com *overlay* do mapa geológico de Lobato et al. (2005), Folhas Itabirito e Casa de Pedra. a) Visão aproximadamente de sul para norte com as seções acima da superfície; b) Visão em subsuperfície de noroeste para sudeste com enfoque comparativo entre as estruturas e profundidades em 3D das seções geológicas.

5.2.2) Seção Central

A Seção Central (C-D, na Figura 11) é o foco do trabalho, pois apresenta os dados de subsuperfície disponíveis e interpretados, dando maior confiabilidade ao modelo e serve, portanto, como referência na construção e interpretação das outras seções.

Area Depth e Line Length

O primeiro passo na realização da restauração da seção dobrada é o uso do *Section Analysis*. Esse método proporciona uma primeira visualização, mais simples, da seção desdobrada, porém sem critérios cinemáticos. O cálculo das espessuras das camadas é realizado através da medição das linhas ortogonais às camadas nos diferentes domínios de mergulho no método *Bisector (Parallel)*. O *Section Analysis* dá uma primeira visão sobre a restauração permitindo identificar possíveis problemas e erros a serem interpretados. A Figura 13 apresenta os resultados iniciais para a Seção Central.

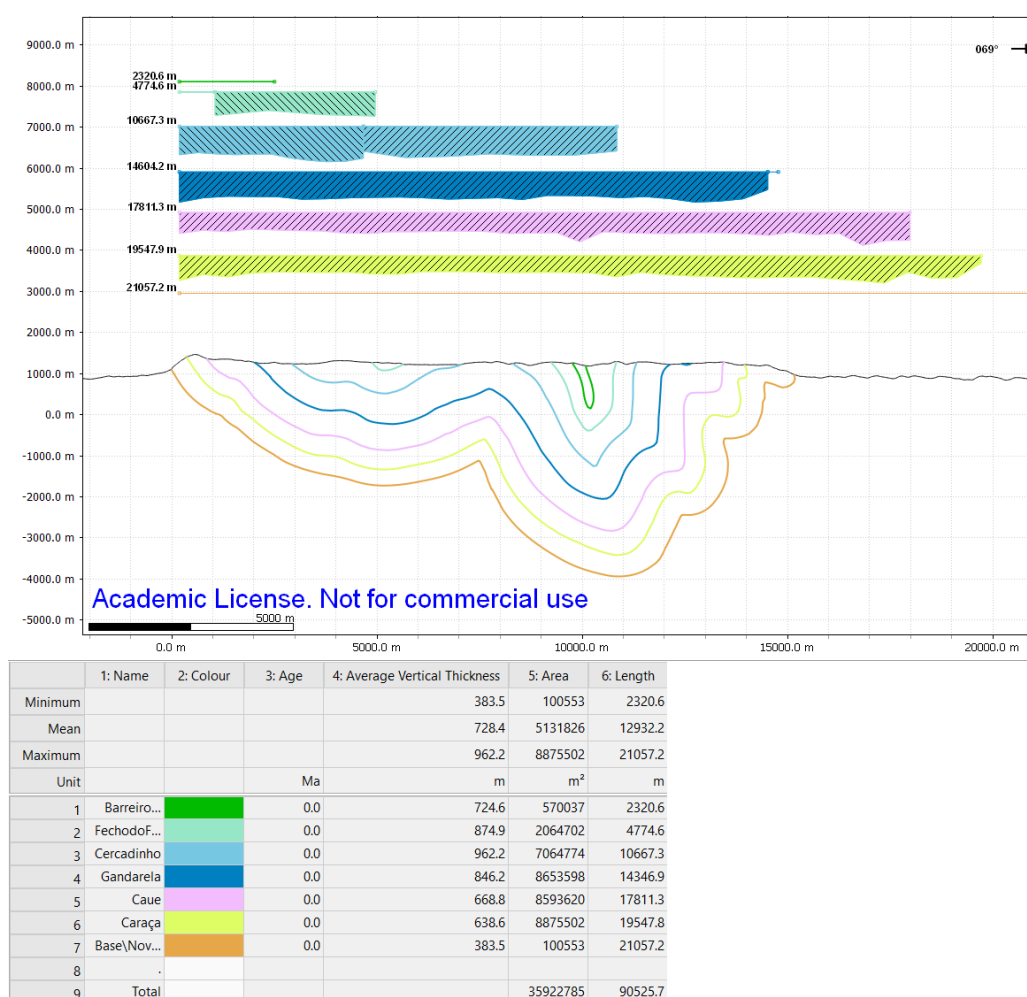


Figura 13: *Section Analysis* da Seção Central, apresentando as espessuras e comprimentos de linha estimados para a seção. Abaixo a tabela produzida no *Section Analysis* com as descrições divididas por camadas.

O resultado do *Section Analysis* (Figura 13) demonstra uma diferença sistemática com a diminuição nos comprimentos de linha das camadas em direção ao topo da estratigrafia. É

notável que a diminuição no comprimento de linha apresenta uma mudança substancialmente maior quando há erosão do topo da camada ou da camada completa em certa porção dos flancos da dobra. As espessuras das camadas apresentam um aumento nas zonas de charneira de dobras das diferentes escalas de dobramento. Em razão da erosão, nas camadas de topo, alguns comprimentos de linha ocorrem isolados e não tiveram suas espessuras calculadas pelo método. A coluna do *Average Vertical Thickness* representa a medição vertical das espessuras da camada independente da sua forma, levando a um espessamento nos valores de média, causado pelas camadas com altos valores de mergulho, não sendo o mesmo método utilizado na representação visual.

O algoritmo de *Area Depth* foi utilizado para realização do teste de balanceamento de igual área e para estimativa dos encurtamentos de cada uma das camadas. A área preenchida é o polígono de cálculo utilizado, delimitado entre os *pins* (Figura 14). As estimativas de encurtamento mostram uma média coerente da camada Caraça até a Cercadinho de aproximadamente 29~32% de encurtamento. As camadas do topo apresentam um encurtamento estimado maior, de 50 e 77% na Formações Fecho do Funil e Barreiro

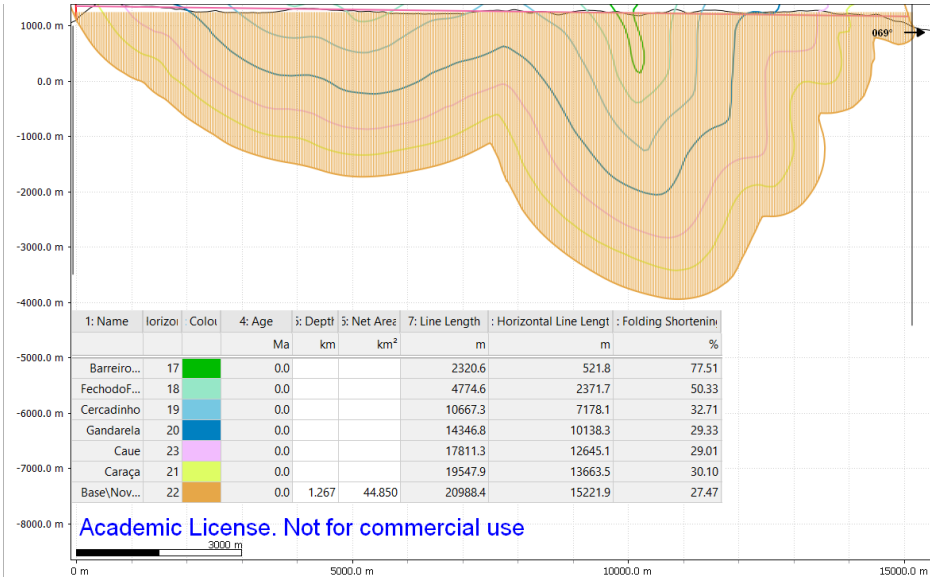


Figura 14: Área de cálculo de área utilizado pelo algoritmo *Area Depth* na Seção Central. Abaixo a tabela com a área calculada e as estimativas de encurtamento para cada camada.

Line Length

O desdobramento pelo algoritmo *Line Length* é um método que não mantém a área das camadas, apenas desdobrando as camadas com referência às interseções fixadas pelo *pin*. O *pin line* foi posicionado na charneira principal da sinforme por ser um ponto de referência de um trecho horizontalizado das camadas (Figura 15). As camadas de topo apresentam descontinuidades devido à erosão.

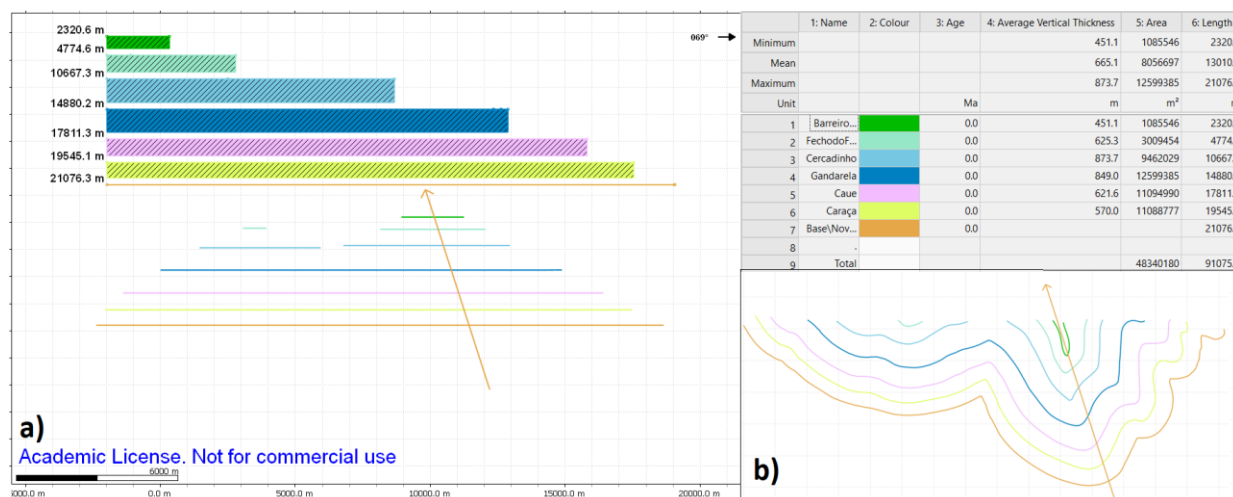


Figura 15) a) *Section Analysis* das camadas desdobradas pelo algoritmo *Line Length* e tabela do *Section Analysis* após o desdobramento; b) Localização do *pin line* na seção, sem escala.

Os resultados mostram um padrão semelhante ao *Section Analysis* inicial, com diminuição sistemática do comprimento de linha e uma diminuição expressiva nas camadas com descontinuidades por erosão. Os valores de espessura na tabela são medidos do resultado do desdobramento, sendo o método vertical adequado nesse caso. Os comprimentos de linha foram preservados com um erro desprezível de 0,06% em relação ao *Section Analysis* e *Area Depth*. A diferença entre a área calculada no *Line Length* e *Area Depth* é de 7,2%.

Flexural Slip

O algoritmo *Flexural Slip* realiza desdobramento com a manutenção de área e é um método cinemático, que desdobra a partir da cinemática de um deslizamento flexural com deslocamentos paralelos das camadas passivas em relação à camada *template* escolhida. O *pin* representa os pontos fixos das camadas, nos quais não há deslocamentos. A manutenção das espessuras e linhas das camadas possibilita o uso desse algoritmo para analisar e aprimorar o balanceamento da seção em análise.

As melhores escolhas de *pin line* foram na charneira principal e nas charneiras das antifomes e sinformes abertas do flanco oeste. Iniciar com o *pin line* na charneira principal reduz consideravelmente a deformação remanescente nas camadas, especialmente no flanco leste. Foram testadas as três camadas basais da estratigrafia como *template* inicial. As duas basais geram resultados semelhantes representados na Figura 16a e 16c. Utilizar o topo da Fm. Cauê como *template* reduz a deformação remanescente no flanco leste, porém após a sequência de desdobramentos os resultados são semelhantes aos anteriores.

O procedimento em etapas é necessário para dar conta da deformação remanescente nas camadas após o primeiro desdobramento. O estilo de dobra das parasitas apresenta uma diferença quanto ao estilo das dobras maiores, podendo ter componentes dúcteis que

contribuem para essa feição. Ao utilizar como *template* inicial camadas como Cauê, resta pouca deformação nas camadas passivas, indicando que utilizar as camadas com importante presença de dobras parasitas com o *Flexural Slip* produz um desdobramento quase total desde o primeiro procedimento.

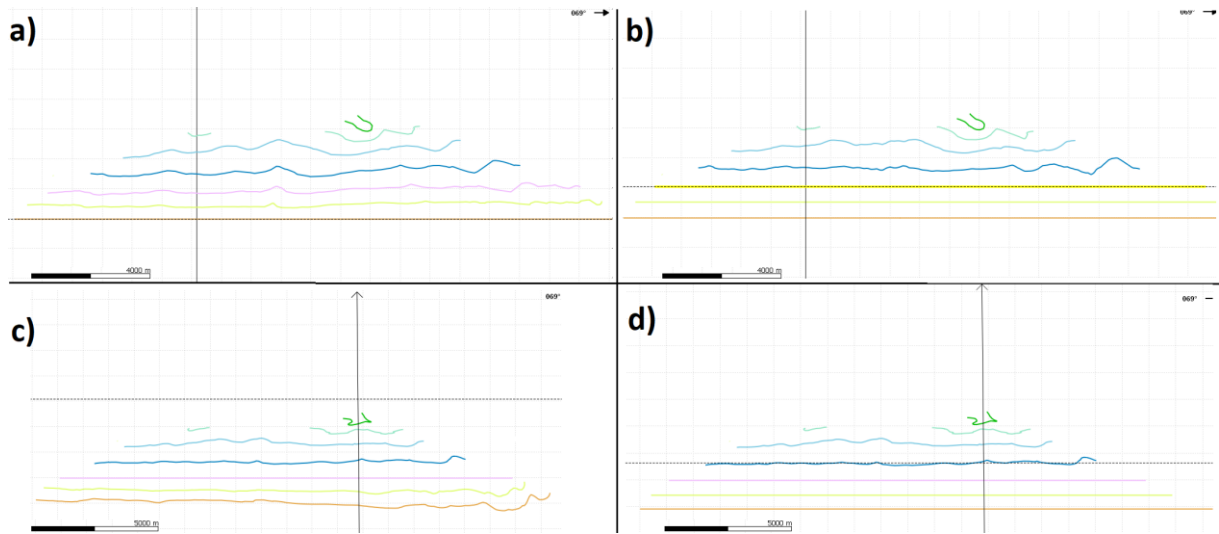


Figura 16: a) Resultado do primeiro desdobramento por *Flexural Slip* iniciado na base do Grupo Caraça e *pin line* na sinforme aberta do flanco oeste; b) Resultado do terceiro desdobramento por *Flexural Slip* iniciado na base do Grupo Caraça até a Fm. Cauê, e *pin line* na sinforme aberta do flanco oeste; c) Resultado do desdobramento iniciado no topo da Fm. Cauê\Base da Gandarela e *pin line* na charneira principal; d) terceira etapa tendo iniciado pelo topo da Fm. Cauê\Base da Gandarela e *pin line* na charneira principal.

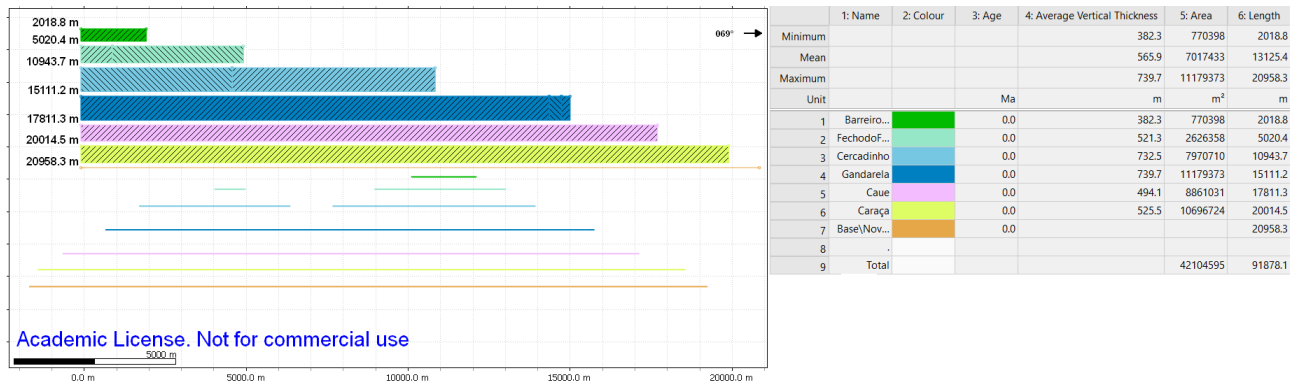


Figura 17: *Section Analysis* da seção desdobrada pelo algoritmo *Flexural Slip* e sua tabela de dados à direita.

O *Section Analysis* da seção desdobrada por *Flexural Slip* (Figura 17) apresenta um padrão de comprimento de linhas semelhante aos métodos de *Line Length*. A área total da seção, no entanto é de 42.228 km², sendo mais próximo do calculado por *Area Depth* com 44.850 km² apresentando um erro de 6,1%. A mesma seção, quando contabilizado o topo erodido da Fm. Cercadinho, apresenta uma área de 43.312 km² (Figura 18). Essa diferença, no entanto, não reflete a área de polígono acima da seção, que seria de 0,2 km², mas em aproximadamente 1,227 km² no cálculo final, devido ao método de cálculo do *Section Analysis*. A área calculada na Figura 18, de 43.312 km², se subtraída do polígono de 0,2 km²

acima, resulta em um erro de 3,9% em relação à calculada com *Area Depth*. As diferenças de comprimento de linha entre os resultados do *Flexural Slip*, *Line Length*, *Area Depth* e *Section Analysis* inicial são todos inferiores a 1%.

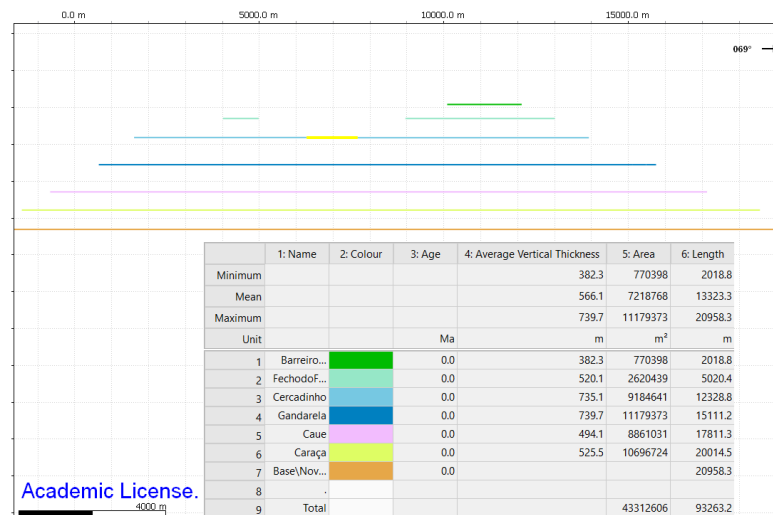


Figura 18: Resultado do desdobramento por *Flexural Slip* da Seção Central Erodida com a continuação da Fm. Cercadinho e a tabela de dados resultante do *Section Analysis*. Em amarelo claro o arco externo acima da superfície desdobrado. Dados de área foram subtraídos da área que, de fato, está acima da superfície e utilizados para corrigir a estimativa de área por *Flexural Slip*.

5.2.3) Seção Norte

Essa seção (A-B, na Figura 11) é baseada na interpretação de dados de superfície, sem dados de subsuperfície disponíveis. É uma seção construída tendo como base a seção central em interação com a interpretação da geologia de superfície.

O *Section Analysis* da Seção Norte (Figura 19) apresenta um padrão de variação de comprimentos de linha semelhante ao da central, com diminuição sistemática em direção às camadas de topo. As camadas com comprimento de linha erodidos apresentam uma maior diminuição. As espessuras das camadas variam especialmente com relação às charneiras das principais dobras, tanto parasitas como a sinforme principal. Na terminação leste das camadas Gandarela e Cercadinho, há uma diminuição na espessura por efeito de erosão do topo delas.

O cálculo de área da seção foi realizado pelo algoritmo *Area Depth* (Figura 20). A área dessa seção é 30% menor que a Central, tendo como principal fator a diferença de profundidade da charneira sinformal. A distribuição dos encurtamentos segue o padrão da Seção Central, porém tendo as três camadas basais uma média de 20% de encurtamento e uma variação gradual até o encurtamento máximo de 55% no núcleo da sinformal com a Fm. Barreiro. O encurtamento é maior nas camadas de menor comprimento de linha, especialmente localizadas na charneira principal.

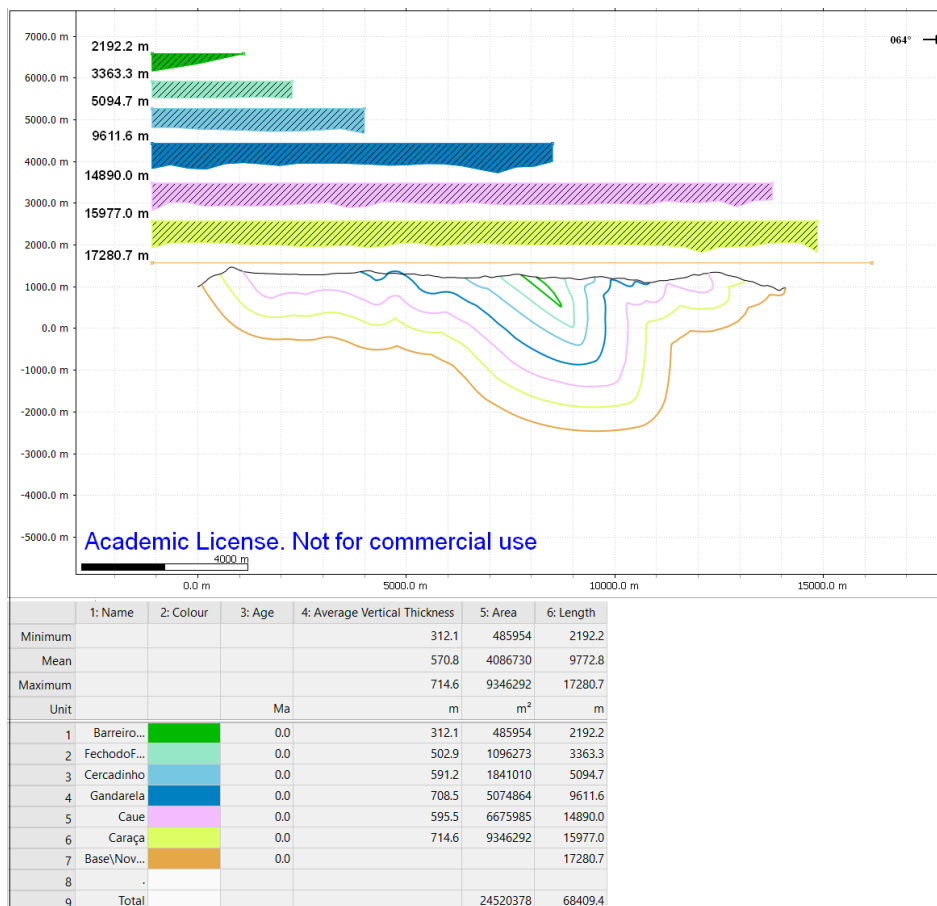


Figura 19: Section Analysis da Seção Norte em subsuperfície. Abaixo tabela com os dados obtidos.

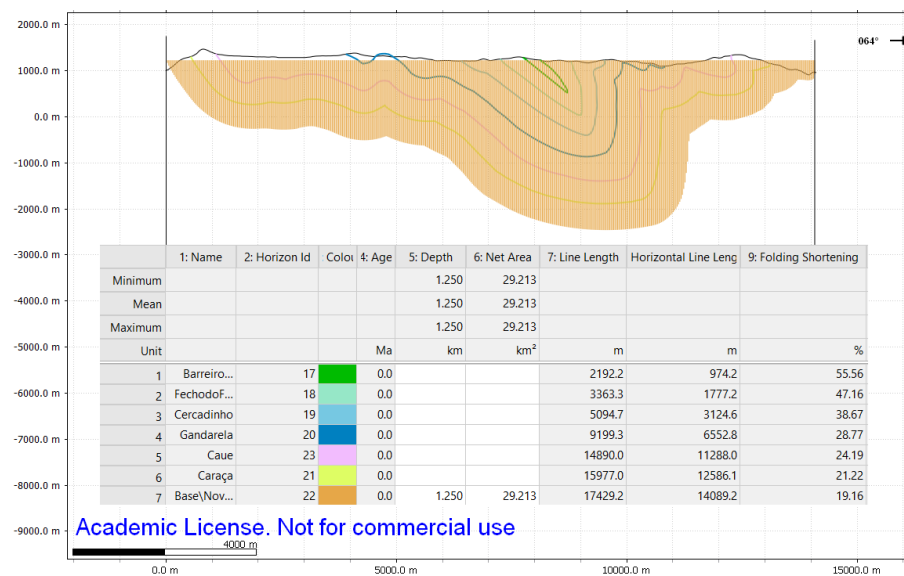


Figura 20: Área calculada pelo algoritmo Area Depth e a tabela com os valores de linha, encurtamento e área.

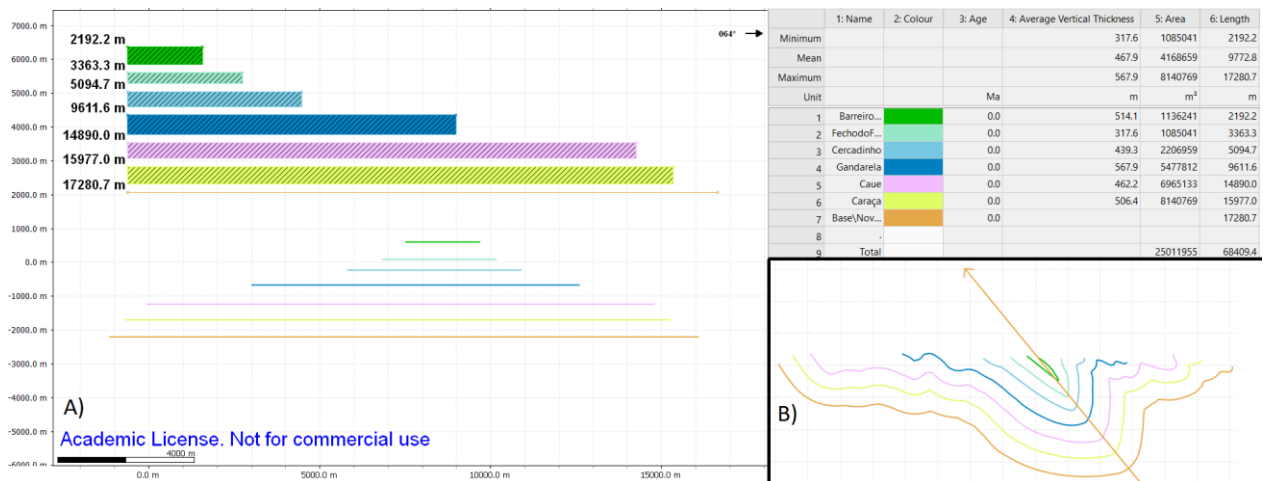


Figura 21: A) Resultado do *Section Analysis* da Seção Norte desdobrada totalmente pelo método *Line Length* junto à tabela do *Section Analysis*; B) *Pin* utilizado no desdobramento por *Line Length* e como primeiro *pin line* também no *Flexural Slip*.

O *Section Analysis* do desdobramento por *Line Length* (Figura 21) é muito semelhante ao inicial, apresentando uma diferença máxima de 5% no comprimento de linha da Fm. Gandarela. A tabela (Figura 21a) contém a área calculada de 25,0 km², aproximadamente 14% menor que a área da seção dobrada de aproximadamente 29 km². A localização do *pin line* (Figura 21b) foi escolhida para abranger todas as camadas na charneira da dobra principal. A diferença de comprimento de linha em relação aos testes anteriores dessa seção é inferior a 1%.

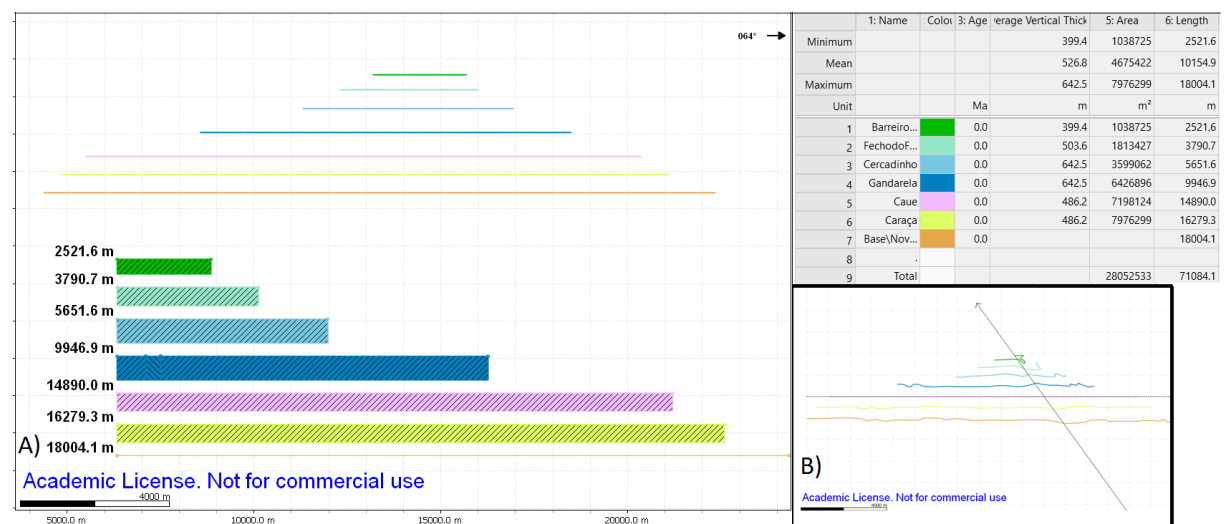


Figura 22: A) *Section Analysis* do desdobramento da Seção Norte pelo algoritmo *Flexural Slip* e tabela de dados calculados; B) Primeiro desdobramento por *Flexural Slip* da Seção Norte com a Fm. Cauê como camada *template* e *pin line* localizado na charneira aproximadamente paralelo ao plano axial da sinforme.

O desdobramento por *Flexural Slip* da Seção Norte (Figura 22) apresenta resultados de comprimento de linha semelhantes entre as camadas de base até a Fm. Gandarela. Constatam-se diferenças de 10% do comprimento na Fm. Cercadinho, cerca de 26% na Fm.

Fecho do Funil e 28% na Fm. Barreiro. A área estimada apresentou diferença de 4,1% em relação à calculada pelo *Area Depth*.

A camada *template* com melhores resultados foi a Fm. Cauê (topo), apresentando a menor deformação remanescente após o primeiro estágio de desdobramento (Figura 22b). A presença de estilo de deformação semelhante ao da Seção Central resulta em uma deformação remanescente de estilo e escala condizentes. A Fm. Barreiro, por ter um comprimento de linha consideravelmente menor e se concentrar no núcleo da charneira, é a camada que demonstra comportamento mais destoante das outras, porém sem problemas no desdobramento. Os comprimentos de linha encontrados nesse teste apresentam um erro de 4% em relação aos anteriores.

5.2.4) Seção Sul

A Seção Sul (E-F, na Figura 11) encontra-se delimitada lateralmente pelos Blocos\Domos Bonfim e Bação, a oeste e leste, respectivamente. É uma seção de linha de superfície mais curta e tem como base interpretativa os dados de superfície. O *Section Analysis* inicial está ilustrado na Figura 23 e demonstra uma diminuição sistemática nos comprimentos de linha da base para o topo, porém com uma variação menos abrupta nas camadas de topo.

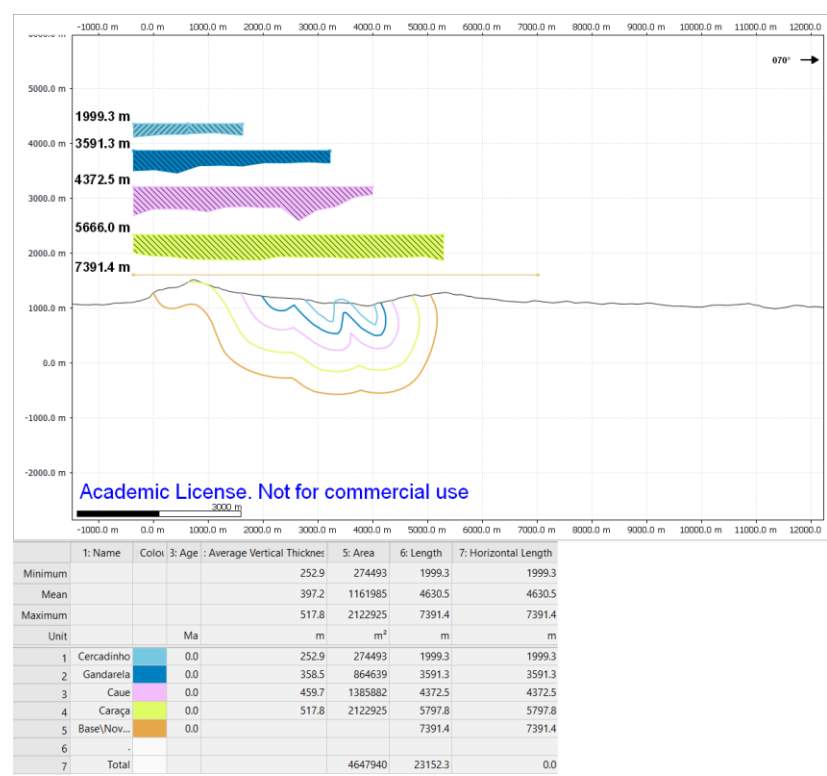


Figura 23: *Section Analysis* inicial da Seção Sul. Abaixo a tabela com as espessuras de camadas calculados pelo método *Bisector*.

A Figura 24 contém os resultados da aplicação do algoritmo *Area Depth* na Seção Sul. É notável que o encurtamento das camadas de base até a Fm. Gandarela se mantém nos

30% e nesta última, passa a 37%. A camada de topo Cercadinho ocorre em uma dobra com aspecto em “W” no núcleo da sinforme apresentando 48% de encurtamento.

A Figura 25 contém os resultados do desdobramento por *Line Length*, apresentando comprimentos de linha com diferenças menos de 1% em relação ao *Section Analysis* inicial e 3% em relação ao *Area Depth*. A diferença de área em relação ao *Area Depth* foi de 10,6%.

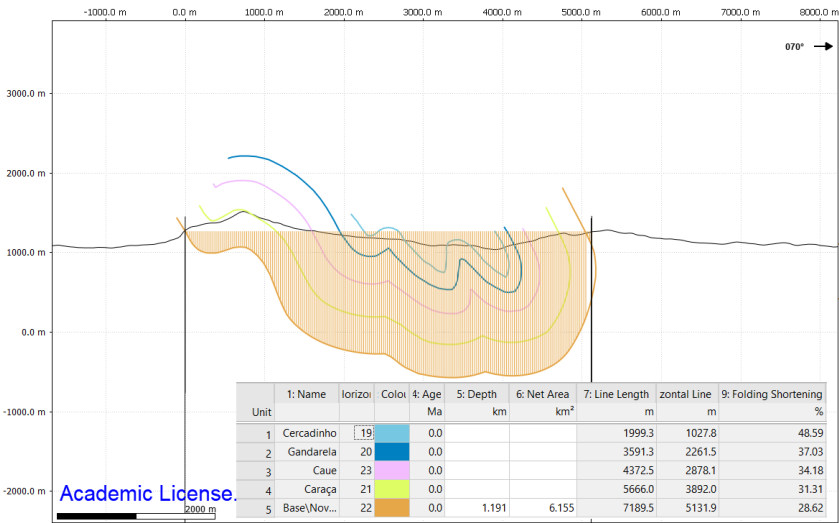


Figura 24: Resultado do *Area Depth* aplicado à Seção Sul. Abaixo a tabela de dados resultante.

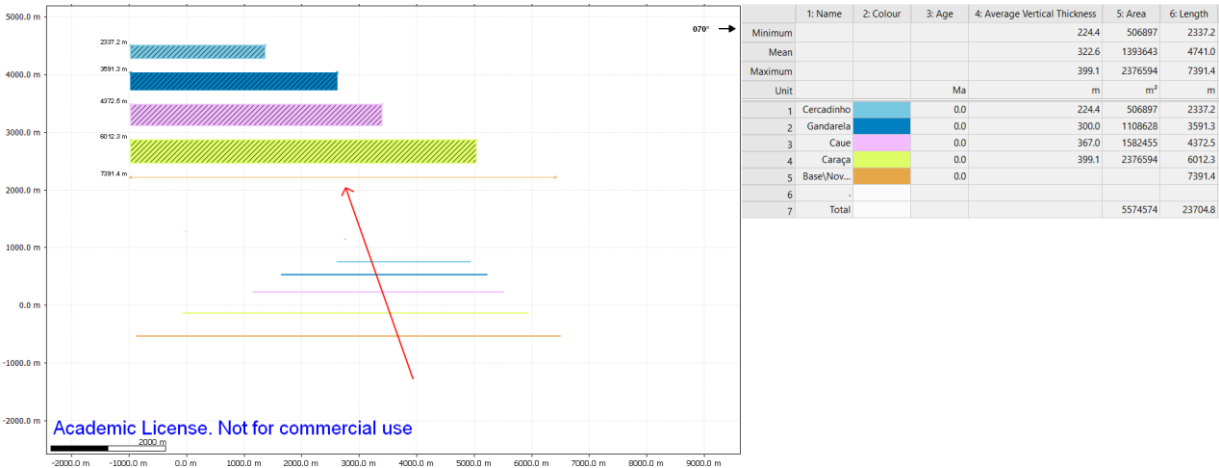


Figura 25: *Section Analysis* do desdobramento por *Line Length* e, à direita, tabela de dados. Os comprimentos de linha encontram-se na coluna *Length*.

O desdobramento por *Flexural Slip* teve o *pin line* em posição paralela ao plano axial na charneira e foi utilizada a camada Caraça como *template* com o melhor resultado de desdobramento. O *Section Analysis* (Figura 26) da seção desdobrada produziu resultados muito semelhantes com diferenças no comprimento das duas camadas de topo de até 10%. No cálculo de área, essa foi a única seção em que o resultado do *Flexural Slip* foi semelhante ao do algoritmo *Line Length*, apresentando ambos uma área de aproximadamente 5,5 km², cerca de 10% menor que a área estimada pelo *Area Depth*.

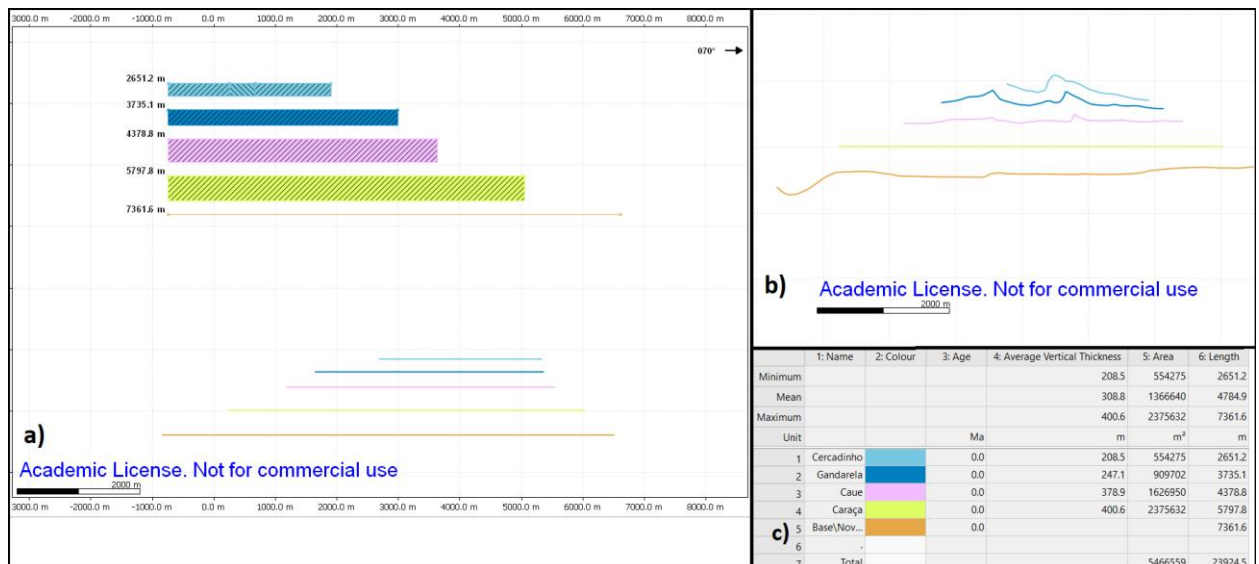


Figura 26: a) *Section Analysis* da Seção Sul desdobrada por *Flexural Slip*; b) Resultado da primeira etapa de desdobramento por *Flexural Slip* tendo o topo da camada Caraça como *template* e *pin line* paralelo ao plano axial da charneira principal; c) Tabela com dados do *Section Analysis*.

5.3) Discussão Preliminar

As três seções propostas foram analisadas com as metodologias disponíveis no *software* Move. A análise do balanceamento da seção é realizada através do algoritmo *Flexural Slip* pois as camadas da seção são desdobradas por um mecanismo de deslizamento que preserva as variações e características da seção quanto a comprimento de linha e espessura com precisão, preservando a área, se a geometria da seção for compatível com as premissas. Em termos de balanceamento é possível notar que as três seções apresentam, quanto ao comprimento de linha, diferenças menores que 5% entres os testes, e um resultado muito semelhante de diminuição sistemática do comprimento de linha. Alguns dos significados de uma variação sistemática nos comprimentos de linha são descritos por Groshong (2006) e os principais são: (i) escolha inadequada do *pin line*; (ii) efeitos de falhas. Não foram identificadas falhas no interior da seção e os *pin lines* foram testados e comparados em diversas posições, tendo sido apresentados os melhores resultados. O *software* Move dispõe de uma série de ferramentas para modelagem estrutural que possibilitam trabalhar essa hipótese. Uma segunda etapa de testes foi realizada para investigar os possíveis problemas na seção e os limites da aplicação do método para o caso em estudo.

Os resultados comparados das três seções quanto a área e comprimentos de linha estão resumidos na Tabela 2. Os valores foram comparados entre os métodos para avaliar a eficiência e também os parâmetros do balanceamento. Erros superiores a 5% foram representados em vermelho.

Tabela 2: Tabela com as comparações nas medidas de área, comprimento de linha e erros associados entre os diferentes métodos. A tabela foi subdividida por seções e os erros superiores a 5% são representados em cor vermelha.

		Área (km ²)	Compr. De Linha (km)	Erro em área ¹	Erro em compr. de linha ²
Seção Central	SA	35.922	90,52	20,0%	0.6%
	LL	48.340	91,07	7,2%	-
	AD	44.850	90,47	-	0.6%
	FS	43.312	91,88	3,4%	0,8%

		Área (km ²)	Compr. De Linha (km)	Erro em área ¹	Erro em compr. de linha ²
Seção Norte	SA	24.520	68,41	16,0%	0
	LL	25.012	68,41	14,4%	-
	AD	29.213	68,86	-	0.6%
	FS	28.052	71,08	4,0%	3,9%

		Área (km ²)	Compr. De Linha (km)	Erro em área ¹	Erro em compr. de linha ²
Seção Sul	SA	4.648	23,15	24,5%	2,3%
	LL	5.576	23,70	9,4%	-
	AD	6.155	22,82	-	3.7%
	FS	5.466	23,92	11,2%	0,9%

¹ Em comparação à área calculada pelo *Area Depth*

SA = *Section Analysis*; LL= *Line Length*; AD = *Area Depth*;

² Em comparação ao comprimento de linha calculado pelo *Line Length* FS = *Flexural Slip*

5.3.1) Dobras parasitas e erosão

Nos resultados apresentados fica evidente que o erro sistemático de comprimentos de linha tem uma relação direta com os níveis de erosão das camadas superiores. As três camadas basais na Seção Central e Norte apresentam diferenças que variam de 5 a 17% de comprimento de linha, enquanto nas camadas superiores com efeitos erosivos acentuados, há diferenças maiores que 50% em relação às de base. As dobras parasitas aprofundam as diferenças, pois o comprimento sinuoso de linha delas é maior e ocorrem especialmente no flanco leste. Os arcos externos e internos dessas dobras estão preservados apenas nas camadas basais especialmente Cauê (onde foram descritas) e Caraça, gerando uma diferença expressiva nos comprimentos de linha com camadas com os arcos erodidos.

A ausência de níveis por efeitos erosivos é responsável por parte das diferenças no comprimento de linha, porém é necessária uma quantificação para compreender a diferença entre o aspecto geométrico e erosivo. Uma primeira forma de acessar essas diferenças foi complementando as camadas com sua interpretação acima do nível topográfico. O limite da “expansão” acima da topografia foi definido como uma linha perpendicular ao mergulho das

camadas após a última dobra afetando as camadas. Uma linha horizontal também foi testada e pela semelhança dos resultados optou-se pela perpendicular. Esse teste (Figuras 27, 28 e 29) visou apreender as diferenças geradas pelo efeito erosivo que remove a continuidade e as estruturas preservadas nas camadas basais, das superiores.

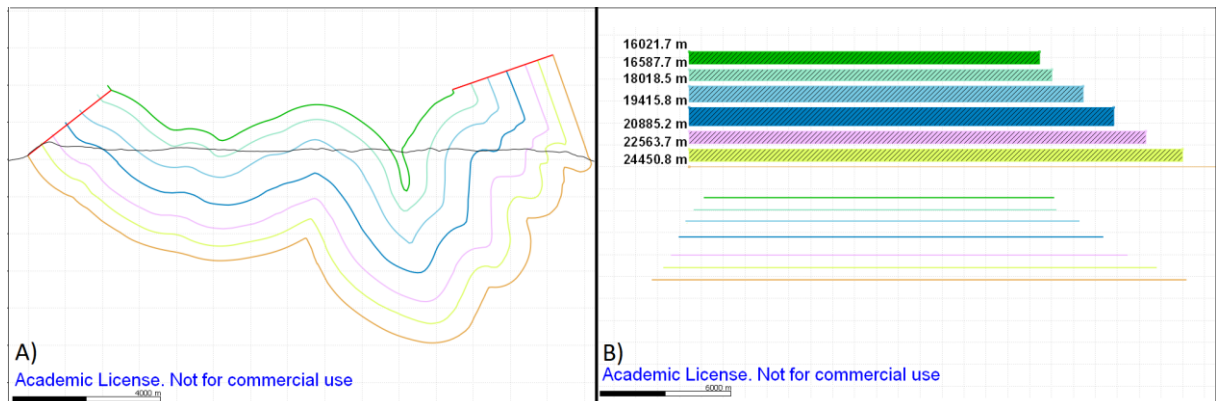


Figura 27: A) Seção Central com interpretação acima da topografia, delimitada por uma linha perpendicular ao mergulho das camadas após a última interpretação de dobra; B) *Section Analysis* da seção descrita, pelo método *Flexural Slip* com *pin line* paralelo ao plano axial da charneira antiformal, utilizando a Fm. Cauê como referência.

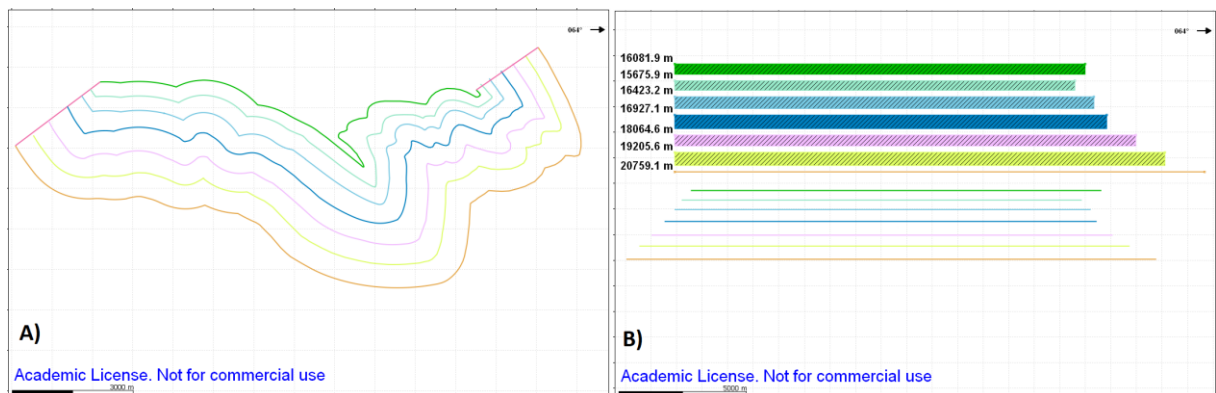


Figura 28: A) Seção Norte com interpretação acima da topografia, delimitada por uma linha perpendicular ao mergulho das camadas após a última interpretação de dobra; B) *Section Analysis* da seção descrita, pelo método *Flexural Slip* com *pin line* subparalelo ao plano axial da charneira principal e utilizando a Fm. Cauê como referência.

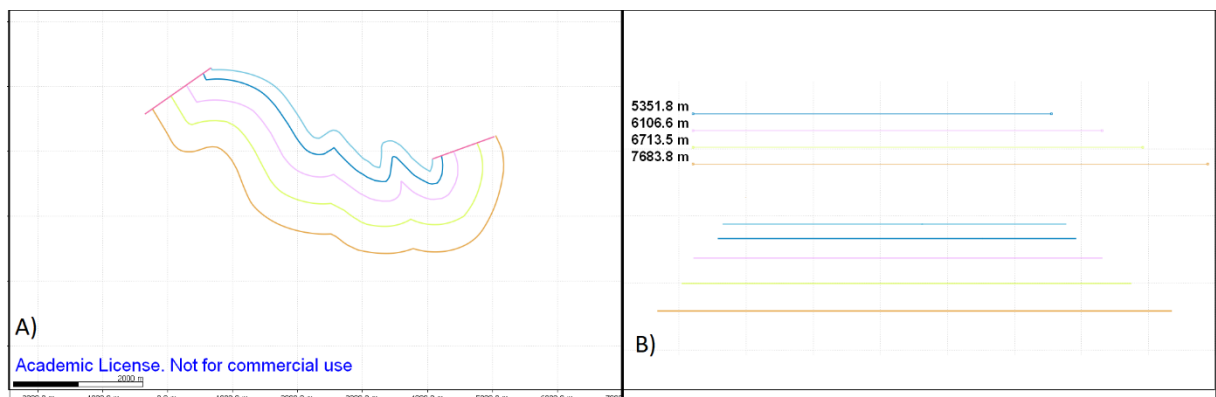


Figura 29: A) Seção Sul com interpretação acima da topografia, delimitada por uma linha perpendicular ao mergulho das camadas após a última interpretação de dobra; B) *Section Analysis* da seção descrita, pelo método *Flexural Slip* com *pin line* subparalelo ao plano axial da charneira principal e utilizando a Fm. Cauê como referência.

Flexural Slip com *pin line* subparalelo ao plano axial da charneira principal e utilizando a camada Caraça como referência.

As diferenças notadas entre os comprimentos de linha das três seções desdobradas passam a ter um comportamento gradual de diminuição nas diferenças entre a maior e a menor linha. Na Seção Central há uma diferença máxima de 34,5% (Figura 27). Na Seção Sul há uma diferença máxima de 30% (Figura 29). Na Seção Norte (Figura 28), a diferença máxima é de aproximadamente 24,4%, porém há uma mudança, apresentando a linha de topo com comprimento maior que a inferior. Essa inversão está relacionada à geometria interpretada acima da superfície de erosão.

Os resultados desses testes confirmam que as maiores diferenças entre os comprimentos de linha estavam relacionadas às descontinuidades geradas pela erosão. Entretanto nas três seções ainda há uma diminuição sistemática do comprimento de linha, ainda que com diferenças menos expressivas.

5.3.2) *Teste de restauração em geometria ideal*

Uma pergunta serve como guia para essa segunda etapa de testes: O que é necessário para uma seção dobrada ser balanceável? Além de cumprir as premissas quanto à compatibilidade em relação a estilo estrutural e geológico com o contexto regional e local, deve-se avaliar a seção quanto ao seu aspecto geométrico. As camadas de uma seção devem manter constantes os comprimentos de linha e espessuras, preservando a área e apresentar deformação plana. A geometria de dobras que garantem a preservação da área é classificada como 1B ou dobras paralelas por Ramsay (1967). Essas dobras têm como mecanismo de deformação característico para sua formação, o deslizamento flexural ou *flexural slip*, reproduzido pelo algoritmo de desdobramento. Uma seção idealizada foi modelada com dobras de geometria estritamente paralela (1B) a partir da modelagem por *Ramsay Folds* do Move. Essa seção apresenta escala e estilo estrutural compatíveis com a seção central, reproduzindo as dobras de escala quilométrica e não apresentando variações de espessura ou dobras parasitas.

A seção idealizada foi testada para o mesmo caso das outras: primeiramente apenas em subsuperfície (Figura 30) e em seguida modelada até um limite perpendicular aos mergulhos das camadas após as principais inflexões acima da superfície (Figura 31).

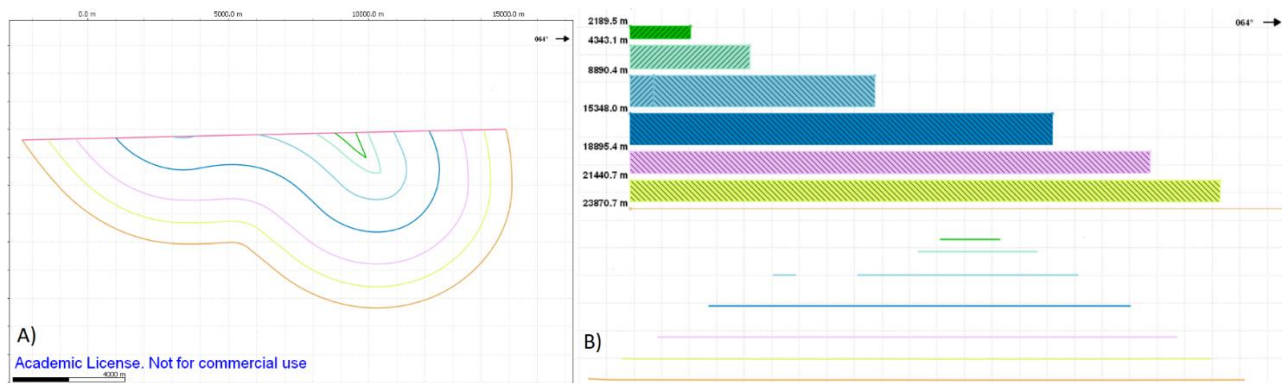


Figura 30: A) Seção idealizada de teste simulando uma versão aproximada da Seção Central com o aspecto principal das dobras de maior escala e todas modeladas como dobras do tipo 1B; B) *Section Analysis* da seção desdobrada por *Flexural Slip* com os comprimentos de linha e espessura das camadas.

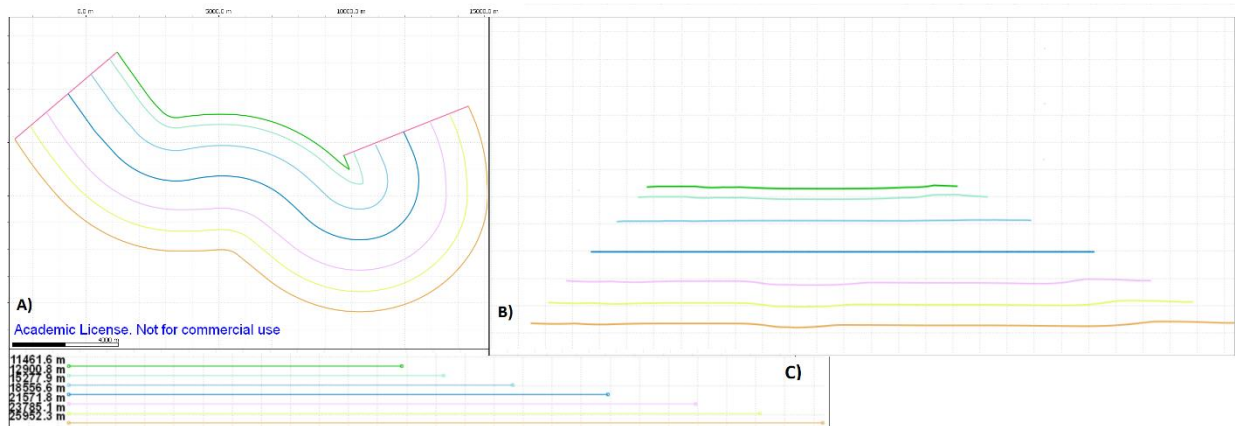


Figura 31: A) Seção idealizada com o mesmo teste da continuação acima da topografia até uma linha perpendicular ao mergulho das camadas após o último dobramento\inflexão; B) Seção desdobrada em uma etapa por *Flexural Slip* com os comprimentos de linha resultantes. O *pin line* foi posicionado paralelo ao plano axial da dobra principal. A Fm. Gandarela foi utilizada como *template*; C) *Section Analysis* da seção.

Os resultados dos testes na seção idealizada reproduzem os padrões gerais de comprimentos de linha, com diminuição progressiva dos comprimentos de linha em direção às camadas de topo (Figura 30). A seção delimitada até a linha perpendicular (Figura 31) reproduz o efeito de anular as diminuições drásticas de comprimento de linha causada por erosão, porém apresenta ainda a redução sistemática descrita. As diferenças de comprimento máximo de linha são maiores (55%) devido ao teste ter sido feito com espessuras maiores, amplificando as diferenças entre as camadas na borda e no núcleo da dobra.

5.3.3) Distribuição do encurtamento: Seção Central

O encurtamento calculado para as camadas da Seção Central foi de aproximadamente 30%, porém, a seção não apresenta uma geometria com distribuição homogênea de dobramentos até onde é possível avaliar com as informações disponíveis. A ferramenta *Measure* foi utilizada para comparar os comprimentos sinuoso e retilíneo das camadas, possibilitando cálculos locais de encurtamento em direções escolhidas. O resultado dessa análise foi uma clara diferença no encurtamento entre o flanco oeste, com estilo aberto a

suave de dobras, poucas dobras parasitas, a charneira e o conjunto charneira junto ao flanco leste com dobras mais apertadas e presença marcante de dobras parasitas. A análise foi realizada na linha de base do Grupo Caraça (Figura 32).

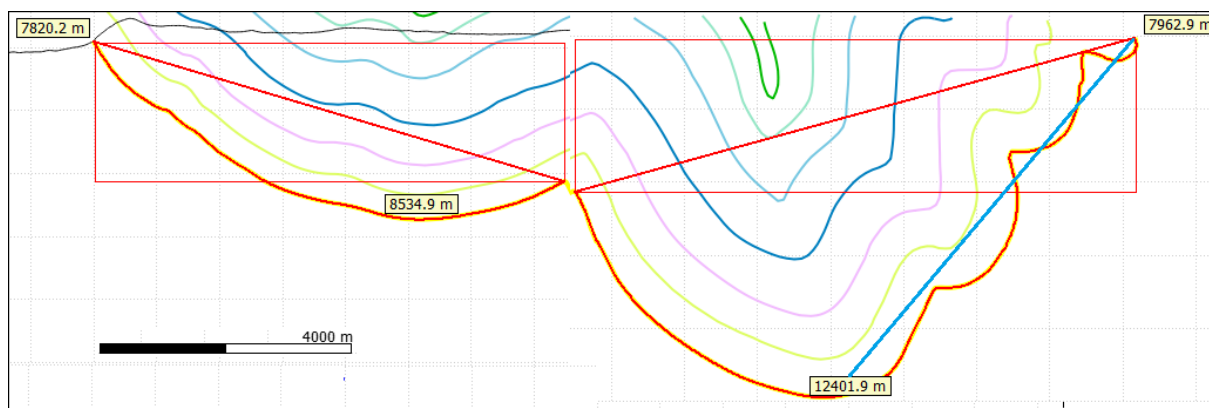


Figura 32: Resultado da ferramenta *Measure* no flanco oeste do sinclinal, apresentando a medida da linha sinuosa abaixo e da linha reta à esquerda. À direita, resultado do flanco leste e charneira do sinclinal. A linha azul interceptando a base do Grupo Caraça representa a referência de medição do flanco oeste separadamente. Os valores nos cantos superiores são dos segmentos retilíneos, e os inferiores representam os comprimentos sinuosos.

O encurtamento foi estimado em cada setor a partir de uma linha reta aproximadamente perpendicular ao plano axial dominante nesse setor. A Figura 32, no flanco oeste, apresenta as medidas de linha sinuosa e reta, resultando em aproximadamente 10% de encurtamento local nessa direção. No flanco leste, contém os dados do setor com a charneira principal e flanco leste apresentando aproximadamente 41% de encurtamento local nessa direção. As camadas em direção ao topo do flanco oeste se mantêm entre 10 e 11% e as camadas da charneira principal e leste tendem a 50% de encurtamento. O encurtamento entre o ponto mais profundo da charneira na base do Grupo Caraça e seu afloramento em superfície é de aproximadamente 17% (linha azul na Figura 32).

5.4) Testes e preparo do modelo cinemático

5.4.1) Desdobramento em porcentagem

O desdobramento por *Line Length* apresenta um recurso no *software* Move que possibilita a seleção de desdobramento por porcentagem a partir do *pin line* escolhido. Se a referência do desdobramento for uma linha horizontal, esse é o resultado do 100% de desdobramento, como foi utilizado nas análises anteriores. Esse método por não ter caráter cinemático no desdobramento, pode gerar mudanças expressivas na espessura das camadas em porcentagens de desdobramento baixas. Os desdobramentos foram realizados nos modelos com as correções de erosão para visualizar o desdobramento em todas as camadas e não apenas nas basais.

Esse método atua de maneira uniforme ao desdobrar por igual a seção toda. Isso implica na visualização de um modelo desdobrando uma “única” deformação, desdobrando conjuntamente estilos distintos de dobras como as dobras abertas do flanco oeste junto às dobras parasitas do flanco leste. É notável que entre os 60 e 70% de desdobramento, a dobra adquire um comportamento aproximadamente simétrico (Figura 33), com ambos os flancos se aproximando de mergulhos semelhantes e opostos. Essa configuração mostra ainda a diferença na deformação interna diferencial de dos flancos. Por não ser um método cinemático, as linhas estão sendo estiradas igualmente, não diferenciando possíveis estágios ou heterogeneidades.

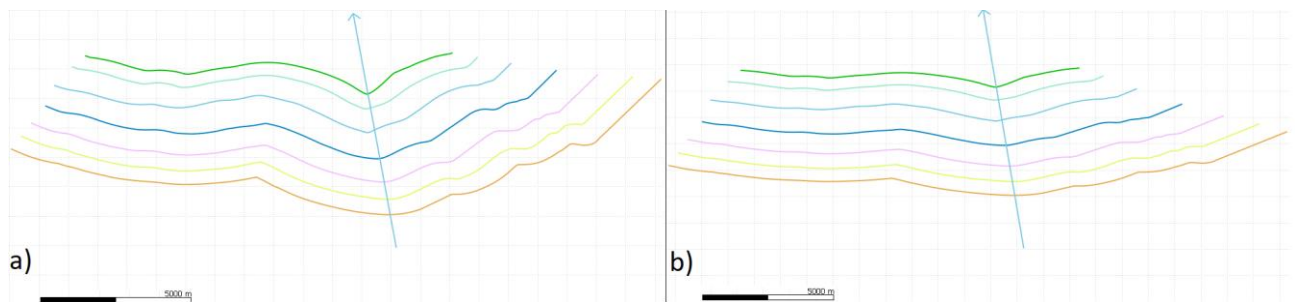


Figura 33: A) Desdobramento de 60% da Seção Central até a linha perpendicular a partir do algoritmo *Line Length* com *pin line* aproximadamente no plano axial da charneira principal e referência horizontal; B) Desdobramento de 80% da mesma seção e referência.

O modelo de Hippert e Davis (2000) descreve um primeiro estágio extensional no qual haveria um dobramento das camadas supracrustais se acomodando à extensão sob as quilhas e consequentemente sob as camadas. Um resultado possível desse estágio, sem levar em conta geometrias complexas de embasamento, seria que esse primeiro estágio tem como feição resultante uma dobra sinformal aberta e aproximadamente simétrica. O método do desdobramento pode ser utilizado para investigar essa geometria.

Nesse teste (Figura 34), foi utilizada uma compartimentação da estrutura separando o flanco oeste da charneira principal e do flanco leste. O flanco oeste foi desdobrado com referência a um *pin line* na charneira antiformal, enquanto o flanco leste e foi desdobrado a partir de um *pin line* paralelo aos planos axiais das dobras parasitas, de maneira a “esticar” as linhas dobradas em direção ortogonal ao *pin line*. O desdobramento com a diferenciação pelos comportamentos geométricos das dobras produz um resultado com geometria de maior aproximação simétrica entre os flancos, produzindo um possível modelo para a geometria inicial resultante do estágio extensional.

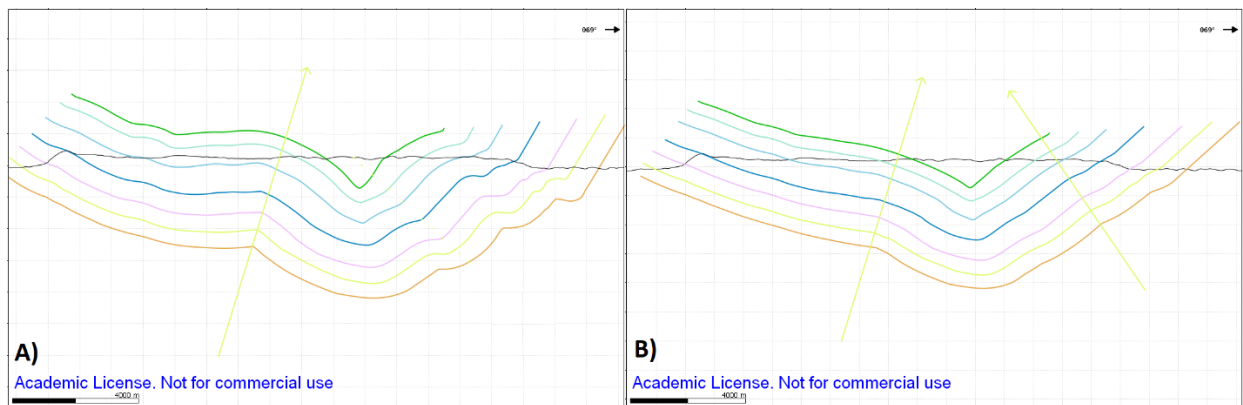


Figura 34: A) Desdobramento em porcentagem por compartimentos da Seção Central até 60% em ambos, tendo a referência horizontal; B) Segunda fase de desdobramentos sem referência horizontal com 70% de desdobramento no flanco leste e 60% no flanco oeste. O resultado é uma figura simétrica com 30° de mergulho cada flanco.

5.4.2) Modelo simétrico

Esse primeiro estágio extensional, com atuação “pura” do deslizamento flexural como mecanismo de dobramento durante o “colapso” sobre o espaço gerado abaixo das camadas teria como geometria esperada dobras de geometria 1B. Para testar essa geometria simétrica foi utilizado o resultado do desdobramento por *Flexural Slip* na Seção Central e foi modelada a sinformal do tipo 1B a partir do mergulho aproximado por 30° dos flancos em direção ao núcleo da dobra. Esse teste teve como objetivo quantificar o “encurtamento” que pode ter sido gerado a partir de um dobramento passivo. Para comparação foram utilizadas geometrias aproximadamente simétricas em escala compatível com o Sinclinal Moeda.

Os resultados dos testes nos modelos simétricos mostram diferentes cenários de encurtamento a partir dos diferentes mergulhos dos flancos. Os modelos da Figura 35 demonstram que uma sinforme simétrica, com flancos com mergulho de 30° em direção ao núcleo da sinforme, apresentaria um encurtamento entre 11 e 14% considerando uma área semelhante a calculada na Seção Central até uma área com o dobro do calculado. A seção da Figura 36a demonstra que uma seção simétrica com mergulhos opostos de flancos com 50° já apresentaria encurtamentos em torno de 20 a 25%, se aproximando do resultado encontrado para a Seção Central. A Figura 36b mostra os resultados de uma seção ainda mais aberta com flancos mergulhando 20° para direções opostas (E-W) e resultando em aproximadamente 6 a 7% de encurtamento com área semelhante à calculada na Seção Central.

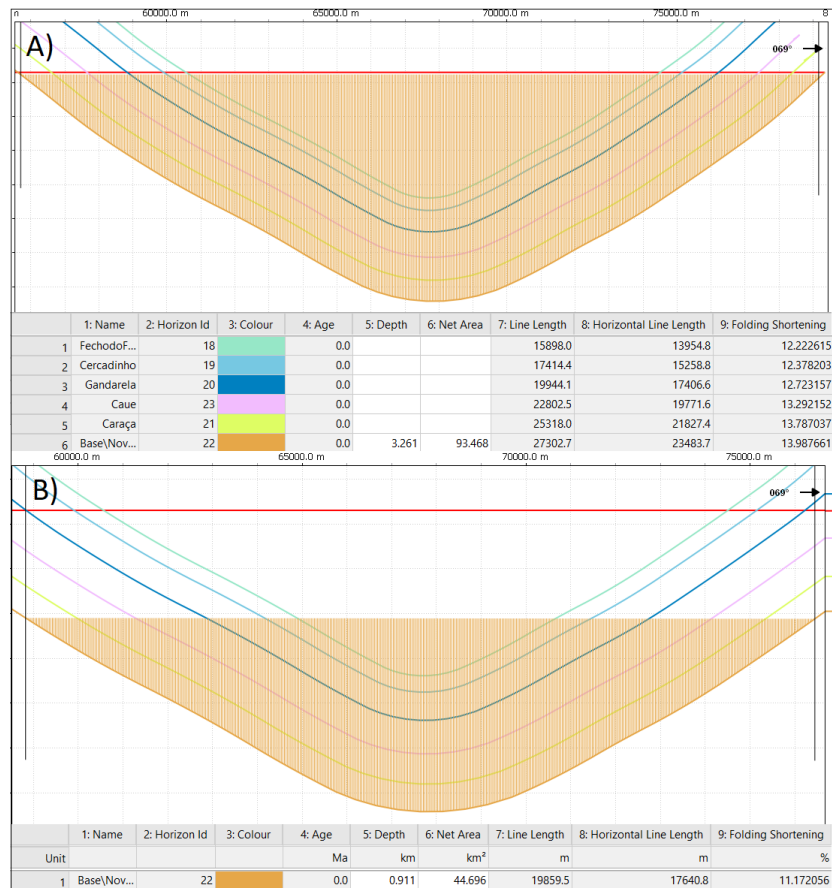


Figura 35: Resultado do algoritmo *Area Depth* aplicado a uma sinforme aberta (flancos com mergulho de 30°) e com geometria 1B. A) Resultados de uma seção com área calculada próxima a duas vezes a área da Seção Central; B) Resultados de uma seção com área calculada semelhante à Seção Central, simplificada para a linha mais longa. Nota-se um aumento próximo a 3% no encurtamento da linha da base quando calculado com o dobro de área.

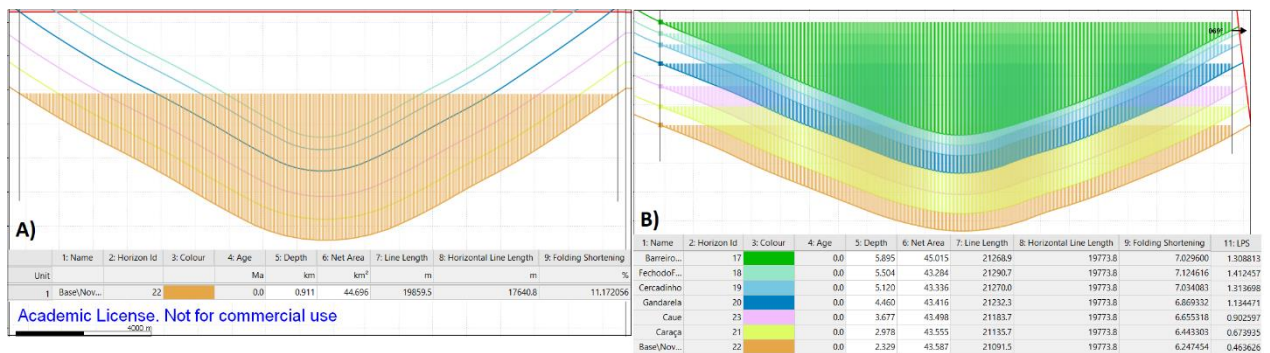


Figura 36: A) Resultado do algoritmo *Area Depth* em uma sinforme com geometria de dobras 1B e flancos com mergulhos opostos de 50° cada um, apresentando a tabela de dados do teste abaixo; B) Teste com seção com flancos apresentando mergulhos de 20° e geometria 1B com o algoritmo *Area Depth* porém utilizando um intercepto vertical. As diferenças de área são compreendidas como *layer-parallel shortening*. O encurtamento em B) é em média 7% utilizando a linha horizontal como referência.

As seções com flancos de 20 a 30° de mergulho servem como referência para compreender quanto “encurtamento” teria ocorrido num possível estágio anterior à compressão. Seguindo a hipótese de que houve um estágio extensional ou de ascensão

dômica que iniciou a formação do sinclinal, a geometria simétrica resultante poderia conter de 6 a 11% do “encurtamento” sofrido.

6) INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1) Viabilidade teórica: Por que o Sinclinal Moeda?

O trabalho de Hippert e Davis (2000) apresenta e detalha sistematicamente dados estruturais na micro, meso e macroescala, com enfoque na relação interna dos sinclinais e interfaces entre sinclinais e domos. A acomodação da deformação é descrita nas rochas granítico-gnáissicas por processos de deformação cristal-plástica, *solution transfer* no quartzo e *retrograde softening reactions* nos feldspatos (Hippert, 1998). Já as sequências supracrustais do Supergrupo Minas apresentam uma acomodação principal por deslizamento em planos basais de micas e também com efeitos da plasticidade de cristais carbonáticos (Davis, 1993; 1995) presentes em diversas unidades. As zonas de cisalhamento paralelas ao acamamento ocorrem por todas as sinclinais e variam de espessuras de milímetros a poucos decímetros principalmente nas interfaces entre camadas ou laminações de composições e reologias diferentes (Hippert e Davis, 2000). Os autores descrevem que o sentido desse *intralayer shear* é de movimento descendente das camadas mais antigas, sendo frequentemente reversas nas zonas de cisalhamento de contato nas bordas, com os domos.

Os autores descrevem uma única clivagem penetrativa nas supracrustais presentes nos sinclinais e a descrevem como geralmente paralelas até oblíquas entre 15 e 20 graus de diferença com o acamamento, sendo as obliquidades maiores associadas a camadas com predomínio de quartzo, indicando a presença do deslizamento paralelo ao acamamento. Fábricas S-C são encontradas em escala de amostra de mão com indicadores cinemáticos que se mostram opostos entre os flancos do sinclinal. Hippert e Davis (2000) também determinam elipses de *finite strain* para amostras das unidades supracrustais e obtêm elipses de obliquidades opostas entre os dois flancos de um mesmo sinclinal, com indicadores coerentes aos obtidos com fábricas S-C. O estudo das fábricas de eixo-c no quartzo foi realizado e os autores reconhecem evidências de que as zonas de cisalhamento intraestratal acomodariam essencialmente deformação não-coaxial enquanto os leitos entre essas zonas de cisalhamento teriam regimes mistos com cisalhamento puro e simples, com ocorrências locais de concentração de cisalhamento puro. A acomodação de deformação por crenulação é descrita como local e restrita a camadas pelíticas.

Hippert e Davis (2000) interpretam uma coerência nos indicadores de como a deformação se particionou, concluindo que o principal mecanismo de deformação atuante na formação dos sinclinais foi de deslizamento flexural. As evidências de deformação rúptil do quartzo indicariam deformação a temperaturas inferiores a 350 °C em taxas consideradas rápidas (Passchier e Trouw, 1996), dificultando que houvesse deformação dúctil nessas unidades.

O estilo estrutural descrito é suficiente para uma manutenção aproximada no comprimento e espessura das camadas durante a deformação. A descrição de Herz (1978); Pires (1995) e Noce (1995) confirmam um metamorfismo baixo de fácies xisto verde na chamada zona de *low-strain*. Rosière et al. (2001) demonstram ainda que as rochas desse domínio preservam estruturas sedimentares e por vezes não apresentam uma fábrica tectônica. Essas descrições colocam as rochas do Sinclinal Moeda em uma zona de balanceamento factível dentro dos parâmetros de Woodward et al. (1989), sem a ativação franca de mecanismos de dobramento dúcteis ou evidências de perdas de volume massivas devido a efeitos metamórficos.

6.2) Desdobramento por *Flexural Slip*

O algoritmo *Flexural Slip* é adequado para verificar o balanceamento em termos geométricos da seção, pois é um algoritmo cinemático que mantém a área e os comprimentos de linha e espessura das camadas entre o estado deformado e retrodeformado. O comportamento resultante dos comprimentos de linha das camadas com o *Flexural Slip* foi consistente nas três seções, com erro máximo de 4% na Seção Norte e, em geral 1% nas outras seções quando comparadas as seções deformadas e restauradas (Tabela 2). As três seções apresentaram um padrão de diminuição sistemática em direção às camadas de topo da estratigrafia.

Os testes com a expansão das seções acima da superfície até a linha perpendicular às camadas demonstraram que as diminuições acentuadas nos comprimentos de linha das camadas de topo estão relacionadas ao apagamento de registro pela erosão. Ao interpretar as camadas acima da superfície, removendo o efeito das descontinuidades, os comprimentos de linha resultantes variam de maneira mais constante e linear.

Os testes com a Seção Central idealizada visaram identificar se a diminuição nos comprimentos de linha eram um problema das seções elaboradas ou um problema geométrico inerente ao estilo e escala de estruturas presentes nas seções estudadas. Foi testada uma seção com as principais estruturas e escala compatível às da Seção Central, tendo sido modelada com dobras do tipo 1B na classificação de Ramsay (1967), por definição as mais adequadas ao balanceamento e estruturalmente compatíveis com o algoritmo *Flexural Slip*. Os resultados demonstraram o mesmo comportamento quanto à variação do comprimento de linha, tanto na seção erodida quando na expandida. Os resultados dos testes na seção de geometria ideal tornam evidente que o comportamento dos comprimentos de linha caracteriza um problema geométrico. Uma discussão e abordagem desse problema é realizada no próximo tópico/seção do trabalho.

Sobre o aspecto geométrico do balanceamento, além dos comprimentos de linha, deve-se manter a área constante entre a seção deformada e restaurada. Os resultados dos desdobramentos por *Flexural Slip* para as seções Norte e Central demonstram um bom

balanceamento em área, com diferenças de 4,1 e 3,9%, respectivamente. Os limites de um bom balanceamento são definidos em Lingrey e Vidal-Royo (2015) como 5% de erro. Ainda que sejam baixos, os erros podem estar relacionados a incertezas estratigráficas em subsuperfície e às geometrias de dobras de estilo 1C a 2 no flanco leste, indicando uma contribuição de deformação de charneira (por *buckling*) com alguma contribuição de deformação dúctil nesse flanco. Os erros dessas seções estão em margens aceitáveis e, portanto, balanceadas em área. Isso demonstra que as soluções geométricas propostas em subsuperfície são compatíveis com a restauração pelo mecanismo *Flexural Slip*.

A Seção Sul apresentou resultados semelhantes entre os desdobramentos por *Line Length* e *Flexural Slip*, com erros de 10% em relação à área calculada pelo *Area Depth*. As incertezas podem ser melhor acessadas com maior volume de dados de subsuperfície, porém, a geometria interpretada, especialmente nas camadas do núcleo da sinforme apresentam um caráter dúctil importante. Isso aliado à maior presença de xistosidade nessa área e afinamento expressivo das camadas em comparação às outras, evidencia uma ativação de mecanismos de deformação que tornam a geometria incompatível com a restauração por deslizamento flexural.

6.3) Balanceamento de seção geológica dobrada

Lingrey e Vidal-Royo (2015) fazem uma revisão da metodologia de restauração e balanceamento para seções com camadas dobradas avaliando a eficiência do uso da transformação por deslizamento/fluxo flexural no desdobramento dos diferentes tipos de dobra da classificação de Ramsay (1967). A deformação no dobramento ativo (*buckling*) é máximo na zona de charneira, enquanto no deslizamento e fluxo flexural concentra-se nos flancos.

Na classificação de Ramsay (1967), as dobras de classe 1C podem ser descritas num espectro entre dobras da classe 1B e 2, apresentando progressivo espessamento de charneira e afinamento nos flancos à medida que se aproxima da geometria das dobras similares. As interpretações e descrições de dobras no presente trabalho se deram principalmente em variações de dobras 1C, 1B e localmente 2. Lingrey e Vidal-Royo (2015) testam uma série de geometrias entre 1B e 2 e demonstram que a restauração de *buckle folds* produzem diferenças de $\pm 2\%$ no comprimento de linha e balanceamento de área, sendo menores que incertezas de natureza estratigráfica, por exemplo.

A deformação em dobras por deslizamento e fluxo flexural se acumula nos flancos das dobras. Uma consequência desse fato é que a ausência ou erosão de parte do flanco da dobra gera uma inconsistência sistemática nos comprimentos de linha de topo e base das camadas. A Figura 37 apresenta dois dos testes de Lingrey e Vidal-Royo (2015). Os autores demonstram que o uso da transformação por deslizamento/fluxo flexural apresenta erros desprezíveis até a geometria 1C com 0.4 similar.

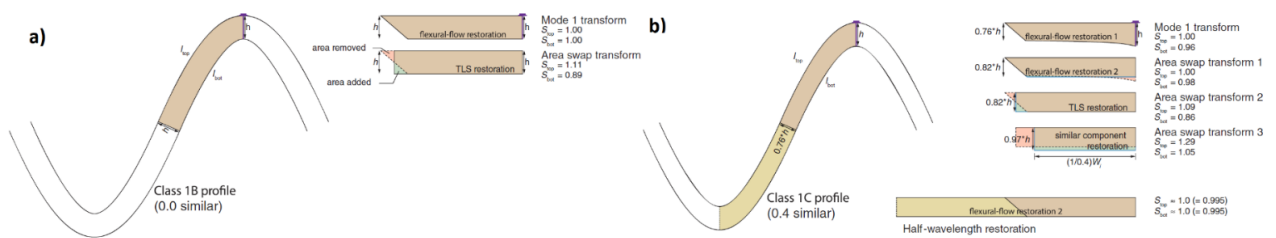


Figura 37: a) Restauração de um quarto de comprimento de onda de uma dobra 1B; b) Restauração de um quarto de comprimento de onda de uma dobra 1C (0.4 similar). À direita uma restauração de meio comprimento de onda do flanco. Retirado de Lingrey e Vidal-Royo (2015).

A Figura 37a mostra o resultado do teste em um quarto de comprimento de onda de dobra paralela (1B), que é a geometria ideal para a transformação em questão. O resultado em área no canto direito superior mostra o polígono resultante balanceado em área, porém com diferenças no comprimento de linha entre topo e base. A Figura 37b apresenta um resultado satisfatório na manutenção de área e apresenta um aspecto geométrico essencial: os comprimentos de linha de topo e base das camadas são iguais quando se analisa o quarto complementar de comprimento de onda no mesmo flanco da dobra. O resultado é um polígono retangular.

A análise da Seção Central idealizada como uma geometria de dobras puramente 1B é ainda uma outra forma de abordar as diferenças no comprimento de linha. Ao tratar-se de dobras do tipo 1 de Ramsay (1967), elas por definição apresentam o arco externo maior que o interno. Se não há alternância com dobras de geometria 3 como nas típicas dobras em *chevron*, os arcos internos de um sinclinal, por exemplo, tendem a ficar cada vez mais apertados nas camadas de topo. A manutenção do comprimento de linha nesse estilo de dobra ocorre através do deslizamento entre as camadas ou em estruturas planares internas a cada camada. No entanto, há uma dificuldade em quantificar o deslocamento entre as camadas durante o deslizamento e fluxo flexural (Tanner, 1989; Fowler e Winsor, 1997).

Seções de caráter regional com dobramentos e empurrões apresentam uma simplificação quanto a esse problema geométrico pois contêm tipicamente os comprimentos de onda completos de certo estilo e escala de dobra, além de uma sequência de fase, como uma alternância de sinformes e antiformes. Como discutido, as diferenças no comprimento de linha se igualam quando as mesmas camadas ocorrem ora como arco externo, ora como interno em uma mesma escala de dobramento. No Sinclinal Moeda não há evidências de antiforme de escala e estilo compatíveis com a charneira principal, não sendo visível essa compensação. Ao considerar os mecanismos de dobramento descritos para o sinclinal, ainda que apresente contribuições variáveis de deformação dúctil, é possível compreender que a geometria da continuação dos flancos hoje erodidos seria essencial para descrever a distribuição da deformação.

6.4) O deslizamento como resposta à diferença nos comprimentos de linha?

Propõe-se uma forma experimental de abordar o problema das diferenças de comprimento de linha a partir do modelo que tem deslizamento e fluxo flexural como principais mecanismos de dobramento. O objetivo do modelo é testar se a aplicação de uma solução geométrica simplificada de fluxo flexural corrige ou não a variação de comprimentos de linha. O experimento fundamenta-se na geometria de base do fluxo flexural (Figura 38a). O modelo ajusta a geometria hipotética dos flancos acima da topografia a partir da diferença do comprimento entre a camada de topo e a camada de base da estratigrafia em questão.

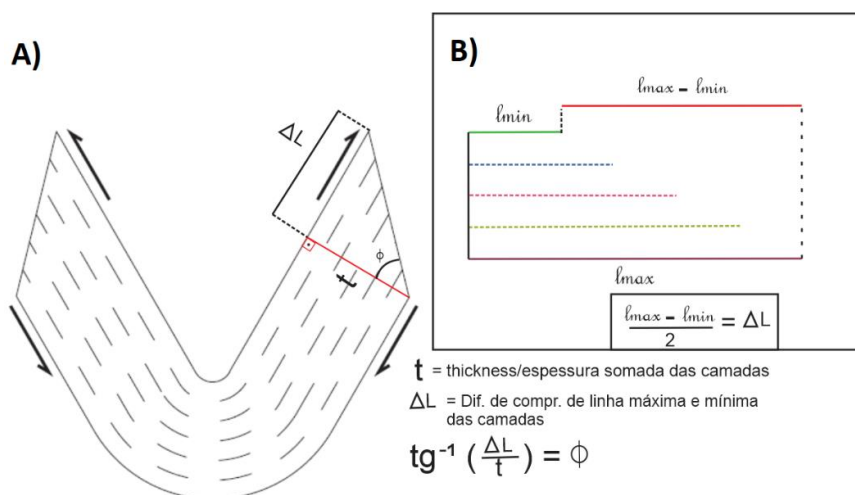


Figura 38: A) Modelo esquemático dos parâmetros e do cálculo utilizado para o modelo da geometria por fluxo flexural. Imagem modificada de Ramsay e Huber (1987); B) Modelo simplificado de como comparar o comprimento máximo e mínimo de linha utilizando o *Section Analysis* da seção desdobrada no Move. A diferença de comprimentos é dividida e generalizada para ambos flancos, desprezando possíveis variações de espessura.

A Figura 39 apresenta os resultados dos testes, com uma estimativa possível do deslizamento/fluxo flexural a partir da aplicação do modelo às geometrias de flanco. Esses testes não implicam em um retrato da geometria pré-erosiva dessas estruturas, mas num exercício metodológico que visa compreender se as diferenças sistemáticas de comprimento de linha são corrigidas pelo deslizamento. As diferenças máximas de comprimento de linha foram calculadas entre a camada de base e de topo, com exceção da Seção Norte, na qual utilizou-se a camada Fecho do Funil. As medidas foram tiradas do *Section Analysis* das seções delimitadas pela linha perpendicular.

A Seção Central (Figura 39a e 39b) apresenta um erro máximo de 3,4% nos comprimentos de linha máximo e mínimo. A Seção Norte (Figura 39c e 39d) apresenta um erro de 5,5% nos comprimentos de linha e a Seção Sul (Figura 39e e 39f) 5,8%. A Seção Central idealizada apresentou um erro de 1,1% (Figura 40). Os erros encontrados se mantiveram em torno e abaixo de 5%. Esses resultados demonstram que a geometria resultante do deslizamento/fluxo flexural, com movimentação entre as camadas concentrada nos flancos, é uma solução geométrica válida e compensa satisfatoriamente a diminuição

sistemática dentro de uma margem de erro de aproximadamente 5%. Ressalta-se que com uma aproximação simples, sem detalhamento de mudanças de espessura produz um erro baixo na Seção Central e tolerável nas três seções.

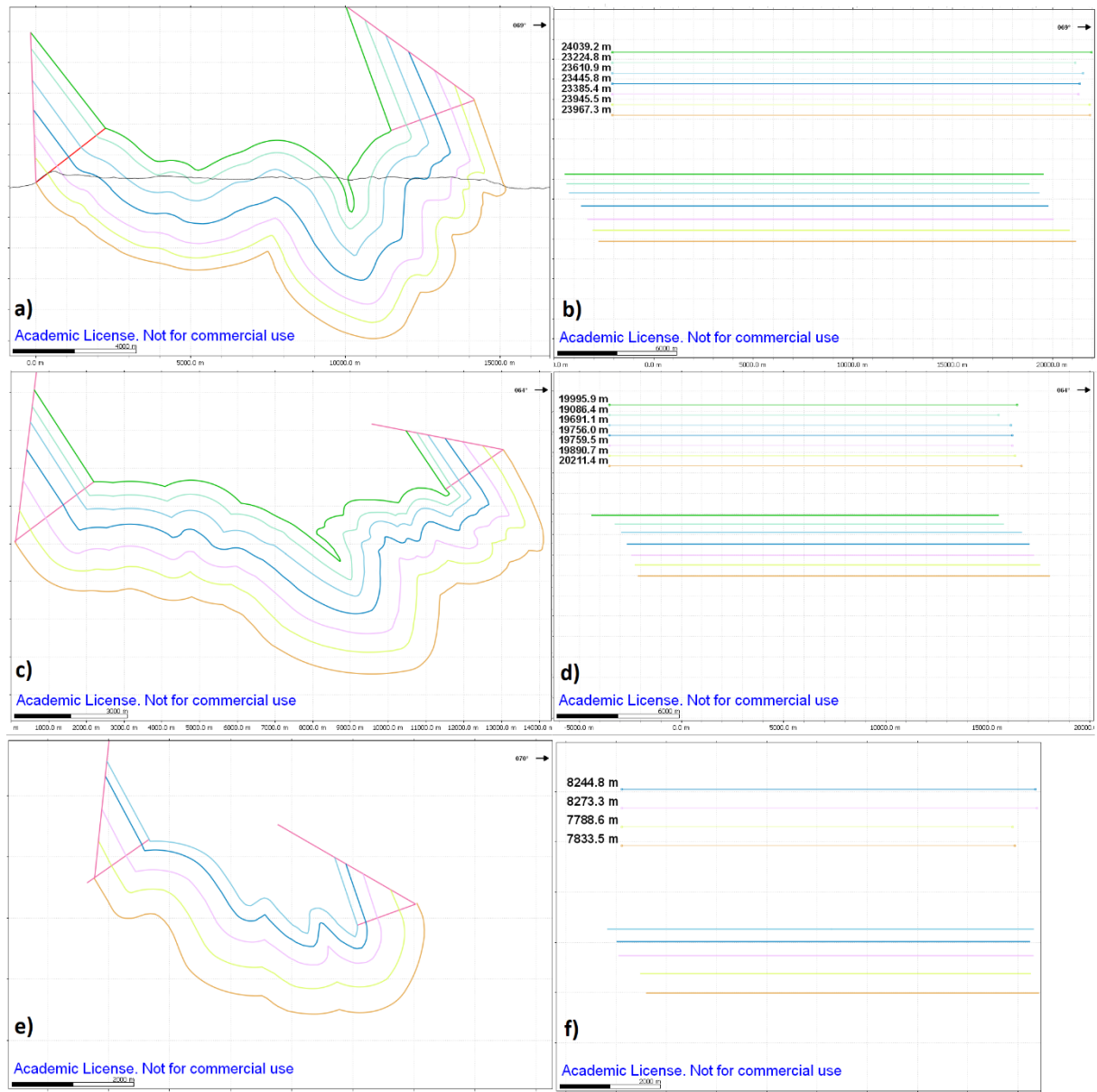


Figura 39: Seções geológicas expandidas acima da superfície pelo método descrito na Figura 38 e os ângulos referidos. a) Seção Central expandida com o ângulo calculado de 52°. b) *Section Analysis* da seção à esquerda pelo método *Flexural Slip* tendo a Fm. Cauê como *template* e *pin line* aproximadamente paralelo ao plano axial da charneira sinformal.; c) Seção Norte expandida com ângulo calculado de 45°. d) *Section Analysis* da seção à esquerda a partir do desdobramento por *Flexural Slip* tendo a Fm. Gandarela como *template* e *pin line* subparalelo ao plano axial da charneira sinformal; e) Seção Sul expandida com ângulo calculado de 50°; f) *Section Analysis* da seção à esquerda a partir do desdobramento por *Flexural Slip* tendo a camada Caraça como *template* e *pin line* subparalelo ao plano axial da charneira sinformal.

A diminuição sistemática está relacionada à geometria de dobra e como a deformação se particiona no deslizamento/fluxo flexural. O baixo erro da seção idealizada indica a

eficiência método para a geometria ideal, evidenciando que os erros maiores representam possíveis desvios nas geometrias de dobra, com uma pequena contribuição de outros mecanismos de dobramento, como *buckle folds* e geometrias próximas a dobras similares, por exemplo.

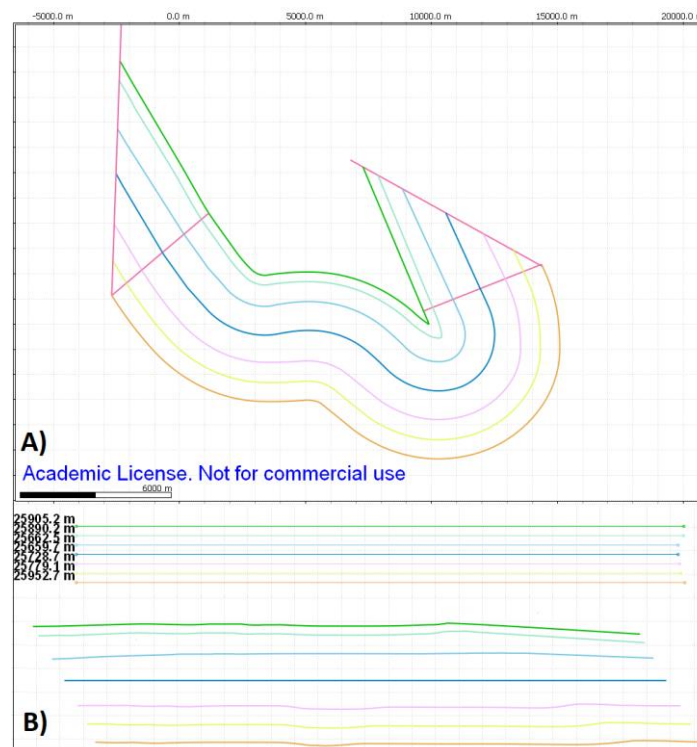


Figura 40: a) Seção Central idealizada e expandida com ângulo calculado de 55°; b) *Section Analysis* da seção à esquerda a partir do desdobramento em apenas uma etapa por *Flexural Slip* tendo a Fm. Cauê como *template* e *pin line* subparalelo ao plano axial da charneira sinformal.

6.5) *Line Length* e encurtamento tectônico

A restauração pelo algoritmo *Line Length* junto ao *Section Analysis* possibilita uma visualização e avaliação inicial das seções geológicas. Por não se tratar de um método cinemático, não há manutenção da área entre a seção deformada e não-deformada. Esse fato fica evidente nos erros de aproximadamente 10% entre as áreas calculadas pelo *Area Depth* e as áreas calculadas nas seções desdobradas por *Line Length* nas seções.

O desdobramento em porcentagem possibilita a visualização de “etapas” da geometria, sendo possível identificar uma janela de porcentagens nas quais a estrutura tende a simetria. Entre 60 e 70% de desdobramento aplicados à Seção Central, chega-se a geometrias aproximadamente simétricas. Ao modelar as camadas, com as espessuras ajustadas e estilo estrutural esperado, aos mergulhos encontrados no desdobramento, calculou-se um encurtamento de 11% para uma área próxima à da Seção Central. O modelo com os desdobramentos individuais dos flancos oeste e leste, em 60 e 70%, respectivamente, removeu as dobras de segunda ordem.

O encurtamento calculado obteve valor próximo a 30% na Seção Central. Desdobrando-se a seção em 60% e aplicando essa porcentagem ao encurtamento total, dos 30% totais, restam 12% de encurtamento. Esse valor é muito próximo dos 11% de encurtamento calculados para uma área e mergulhos de flanco semelhantes. Isso mostra que, ainda que semiquantitativo, é um recurso válido e útil na modelagem de seções dobradas. Esse modelo parcialmente desdobrado é um retrato possível do efeito da ascensão dômica e/ou evento extensional sob as quilhas de supracrustais no modelo geológico-estrutural discutido.

O cálculo do encurtamento é uma comparação entre o comprimento de linha sinuoso em subsuperfície, da seção dobrada e o comprimento de linha horizontal, da superfície. O Sinclinal Moeda apresenta uma estrutura tridimensional evidenciada pelas terminações periclinais das camadas do Grupo Piracicaba a norte e sul da estrutura. O menor valor de encurtamento encontrado na Seção Norte, de 20%, não é uma evidência de que os efeitos compressivos foram diferentes entre a Seção Norte e Central, mas que, para um comprimento semelhante de linha horizontal (superfície), foi interpretado um comprimento de linha sinuosa (subsuperfície) menor para a Seção Norte. Seções construídas próximas a terminações periclinais presumivelmente são mais rasas em um contexto sinformal do que outras mais distantes.

Ainda que a Seção Norte seja mais rasa e com menor área, isso não significa que ela foi menos encurtada, mas indica um aspecto tridimensional do Sinclinal Moeda. Esse aspecto pode estar relacionado a uma heterogeneidade pré-compressiva ao longo do eixo N-S ou a um evento de deformação. Uma hipótese é a atuação de vetores compressivos ao longo do eixo N-S, controlados ou não pela geometria e atuação do Domo Bação. Uma outra hipótese, que não anula a primeira, é a de que haveriam heterogeneidades geradas possivelmente durante a distensão no colapso orogênico Paleoproterozoico relacionadas, ou não, com a reativação do mecanismo de ascensão dômica, produzindo ou aprofundando uma quilha tridimensional à qual as camadas do Sgp. Minas se amoldariam.

O termo “encurtamento” não representa, portanto, uma quantificação apenas dos efeitos compressivos da deformação. Se parte do dobramento (geometria sinuosa das linhas) foi gerado durante um evento extensional, essa geometria se traduz em uma porcentagem de encurtamento nesse método de cálculo.

6.6) Modelo geológico-estrutural

O modelo descrito por Cutts et al. (2019) apresenta uma base robusta em termos metamórficos e geocronológicos e compara os principais modelos do QFe aos de outras províncias de natureza geológica semelhante no planeta. Os modelos discutidos por Chemale et al. (1994), Alkmim e Marshak (1998) e por Cutts et al. (2019) salientaram a importância das zonas de cisalhamento normais na interface entre os domos e as unidades supracrustais, com

indicadores da ascensão dômica. Marshak et al. (1997) também evidenciam a relação de corte entre a quilha das unidades do Sgp. Rio das Velhas e Minas, sendo um argumento para uma posição autóctone e discordante do Sgp. Minas sobre uma quilha das rochas metavulcanossedimentares. Hippert e Davis (2000) apresentam um modelo simples de evolução estrutural que é correlacionável ao modelo de Cutts et al. (2019) ainda que com uma cronologia menos precisa. Hippert e Davis (2000) demonstram um modelo cinemático para o Sinclinal Moeda coerente com base nos dados estruturais de campo e análises de indicadores cinemáticos, *finite strain*, microtexturas e eixos c de quartzo. Um primeiro estágio teria um resultado geométrico semelhante ao proposto por Endo e Nallini Jr. (1992) no qual os domos Bonfim e Bação ascendem relativamente a quilha de supracrustais gerando uma primeira fase do sinclinal acomodado totalmente por deslizamento flexural, como indicaram as análises cinemáticas dos flancos (Figura 41a).

O segundo momento é de natureza compressiva e pode ser resumido em uma compressão E-W com vergência para W que inverteu o movimento da falha a leste e inverteu o movimento relativo entre as camadas no flanco leste. As unidades do Sgp. Rio das Velhas e do complexo Bação presumivelmente cavalgaram o flanco leste, que foi invertido (Figura 41b). Os dobramentos associados ao evento compressivo são de natureza ativa e ainda que grande parte da deformação tenha se dado em termos de deslizamento e fluxo flexural há dobramentos mais complexos relacionados às dobras parasitas, por vezes com espessamento de charneira.

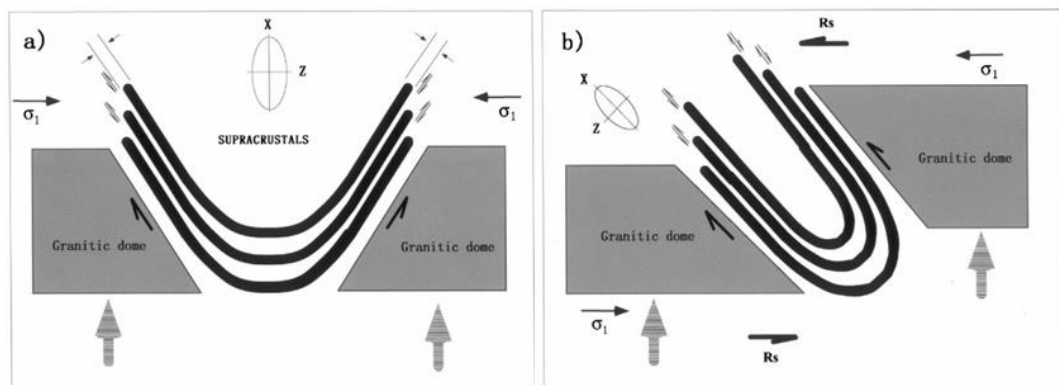


Figura 41: Modelo cinemático de evolução dos sinclinais no QFe proposto por Hippert e Davis (2000). a) Esforço compressivo com dobramento simétrico acomodado por *flexural slip* com ascensão dômica; b) esforço compressivo com o fechamento da dobra e inversão do flanco leste com cavalgamento do domo neste flanco, ainda com uma ascensão dômica relativa ao sinclinal.

O modelo cinemático para o Sinclinal Moeda de Hippert e Davis (2000) enfatiza a função dos domos granítico-gnáissicos nas laterais da estrutura. Essa função, nas seções trabalhadas concentra-se em especial na Seção Sul e gradualmente tem menor efeito em direção ao centro da estrutura, em relação ao eixo N-S. A seção geofísica (Figura 10) da região central do sinclinal não apresenta evidências conclusivas de falha profunda no contato

com o Sgp. Rio das Velhas na borda do flanco leste. A falha interpretada de mergulho médio para leste é um indicador da cinemática nas rochas do Sgp. Rio das Velhas durante a compressão com a possível influência do Domo Bação.

6.7) Relação do Domo/Bloco Bação com o encurtamento

Há uma expressiva diferença na distância, entre as bordas do sinclinal, de aproximadamente 10 Km entre as seções Central e Sul confeccionadas (Figura 42a). Não há dados disponíveis de subsuperfície na seção Sul, porém é possível discutir e entender essa estrutura a partir de cinco pontos essenciais: (i) a Seção Sul encontra-se entre os domos Bação e Bonfim, na zona de menor distância entre eles; (ii) a última camada da estratigrafia do Sgp. Minas, da base até o topo, que aflora na seção é a Fm. Cercadinho; (iv) as camadas na Seção Sul encontram-se expressivamente menos espessas que no restante da estrutura; (v) expressiva diminuição, em mapa, de medidas estruturais de acamamento e presença marcante de xistosidade (ainda que subparalelas).

Há mais de uma linha interpretativa possível para abordar esses fatores, porém, com os dados disponíveis e as metodologias propostas, é possível discutir em termos da influência do Domo Bação na deformação/encurtamento e o modelo cinemático que incorpora esses aspectos. Parte-se da hipótese de que as camadas do Sgp Minas que se encontram no Sinclinal Moeda, em seu estado pré-deformacional seriam pilhas sedimentares de natureza contínua e sem mudanças robustas de espessura, ao menos na área de estudo. Essa hipótese faz com que se entenda as diferenças geométricas encontradas a partir das deformações que atuaram e transformaram a disposição das camadas.

A borda leste do Sinclinal Moeda entre a seção Central e Sul mimetiza a geometria do Domo Bação aflorante, indicando que, onde estão justapostos, há um controle estrutural pelo bloco e as camadas supracrustais se amoldaram a ele durante a deformação extensional e compressiva. Na região Central e Norte também houve compressão na lateral leste, porém em contato com corpos rochosos de natureza geométrica, geomecânica e física diferentes do corpo rochoso coeso do domo. Esse é um dos fatores que torna coerente analisar a diferença da distância entre as bordas do sinclinal como resultado da compressão e a diferença no comportamento estrutural do Domo Bação com as bordas que tem contato apenas com rochas do Sgp. Rio das Velhas próximas.

Uma dificuldade do modelo cinemático é o fato do afloramento e repetição da Fm. Cercadinho sugerir uma seção menos profunda das camadas supracrustais na seção Sul. Se for considerado que ambas seções partiram de uma geometria semelhante antes da deformação compressiva, a porção sul teria passado por uma ascensão durante o evento compressivo, possivelmente controlada pela movimentação do Domo Bação. Uma hipótese mais simples envolve compreender o efeito do estágio extensional, com ascensão dômica e a geometria de domos e quilhas como uma feição tridimensional, possibilitando que as

diferenças na profundidade do sinclinal desses setores seja uma herança desse estágio. A acomodação dessas diferenças de profundidade poderia se dar por falhas normais nas quilhas afetando o substrato do Sgp. Minas que se acomodariam em dobramentos por deslizamento e fluxo flexural que também pode atuar em 3D (Figura 42b). Essas falhas possivelmente se relacionam às falhas de mergulho verticalizado e direção E-W que ocorrem no Sgp. Rio das Velhas na borda leste da estrutura, ainda que tenham sido reativadas durante a compressão. Essas falhas são visíveis na borda leste especialmente do centro ao sul (Figura 42a).

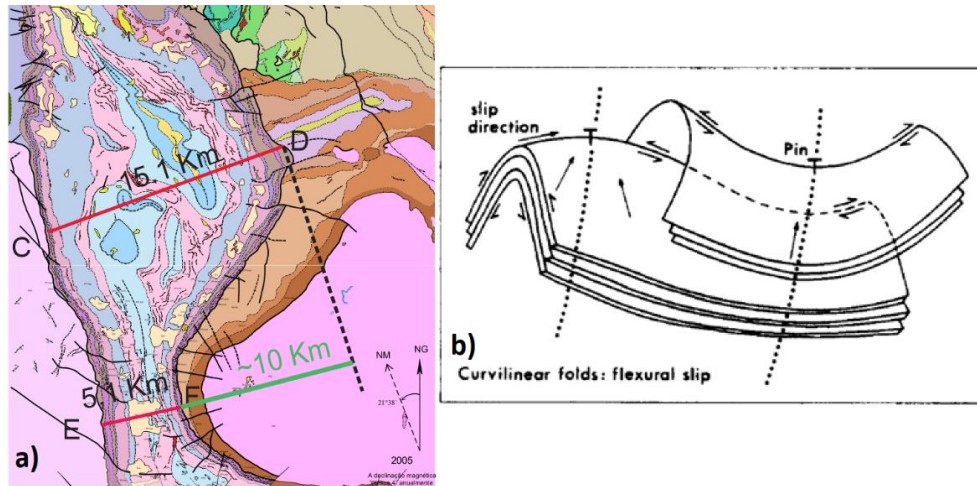


Figura 42: a) Mapa esquemático a partir de Lobato et al. (2005), comparando os segmentos C-D e E-F, representativos da Seção Central e Sul, respectivamente; b) Imagem representando o deslizamento flexural com vetor ao longo do eixo também, acomodando o encurvamento do eixo da dobra pelo mesmo processo. Imagem retirada de Tanner (1989).

A presença marcante da xistosidade, a geometria de dobras apertadas e a presença da charneira em forma de “M” são indícios estruturais de um importante componente de deformação dúctil na seção Sul. Essas características podem ser interpretadas como uma resposta à intensidade e distribuição da deformação que a atuação do Domo Bação gerou, possivelmente ativando mecanismos de deformação francamente dúcteis além dos mecanismos de deslizamento e fluxo flexural. Outro fator importante é a menor espessura das camadas na Seção Sul que, considerando a presença marcante de xistosidade, é um indicativo da perda de espessura por efeitos tectono-metamórficos, especialmente no flanco leste.

A partição da deformação com maior importância de mecanismos dúcteis e a ausência de dados de subsuperfície na seção Sul torna o processo de quantificação e modelagem mais complexos. Ainda que a quantificação precisa não seja possível, é argumentável que a diferença da distância das bordas do sinclinal (Figura 42a) é, em parte, um efeito da atuação e presença do Domo Bação, porém não necessariamente durante o encurtamento. A diferença na profundidade das seções implica em uma dificuldade em atribuir toda a diferença

do comprimento de linha em superfície ao encurtamento, pois não há garantia que as quilhas apresentavam semelhança geométrica no momento pré-compressivo. Uma abordagem comparativa mais robusta seria uma modelagem 3D com mais dados de subsuperfície para elucidar a conexão entre a porção central e sul.

Adicionalmente, se a diminuição de espessura na seção Sul puder ser atribuída a formação de clivagem e, portanto, de caráter tectônico, é possível comparar com as espessuras das outras seções. As Fm. Cauê e Gandarela chegam a apresentar reduções de espessura, especialmente no flanco leste, de aproximadamente 50% e até 68%, respectivamente. O encurtamento calculado de 30%, semelhante à Seção Central, não representa uma quantificação completa, pois a Seção Sul não está balanceada em área, tendo uma importante fração dos efeitos compressivos na perda de espessura/geração de clivagem e deformação dúctil.

7) CONCLUSÕES

O teste de hipóteses comparativo entre as seções é um exercício metodológico que vai de encontro aos limites do método para uma região de história deformacional/tectônica complexa como o Quadrilátero Ferrífero. O grau metamórfico baixo da zona de *low strain*, em especial no Sinclinal Moeda e a descrição estrutural e textural das rochas nessa zona (Rosière et al., 1993, 1996; Hippert e Davis, 2000; Hippert et al., 2001) caracterizam um regime de deformação plana ou aproximadamente plana confirmando a viabilidade do método nas discussões propostas.

Uma seção geológica balanceada não é necessariamente a interpretação correta sobre uma dada área. Ela é geometricamente válida e apresenta uma coerência interna, resultando em uma interpretação mais confiável em comparação a uma seção não-balanceada. As seções propostas são, portanto, interpretações possíveis amparadas rigorosamente nos dados da pesquisa bibliográfica, mapas geológicos e a seção geofísica interpretada.

O *software* Move é um kit de ferramentas para modelagem estrutural completo e se mostrou totalmente compatível com os objetivos e análises propostos. A análise comparativa através do uso dos algoritmos *Area Depth*, *Line Length* e *Flexural Slip* junto às ferramentas de modelagem de dobras e falhas possibilitou um trabalho bem documentado dos processos de restauração. O algoritmo *Flexural Slip* se mostrou o método adequado para restaurar e analisar as seções propostas quanto ao balanceamento, junto ao *Area Depth*.

As Seções Central e Norte são consideradas balanceadas em área dentro de uma tolerância de 5% e balanceadas em comprimento de linha com erro de até 4%. Demonstrou-se que as variações de comprimento de linha sistemáticas são inerentes à relação entre a geometria das dobras e a superfície/erosão, ainda que as dobras sejam paralelas. Uma

solução geométrica simples foi proposta para abordar as diferenças de comprimento de linha pela geometria de flanco esperada em uma dobra por deslizamento e fluxo flexural, se mostrando compatível com erro próximo a 5%. A Seção Sul não é balanceada em área com erro aceitável, indicando que a geometria interpretada não é eficientemente restaurada pelos métodos de desdobramento. Fatores como mecanismos dúcteis de deformação, maior presença de clivagem e perda de massa (camadas afinadas) são possíveis explicações. Os efeitos do Domo Bação durante a fase compressiva da deformação podem estar retratados nessas características da Seção Sul.

O encurtamento tectônico calculado apresentou variação entre as seções propostas, sendo de 30% na Seção Central, 20% na Seção Norte e aproximadamente 30% na Seção Sul. Foi demonstrado que, considerando os modelos cinemáticos propostos para evolução estrutural do QFe, o encurtamento não reflete uma estimativa da deformação compressiva unicamente. O modelo testado de ascensão dômica ou de extensão sob a quilha, produz uma sinforme aproximadamente simétrica aberta, que representaria cerca de 10% do “encurtamento”, restando 20% como possível encurtamento tectônico horizontal. O caráter tridimensional da estrutura é também indicado para explicar a diferença no “encurtamento” da Seção Norte e as diferenças de profundidade máxima entre as seções.

As seções geológicas Central e Norte construídas são consideradas válidas, pois apresentam manutenção de área e comprimento de linha entre as seções restauradas e deformadas, assumindo a deformação plana. As seções são consideradas admissíveis pois os modelos estruturais são compatíveis aos modelos e estilos estruturais descritos no contexto geológico da área e possíveis eventos, sendo a retrodeformação aplicada, cinematicamente possível.

8) REFERÊNCIAS

- Aguilar, C., Alkmim, F. F., Lana, C., & Farina, F., 2017. Palaeoproterozoic assembly of the São Francisco craton, SE Brazil: New insights from U–Pb titanite and monazite dating. *Precambrian Research*, 289, 95-115.
- Alkmim, F.F., Marshak, S., 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29–58.
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 33: 127–139.
- Almeida, F.F.M., 1981. O Cráton do Paramirim e sua relação com o do São Francisco. In: *Anais do Simposio do Cráton do São Francisco e suas faixas marginais*, Salvador. Soc. Bras. Geol., Núcleo Bahia/Sergipe, pp. 1–10.
- Almeida L. G., 2004. Evolução tectônica da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero. [Dissertação de Mestrado]: Minas Gerais. Ouro Preto: Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto. 110p.
- Baltazar, O.F., Zucchetti, M. 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Review*, 32: 471–499.
- Barbosa, J.S.F., Sabaté, P., 2004. Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. *Precambrian Research* 133, 1e27. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.03.001>.
- Barr, M. and Coward, M. P., 1974. A method of measurement of volume change, *Geological Magazine*, 111, 293-296.
- Bizzi L. A., Schobbenhaus C., Vidotti R. M. & Gonçalves J. H. (eds.), 2003. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*, CPRM, Brasília, 642p.
- Boyer, S. E. (1978). Structure and origin of the Grandfather Mountain window [Tese de doutorado]: North Carolina, Johns Hopkins University.
- Boyer, S. E., & Elliott, D., 1982. Thrust systems. *AAPG bulletin*, 66(9), 1196-1230.
- Braga, S. C. M., 2006. Modelagem estrutural e geofísica da porção centro-norte do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG. [Dissertação de Mestrado]: Ouro Preto, MG, Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia. 113p.
- Chemale, F., Rosière, C.A., Endo, I., 1991. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais-Um modelo. *Pesquisas em Geociências*, 18(2), 104-127.
- Chemale, F., Rosière, C.A., Endo, I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Iron Formations*, 65: 25–54.
- Cutts, K., Lana, C., Alkmim, F., Farina, F., Moreira, H., & Coelho, V., 2019. Metamorphism and exhumation of basement gneiss domes in the Quadrilátero Ferrífero: Two stage dome-and-keel evolution?: *Geoscience Frontiers*, 10(5), 1765-1787.
- Dahlstrom, C.D.A., 1969. Balanced cross-sections. *Can. Journal Earth Science*, 6: 743-757.
- Davis, B. K., 1993. Mechanism of emplacement of the Cannibal Creek Granite with special reference to timing and deformation history of the aureole. *Tectonophysics* 224, 337–362.

- Davis, B.K., 1995. Regional-scale foliation reactivation and re-use during formation of a macroscopic fold in the Robertson River Metamorphics, north Queensland, Australia. *Tectonophysics* 242, 293–311.
- Dopico, C.I.M., Lana, C., Moreira, H.S., Cassino, L.F., Alkmim, F.F., 2017. U-Pb ages and Hf-isotope data of detrital zircons from the late Neoarchean-Paleoproterozoic Minas Basin, SE Brazil. *Precambrian Research*, 291: 143–161.
- Dorr, J. V. N.; Gair, J. E.; Pomerene, J. B.; Rynearson, G. A., 1957. Revisão da da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero, Brazil. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, 31p. (Avulso 81).
- Dorr, J.V.N., 1969. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Geological Survey Professional Paper*, 110.
- Endo, I., & Nalini Júnior, H. A., 1992. Geometria e cinemática das estruturas extensionais e compressionais na borda oeste do sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG.
- Endo, I., 1997. Regimes tectônicos do arqueano e proterozóico no interior da placa sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. 243p.
- Endo, I., Oliveira, A. H., Peres, G. G., Guimarães, M. L. V., Lagoeiro, L. E., Machado, R., Zaravaglia G., Rosas, C.F., Melo, R. J., 2005. Nappe Curral: uma megaestrutura alóctone do Quadrilátero Ferrífero e controle da mineralização. *Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, Curitiba. 10, 279-282.
- Endo et al, 2019. Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000: Uma celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969). Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero: www.qfe2050.ufop.br.
- Elliott D., 1983. The construction of balanced cross sections. *Journal of Structural Geology* 5:101.
- Erslev, E. A., & Ward, D. J., 1994. Non-volatile element and volume flux in coalesced slaty cleavage. *Journal of Structural Geology*, 16(4), 531-553.
- Etheridge, M. A., Wall, V. J., Cox, S. F., & Vernon, R. H., 1984. High fluid pressures during regional metamorphism and deformation: implications for mass transport and deformation mechanisms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B6), 4344-4358.
- Farina, F., Albert, C., Dopico, C.M., Gil, C.A., Moreira, H., Hippertt, J.P., Cutts, K., Alkmim, F., Lana, C. 2015. The Archean-Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): current models and open questions. *The Journal of South American Earth Sciences*, 68: 4–21.
- Ferreira, R. F., Silva, R. G. D., & Marques, M. L. S., 2015. Relação entre grau de metamorfismo e malha de liberação de itabiritos compactos do Quadrilátero Ferrífero. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 12(2), 140-145.
- Fowler, T. J., & Winsor, C. N., 1997. Characteristics and occurrence of bedding-parallel slip surfaces and laminated veins in chevron folds from the Bendigo-Castlemaine goldfields: implications for flexural-slip folding. *Journal of Structural geology*, 19(6), 799-815.
- Gray, D. R., 1997. Volume loss and slaty cleavage development. In *Evolution of Geological Structures in Micro-to Macro-Scales* (pp. 273-291). Springer, Dordrecht.

- Groshong, R. H., 1994. Area balance, depth to detachment, and strain in extension. *Tectonics*, 13(6), 1488-1497.
- Groshong, R. H., & Epard, J. L., 1994. The role of strain in area-constant detachment folding. *Journal of Structural Geology*, 16(5), 613-618.
- Groshong, R. H., 2006. 3-D Structural Geology: A Practical Guide to Quantitative Surface and Subsurface Map Interpretation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 400p.
- Groshong Jr, R., Bond, C., Gibbs, A., Ratcliff, R., & Wiltschko, D. (2012). Preface: Structural balancing at the start of the 21st century: 100 years since Chamberlin. *Journal of Structural Geology*, 41, 1-5.
- Groshong Jr, R. H., 2019. Area-constant strain and dilation in sandbox models: Insights from whole-model area balance. *Journal of Structural Geology*, 118, 279-283.
- Herz, N., 1978. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey Professional Paper, 641, C1–C81.
- Hippertt, J., 1998. Breakdown of feldspar, volume gain and lateral mass transfer during mylonitization of granitoid in a low metamorphic grade shear zone. *Journal of Structural Geology* 20, 175–193.
- Hippertt, J., & Davis, B., 2000. Dome emplacement and formation of kilometre-scale synclines in a granite–greenstone terrain (Quadrilátero Ferrífero, southeastern Brazil). *Precambrian Research*, 102(1-2), 99-121.
- Hippertt, J., Rocha, A., Lana, C., Egydio-Silva, M., & Takeshita, T., 2001. Quartz plastic segregation and ribbon development in high-grade striped gneisses. *Journal of Structural Geology*, 23(1), 67-80.
- Hossack, J. R., 1979. The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction: A review. *Journal of the Geological Society*, 136(6), 705-711.
- Jordt-Evangelista, H., Alkmim, F.F., Marshak, S., 1992. Metamorfismo progressivo e a ocorrência dos três polimorfos de Al_2SiO_5 (Cianita, Andaluzita e Silimanita) na formação Sabará em Ibirité, Quadrilátero Ferrífero, MG. *REM: Revista da Escola de Minas, Ouro Preto*, 45 (1 e 2), 151–160.
- Judge, P. A., & Allmendinger, R. W., 2011. Assessing uncertainties in balanced cross sections. *Journal of Structural Geology*, 33(4), 458-467.
- Kerrick, R., Beckinsdale, R. D. and Shackleton, N., 1978. The physical and hydrothermal regime of tectonic vein systems: evidence from stable isotope and fluid inclusion studies. *Neues Jahrb, Mineral Abh.*, 131, 225-239.
- Kirkwood, D., 1999. Palinspastic restoration of a post-Taconian successor basin deformed within a transpressive regime, northern Appalachians. *Tectonics*, 18(6), 1027-1040.
- Ladeira, E. A., & Viveiros, J. F. M. D., 1984. Hipótese sobre a estruturação do Quadrilátero Ferrífero com base nos dados disponíveis. *Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo de Minas Gerais*.
- Lana, C., Kisters, A., & Stevens, G., 2010. Exhumation of Mesoarchean TTG gneisses from the middle crust: Insights from the Steynsdorp core complex, Barberton granitoid-greenstone terrain, South Africa. *Bulletin*, 122(1-2), 183-197.

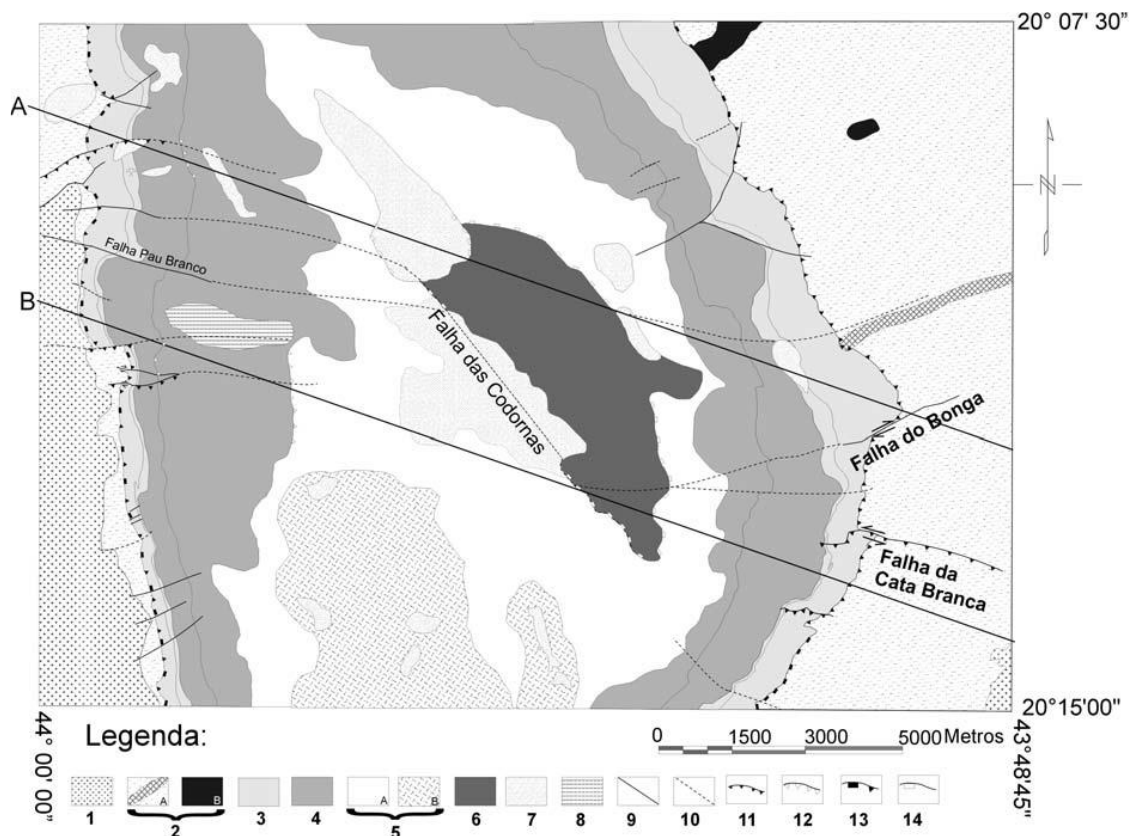
- Lana, C., Alkmim, F.F., Armstrong, R., Scholz, R., Romano, R., Nalini, H.A. 2013. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. *Precambrian Research*, 231: 157–173.
- Lingrey, S., Vidal-Royo, O., 2015. Evaluating the quality of bed length and area balance in 2D structural restorations. *Interpretation*. <http://dx.doi.org/10.1190/INT-2015-0126.1>
- Lobato, L.M., Baltazar, O.F., Reis, L.B.; Achtschin, A.B., Baars, F.J., Timbó, M.A., Berni, G.V, Mendonça, B.R.V. de, Ferreira, D.V., 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005.
- Loczy, L. & Ladeira, E. A. 1976. *Geologia Estrutural e Introdução à Geotectônica*. São Paulo, Edgard Blücher. 528 p.
- Madeira, de R. M., de Souza Martins, M., Martins, G. P., & Alkmim, F. F., 2019. Caracterização faciológica e evolução sedimentar da Formação Moeda (Supergrupo Minas) na porção noroeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Geologia USP. Série Científica*, 19(3), 129-148.
- Marrett, R., & Allmendinger, R. W., 1992. Amount of extension on "small" faults: An example from the Viking graben. *Geology*, 20(1), 47-50.
- Marshak, S., Alkmim, F.F., 1989. Proterozoic Contraction/Extension tectonics of the Southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, 8: 555–571.
- Marshak, S., Tinkham, D., Alkmim, F., Brueckner, H., Bornhorst, T., 1997. Dome-and-keel provinces formed during Paleoproterozoic orogenic collapse — core complexes, diapirs, or neither? Examples from the Quadrilátero Ferrífero and the Penokean orogen. *Geology*, 25: 415–418.
- Maxwell C.H. 1972. Geology and ore deposits of the Alegria District, Minas Gerais, Brazil. Antônio dos Santos, Gongo Sôco, and Conceição do Rio Acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil. USGS Prof. Paper 341-J, 72 p.
- Mitra, S., & Namson, J. S., 1989. Equal-area balancing. *American Journal of Science*, 289(5), 563-599.
- Moreira, H., Lana, C., Nalini, H.A., 2016. The detrital zircon record of an Archaean convergent basin in the Southern São Francisco Craton, Brazil. *Precambrian Research*, 275: 84–99.
- Namson, J.S., Wallace, W.K., 1986. A structural transect across the Brooks Range. Alaska, Geological Society of America Abstracts with Programs 16, 163.
- Noce, C. M., 1995. Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. 128p.
- Nunes, F.S. 2016. Contribuição à estratigrafia e geocronologia U-Pb de zircões detríticos da Formação Moeda (Grupo Caraça, Supergrupo Minas) na Serra do Caraça, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. [Dissertação de Mestrado]: Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia, 79 p.
- O'Rourke, J.E. 1957. The stratigraphy of metamorphic rocks of the Rio de Pedras and Gandarela quadrangles, Minas Gerais, Brazil. University of Winsconsin, Winsconsin.
- Passchier, C. W. & Trouw, R. A., 2005, *Microtectonics*, Springer Science & Business Media.

- Pires, F. R. M., 1995. Textural and mineralogical variations during metamorphism of the Proterozoic Itabira Iron Formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 67(1): 77-105.
- Pires P. F. R., 2005. Gênese dos depósitos auríferos em metaconglomerados da Formação Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG: O papel do metamorfismo e associação com a matéria carbonosa. [Tese de Doutorado], Campinas, SP, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, 209p.
- Ragan D. M., 2009. *Structural Geology: An Introduction to Geometrical Techniques*. Cambridge University Press. 4th ed., 602p.
- Ramsay, J. G., 1967. *Folding and fracturing of rocks*. Mc Graw Hill Book Company, 568.
- Ramsay, J.G., & M.I. Huber, 1987, *The Techniques of Modern Structural Geology: Volume 2: Folds and Fractures*: Academic Press, London, 391p.
- Reis, L. A., Martins Neto, M. A., Gomes, N. S., Endo, I., & Evangelista, H. J., 2002. A bacia de antepaís paleoproterozóica Sabará, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.
- Renger, F. E., Noce, C. M., Romano, A. W., & Machado, N., 1994. Evolução sedimentar do Supergupo Minas: 500 Ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*. 2(1): 1-11.
- Roeser, H., 1987. Metassomatismo de rochas ultramáficas: a tentativa de uma quantificação. 1 Congresso Brasileiro de Geoquímica.
- Rosière, C. A., & Chemale Jr, F., 1991. Textural and structural aspects of iron ores from Iron Quadrangle, Brazil. In: 25 years, Society for Geology applied to Mineral Deposits, anniversary meeting (pp. 485-488).
- Rosière, C. A., Chemale, J. F., Quade, H., Siemes, H., Fischel, D., & Souza, E., 1993. Análise microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero-texturas desenvolvidas e um modelo para sua origem. In *Workshop Geologia Estrutural dos Minérios de Ferro*. Belo Horizonte: Boletim SBG Núcleo Minas Gerais (Vol. 12, pp. 362-366).
- Rosière, C. A., Quade, H., Siemes, H., Chemale Jr, F., & de Souza, E. R., 1996. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte II—trama, textura e anisotropia de susceptibilidade magnética. *Geonomos*.
- Rosière, C. A., & Chemale Jr, F., 2000. Itabirites e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero—uma visão geral e discussão. *Geonomos*.
- Rosière, C. A., Siemes, H., Quade, H., Brokmeier, H. G., & Jansen, E. M., 2001. Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. *Journal of Structural Geology*, 23(9), 1429-1440.
- Rosière et al., 2008, The itabirites of Quadrilátero Ferrífero and Related High-Grade Iron Ore Deposits: An Overview; *in* Hagemann, S., 2008. Banded iron formation-related high-grade iron ore. C. Rosière, J. Gutzmer, & N. J. Beukes (Eds.). Society of Economic Geologists, Incorporated.
- Romano, R., Lana, C., Alkmim, F.F., Stevens, G., Armstrong, R., 2013. Stabilization of the southern portion of the São Francisco Craton, SE Brazil, through a long-lived period of potassic magmatism. *Precambrian Research*, 224: 143–159.
- Rowland S.M., Duebendorfer E. M., Schiefelbein I. M. 2007., *Structural analysis and synthesis: laboratory course in structural geology*. 3rd ed. Blackwell Publishing Ltd. 322p.

- Schorscher H. D., 1979. Evolução geotectônica e petrogenética do embasamento arqueano do Quadrilátero Ferrífero. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 51, p. 766-768.
- Schorcher, J.H.D., 1992. Arcabouço petrográfico e evolução crustal de terrenos precambrianos do sudeste de Minas Gerais, Quadrilátero Ferrífero, Espinhaço meridional e Domínios granito-gnáissicos adjacentes. [Tese de Livre Docência]: São Paulo, SP, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 2 vols., 394pp.
- Tanner, P. G. (1989). The flexural-slip mechanism. *Journal of Structural Geology*, 11(6), 635-655.
- Teixeira, W., Sabate, P., Barbosa, J., Noce, C.M., Carneiro, M.A. 2000. Archean and Paleoproterozoic tectonic evolution of the Sao Francisco Craton, Brazil. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Fo, A., Campos, D.A. (eds.). *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, p. 101–137.
- Weber, K., 1981. Kinematic and metamorphic aspects of cleavage formation in very low-grade metamorphic slates. *Tectonophysics*, 78(1), 291-306.
- Woodward, N. B., Gray, D. R., & Spears, D. B., 1986. Including strain data in balanced cross-sections. *Journal of Structural Geology*, 8(3-4), 313-324.
- Woodward, N.B., Boyer, S.E., and Suppe, J., 1989, Balanced geological cross-sections: Na essential technique in geological research and exploration: *American Geophysical Union Short Course in Geology* 6, 132 p., doi:10.1029/SC006.
- Wright, T. O., & Platt, L. B., 1982. Pressure dissolution and cleavage in the Martinsburg Shale. *American Journal of Science*, 282(2), 122-135.
- Zucchetti M. & Baltazar O. F. (orgs) 1998. Projeto Rio das Velhas. Programa de estudos de distritos mineiros: Texto explicativo do mapa geológico integrado, escala 1: 100,000. Departamento Nacional da Produção Mineral/CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, Brasil, 121 pp.

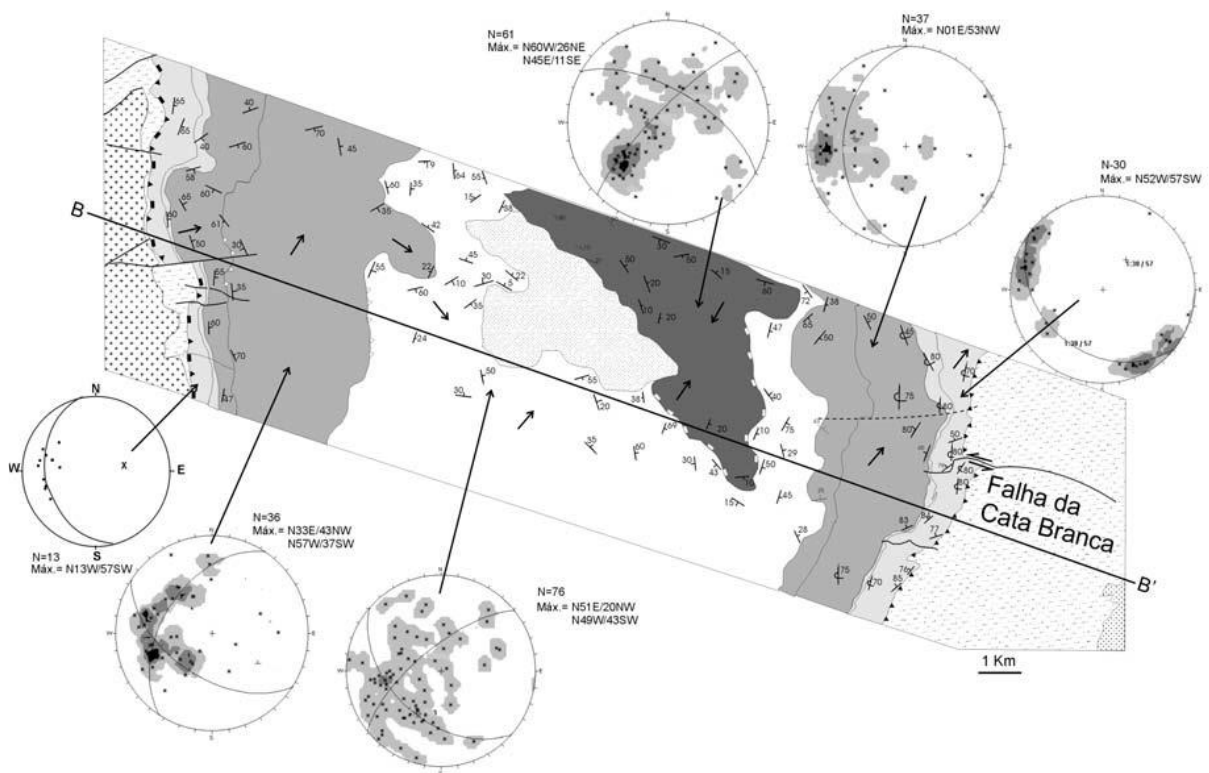
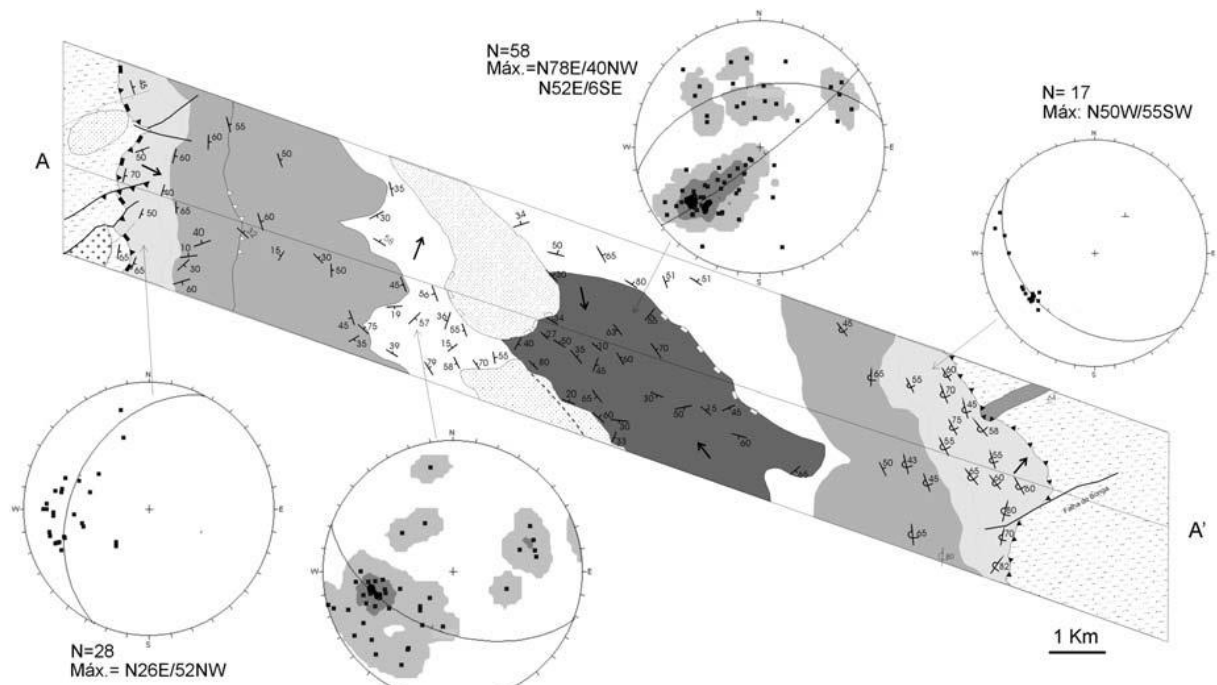
ANEXO I

Mapa geológico e legenda de Braga (2006)



Legenda: 1: Complexos metamórficos; 2: Supergrupo Rio das Velhas (A, xistos, B, metaultramáficas), 3: Grupo Caraça 4: Grupo Itabira; 5: Grupo Piracicaba (A, indiviso, B, Formação Fecho do Funil); 6: Grupo Sabará; 7: Depósitos Cenozóicos; 8: dique máfico metamorfoisado; 9: Traço de falhamentos e contatos cartografados; 10: Traço de falhamentos e contatos identificados a partir dos dados geofísicos; 11: Falhas reversas cartografadas; 12: Falhas reversas identificadas a partir dos dados geofísicos; 13: Falhas normais reativadas identificadas em mapeamentos; 14: falhas normais reativadas inferidas a partir dos dados geofísicos.

ANEXO II
Mapa com medidas estruturais de Braga (2006)



ANEXO III

Folha Itabirito, SF-23-X-A-III-1 e Casa de Pedra, SF-23-X-A-III-3

[illegible]

[illegible]

NP
Z
CE
27°N
27°S
2005

ADIMB
Associação de Desenvolvimento
Imobiliário do Rio de Janeiro
www.adimb.com.br

GeoGress
geoprocessamento

Borel Rock

Associação de Desenvolvimento
Imobiliário do Rio de Janeiro
www.adimb.com.br

CPRM
Centro Profissional de Registro
Imobiliário do Rio de Janeiro

MBR
Mapas e Bases de Dados

Associação de Desenvolvimento
Imobiliário do Rio de Janeiro
www.adimb.com.br

Companhia
Vale do Rio Doce

[illegible]

21	Dição e margem das caracidas	—	Contato geológico
22	Dição e margem das caracidas invertidas	—	Contato geológico aproximado
23	Dição e margem das caracidas, estratificação cruzada do quartzito	—	Faixa indomorfada
24	Dição e das camadas verticais	—	Faixa indomorfada inferior
25	Dição e margem de foliação	—	Faixa indomorfada inferior
26	Foliação com margem de foliação, fase 2	—	Faixa indomorfada proximal
27	Dição de foliação vertical	—	Faixa de distensão
28	Dição e margem de subordinação	—	Faixa de distensão apromada
29	Dição e margem de divergência	—	Faixa de empuxo
30	Dição de divergência do contato com margem de foliação, fase 3	—	Faixa de empuxos com componente oblíquo
31	Dição e margem de divergência	—	Faixa de empuxo
32	Dição e caminho de foliação	—	Faixa transcorrente distal
33	Liniação de foliamento ou mineral	—	Faixa transcorrente distal apromada
34	Liniação B	—	Faixa transcorrente
35	Liniação B, fase 2	—	Faixa transcorrente
36	Liniação C	—	Faixa transcorrente sinistral apromada
37	Liniação D	—	Faixa transcorrente sinistral normal
38	Cementação de óleo de doura	—	Faixa preenchida (diabásio)
39	Cementação de óleo de dobraduras múltiplas	—	—
40		—	—
41		—	—
42		—	—
43		—	—
44		—	—
45		—	—
46		—	—
47		—	—
48		—	—
49		—	—
50		—	—
51		—	—
52		—	—
53		—	—
54		—	—
55		—	—
56		—	—
57		—	—
58		—	—
59		—	—
60		—	—
61		—	—
62		—	—
63		—	—
64		—	—
65		—	—
66		—	—
67		—	—
68		—	—
69		—	—
70		—	—
71		—	—
72		—	—
73		—	—
74		—	—
75		—	—
76		—	—
77		—	—
78		—	—
79		—	—
80		—	—
81		—	—
82		—	—
83		—	—
84		—	—
85		—	—
86		—	—
87		—	—
88		—	—
89		—	—
90		—	—
91		—	—
92		—	—
93		—	—
94		—	—
95		—	—
96		—	—
97		—	—
98		—	—
99		—	—
100		—	—

 Drenagem Área urbana Rodovia pavimentada Rodovia não pavimentada

O Projeto georeferenciado, pela primeira vez, a geologia disponível para o Quadrilátero Ferrífero-QF, resultante do projeto de mapeamento geológico pelo convênio United States Geological Survey-USGS/Departamento Nacional da Produção Mineral-DNPM (1964-1964) e do mapeamento geológico do convênio DNPM/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais-CPRM (1992-1996). O primeiro focou o Supergrupo Minas - 47 quadriculados integrais, cujas parcelas na escala 1:25.000 - integrado em 1:150.000 (Dort 1998). O segundo cartografou apenas o Supergrupo Rio das Velhas no interior do QF - 24 folhas integrais ou parcelas na mesma escala - integrado em 1:100.000 (Baltazar e Silva 1996).

O resultado é um projeto em Sistema de Informações Geográficas-SIG, no software ArcView[®] 3.1a - formato shape (.shp), constando da integração cartográfica e geológica dos dados ilustrados dos supergrupos Minas e Rio das Velhas. Para complementar a divulgação do projeto, também foram produzidos mapas geológicos na escala 1:50 000, em formato Adobe® pdf, também integrados ao projeto SIG. Anexos detalha da análise do meio cartográfico: geoesfera, da geologia dos mapas e da elaboração do SIG achem-se na Nota Explicativa com extenso, que integra o SIG e cada um dos mapas.

Não há modificações na geologia dos mapeamentos originais. Trabalhos de campo e interpretação de imagem de satélite Landsat 7 auxiliaram a integração necessária. Inconsistências cronoestratigráficas são resolvidas usando os melhores controles estratigráficos disponíveis (Baltazar e Zucchetti, 2005 citações citam obra).

Instituição Coordenadora:
Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Instituto de Geociências-IGC (Departamento de Geologia), Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira de
Costa-CPMTC

Financiadoras: AngloGold Ashanti; Minerações Brasileiras Reunidas-MBR, Iamgold Brasil; São Bento Mineração; Companhia Vale do Rio Doce-CVRD (Diretoria de Fomento); Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais-CODEMIG

Cofinanciadoras:
Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais-CPRM, Serviço Geológico do Brasil (apoio técnico especializado de geólogos; troca de informações; cessão de documentos; acompanhamento em campo); GeoGenes (apoio financeiro e técnico especializado de geólogos; infra-estrutura operacional); Roots Rock (apoio financeiro e técnico especializado de geólogos)

Responsabilidade Técnica:
Lydia Maria Lobato, Ph.D., do Depto. de Geologia e pesquisadora do CPMTM - UFMG (coordenadora);
Arlana Rose E. Arshatchin, M.Sc., Geóloga (exerciciamento operacional).

Francisco Jacobus Baars, M.Sc. - Diretor Roca Rock (projeto conceitual do SIG);
Ovídio Ferreira Baltazar - Geólogo CPRM (Geologia do Quadrilátero Fértil);
Marcos Antônio Timbo, M.Sc. - Prof. Depto. de Cartografia da UFMG e Leandro Barros Reis, M.Sc. - Prof. Depto. de Ciências Biológicas, Ambientais e de Saúde na Centro Universitário de Rio Horizonte (UFHRJ) - Diretor Geral (contato: leandro.barros.reis@ufhrj.br ou contato@geocintia.com.br)

Elaine Voll - Geóloga e Karin Voll - Estudante de Geologia, UFMG (projeto gráfico);
Sérgio Lima da Silva - Geólogo CPRM (apoio à Geologia);

Gabriel Valentim Bormi e Vitor Diniz Silveira (estudantes de Geologia - UFMG);
Breno Reis Versiani de Mendonça e Daniel Veloso Ferreira (estudantes de Geografia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais-PUC-MG)

Equipe Editora-CODEMIG:

Instituições Intervenientes: Associação dos Geólogos do Estado de São Paulo (AGEP), Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDAP), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).

Citação Bibliográfica do SIG:
Lobato, L.M.; Baltazar, O.F.; Reis, L.B.; Achtschin, A.B.; Baars, F.J.; Timbó, M.A.; Berni, G.V.; Mendonça, B.R.V. de; Ferreira, D.V. 2005. Projeto Geológico

Citação Bibliográfica do Mapa Geológico com Nota Explicativa:
 Sotgiu, R. F.; Branco, F. L. (2006). Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro, escala 1:500.000. Rio de Janeiro: DNPM, 2006. 1 CD-ROM.

com Nota Explicativa. In: Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com nota explicativa. Lobato *et al.* (2005) CODEMIG. Belo Horizonte

O GEOLOGIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

GRACÃO E CORRECÇÃO CARTOGRÁFICA EM SIG

UFMG   CODÉMIG  MINAS GERAIS
GOVERNO DO ESTADO
