

## 8. INTERPRETAÇÃO DOS MODELOS

### 8.1 Comparação com modelos anteriores de Niquelândia e Barro Alto

O Complexo Cana Brava, teve modelos (2 ½D direto e 3D inverso) estabelecidos por Carminatti (2001), utilizando uma cobertura razoável de pontos e discriminando a contribuição gravimétrica das rochas vulcano-sedimentares das rochas máficas-ultramáficas acamadadas. Os complexos de Niquelândia e Barro Alto tiveram modelos gravimétricos estabelecidos anteriormente por Feininger et al. (1991) e Assumpção et al. (1985), respectivamente. Estes modelos foram estabelecidos utilizando uma cobertura menor de pontos (principalmente para Barro Alto); utilizam apenas a modelagem 2 ½D (Talwani et al., 1959); levam em consideração apenas a massa e área aflorante dos maciços máficos acamadados, desprezando a presença das seqüências acamadadas; e utilizam diferentes meios de estabelecimento do regional para a separação do residual. Os modelos estabelecidos neste trabalho para os mesmos complexos foram estabelecidos com um número maior de informações, discriminando em todos a contribuição das seqüências vulcano-sedimentares das rochas acamadadas, e aplicando métodos 2 ½D (Rasmussen & Pedersen, 1979) e 3D (Götze & Lahmeyer, 1988), ambos de modelagem direta, gerando modelos diferentes dos anteriores. Comparando-se os modelos 2 ½D obtidos neste trabalho com os anteriores pode-se avaliar as melhorias alcançadas pelo incremento de informações e diferentes metodologias.

## Cana Brava

Comparando os modelos 2 1/2D obtidos neste trabalho (fig. 6.10) com aqueles obtidos por Carminatti (2001, fig. 8.1) pode-se notar poucas mudanças quanto à geometria, profundidade e relações de massa.

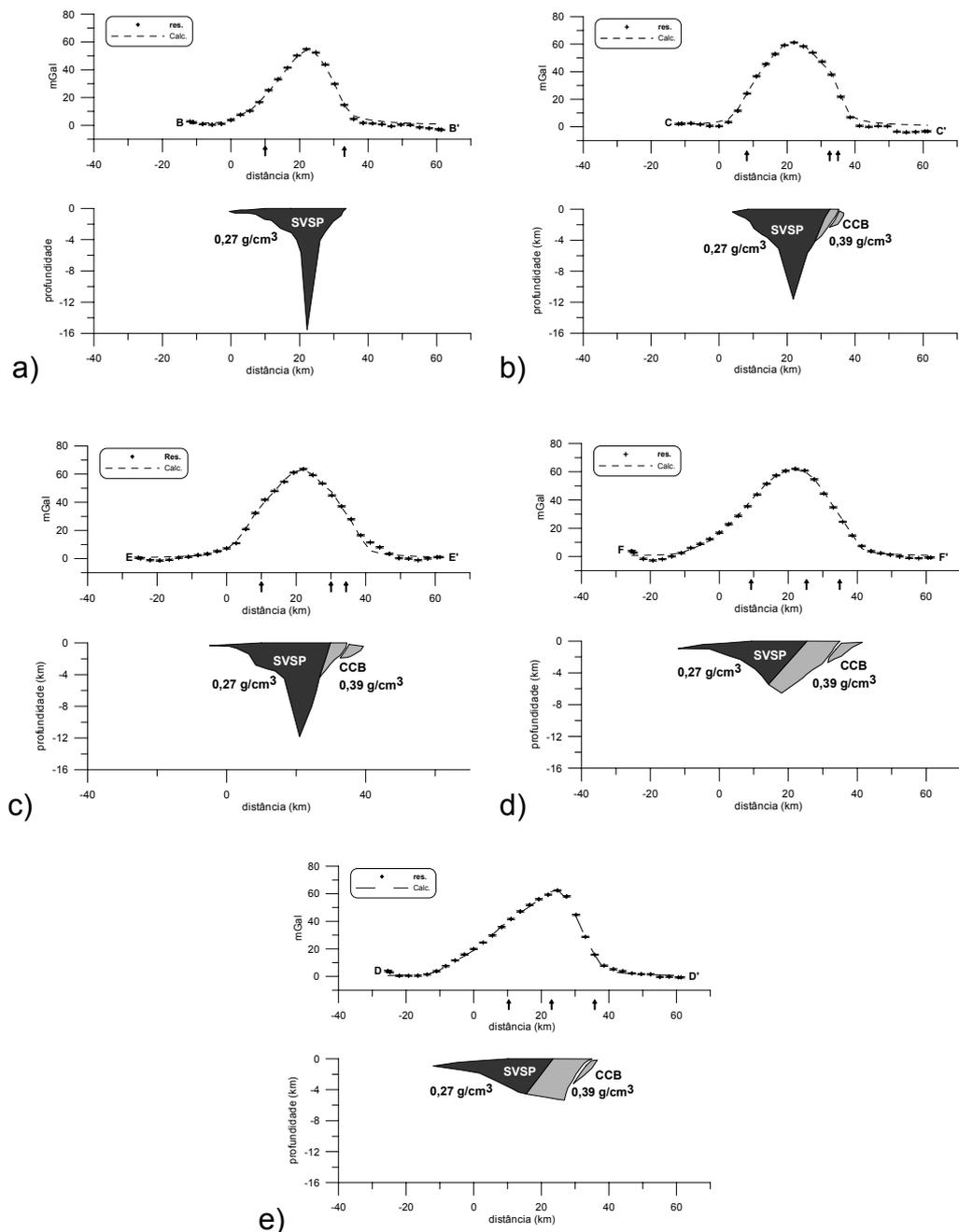


Figura 8.1- Modelos gravimétricos de Carminatti (2001) para o Complexo Cana Brava: a) BB'; b) CC'; c) EE'; d) FF'; e) DD', correspondentes aos perfis AA', BB', DD', EE' e CC' deste trabalho. Perfil da anomalia calculada (linha pontilhada) gerado pelo programa GRAVMAG, sobre o perfil Bouguer residual (cruzes), e modelo para o corpo da Sequência Vulcano-Sedimentar Palmeirópolis (SVSP) e Complexo Cana Brava), as setas indicam os limites aflorantes.

As maiores diferenças são notadas nos modelos da parte norte (AA', BB' e DD', fig. 6.10 a...c) que tiveram reduzidas as suas profundidades máximas em torno de 2km e se tornaram mais largos, diminuindo um pouco a característica de raiz profunda obtida nos modelos anteriores (fig. 8.1a...c). Os perfis DD' e EE' (fig. 6.10c, d) também tiveram algumas mudanças, tendo sido acrescentada mais uma lasca a leste para ajustar a curva calculada à medida, o que não foi necessário nos perfis W&E4 E-E' e W&E5 F-F' (fig. 8.1 c, d). O perfil mais afetado quanto à forma modelada foi o BB' (fig. 6.10b), que tem uma forma cuneiforme bem simétrica, com um afinamento gradual até a base. Contrastando um pouco com o modelo anterior que apresentava um afinamento mais abrupto na sua base (fig. 8.1b). Como dito no capítulo seis (6) isto se deve a presença de pontos que forçaram a anomalia a ficar centrada ao complexo nesta região.

Analisando de uma forma geral a geometria encontrada neste trabalho pode-se ver que diferiu muito pouco com o resultado do trabalho anterior (Carminatti, 2001) para este método. A geometria externa continuou cuneiforme, as relações de contato e volume da seqüência vulcano-sedimentar e das rochas máficas acamadadas continuaram praticamente as mesmas. Isto se deve pela repetição do mesmo método 2 ½D utilizado anteriormente (Rasmussen & Pedersen, 1979) e principalmente pelo reduzido incremento de pontos de medida conseguido neste trabalho para este complexo, que não mudaram significativamente a forma da anomalia encontrada por Carminatti (2001)

A repetição da geometria cuneiforme encontrada neste trabalho tanto no método 2 ½D como no 3D, reforça o resultado do trabalho anterior e indica que talvez esta seja uma geometria muito próxima da que realmente exista em subsuperfície.

## Niquelândia

Para este complexo existe um modelo 2 ½D anterior determinado por Feininger et al. (1991, fig. 8.2)

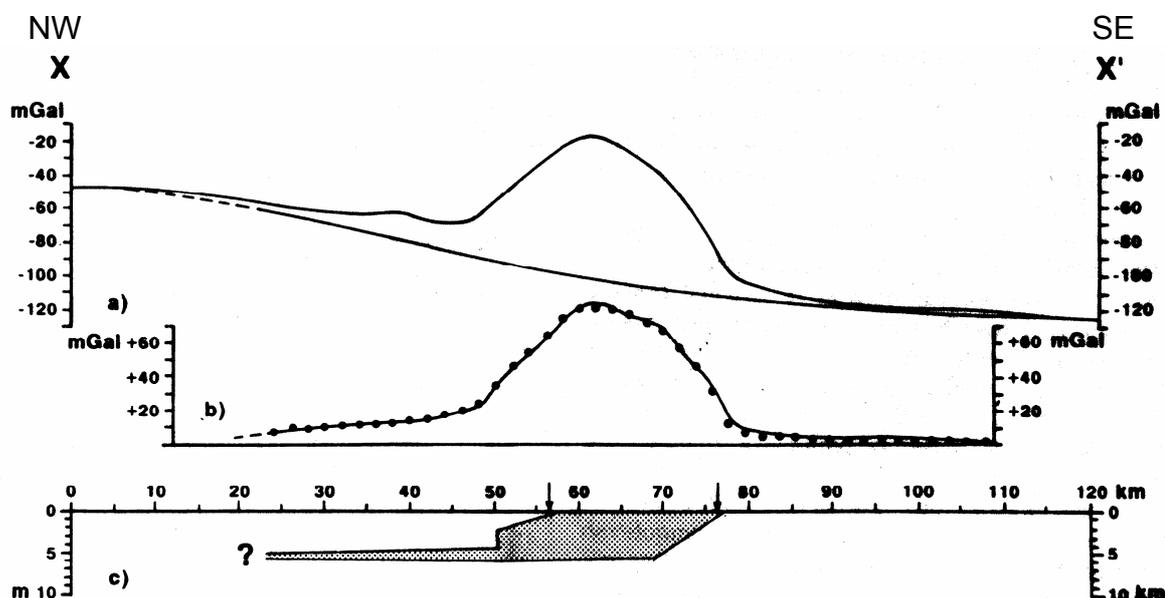


Figura 8.2 - Modelo gravimétrico para o corpo de Niquelândia proposto por Feininger et al. (1991), as setas indicam os limites aflorantes utilizados. Modificado de Feininger et al. (op. cit.).

Para esta modelagem Feininger et al. (1991) dispunham de menos pontos na cobertura do corpo, estabeleceu um regional médio utilizando dois perfis como base e levaram em consideração apenas a presença de massa das rochas acamadas como fonte geradora da anomalia gravimétrica. A geometria encontrada é muito parecida com um trapezoedro possuindo uma grande cauda para oeste na sua base horizontal cuja profundidade máxima é em torno de 5km.

Comparando as formas encontradas para as rochas acamadas do complexo (fig. 6.12 c) pode-se ver que são mais ou menos parecidas, com ambos os lados mergulhando para oeste formando uma unidade mais ou menos trapezoédrica. As profundidades também são parecidas oscilando em torno de 5 a 6km. As diferenças são notadas nos detalhes do novo modelo: base acidentada com presença de uma pequena raiz; forma geral cuneiforme, por considerar a presença da seqüência vulcano-sedimentar; e não apresentar a longa cauda para oeste por baixo das rochas encaixante.

As semelhanças ocorreram devido à localização dos dois perfis (Feininger et al., 1991; e este trabalho) serem muito próximas, cortando o complexo próximo do centro (figs. 6.5 BB' e 8.3 XX'), onde ocorre a maior presença das rochas acamadadas e as anomalias são mais simétricas. Outro fator que colaborou para as semelhanças encontradas entre os modelos foi que a cobertura de pontos que Feininger et al. (1991) dispunham, possibilitando uma definição muito boa da anomalia, sendo quase idêntica à utilizada neste trabalho.

As diferenças surgiram nos diferentes números de vértices no modelo em conjunto com o método de modelagem, o estabelecimento do regional, e a consideração da seqüência vulcano-sedimentar. O método de modelagem utilizado por Feininger et al. (1991) é o de Talwani et al. (1959), com a utilização de poucos vértices para definição da forma do corpo. O método utilizado neste trabalho foi o de Rasmussen & Pedersen (1979), através do programa GravMag (Pedley et al., 1993), com um número maior de vértices, podendo ser possível definir pequenas variações de espessura no corpo. O regional estabelecido por Feininger et al. (1991) é feito pelo uso de dois perfis auxiliares, um de cada lado da anomalia principal, interpolando os valores destes perfis para a posição do perfil a ser modelado. Deste modo o regional ficou um pouco mais negativo do que o estabelecido para este trabalho, causando a presença de valores positivos além do limite oeste do complexo e por conseqüência a necessidade do estabelecimento da cauda mergulhando para oeste. Ao considerar a presença da seqüência vulcano-sedimentar neste trabalho a geometria encontrada se tornou mais cuneiforme, completando a porção do corpo referente a ela em subsuperfície, o que faltou no modelo de Feininger et al. (1991).

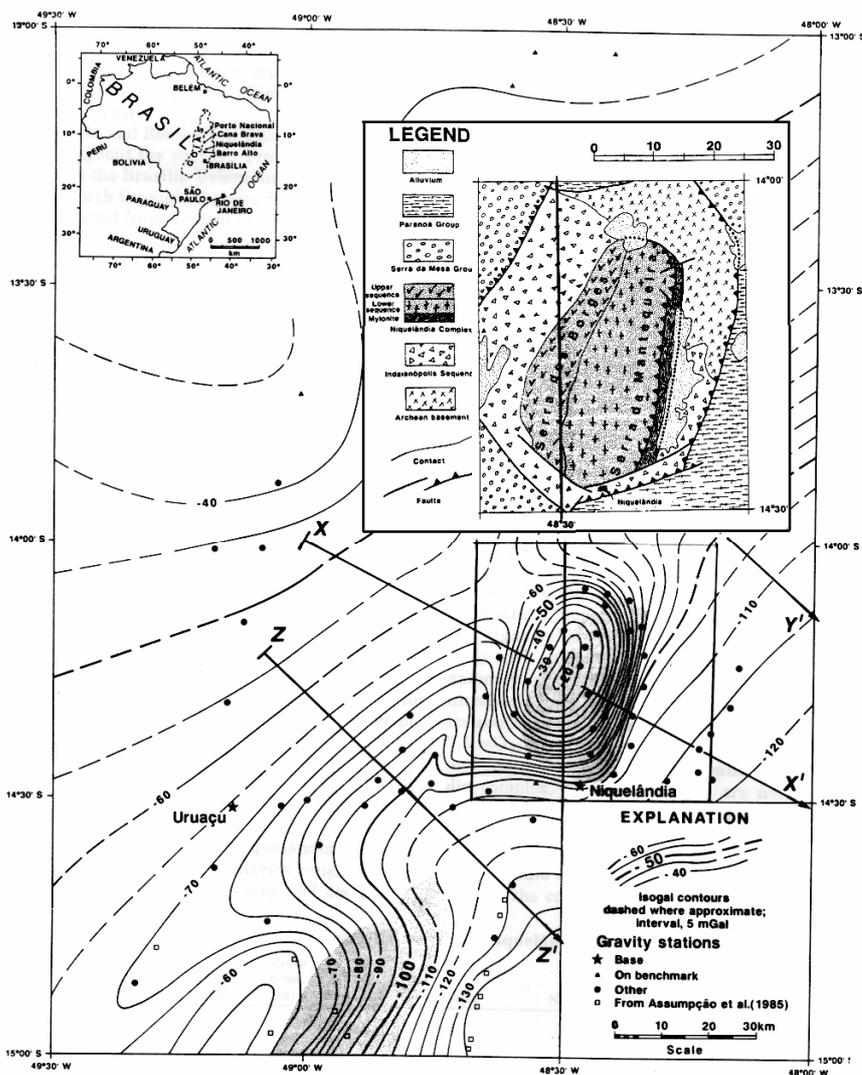


Figura 8.3- Mapa de anomalia Bouguer simples e geológico do complexo máfico-ultramáfico acamadado de Niquelândia. Comparando a posição do centro da anomalia e do centro do afloramento em relação ao meridiano de 48° 30' W pode-se notar que a anomalia gravimétrica está deslocada para oeste em relação a área aflorante do complexo. Modificado de Feininger et al. (1991).

### Barro Alto

Para este complexo existe um modelo 2 ½D anterior determinado por Assumpção et al. (1985, fig. 8.4). Para estabelecer este modelo Assumpção et al. (1985) dispunham de poucos pontos gravimétricos, obtendo uma anomalia muito ampla nas regiões devido à falta de pontos; estabeleceram o regional por meio de modelagem sintética utilizando as informações disponíveis sobre as profundidades crustais da região; e tal como Feininger et al. (1991) levaram em consideração apenas a presença de massa das rochas acamadas. A determinação do regional por

Assumpção et al. (1985) foi feita como sendo devido à diferença de espessura crustal entre os blocos Porangatu e Brasília, sendo obtido com um contraste de densidade de  $0,35 \text{ g/cm}^3$  entre a crosta inferior e manto superior, e espessuras crustais de 30 e 36 km para os blocos Porangatu e Brasília respectivamente (fig. 8.4 topo).

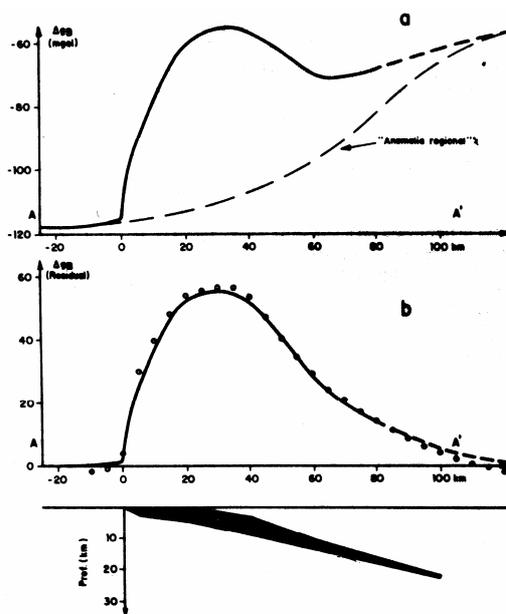


Figura 8.4 - Modelo gravimétrico proposto por Assumpção et al. (1985) para o corpo Barro Alto. Modificado de Assumpção et al. (op. cit.).

Comparando o modelo encontrado por Assumpção et al. (1985) com o modelo obtido neste trabalho (fig. 6.15a) pode-se notar algumas semelhanças e algumas diferenças. As semelhanças são notadas quando é observada a porção superior das rochas acamadas do Complexo Barro Alto nos dois modelos. Em ambos os casos, os limites do corpo mergulham para norte por baixo da seqüência vulcano-sedimentar, e se o modelo de Assumpção et al. (1985) for cortado por volta dos 5 a 6km, terá uma forma muito parecida com o modelo proposto por este trabalho para estas rochas. Estas semelhanças surgem pela localização muito próxima dos perfis modelados (fig. 6.7, perfil EE' e fig. 8.5, perfil AA', a direita) e pela semelhança em forma e amplitude da anomalia gravimétrica Bouguer (assimétrica e por volta dos 60mGal, fig. 5.32b e 8.4a).

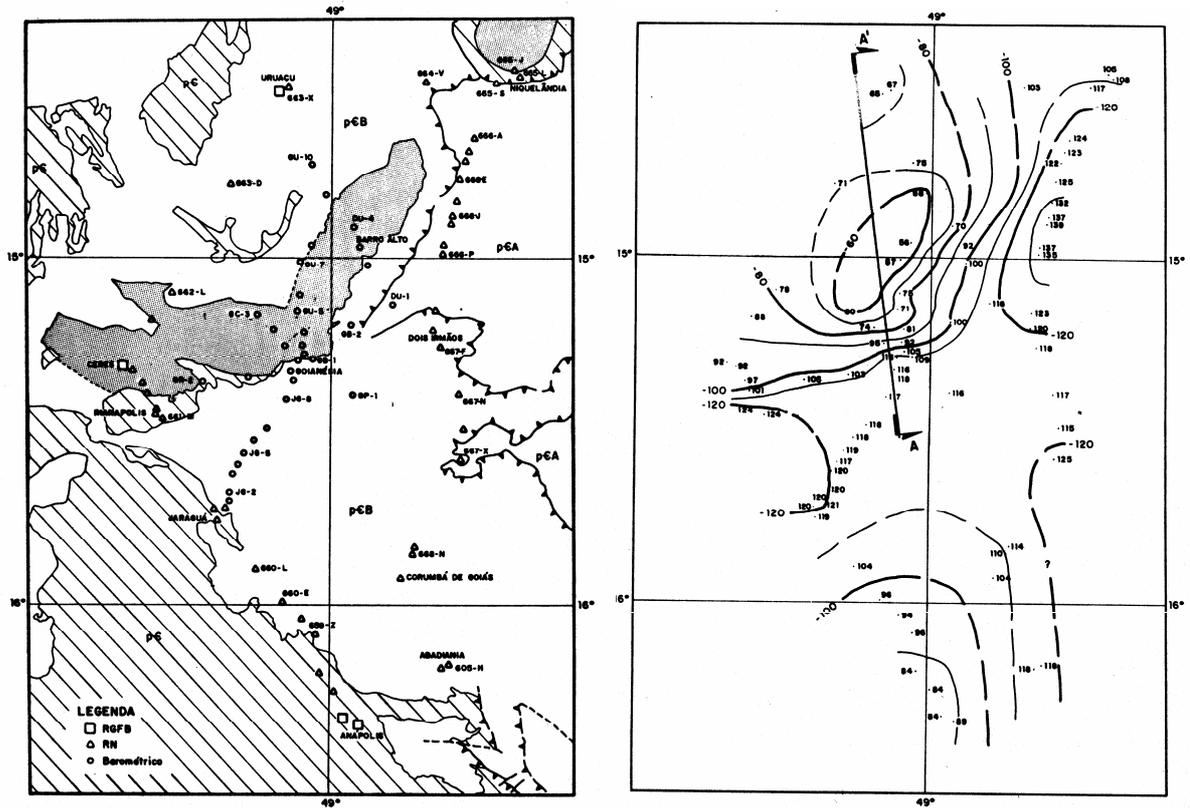


Figura 8.5- Mapa geológico (esq.) e de anomalia Bouguer (dir.) do Complexo de Barro Alto. Comparando a posição do centro da anomalia e do centro do afloramento em relação ao meridiano de 49° W pode-se notar que a anomalia gravimétrica está deslocada para oeste em relação à área aflorante do complexo. Modificado de Assumpção et al.(1985).

As diferenças encontradas foram: a forma geral do corpo que passou de uma grande cunha mergulhando para norte para uma cunha simétrica e +/- centrada em relação à área aflorante e uma drástica redução de profundidade de 20km para menos de 4km. Estas diferenças se devem principalmente ao numero maior de pontos gravimétricos disponíveis neste trabalho, definindo melhor a anomalia gravimétrica, estabelecimento diferenciado do regional e da consideração da presença de massa devido à seqüência vulcano-sedimentar. O maior número de pontos de medida possibilitou uma melhor definição da forma da anomalia, podendo ser estabelecidos os limites, amplitudes e variação horizontais mais próximos do real. Deste modo foram obtidos perfis gravimétricos que representam melhor a anomalia gerada por todo o complexo em toda a sua extensão, podendo ser encontrado modelos mais próximos da forma real do complexo. O método de estabelecimento do regional utilizado por Assumpção et al. (1985) colocou o campo

regional em uma posição mais negativa e com uma forma voltada para baixo, o que gerou uma anomalia residual com uma maior amplitude e se estendendo muito para norte, além dos limites aflorantes, quando comparado ao regional e residual encontrados para este trabalho. Deste modo o modelo estabelecido neste trabalho ficou mais centrado aos limites do complexo e com uma profundidade geral bem menor. Se Assumpção et al. (1985) tivessem utilizado um regional mais positivo e menos curvo, o residual encontrado seria muito parecido com o estabelecido neste trabalho e possivelmente o mesmo ocorreria com o modelo. A consideração da massa da seqüência vulcano-sedimentar fez com que a forma geral do corpo ficasse cuneiforme mais simétrica, completando a porção superficial faltante no modelo de Assumpção et al. (1985).

## **8.2 Interpretação dos modelos**

Como visto no capítulo seis, os modelos 2 ½D e 3D obtiveram praticamente a mesma forma para cada complexo, podendo ser interpretados em conjunto.

Os modelos encontrados para o Complexo Cana Brava podem ser divididos em dois grandes grupos: um ao norte formados pelos perfis AA', BB' e DD; e outro ao sul, formado pelos perfis EE' e CC'. Dos três primeiros perfis o AA' e o DD' se parecem com uma geometria do tipo cuneiforme assimétrica com a presença de uma raiz que se estende em profundidade. O perfil BB' possui uma geometria cuneiforme mais simétrica e sem a formação da raiz. Estes três perfis possuem uma geometria que se assemelha muito a estrutura tipo "pop up" (fig. 8.6 a, b) em sistemas compressivos (Butler, 1982), principalmente o perfil BB' (fig. 6.10b). Os dois últimos modelos (6.10 c, d) se assemelham muito a uma estrutura do tipo desenvolvida por empurrão (fig. 8.6 c; Mandl e Crans, 1981). Analisando todos os

modelos pode-se ver que as relações de volume entre a seqüência vulcano-sedimentar e as rochas acamadadas se invertem de norte para sul: enquanto a seqüência diminui de volume, as rochas acamadadas aumentam. Isto explicaria o fato da anomalia ter uma amplitude oscilante entre 60 e 65mGal de norte até sul em quase toda a sua extensão e a profundidade máxima do complexo diminuir para sul. A contribuição gravimétrica das rochas acamadadas mais densas se torna mais importantes devida ao seu maior volume, assim é necessário menos espessura para gerar a mesma anomalia gravimétrica. Pode-se notar através destes modelos que o tectonismo atuou de maneira diferenciada ao longo do seu maior eixo, proporcionando uma geometria de estrutura do tipo “pop up” (fig. 8.6b) na porção norte do complexo, que mudou para o tipo desenvolvida por empurrão (fig. 8.6c). Ressalta-se que esta interpretação inicial é válida para os modelos aqui apresentados, como dito no item 6.22 o modelo encontrado para o perfil BB’ pode ser o mais representativo de todos, devido ao fato de possuir pontos de medida balizando ambos os lados. Se mais pontos de medida fossem feitos na região a oeste do complexo e os perfis a sul tivessem sua geometria modificada para uma mais próxima do perfil BB’, acarretaria uma mudança da interpretação. Isto ocorrendo ter-se-á uma estrutura do tipo “pop up” ao longo de todo o eixo maior do complexo, indicando que o regime compressivo que atuou sobre ele foi mais homogêneo. No modelo 3D completo pode-se notar um relevo basal muito acidentado com uma grande quantidade de espessamentos localizados semelhantes a raízes. Uma possibilidade para a formação deste relevo é que tenha se formado no momento da atuação tectônica, fraturando o corpo de maneira complexa e possibilitando que pedaços sejam arrancados e deixados para traz e/ou deslocados de modo a espessarem localmente o corpo durante o movimento de exumação ou de inclinação.

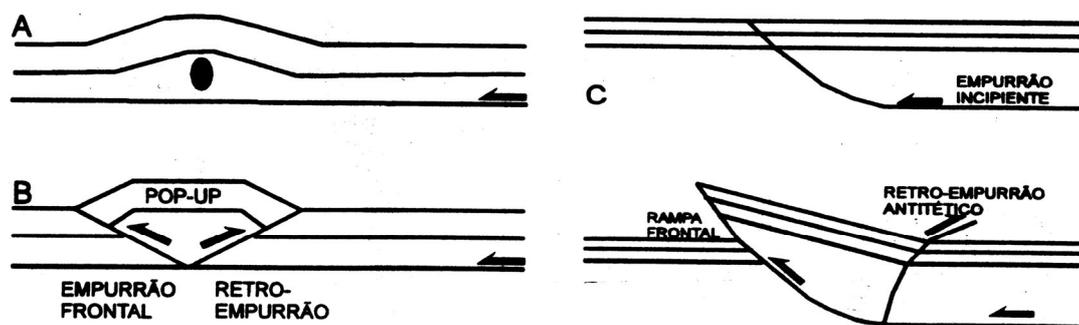


Figura 8.6 – Seqüência de desenvolvimento de uma estrutura “pop up”: A) encurtamento paralelo ao acamamento. B) desenvolvimento do “pop up” após o empurrão (Butler, 1982). C) Estrutura de “pop up” desenvolvida por falha de retro empurrão antitética (Mandl & Crans, 1981). Modificado de Lima 1997.

Os modelos encontrados para o Complexo Niquelândia mostram uma geometria do tipo cuneiforme mais simétrica muito parecida com uma estrutura do tipo “pop up” (fig. 8.6 b) onde as falhas se encontram, dando uma forma quase triangular ao corpo. Pode-se notar que diferentemente do complexo anterior a estrutura geral do corpo não se modifica ao longo do seu maior eixo. Somente a profundidade máxima e as relações de massa entre a seqüência vulcano-sedimentar e as rochas acamadas é que sofrem alguma variação. A variação da profundidade é mais ou menos simétrica em relação ao centro do corpo; sendo maior ao longo do eixo maior, possuindo seu ápice no centro geométrico; e menor nas bordas (principalmente leste e oeste). As relações de massa entre o complexo acamadado e a seqüência vulcano-sedimentar refletem principalmente as variações visíveis em superfície, se mantendo mais ou menos constante ao longo do eixo maior. Isto indica que as forças aplicadas e o tectonismo que modelou este complexo atuaram de maneira mais ou menos homogênea ao longo de todo o complexo.

Para Barro Alto os modelos encontrados neste trabalho podem ser divididos em dois grandes grupos: os pertencentes ao braço norte-sul, e os pertencentes ao braço leste-oeste. Os perfis pertencentes ao braço norte-sul são mais cuneiformes e simétricos ( $2 \frac{1}{2}D$ ) do que no braço leste-oeste que tendem a ser mais em forma de W, com a presença de um afinamento local que separa duas

massas maiores (2 ½D e 3D). Os perfis 3D situados sobre o braço norte-sul possuem orientação inclinada em relação ao eixo maior do braço, fornecendo uma geometria distorcida do corpo e por isto difícil de comparar com a geometria encontrada nos perfis 2 ½D. A relação de massa entre a seqüência vulcano-sedimentar e o complexo acamadado refletem a variação visível em superfície entre eles. Isto indica que as forças aplicadas e o tectonismo que modelou este complexo atuaram de maneira diferenciada para a região norte em comparação a região sul, antes da inflexão, quando o complexo estaria ainda acompanhando a orientação dos outros dois complexos. Outra explicação possível seria que durante a inflexão que reorientou a porção sul para a posição leste-oeste ocorreu a atuação de forças diferenciais que remodelaram a base deste braço. De uma maneira geral pode-se ver que o complexo parece possuir uma geometria muito parecida com a estrutura tipo “pop up” (fig. 8.6 b) no braço norte-sul e uma estrutura mais complexa no braço leste oeste.

Analisando os três complexos pode-se ver que todos possuem em comum uma geometria cuneiforme que aponta para uma estrutura resultante de um regime compressivo tipo “pop up” (fig. 8.6b). Esta geometria surgiria devido à geração de duas falhas: uma de empurrão frontal e outra de retro-empurrão, que se encontram em subsuperfície. O problema deste modelo está na falta de explicação para o acamadamento subparalelo mergulhante para oeste em todas unidades envolvidas dos três complexos: seqüências vulcano-sedimentares e as rochas máficas acamadas. O resultado esperado para este modelo seria de camadas vergadas para cima como em uma dobra antiforme. Com a erosão, o mergulho visível em superfície das camadas estaria apontando para fora do corpo principal, o que não é verificado em nenhum dos complexos. Não sendo então um modelo aplicável para explicar a

forma geométrica encontradas nos modelos gravimétricos 2 ½D e 3D e orientação espacial das camadas presente no campo.

Um modelo plausível seria o de uma estrutura do tipo desenvolvida por falha de empurrão segundo Mandl e Crans (1981). Tomando-se o complexo já associado a sua respectiva seqüência vulcano-sedimentar, formando um bloco único e diferenciado das encaixantes (fig. 8.7a). Neste modelo inicial o contato entre este bloco e as rochas encaixantes seria uma excelente zona de fraqueza onde poderia se instalar um conjunto de falhas que rotacionariam e deslocariam bloco em direção à superfície. Inicialmente seria formada uma falha curva de baixo ângulo entre o complexo e as rochas encaixantes no lado leste (fig. 8.7a). Esta falha formaria uma rampa que possibilitaria o corpo deslizar para cima e girar para oeste, gerando em resposta no lado oeste uma falha de retro-empurrão de alto ângulo (fig. 8.7b). A continuidade dos esforços compressivos empurraria o corpo para cima enquanto que as falhas se aproximam. Posteriormente a erosão seria responsável pelo desgaste da rocha, diminuindo o volume e horizontalizando a superfície superior, dando uma forma cuneiforme ao corpo pelo encontro das duas falhas que limitam o corpo (fig. 8.7c) e possibilitando visualizar as camadas internas inclinadas do corpo basculado. Este modelo dinâmico consegue explicar tanto a geometria cuneiforme majoritária encontrada nos complexos como também explica o mergulho paralelo a subparalelo para oeste presente em todas as suas rochas.

A presença das lascas próximas do limite leste dos complexos de Cana Brava e Barro Alto pode ser explicada pela formação de um sistema de falhas na rampa frontal que separou lascas do corpo principal e que foram sendo deixadas para traz, em níveis crustais inferiores, quando o processo cessou de atuar. Este movimento de ascensão e rotação também pode explicar o relevo basal acidentado encontrado no modelo 3D. Durante o movimento que o corpo sofreu, sua borda pode

ter se partido deixando pedaços para traz. Estes pedaços podem não ter se separado fisicamente do corpo, ficando apenas um pouco mais profundos, criando o aspecto de raízes mais profundas encontrado no modelo 3D para ajustar as variações gravimétricas internas aos corpos. As diferentes espessuras encontradas para cada complexo indicam que os esforços e possivelmente o encurtamento foi diferenciado de norte para sul. O Complexo Cana Brava (mais ao norte) foi soerguido para níveis crustais mais baixos do que os outros três, enquanto que o Complexo Barro Alto foi empurrado para níveis mais altos, deixando o Complexo Niquelândia em uma posição intermediária. Deste modo pode-se imaginar que a norte os esforços e/ou deslocamento entre os blocos foram menores do que a sul, onde foram maiores, causando as diferentes espessuras nos complexos após a erosão.

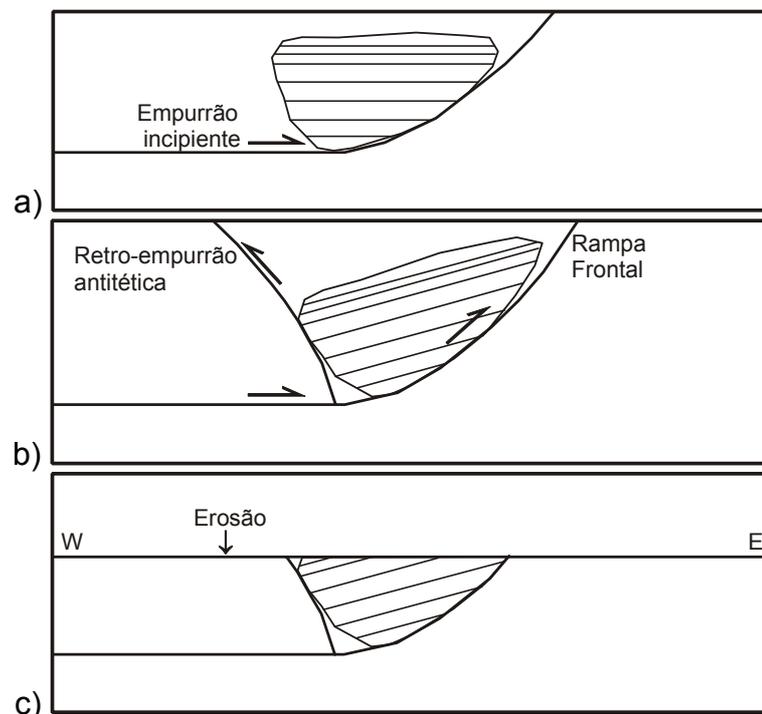


Figura 8.7 – Evolução tectônica dos complexos baseado no modelo de desenvolvimento de estrutura por falha de empurrão. a) fase de formação de uma falha por empurrão incipiente aproveitando a zona de fraqueza entre o corpo e as rochas encaixantes. b) formação da falha de empurrão antitética em resposta a inclinação do corpo, com a continuidade da compressão o corpo tende a subir. c) Erosão posterior a estabilização do sistema, aflorando o corpo com suas unidades internas mergulhantes para oeste (W).