

INTERPRETAÇÃO DE ANOMALIAS AEROMAGNÉTICAS DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Antonio Lopes Padilha

Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq
12200 – São José dos Campos – SP – Brasil

The methodology for geophysical interpretation of magnetic anomalies, including upward continuation, reduction to the pole and linear and nonlinear inversion, has been applied on aeromagnetic data from the Quadrilátero Ferrífero (MG). The isolated anomalies associated with some of the main structural features of the region (Itabira District, Ouro Fino and Gandarela synclines) have been analysed. The obtained results indicate a possibility of high induced and remanent magnetization in the studied region.

1. INTRODUÇÃO

A interpretação de dados magnéticos envolve toda uma metodologia que inclui desde as técnicas numéricas que efetuam a separação entre as variações regionais e locais do campo (separação regional – residual) até as que operam inversões, lineares e não-lineares, desses dados, permitindo obter modelos quantitativos dos corpos geradores das anomalias.

Utilizando as facilidades da FFT (Fast Fourier Transform, foram elaboradas rotinas computacionais para efetuar algumas das operações anteriormente citadas (separação regional-residual e inversão linear), sendo sua eficiência comprovada em testes sobre casos sintéticos (Moreira et al., 1981). Adaptou-se, também, para o caso magnético, o programa iterativo de inversão gravimétrica publicado por Enmark (1981).

O presente trabalho tem por objetivo interpretar algumas anomalias magnéticas da região do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais), aplicando os programas computacionais implementados aos dados do aerolevante magnético efetuado pela companhia alemã Prakla em 1971, dentro do convênio de cooperação científica entre o Brasil e a Alemanha (DNPM, 1974). A escolha da área deveu-se à grande quantidade de detalhes complexos do mapa de anomalias magnéticas no local, possibilitando aplicar toda a metodologia desenvolvida, e à existência de mapeamento geológico de detalhe na região (Dorr, 1969), que fornece dados adicionais independentes úteis à interpretação, possibilitando correlacionar as estruturas magnéticas mais superficiais às características geológicas da área.

2. METODOLOGIA

O objetivo principal do método magnético é interpretar o campo anômalo da Terra em termos de ocorrên-

cias geológicas relevantes. Para isto exige-se a execução de uma série de tarefas que vão desde o estágio de coleta de dados até a formulação do modelo final. A seqüência dos diversos procedimentos envolvidos pode ser descrita através do esquema exibido na Fig. 1.

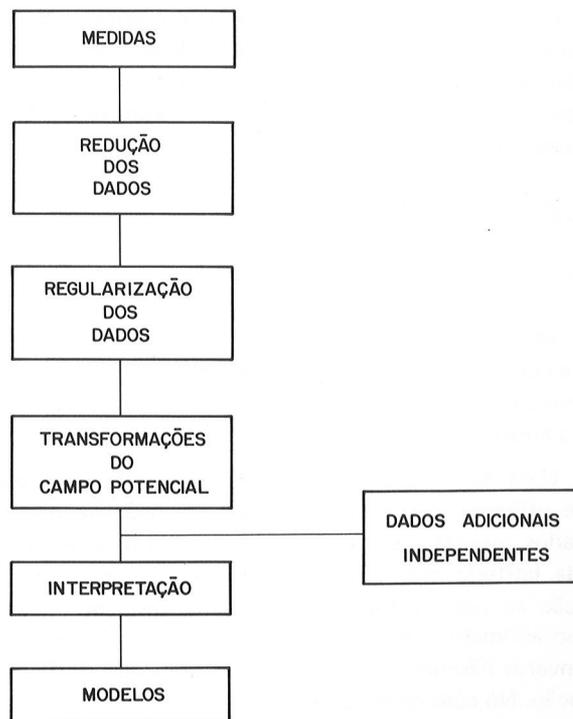


Figura 1 — Procedimento na interpretação de dados magneto-métricos.

Neste trabalho a ênfase maior concentrou-se nos estágios de transformações lineares do campo potencial e na interpretação quantitativa dos dados magnéticos.

A expressão básica para o problema das transformações lineares do campo potencial pode ser, matematicamente, expressa da seguinte forma (Baranov, 1975):

$$T(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\alpha, \beta) \cdot C(\alpha, \beta) \cdot \exp(-i(\alpha x + \beta y)) d\alpha d\beta \quad (1)$$

onde:

T é o campo resultante da transformação linear aplicada;
F é a transformada de Fourier bidimensional do campo anômalo medido;
C é um filtro que depende do tipo de transformação desejada;
x e y são as variáveis espaciais nas direções ortogonais;
 α e β são as frequências nas direções x e y, respectivamente.

As transformações possíveis sobre o campo magnético, algumas das quais descritas por Kanasevich & Agarwal (1970), podem ser separadas em duas classes. A primeira, a chamada separação regional-residual, da qual faz parte a continuação do campo de anomalias, é utilizada para separar efeitos gerados pelas heterogeneidades mais profundas da crosta das perturbações locais, associadas à existência de estruturas magnéticas superficiais. A continuação do campo é obtida adotando-se, na expressão de transformação funcional (1),

$$C(\alpha, \beta) = \exp(-\gamma(Z_0 - Z)) \quad (2)$$

onde:

$$\gamma = (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2};$$

Z_0 é a coordenada z do plano de medidas (usualmente $Z_0 = 0$);

Z é a altura à qual se deseja continuar o campo.

Uma segunda classe de transformações funcionais, que é utilizada para auxiliar na interpretação quantitativa de dados magnéticos, tem por objetivo suprimir a influência da latitude magnética sobre as anomalias, através da redução ao polo, e fornecer, através da inversão linear do campo anômalo, vínculos iniciais para a solução do problema inverso não-linear, passo seguinte no processo de interpretação. No caso da redução ao polo, no plano de medidas, o fator $C(\alpha, \beta)$ vai ser dado por:

$$C(\alpha, \beta) = \frac{\gamma^2}{A \cdot B} \quad (3)$$

onde:

$$A = -\gamma \lambda_3 + i(\alpha \lambda_1 + \beta \lambda_2)$$

$$B = -\gamma \nu_3 + i(\alpha \nu_1 + \beta \nu_2)$$

λ_1, λ_2 e λ_3 são os cossenos diretores do campo magnético principal;

ν_1, ν_2 e ν_3 os cossenos diretores da magnetização do corpo.

Na inversão linear, que neste caso consiste em determinar, a partir do campo de anomalias medido, a distribuição de magnetização numa camada de espessura finita, o fator $C(\alpha, \beta)$ se torna:

$$C(\alpha, \beta) = \frac{2\pi\gamma^2}{A \cdot B \cdot P} \quad (4)$$

onde:

$$P = \exp(-\gamma Z_1) - \exp(-\gamma Z_2);$$

Z_1 e Z_2 são, respectivamente, as profundidades do topo e da base do modelo considerado;

A e B são as mesmas expressões discriminadas na redução ao polo.

Na interpretação quantitativa de dados magnéticos defronta-se com o problema inverso não-linear da teoria do campo potencial, procurando-se determinar as características do corpo através do campo por ele gerado. No nosso caso específico o modelo básico utilizado é um corpo bidimensional de seção poligonal, sendo que os diversos procedimentos comumente utilizados para solucionar o problema são discutidos em Parker (1977).

Uma descrição mais detalhada de cada um dos itens da Fig. 1, bem como os programas computacionais desenvolvidos para efetuar a transformação e interpretação do campo de anomalias, pode ser encontrada em Ussami (1981), Padilha (1982) e, mais especificamente, na bibliografia citada nos referidos textos.

3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ÀS ANOMALIAS MAGNÉTICAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Numa análise qualitativa preliminar do mapa de iso-anômalas magnéticas do Quadrilátero Ferrífero verifica-se que suas principais anomalias concentram-se ao longo dos lineamentos do Grupo Itabira, portador das mais importantes formações ferríferas da região. Dentro do Grupo Itabira a formação ferrífera é encontrada nos itabiritos que constituem uma das suas unidades (Itabirito Cauê). O itabirito, conforme definido por Dorr & Barbosa (1963), é uma rocha metassedimentar composta basicamente de quartzo, hematita e magnetita, apresentando um espectro grande de variação entre estes seus componentes.

As principais anomalias magnéticas locais estariam associadas, então, ou a um espessamento maior da camada de ferro (Grupo Itabira) ou ao fato de se ter no local a presença de um itabirito com conteúdo maior de minerais magnéticos (hematita e magnetita substituindo o quartzo), não se podendo, porém, decidir qual destes modelos seria aplicável, devido à ambigüidade inerente ao

método magnético. Algumas destas anomalias podem ser diretamente correlacionadas às mais importantes feições estruturais da região e serão tratadas aqui em maiores detalhes.

3.1. Anomalia do Sinclinal Ouro Fino

É o pequeno sinclinal centrado em $20^{\circ}10'S$, $43^{\circ}38'W$, imediatamente ao sul do extremo oeste do Sinclinal Gandarela, separado deste pela falha do Fundão e pelo extremo oeste do anticlinal Conceição. As únicas unidades da Série Minas ainda preservadas no sinclinal são o Grupo Caraça e o Itabirito Cauê.

A anomalia residual, obtida com uma continuação para cima de 1 km (Fig. 2a), foi interpretada como sendo gerada por um corpo tridimensional, cujos contornos podem ser obtidos através da redução ao polo (Fig. 2b). Procedeu-se, então, ao cálculo da distribuição de magnetização a partir do campo de anomalias, considerando para o corpo anômalo uma espessura de 500 m (espessura máxima da formação ferrífera observada na região (Dorr, 1969). Pode-se determinar, desta forma, o limite inferior para a distribuição de magnetização da região (Fig. 2c). Este limite situa-se no intervalo entre 200 e 610 nT, o que fornece para

a suscetibilidade limites de $8,3$ a $25,3 \times 10^{-3}$ uem (campo indutor local: 24090 nT). A Fig. 2d, mostra o campo de anomalias ajustado com suscetibilidade de $17,6 \times 10^{-3}$ uem, usando, para cálculo do campo magnético devido a corpos tridimensionais, o método numérico de Talwani (1965).

O ajuste obtido para esta anomalia, comparando as Figs. 2a e 2d, pode ser considerado satisfatório. A principal discrepância refere-se ao fato de que, no campo observado, a parte positiva ao norte aparece um pouco mais achatada, provavelmente devido à presença de uma forte anomalia magnética associada ao Sinclinal Gandarela, que pode perturbar aquela gerada pelo Sinclinal Ouro Fino.

3.2. Anomalia da Região de Itabira

Localizada em torno das coordenadas $19^{\circ}40'S$, $43^{\circ}15'W$, está separada do corpo principal do Quadrilátero Ferrífero por cerca de 15 km de paragneisses e ortogneisses. Consiste em um sinclinal de cerca de 10 km de comprimento, em cujo flanco nordeste ocorrem dois sinclinais subsidiários e onde o Itabirito Cauê é bastante espesso.

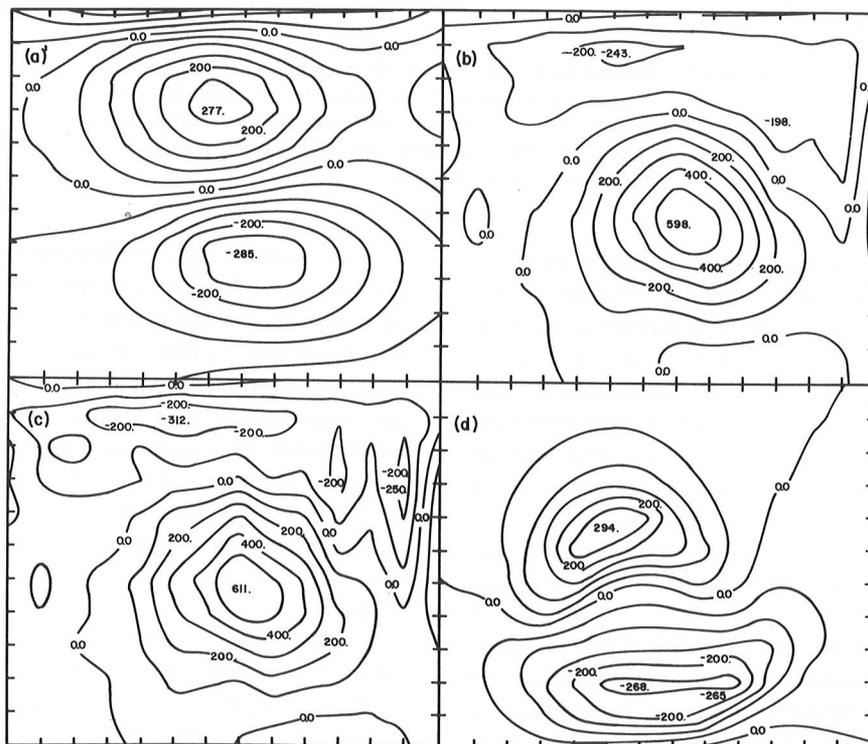


Figura 2 — Interpretação do campo de anomalias do Sinclinal Ouro Fino (a) observado; (b) reduzido ao polo; (c) distribuição de magnetização; (d) calculado. Isovalores em nT. Escalas verticais e horizontais em quilômetros.

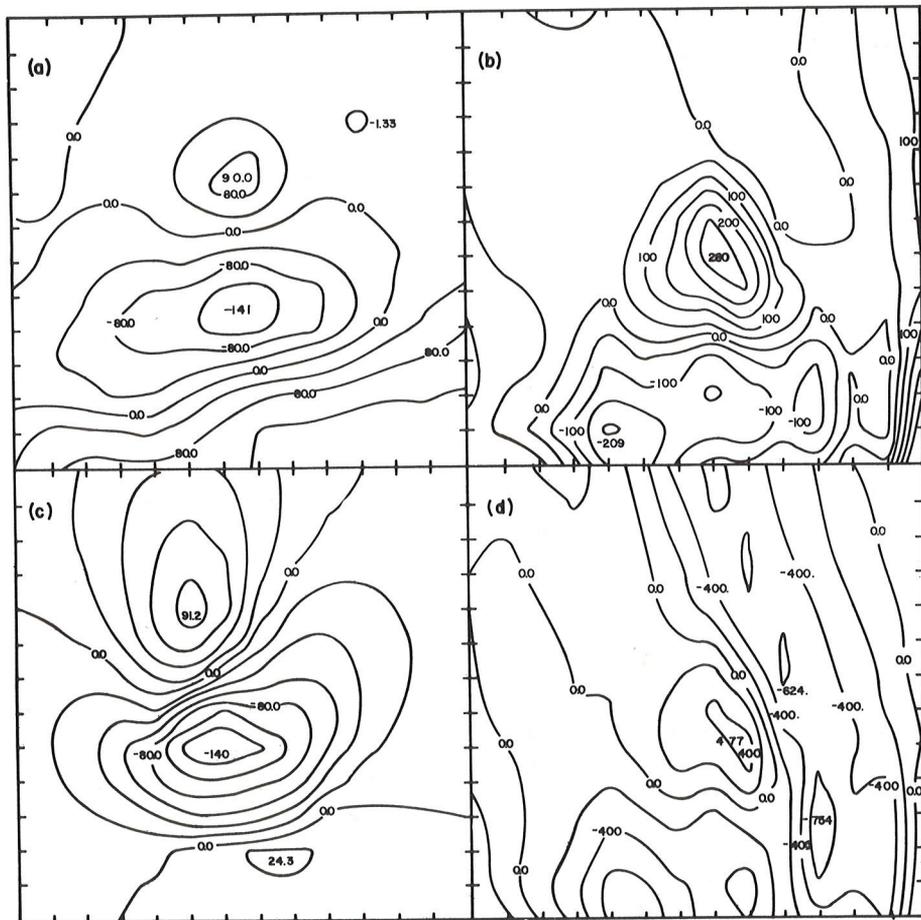


Figura 3 — Interpretação do campo de anomalias da região de Itabira (a) observado; (b) reduzido ao polo; (c) calculado; (d) distribuição de magnetização com inclinação de 5° S. Isovalores em nT. Escalas verticais e horizontais em quilômetros.

A anomalia magnética residual associada a este sinclinal é mais fraca que a anteriormente estudada, tendo sido obtida através da remoção de uma tendência regional, ajustada por um polinômio de grau 1, e com uma continuação para cima de 0,2 km (Fig. 3a). Analisando o resultado obtido verifica-se a presença de um mínimo bem mais acentuado que o máximo. Numa região como esta, latitude magnética de $-21,5^{\circ}$, isto pode ser explicado pela presença de um corpo fortemente inclinado ou pela existência de magnetização remanescente de intensidade significativa, tornando mais horizontal a magnetização resultante (induzida mais remanescente).

A possibilidade de ocorrência de um corpo inclinado no local foi testada, considerando uma extensão vertical máxima de 3km. Seu formato, no plano horizontal, foi determinado através da redução ao polo (Fig. 3b). A Fig. 3c mostra o campo de anomalias calculado, usando um corpo inclinado de aproximadamente 60° para o norte e com uma suscetibilidade de $4,5 \times 10^{-3}$ uem. A principal diferença verificada entre os campos calculado e observado refere-se ao máximo da anomalia que, no campo observado, aparece um pouco mais achatado.

A magnetização remanescente foi medida em três amostradas de itabirito coletadas na região. Deve-se observar que, pelo fato de as amostras analisadas não terem sido orientadas por ocasião de sua coleta no campo, não se pode ter informação sobre a direção do vetor magnetização remanescente, mas apenas sobre seu módulo (a intensidade total). Os resultados das análises efetuadas sobre as amostras, escolhidas por apresentarem diferenças sensíveis em suas composições, mostram a importância da magnetização remanescente nesta região, especialmente nas amostras com maior conteúdo de minerais magnéticos (Tabela 1).

Procurou-se, a seguir, determinar quais seriam a inclinação e a intensidade da magnetização resultante. Analisando a Fig. 3b, onde se efetuou a redução ao polo do campo de anomalias, verifica-se a presença de uma forte anomalia parasitária negativa. Isto pode ser originado pelo fato de se ter empregado uma direção errada para representar a magnetização do corpo (não se considerou a presença da magnetização remanescente). Utilizou-se, então, a técnica de redução ao polo para estimar a direção de magnetização resultante, calculando a redução ao polo para

diferentes direções de magnetização até obter um campo com uma anomalia parasitária pouco representativa. O valor, assim determinado, para a inclinação da magnetização do corpo foi de -5° . A intensidade da magnetização foi determinada supondo, para a formação ferrífera, uma espessura máxima de 200 m. Obtiveram-se, na região onde se situa o corpo, limites entre 200 e 450 nT (Fig. 3d), valores bastante superiores à magnetização obtida para as amostras analisadas. Uma hipótese que poderia ser aventada é que o modelo obtido não representaria a condição real da natureza. O mais provável, porém, é que as amostras utilizadas não devem ser petrograficamente do mesmo tipo daquelas que produzem a anomalia. Estas devem ter um teor muito maior de substâncias ferrimagnéticas (magnetita). Com isto as amostras estudadas devem ser usadas apenas para mostrar a importância da magnetização remanescente na região de Itabira.

3.3. Anomalia do Sinclinal Gandarela

Centrado em, aproximadamente 20°S , $43^\circ 40'\text{W}$, este sinclinal é a principal estrutura a leste do arqueamento Rio das Velhas. Em seu extremo oeste, seus dois flancos são aproximadamente paralelos por cerca de 10 km; o flanco sul é cortado pela falha do Fundão (Fig. 4).

A anomalia magnética residual, obtida através de uma continuação para cima de 1 km (Fig. 5a), está localizada sobre o extremo oeste do sinclinal onde, segundo Dorr (1969), o Itabirito Cauê é bastante espesso. Novamente iniciou-se a interpretação da anomalia através da inversão linear, utilizando para o corpo magnetizado uma espessura de 5 km (Fig. 5b). O intervalo obtido para a magnetização foi entre 100 e 500 nT, fornecendo suscetibilidades entre 4 e 21×10^{-3} uem.

Aproveitando as características deste sinclinal (mais alongado numa direção aproximadamente perpendicular à do campo magnético), resolveu-se inverter a anomalia

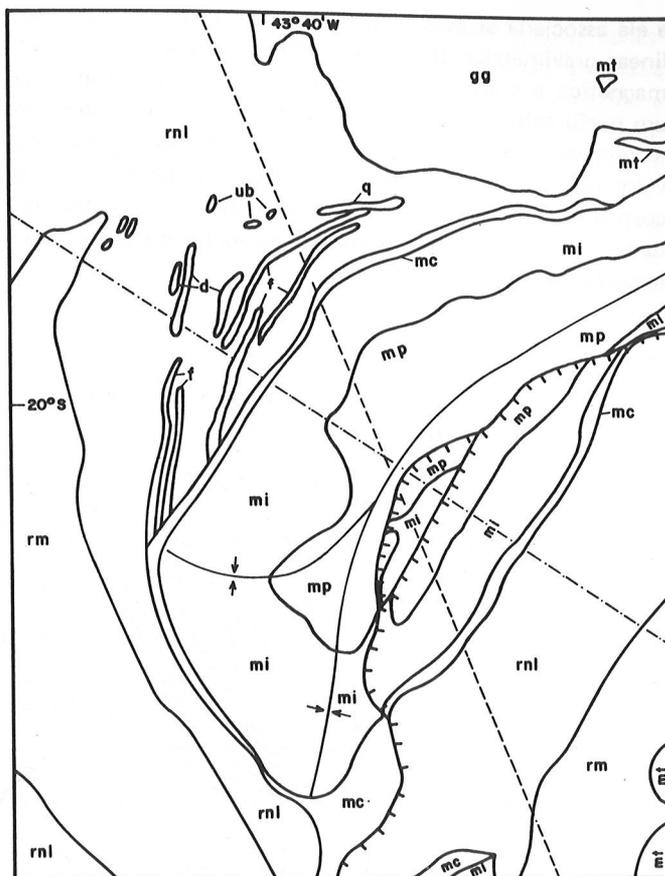


Figura 4 — Esboço geológico do Sinclinal Gandarela.

Legenda: rnI — Grupo Nova Lima; rm — Grupo Maquiné; mt — Grupo Tamanduá; mc — Grupo Caraça; mi — Grupo Itabira; mp — Grupo Piracicaba; gg — rochas graníticas; q — quartzito; f — formação ferrífera; d — diques fêmicos; ub — rochas ultrabásicas.
eixo do Sinclinal Gandarela
falha do Fundão
perfil geológico de Dorr (1969)
perfil analisado

Tabela 1 — Medidas de magnetização em amostras de itabirito da região de Itabira.

AMOSTRA	SUSCETIBILIDADE ($\times 10^{-6}$ uem)	MAGNETIZAÇÃO REMANESCENTE (nT)	MAGNETIZAÇÃO INDUZIDA (nT)	FATOR DE KOENIGSBERGER
ITA-QUA	73	0,8	1,8	0,4
ITA-TAL	215	13,1	5,2	2,5
ITA-HEM	305	13,7	7,4	1,9

Descrição das Amostras

ITA-QUA — Itabirito rico em quartzo coletado a 166 m de profundidade.
ITA-TAL — Itabirito apresentando lixiviação com substituição por talco.
ITA-HEM — Itabirito rico em hematita coletado à profundidade de 132 m.

a ele associada através do método iterativo de inversão não-linear gravimétrico (Enmark, 1981) adaptado para o caso magnético e com corpo bidimensional. Para isto tomou-se um perfil sobre o campo de anomalias na direção do norte magnético, passando pelos pontos de máximo e mínimo valor da anomalia, e considerou-se ser ela gerada por três corpos distintos bastante próximos, constituídos pelas unidades da Série Minas aflorantes ao longo do perfil, cuja localização é exibida na Fig. 4.

A Fig. 5c exibe os perfis observado e calculado, bem como os corpos finais obtidos. O ajuste encontrado para a curva pode ser melhorado introduzindo, por exemplo, um número maior de vértices no corpo. Isto não foi efetuado pois a forma geral encontrada para os corpos seria pouco alterada. Exibe-se também, na mesma figura, o perfil geológico vertical apresentado por Dorr (1969) para o Sinclinal Gandarela, a partir de tendências das estruturas na superfície. Embora o perfil aqui analisado não seja exatamente

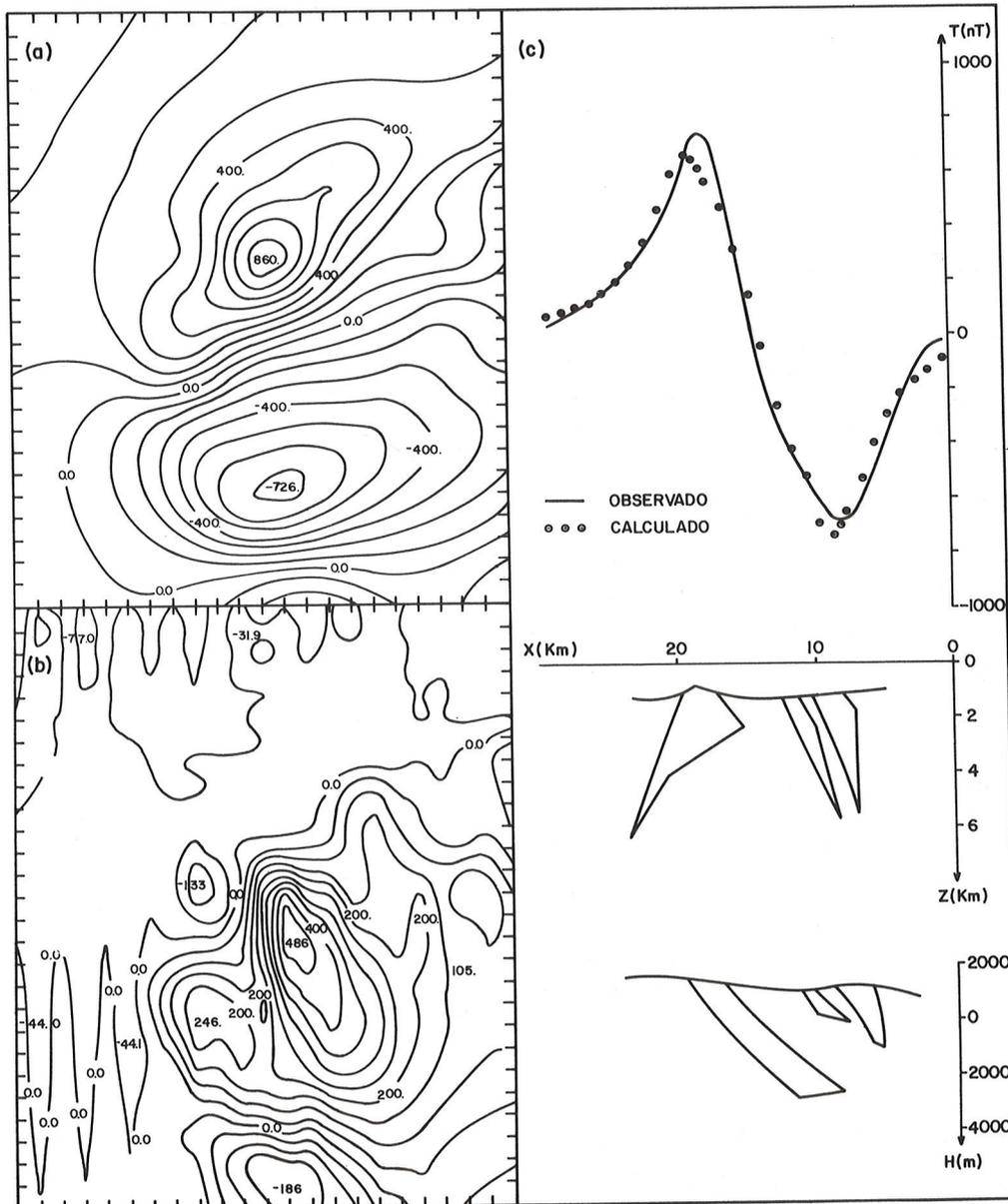


Figura 5 — Interpretação do campo de anomalias da região do Sinclinal Gandarela (a) observado; (b) distribuição de magnetização; (c) resultado da inversão não-linear (parte superior: perfis observado e calculado; central: corpos modelos obtidos; inferior: modelo formulado por Dorr). Isovalores em nT e escalas verticais e horizontais em quilômetros (em (a) e (b)).

o mesmo daquele apresentado por Dorr (Fig. 4), nos dois casos os corpos tendem a se direcionar, com o aumento da profundidade, para sudeste. A principal diferença é observada no flanco norte do sinclinal. Porém, de acordo com Schorscher (comunicação pessoal), modelos estruturais mais recentes contrariam aquele exposto por Dorr para esta região, com as estruturas apresentando-se dobradas em direção ao norte, mais de acordo com o modelo aqui fornecido, obtido através da inversão não-linear dos dados magnéticos.

4. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi verificar a utilidade de algumas técnicas numéricas de interpretação de dados magnéticos, através da sua aplicação aos dados do Quadrilátero Ferrífero. Devido à complexidade das anomalias magnéticas dessa região, associadas à presença de alto teor de minerais magnéticos, pôde-se defrontar com os tipos mais diversos de problemas que, em alguns casos, somente foram solucionados mediante o emprego combinado de diferentes técnicas.

Os resultados encontrados demonstraram a existência de magnetização extremamente elevada no local, típica de regiões com alta concentração de minerais ferrimagnéticos. De modo geral, as magnetizações concentraram-se nos intervalos entre 100 e 500 nT. Análises efetuadas sobre amostras da região de Itabira demonstraram a importância da magnetização remanescente neste local. Nos outros casos, a partir do formato das anomalias observadas, este fator pareceu não ser importante, tendo-se considerado apenas a presença de magnetização induzida.

Para explicar a importância da remanescência apenas na região de Itabira, podem ser sugeridas algumas hipóteses.

Em primeiro lugar, a ocorrência de magnetização remanescente para justificar o formato de uma dada anomalia poderia ser indicativa de uma maior alteração das rochas a ela associadas. Isto porque o fator de Koenigsberger aumenta consideravelmente em função do grau de alteração (Seguin, 1971). Uma outra possibilidade poderia ser formulada a partir das grandes deformações sofridas por toda esta região. Tal fato pode ter alterado completamente as direções originais das estruturas e conseqüentemente causado mudanças nas direções originais da magnetização remanescente, alinhando-as ou não com a direção da magnetização induzida.

Os modelos aqui formulados devem, no entanto, levar em conta o emprego de dados aeromagnéticos, normalmente apropriados para análises regionais, em análises de caráter local. Além disso, foram utilizados unicamente dados magnéticos neste estudo. Estes dados não fornecem uma solução unívoca na modelagem das fontes das anomalias, sendo necessária a existência de outras informações geofísicas independentes. Estas permitiriam, por exemplo, conhecer com precisão as propriedades físicas dos corpos estudados.

AGRADECIMENTOS

Esta publicação constitui parte do trabalho apresentado como Dissertação de Mestrado perante o IAG-USP, orientado pela Prof.^a Dra. Marta S. M. Mantovani, financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, aos quais agradecemos. Cumpre ressaltar, também, o apoio decisivo, durante toda a elaboração do trabalho, dos Profs. Naomi Ussami (IAG-USP) e José Antonio de Moraes Moreira (CCE-UFRN).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARANOV, W. — 1975 — Potential Fields and their Transformations in Applied Geophysics. Geosurvey Monographs — series 1 — n.º 6. Editors R. G. Van Nostrand, S. Saxov — Gebrüder Borntraeger — Berlin, Stuttgart.
- DNPM — 1974 — Retrospectivas das atividades do Convênio Geofísico Brasil—Alemanha e trabalhos do Centro de Geofísica Aplicada. Boletim do Ministério de Minas e Energia (DNPM—Brasília).
- DORR, J.V.N. — 1969 — Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 641-A.
- DORR, J.V.N. & BARBOSA, A.L.M. — 1963 — Geology and ore deposits of the Itabira district, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 341-C.
- ENMARK, T. — 1981 — A versatile interactive computer program for computation and automatic optimization of gravity models. Geosurvey, 19: 47-66.
- KANASEVICH, F.R. & AGARWAL, R.G. — 1970 — Analysis of combined gravity and magnetic fields in wave number domain. J. Geophys. Res., 75: 5702-5712.
- MOREIRA, J.A.M., PADILHA, A.L. & USSAMI, N. — 1981 — Routines using FFT for interpretation of gravimetric and magnetic data. COGEO DATA—IAMG Meeting for South America (Abstract) — Rio de Janeiro.
- PADILHA, A.L. — 1982 — Implementação da metodologia para interpretação magnética e sua aplicação aos dados do Quadrilátero Ferrífero (MG). Dissertação de Mestrado — IAG-USP.
- PARKER, R.L. — 1977 — Understanding inverse theory. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 5: 35-64.
- SEGUIN, M.K. — 1971 — Discovery of Direct-Shipping Iron Ore by Geophysical Methods in the Central Part of the Labrador Trough. Geophysical Prospecting, 19: 459-487.
- TALWANI, M. — 1965 — Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape. Geophysics, 30: 797-817.
- USSAMI, N. — 1981 — Interpretação quantitativa dos dados aeromagnéticos na área compreendida entre 42°—47°W e 15°—19°S (Minas Gerais, Brasil). Dissertação de Mestrado — IAG-USP.