

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ANÁLISE DE AMBIGUIDADE EM MÉTODOS DE CAMPO POTENCIAIS
ATRAVÉS DA ANÁLISE FATORIAL, Q- MODAL

Tese Apresentada por
SIMONE DA GRAÇA FRAIHA LOPES

como requisito parcial à obtenção do grau em
MESTRE EM CIÊNCIAS

Na área de
GEOFÍSICA

Conferido pelo Curso de Pós-Graduação em
Geociências da

Universidade Federal do Pará

Aprovado: 18.07.89

Comitê de Tese



JOÃO BATISTA CORREA DA SILVA
ORIENTADOR



MARCO POLO PEREIRA DA BOA HORA



WLADIMIR SHUKOWSKY

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	iv
RESUMO	1
ABSTRACT	3
1 INTRODUÇÃO	5
2 METODOLOGIA	9
2.1 Modelos Empregados.....	9
2.2 Problema Inverso.....	12
2.3 Análise Fatorial.....	17
3 ANÁLISE DOS DADOS SINTÉTICOS	26
3.1 Gravimetria.....	27
3.2 Magnetometria.....	66
4 APLICAÇÃO A DADOS REAIS	100
4.1 Gravimetria.....	100
4.2 Magnetometria.....	106
5 CONCLUSÕES	125
6 REFERÊNCIAS	128

DEDICATÓRIA

A meus pais, ao meu Ninho e ao meu futuro nenen.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. João Batista Corrêa da Silva, pela maneira dedicada e paciente com que orientou a elaboração desta tese;

Ao Professor Dr. Wladimir Shukowsky e ao Dr. Marco Polo Pereira da Boa Hora, membros da banca examinadora, pelas sugestões e críticas feitas durante a leitura deste trabalho;

Ao Departamento de Física, por ter me liberado parcialmente durante todo o período necessário para a execução desta tese;

A diretoria do Centro de Geociências (CG), à Coordenação do Curso de Pós-Graduação e à chefia do Departamento de Geofísica pelo apoio prestado para a conclusão da mesma;

Ao Professor Jorge Wilson Leão por seus ensinamentos no tocante a utilização do sistema Disco-Vax;

A Professora Jacira Felipe Beltrão, a Alteredo Oliveira Cutrim e ao amigo Jessé Carvalho Costa pela contribuição e apoio prestados durante a elaboração deste trabalho;

Ao técnico Paulo Magalhães pelo apoio na utilização do laboratório de Computação;

A equipe da biblioteca do CG pelo apoio constante referente ao material bibliográfico;

Aos professores, alunos e funcionários do CG que contribuíram para a realização deste trabalho;

E a todos aqueles que sem precisarem ser citados, foram sempre os mais presentes na elaboração desta tese.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS	PAG.
2.1 - Prismas bidimensionais que formam o corpo de forma complexa.	10
2.2 - Prisma bidimensional, sua localização e seus parâmetros.	10
2.3 - Reflexão do complex para um caso bidimensional. $\bar{p}_a$ é o ponto rejeitado, $\bar{p}_c$ o centróide dos pontos restantes e $\bar{p}_n$ o novo ponto do complex.	16
2.4 - Fatores para o caso de análise modo R com dois parâmetros P_1 e P_2 . C_{11} e C_{21} são as cargas dos parâmetros P_1 e P_2 no primeiro fator.	20
2.5 - (a) Fatores I e II em suas posições originais para o caso de análise modo R com dois parâmetros P_1 e P_2 . (b) Fator I rodado (I') após a eliminação do fator II.	22
2.6 - (a) Fatores I e II em suas posições originais, contidas no plano das soluções S_1 e S_2 , para o caso da análise modo Q. (b) Fatores rodados I' e II' após a eliminação do fator III.	24

2.7	- Relação entre as cargas S_{II} e S_{2I} , (a) antes da rotação: $\overline{BS}_{2I} > \overline{AS}_{II}$, (b) após a rotação: $\overline{BS}_{2I'} > \overline{AS}_{II'}$	25
3.1	- Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) e (b) do 1º teste em gravimetria.	28
3.2	- Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 1º teste em gravimetria.	29
3.3	- Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 2º teste em gravimetria. As setas assinalam as soluções extremas mostradas nas Figuras 3.4a e 3.4b.	31
3.4	- Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) e (b) do 2º teste em gravimetria.	32
3.5	- Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 3º teste em gravimetria.	33
3.6	- Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados	

(abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 3º teste em gravimetria.	34
3.7 - Projeção estereográfica das cargas (representadas por cruces) nos fatores I, II e III, para o 4º teste em gravimetria. O fator III é perpendicular ao plano da figura.	36
3.8 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo) para o 4º teste em gravimetria. A sequência de soluções de (a) a (c) está relacionada ao fator II e a sequência de (d) a (f) ao fator III.	37
3.9 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 5º teste em gravimetria.	40
3.10 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 5º teste em gravimetria.	41
3.11 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 6º teste em gravimetria.	42
3.12 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados	

(abaixo), para a sequência de soluções (a) a	
(d) do 6º teste em gravimetria.	44
 3.13 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores	
I e II de 20 possíveis soluções para o 7º	
teste em gravimetria.	45
 3.14 - Anomalias gravimétricas 'observada' e	
ajustadas (acima) e modelos real e ajustados	
(abaixo), para a sequência de soluções (a) a	
(d) do 7º teste em gravimetria.	46
 3.15 - Projeção estereográfica das cargas	
(representadas por cruces) nos fatores I, II e	
III para o 8º teste em gravimetria.	48
 3.16 - Observações gravimétricas (cruces)	
interpretadas como se a anomalia (linha cheia)	
tivesse sido amostrada em toda sua extensão	
(a) ou apenas na sua parte central (b).	49
 3.17 - Anomalias gravimétricas 'observada' e	
ajustadas (acima) e modelos real e ajustados	
(abaixo), para o 8º teste em gravimetria. A	
sequência de soluções de (a) a (c), está	
relacionada ao fator II e a de (d) a (f) ao	
fator III.	50
 3.18 - Projeção estereográfica das cargas	
(representadas por cruces) nos fatores I, II e	

III, para o 9º teste em gravimetria.	53
3.19 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para o 9º teste em gravimetria. A sequência de soluções de (a) a (c), está relacionada ao fator II e a de (d) a (f) ao fator III.	54
3.20 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 10º teste em gravimetria.	57
3.21 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 10º teste em gravimetria.	58
3.22 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 12 possíveis soluções que apresentam valores elevados de nível de base, no 10º teste em gravimetria.	60
3.23 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) apresentando valores elevados de nível de base no 10º teste em gravimetria.	61
3.24 - Projeção estereográfica das cargas	

(representadas por cruces) nos fatores I, II e III, de 8 possíveis soluções, que apresentam valores reduzidos do nível de base no 10º teste em gravimetria.	62
3.25 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para as sequências de soluções (a) a (c) correspondentes ao fator II e (d) e (e), correspondentes ao fator III, apresentando valores reduzidos de nível de base no 10º teste em gravimetria.	63
3.26 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 1º teste em magnetometria.	67
3.27 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 1º teste em magnetometria. IT=IM=60 graus; DT=DM=10 graus. IM' e DM' podem variar nos intervalos (-90,90) e (-100,100), respectivamente.	68
3.28 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 2º teste em magnetometria.	70
3.29 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas	

(acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 2º teste em magnetometria. IT=IM=60 graus; DT=DM=10 graus. IM' e DM' podem variar nos intervalos (-90,90) e (-100,100), respectivamente.	71
3.30 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 3º teste em magnetometria.	72
3.31 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 3º teste em magnetometria. IT=IM=60 graus; DT=DM=10 graus. IM' e DM' podem variar nos intervalos (-90,90) e (-100,100), respectivamente.	73
3.32 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 4º teste em magnetometria.	75
3.33 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 4º teste em magnetometria. IT=IM=60 graus; DT=DM=10 graus. IM' e DM' são mantidos fixos nos valores corretos.	76

- 3.34 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 5º teste em magnetometria. 78
- 3.35 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 5º teste em magnetometria. IT=IM=60 graus; DT=DM=10 graus. IM' é mantido fixo no valor correto e DM' varia no intervalo (-100,100). 79
- 3.36 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 6º teste em magnetometria. 80
- 3.37 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (c) do 6º teste em magnetometria. IT=IM=60 graus; DT=DM=10 graus. IM' e DM' podem variar nos intervalos (-90,90) e (-100,100), respectivamente. 81
- 3.38 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 7º teste em magnetometria. 83
- 3.39 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 7º

teste em magnetometria. IT=IM=15 graus; DT=DM=50 graus. IM' e DM' podem variar nos intervalos (-90,90) e (-100,100), respectivamente.	84
3.40 - Projeção estereográfica das cargas (representadas por cruces) nos fatores I, II e III, para o 8º teste em magnetometria.	86
3.41 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para as sequências de soluções (a) a (c), relacionadas ao fator II e (d) a (f), relacionadas ao fator III, do 8º teste em magnetometria. IT=IM=15 graus; DT=DM=10 graus. IM' e DM' podem variar nos intervalos (-90,90) e (-100,100), respectivamente.	87
3.42 - Projeção estereográfica das cargas (representadas por cruces) nos fatores I, II e III, para o 9º teste em magnetometria.	90
3.43 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para as sequências de soluções (a) a (c), correspondentes ao fator II e (d) e (e), correspondentes ao fator III do 9º teste em magnetometria. IT=IM=15 graus; DT=DM=10 graus. DM' é mantido fixo no valor correto e IM' pode variar no intervalo (-90,90).	91

3.44 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 10º teste em magnetometria.	94
3.45 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) e (b) do 10º teste em magnetometria. IT=IM=60 graus; DT=DM=10 graus. IM' e DM' são mantidos fixos nos valores corretos.	95
3.46 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 11º teste em magnetometria.	96
3.47 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 11º teste em magnetometria. IT=IM=60 graus; DT=DM=10 graus. IM' e DM' são mantidos fixos nos valores corretos.	97
4.1 - Perfil anômalo Bouger cortando o "Salt Basin Graben" e modelo geológico apresentado por Keller et al. (1985). BF é o "Bolson Fill" (2300 kg/m^3), S são rochas sedimentares (2600 kg/m^3), UC e LC são a crosta superior e inferior (2700 e 3100 kg/m^3 respectivamente), e M é uma intrusão máfica (2900 kg/m^3).	101

4.2	- Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para a anomalia gravimétrica do "Salt Basin Graben". ...	104
4.3	- Anomalias gravimétricas observada e ajustadas (acima) e modelos de Keller et al. (1985) (linha cheia) e ajustados (tracejado) (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) da área de "Salt Basin Graben".	105
4.4	- Mapa geológico da parte centro leste da bacia do Parnaíba. As rochas sedimentares correspondem as formações do Piauí (P), Pastos Bons (PA) e Poti (PO). D são rochas diabásicas. .	107
4.5	- Perfil magnético sobre dique intrusivo da bacia do Parnaíba (acima) e modelo geológico (abaixo).	108
4.6	- Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para anomalia magnética causada por um dique intrusivo da bacia do Parnaíba.	111
4.7	- Anomalias magnéticas observada e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para o teste com vínculos menos restritivos, na área da bacia do Parnaíba.	112
4.8	- Cargas (representadas por cruces) nos fatores	

I e II de 20 possíveis soluções para a anomalia magnética da Figura 4.5, aumentada artificialmente de 4 observações.	114
4.9 - Anomalias magnéticas observada e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do teste com o número de observações aumentado, referente ao dique intrusivo da bacia do Parnaíba.	115
4.10 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 12 possíveis soluções para a anomalia do teste anterior, tendo valores elevados de nível de base.	116
4.11 - Anomalias magnéticas observada e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d), referentes às 12 possíveis soluções com nível de base elevado.	117
4.12 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II das 8 possíveis soluções apresentando nível de base reduzido para o teste com a anomalia magnética, sobre o dique da bacia do Parnaíba aumentada.	119
4.13 - Anomalias magnéticas observada e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo),	

para a sequência de soluções (a) a (d), referentes às 8 soluções apresentando nível de base reduzido no teste com a anomalia da bacia do Parnaíba aumentada.	120
4.14 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II das 20 possíveis soluções para o caso da anomalia magnética da Figura 4.5, com os vínculos restritos da largura.	122
4.15 - Anomalias magnéticas observada e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) e (d), referentes ao teste com vínculos restritos da largura.	123

4.1 -Vínculos utilizados e intervalos de estimati- obtidas no teste com dados gravimétricos do "Salt Basin Graben". pb é a profundidade da base do prisma e NB é o nível de base.	103
4.2 -Vínculos utilizados e intervalos de estimativas obtidas empregando-se os dados magnéticos da Figura 4.5.	110
4.3 - Intervalos de estimativas. (a) Empregando-se os dados magnéticos da Figura 4.5 acrescidos de 4 observações e os vínculos da Tabela 4.2. (b) Empregando-se os dados magnéticos da Figura 4.5 e reduzindo os vínculos da largura no en- torno do valor medido (1.9 a 2.1 metros).	121

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para o estudo da ambiguidade na interpretação de dados geofísicos. Várias soluções alternativas, representativas da região de maior ambiguidade no espaço de parâmetros são obtidas, sendo posteriormente grupadas e ordenadas pela análise fatorial modo Q.

Esta metodologia foi aplicada a dados sintéticos de campo potencial simulando-se causas de ambiguidade como discretização e truncamento da anomalia e a presença de ruídos aleatório e geológico. Um único prisma foi usado como modelo interpretativo, sendo a espessura a principal causa de ambiguidade tanto na gravimetria como na magnetometria. Segue-se a profundidade do topo sempre associada à espessura, quando o sinal da anomalia é alto. Quando a anomalia tem sinal baixo, a largura torna-se o segundo parâmetro mais importante, também associada à espessura. Ao contrário da presença de interferências geológicas, a presença de ruído aleatório nos campos, não é fator importante na ambiguidade.

A aplicação da metodologia a dados reais ilustra o papel desta análise na caracterização de soluções alternativas e a importância da informação a priori na caracterização das causas de ambiguidade.

A metodologia apresentada pode ser empregada em diversos estágios de um programa de prospecção fornecendo em cada estágio uma análise dos principais fatores causadores da ambiguidade, que poderá ser útil no planejamento dos estágios seguintes. Comparada a outros métodos de análise de ambiguidade, como por exemplo regiões de confiança, a

metodologia estudada destaca-se por não precisar satisfazer premissas estatísticas sobre a distribuição dos erros.

ABSTRACT

A method is presented to analyze ambiguity in geophysical interpretation. Initially, alternative solutions are obtained which are assumed to be representative of the region in parameter space where ambiguity is more pronounced. In a second stage, these solutions are grouped and ordered using Q-mode factor analysis.

The method was applied to synthetic potential field data where some important causes of ambiguity are simulated, such as discretizing and truncation of the anomaly, and the presence of random and geologic noise. A single prism is employed as an interpretation model and in both gravity and magnetic cases the prism depth extent stands out as the main cause of ambiguity. The second cause is either the depth to the top when the anomaly presents a strong signal, or the width when the anomaly presents a weak signal. The presence of random noise is not an important factor leading to ambiguity. On the other hand, the presence of interfering sources is a strong factor in both gravity and magnetic interpretation.

The application of the method to real anomalies illustrates its importance in defining alternative solutions, and the importance of the a priori information in the establishment of the causes of ambiguity.

The presented method may be applied at any stage of an exploration project. At each stage it provides relevant information which may be useful in planning the next stage. Compared with other methods usually employed in ambiguity analysis such as confidence regions, for example, the proposed method has the advantage of requiring no statistical

assumptions about the error distribution.

1 - INTRODUÇÃO

Os dados de campo potencial (bem como qualquer outro tipo de dado geofísico) não são suficientes para produzir estimativas únicas da propriedade física envolvida (densidade, susceptibilidade magnética) para cada ponto da subsuperfície. No entanto, em situações particulares, a solução do problema inverso em métodos potenciais pode ser única (Roy, 1962), como por exemplo quando a propriedade física é limitada a um plano horizontal ou é constante dentro de volumes com formas geométricas simples.

A ambiguidade, em qualquer interpretação geofísica só pode ser reduzida com a introdução de informação a priori, independente da observação geofísica, sendo interpretada. Dentre as diversas possibilidades de incorporar informação a priori, uma das mais comumente empregadas é a postulação de um modelo interpretativo simples, com propriedade física uniforme (Corbato, 1965; Al-Chalabi, 1971; Pedersen, 1977 para modelos em duas dimensões e Bhattacharyya, 1980 para modelos tridimensionais). Informação a priori pode ainda ser incorporada através de funções distribuições de probabilidades a priori dos parâmetros da fonte causadora. Isso é possível numa formulação Bayesiana do problema inverso (Tarantola & Valette, 1982).

Alternativamente, na ausência de informação a priori uma tentativa de reduzir a ambiguidade é abandonar a interpretação de detalhes em favor da estimativa de parâmetros mais gerais sobre as fontes como os seus momentos em relação às três direções no espaço. Esse tipo de abordagem foi desenvolvida por Goltsman (1970) e Fanselau et al. (1980).

Na prática, mesmo com a incorporação de informação a

priori, a não unicidade torna-se sempre presente pela presença de ruído aleatório, discretização e truncamento da anomalia, e a postulação de um modelo interpretativo muito simples (Al-Chalabi, 1972). Além do mais, devido ao critério, comumente empregado na interpretação, de minimizar um escalar (em geral a norma 2) associado ao vetor de resíduos entre as observações e o ajuste produzido pelo modelo, haverá uma infinidade de vetores de resíduos associados a valores de escalares muito próximos entre si. Desse modo, mesmo reduzida, a ambiguidade ainda existirá. Consequentemente, em situações práticas, uma análise da ambiguidade, em geral, se faz necessária. Apesar disso, muito pouco tem sido publicado na literatura sobre a análise da ambiguidade.

A abordagem mais comum da ambiguidade considera apenas a influência da propagação do ruído aleatório, presente nos dados, nas estimativas dos parâmetros do modelo postulado. A incerteza é expressa em termos de regiões de confiança para as estimativas dos parâmetros (Beck & Arnold, 1977) que apresenta entre outras restrições, a necessidade de premissas estatísticas a priori sobre o ruído nos dados e a especificação a priori da forma da região de confiança. Outra importante restrição é a limitação desta análise a problemas lineares, de modo que, no caso não linear o que se obtém são perturbações no entorno de uma solução particular. A extensão do conceito de regiões de confiança para problemas não lineares tem sido assunto de muita controvérsia (Beale, 1960) e virtualmente não empregado na interpretação geofísica.

A teoria desenvolvida por Backus-Gilbert (1968), permite eliminar a ambiguidade, procurando não mais soluções para o problema inverso, mas construindo funcionais lineares das ob-

servações. Os valores desses funcionais são unicamente determinados pelos dados e representam portanto propriedades comuns a todas as possíveis soluções. Dentre estas propriedades, temos, por exemplo, o excesso de massa (Telford et al., 1976), o máximo limite inferior para a densidade ou o mínimo limite superior para a profundidade (Parker, 1974; 1975; Ander & Huestis, 1987). Como essa análise é efetuada utilizando-se apenas as observações, ela se torna muito conservativa quando alguma informação a priori sobre as fontes causadoras for disponível.

Uma outra abordagem da análise da ambiguidade consiste em procurar, a partir de uma solução aceitável, soluções alternativas, também aceitáveis e extremas segundo algum critério, afastando-se gradativamente da solução originalmente aceita. As direções particulares de busca e o critério de aceitabilidade para as soluções alternativas, definirão os diversos métodos particulares, como por exemplo, os métodos Hedghog (Keilis-Borok & Yanovskaja, 1967) e Edghog (Jackson, 1973) que é uma extensão da abordagem de Backus-Gilbert a problemas não lineares. As limitações desses métodos são a dificuldade de assegurar que as soluções alternativas encontradas sejam representativas de todas as possíveis soluções e a restrição da análise só ser válida no entorno de uma única solução particular, encontrada de modo fortuito.

Este trabalho apresenta um procedimento para estudo da ambiguidade em problemas não lineares de inversão em métodos potenciais aplicável ao estágio de interpretação em que informação a priori sobre as fontes tenha sido introduzido através da especificação de um modelo interpretativo. As causas de ambiguidades estudadas são a presença de ruído aleatório, a dis-

cretização e o truncamento da anomalia e a presença de fontes interferentes laterais e superficiais em relação a um corpo principal. Diversas aproximações iniciais para os parâmetros do modelo postulado são empregadas num algoritmo de otimização não linear vinculado fornecendo diversas soluções. A partir dessas soluções constroi-se a matriz de similaridade, cujos elementos são medidas das separações entre as soluções. A essa matriz de similaridade, é aplicada a análise fatorial modo Q para obter e ordenar os grupos de possíveis soluções alternativas. Este procedimento é ilustrado com aplicações a dados sintéticos produzidos por fontes gravimétricas e magnéticas bidimensionais, e a dados reais magnéticos da Bacia do Parnaíba, Brasil e gravimétricos métricos de Salt Basin, Texas (USA).

2 -METODOLOGIA

A ambiguidade estudada neste trabalho é aquela causada pelos efeitos do truncamento e discretização dos dados, da presença de diversos tipos de ruído nos dados que podem ser de caráter aleatório ou devido à presença de corpos interferentes (ruído geológico), do uso de um modelo simples na interpretação e do emprego de métodos de interpretação que minimizam um escalar associado ao vetor de resíduos.

2.1 Modelos Empregados

As várias causas de ambiguidade foram simuladas, empregando-se dados sintéticos (gravimétricos e magnéticos), gerados por um corpo de forma complexa obtido pela justaposição de vários prismas verticais bidimensionais (2-D) finitos em espessura e infinitos em uma direção horizontal coincidente com o eixo y de um sistema cartesiano dextral. (Figura 2.1).

Em gravimetria o campo anômalo de um prisma 2-D vertical (Figura 2.2) no ponto P é dado por (Telford et al., 1976):

$$g(x) = 2G\delta \left[(x-x_0) \log A + w/2 \log B - t/2 \theta + h\phi \right] \quad (2.1)$$

$$\text{sendo: } A = \frac{(t+h)^2 + (x-x_0)^2}{h^2 + (x-x_0)^2} \frac{h^2 + (x-x_0-w)^2}{(w+h)^2 + (x-x_0-w)^2}$$

$$B = \frac{(t+h)^2 + (x-x_0-w)^2}{h^2 + (x-x_0-w)^2}$$

$$\theta = \arctg \frac{x-x_0-t}{w+h} - \arctg \frac{x-x_0}{h+t}$$

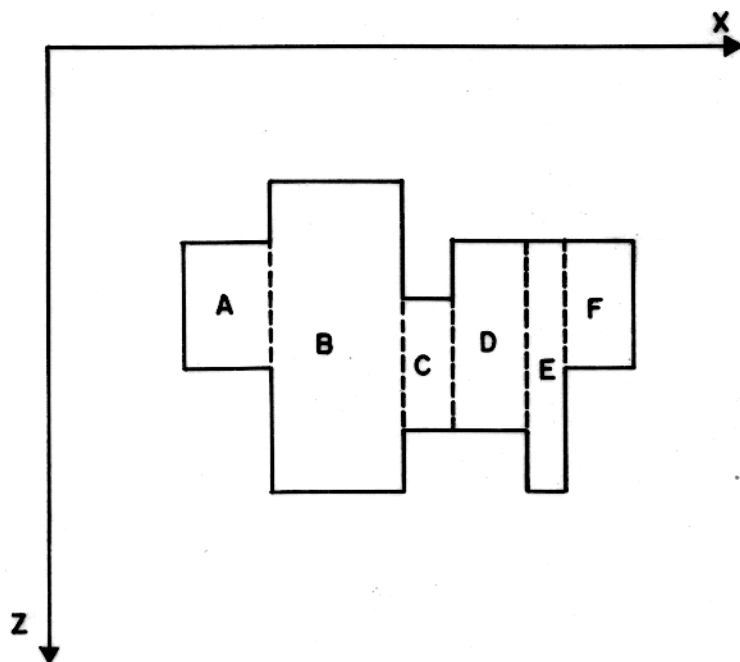


Fig. 2.1 - Prismas bidimensionais que formam o corpo de forma complexa.

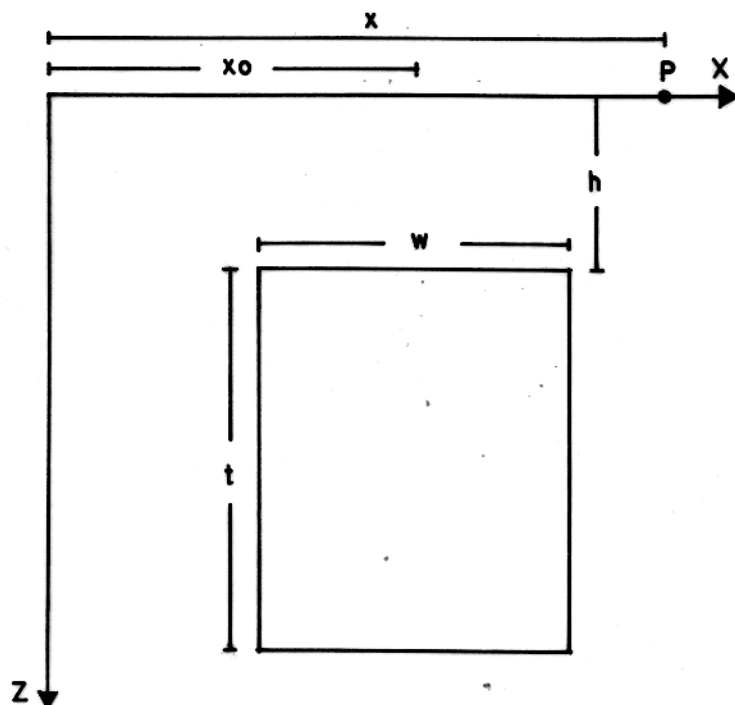


Fig. 2.2 - Prisma bidimensional, sua localização e seus parâmetros.

$$\phi = \arctg \frac{x-x_0-w}{h} - \arctg \frac{x-x_0}{h}$$

onde: x = abcissa do ponto de observação

h = profundidade do topo do prisma

t = espessura

w = largura

x_0 = abcissa do centro do prisma

G = constante gravitacional

d = contraste de densidade entre o corpo e o meio que o circunda

O campo anômalo magnético de um prisma 2-D vertical, de espessura finita é obtido pela subtração dos campos de dois prismas de espessura infinita cuja equação é dada por (McGrath & Hood, 1970) :

$$f(x) = m C \ln D + 2m E \arctg F \quad (2.2)$$

sendo: $C = \cos(IM) \sin(DM) \sin(IT) + \sin(IM) \cos(IT) \sin(DT)$

$$D = \frac{h^2 + (x-x_0-w/2)^2}{h^2 + (x-x_0+w/2)^2}$$

$$E = \sin(IM) \sin(IT) - \cos(IM) \sin(DM) \cos(IT) \sin(DT)$$

$$F = \frac{h w}{h^2 + (x-x_0)^2 - w^2/4}$$

onde: x = abcissa do ponto de observação

h = profundidade do topo

w = largura

x_0 = posição do centro do prisma

IT = inclinação do campo geomagnético

DT = azimuth do campo geomagnético em relação ao eixo y

IM = inclinação do vetor magnetização

DM = azimuth do vetor magnetização em relação ao eixo y

m = módulo do vetor magnetização

O campo produzido por fontes irregulares é obtido pela superposição de campos devidos a prismas justapostos. Assim, o campo devido ao corpo mostrado na Figura 2.1 é obtido pela soma dos campos produzidos pelos prismas A a F. A cada um desses campos, gravimétrico e magnético, adicionou-se ruído aleatório Gaussiano e/ou ruído geológico devido a corpos interferentes (superficiais e/ou laterais em relação ao corpo principal). Esses corpos interferentes, também são prismas verticais 2-D que podem ser pequenos e rasos (interferências superficiais) ou grandes e profundos (interferências laterais).

2.2 Problema Inverso

A interpretação dos campos gravimétrico e magnético contaminados ou não com algum tipo de ruído é feita através de uma inversão não linear, minimizando-se um dos possíveis escalares associados ao vetor de resíduos, (diferença entre o campo observado e o ajuste produzido por um único prisma que serve de modelo interpretativo).

Seja então $\bar{y}_0(\bar{r})$ (uma barra em cima de uma letra, indica um vetor) o vetor N-dimensional de observações, onde $\bar{r}$ é o vetor que define as posições de observações. Aproximaremos $\bar{y}_0(\bar{r})$ por um funcional contínuo não linear $f(r, \bar{p})$ que é o campo gravimétrico ou magnético teórico do modelo considerado, e $\bar{p}$ o vetor M-dimensional de parâmetros que define de modo único modelo interpretativo. Matematicamente, o problema inverso não linear

vinculado, pode ser formulado como:

$$\min_{\bar{p}} \| \bar{y}_0(\bar{r}) - \bar{f}(\bar{r}, \bar{p}_e) \| \quad (2.3)$$

$$\text{sujeito a } \bar{p}_i < \bar{p}_e < \bar{p}_s \quad \text{e} \quad (2.4a)$$

$$\| \bar{y}_0(\bar{r}) - \bar{f}(\bar{r}, \bar{p}_e) \| < T \quad (2.4b)$$

onde $\bar{p}_e$ é o vetor estimativa de $\bar{p}$ e $\bar{f}(\bar{r}, \bar{p}_e)$ o vetor, cujos elementos são os valores do funcional $f(r, \bar{p}_e)$ avaliado em $\bar{r}$.

A obtenção de $\bar{p}$ é feita pela solução da equação (2.3) onde a função objeto ($\| \cdot \|$) é qualquer norma e T (tolerância), uma quantidade que depende principalmente da amplitude dos erros nas observações (nível de ruído) e da habilidade do modelo considerado em descrever as fontes reais. Os elementos de $\bar{p}_i$ e $\bar{p}_s$, definem respectivamente, os limites inferiores e superiores dos elementos do vetor de parâmetros e dependem das informações a priori disponíveis sobre as fontes.

O método Complex de busca direta é empregado para resolver a equação (2.3), na norma 2 (Box, 1965; Richardson & Kuester, 1973). Esse método é uma modificação do método Simplex (Nelder & Mead, 1965) onde um poliedro de $K = M+1$ vértices (chamado de complex) é usado na minimização de uma função de M variáveis independentes. A modificação básica introduzida por Box (1965), diz respeito ao número de vértices K do poliedro que passa a ter entre $M+1$ e $2M$ vértices, evitando assim a perda de dimensionalidade que o método Simplex apresenta quando confrontado com os vínculos. Esses vértices são na verdade pontos no espaço de parâmetros e portanto serão representados como vetores M -dimensionais.

O procedimento do método Complex tem as seguintes etapas:

- 1) Escolher o primeiro ponto $\bar{p}^{(1)}$ do complex, de modo a satisfazer os vínculos.
- 2) Gerar os $K-1$ pontos $\bar{p}^{(2)}, \bar{p}^{(3)}, \dots, \bar{p}^{(K)}$, do complex, satisfazendo os vínculos, através da relação:

$$\bar{p}^{(i)} = \bar{p}^{(1)} + \bar{Z} \bar{r}^{(i)} \quad (2.5)$$

onde, $\bar{r}^{(i)}$ é o vetor de números pseudo-aleatórios, cujo elemento r_j é uma realização de uma variável aleatória Gaussiana com média nula e desvio padrão unitário, e $\bar{Z}$ é a matriz diagonal $M \times M$, com elementos não nulos dados por:

$$z_{jj} = \frac{1}{4} \min (|p_j^{(1)} - p_{ij}|, |p_j^{(1)} - p_{sj}|) \quad (2.6)$$

- 3) Testar os vínculos de cada um dos $K-1$ pontos:

3.1) Se os vínculos de um ponto forem violados ele é colocado dentro da região viável a uma pequena distância v da borda violada e segue-se para 4.

3.2) Se os vínculos são satisfeitos, seguir para 4.

- 4) Avaliar a função objeto $f(\bar{p}^{(i)})$, $i = 1, 2, \dots, K$ em cada ponto do complex.

5) Armazenar os pontos de maior ($\bar{p}_a$) e de menor ($\bar{p}_b$) valor da função.

- 6) Testar a convergência:

Se $f(\bar{p}_b) - f(\bar{p}_a) < b$ em s iterações consecutivas, o processo iterativo termina. Caso contrário segue-se para 7.

- 7) Retirar do complex o ponto $\bar{p}_a$ com maior valor da função e calcular o centróide $\bar{p}_c$ dos pontos restantes. Substituir o pon-

to retirado por um novo ponto $\bar{p}_n$ situado a uma distância de $\bar{p}_c$, q vezes a distância de $\bar{p}_c$ a $\bar{p}_a$ no sentido $\bar{p}_a$ para $\bar{p}_c$ (Figura 2.3). O ponto $\bar{p}_n$ é portanto uma reflexão do ponto $\bar{p}_a$ com coeficiente de reflexão q :

$$\bar{p}_n = (q + 1) \bar{p}_c - q \bar{p}_a, \quad (2.7)$$

e

$$\bar{p}_c = \frac{1}{K-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq L}}^K \bar{p}^{(i)} \quad (2.8)$$

onde $\bar{p}^{(L)} = \bar{p}_a$

8) Testar o valor da função em p_n :

Se $f(\bar{p}_n) < f(\bar{p}_a)$, voltar para 3, caso contrário substituir $\bar{p}_n$ por outro ponto $\bar{p}_n'$, situado na metade da distância entre o antigo ponto $\bar{p}_n$ e o centróide $\bar{p}_c$. Tem-se uma contração em direção ao centróide:

$$\bar{p}_n' = \frac{(\bar{p}_n + \bar{p}_c)}{2} \quad (2.9)$$

Este passo é repetido até que $\bar{p}_n'$ não seja mais o ponto de maior valor da função, nesta caso voltar para 3.

Esse procedimento nos leva a uma solução. Outras soluções possíveis são obtidas variando-se a semente que gera os números pseudo-aleatórios. Estas soluções estão distribuídas dentro da região viável, definida pelos vínculos impostos aos parâmetros. Essa região pode ser de grandes dimensões, demandando um grande esforço computacional. Para minimizar este problema, escolheu-se a distribuição normal para a variável

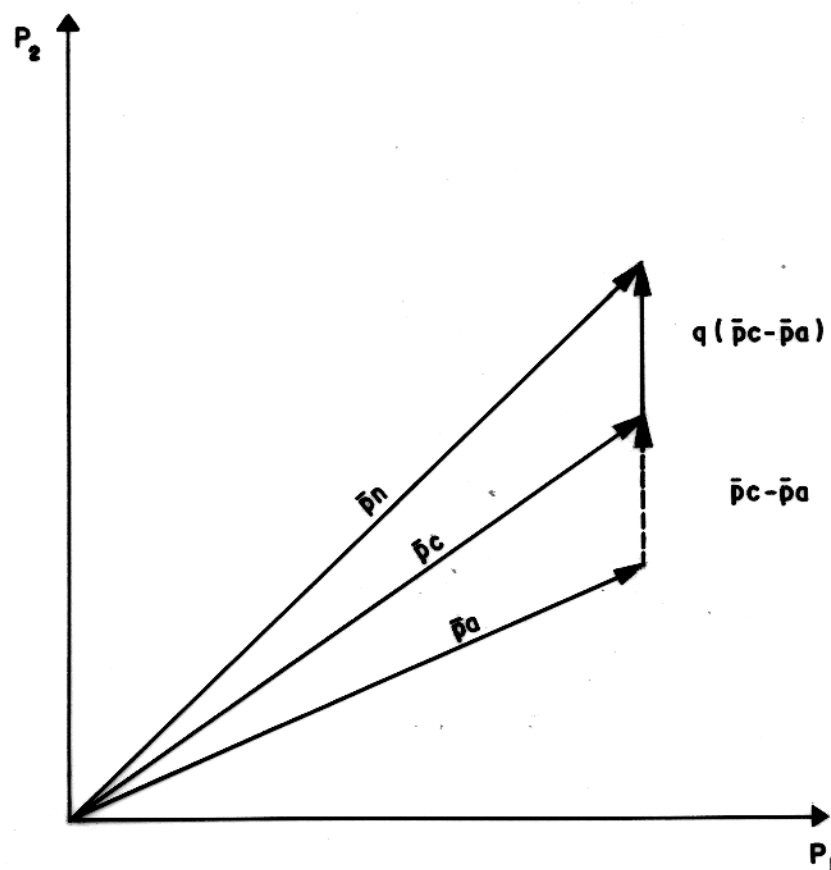


Fig. 2.3- Reflexão do complex para um caso bidimensional. $\bar{p}_a$ é o ponto rejeitado, $\bar{p}_c$ o centróide dos pontos restantes e $\bar{p}_n$ o novo ponto do complex.

aleatória $\bar{r}^{(i)}$ de modo a concentrar a busca das soluções próximo ao ponto inicial.

Os valores das constantes b , s e v utilizadas foram respectivamente 10^{-1} , 5 e 10^{-4} enquanto para q foi utilizado o valor 1.3 , proposto por Box (1965).

2.3 Análise Fatorial

As várias soluções obtidas pelo método descrito acima, são dispostas numa matriz de dados $\bar{A}$ (duas barras em cima de uma letra maiúscula indica uma matriz) cujas linhas correspondem às soluções e as colunas aos parâmetros que definem cada solução. A partir dessa matriz, procuramos agrupar soluções semelhantes e ordenar as soluções substancialmente diferentes com a finalidade de analisar as possíveis causas de ambiguidade empregando para tanto a análise fatorial.

O primeiro passo da análise fatorial é a conversão da matriz de dados numa matriz de espalhamento $\bar{X}$, quadrada, simétrica e, em geral, normalizada. Como veremos mais adiante, a análise fatorial pode ser de modo R , onde a matriz de espalhamento é dada por:

$$\bar{X}_R = \bar{A}^T \bar{A} \quad (2.10)$$

ou de modo Q com a matriz de espalhamento dada por:

$$\bar{X}_Q = \bar{A} \bar{A}^T \quad (2.11)$$

Baseado na decomposição em valores singulares, a matriz de espalhamento, pode ser escrita como:

$$\bar{X} = \bar{V} \bar{S} \bar{V}^T \quad (2.12)$$

onde $\bar{\bar{V}}$ é a matriz dos autovetores de $\bar{\bar{X}}$, e $\bar{\bar{S}}$ a matriz diagonal dos autovalores de $\bar{\bar{X}}$.

O produto:

$$\bar{\bar{V}} \bar{\bar{S}}^{1/2} = \bar{\bar{F}} \quad (2.13)$$

nos dá a matriz cujas colunas são os fatores, sendo os elementos de cada fator as cargas. A equação (2.13), mostra que os autovalores representam o comprimento dos fatores cuja direção é dada pelos autovetores.

Na prática, a matriz de espalhamento quase sempre contém informação irrelevante que torna a análise desnecessariamente complexa. Uma maneira de eliminar essa informação é reter somente os r autovalores maiores que um valor pré-determinado. O objetivo da análise fatorial é portanto, criar um número r , mínimo de novas variáveis, que são combinações lineares das m variáveis originais, tal que as novas variáveis ($r < m$) contenham aproximadamente o mesmo total de informação das variáveis originais contido na matriz $\bar{\bar{X}}$. Nesse caso, a matriz de espalhamento pode ser escrita:

$$\begin{matrix} \bar{\bar{X}} \\ r \end{matrix} = \begin{matrix} \bar{\bar{V}} \\ r \end{matrix} \begin{matrix} \bar{\bar{S}} \\ r \end{matrix} \begin{matrix} \bar{\bar{V}}^T \\ r \end{matrix} \quad (2.14)$$

Como a contribuição de cada fator para o total do espalhamento é dado por uma fração igual ao autovalor correspondente dividido pela soma de todos os autovalores, os fatores com grandes autovalores contribuem com um grande percentual para o espalhamento total, enquanto os fatores restantes contribuem com percentuais pequenos e muitas vezes insignificantes, podendo ser descartados sem grande perda de informação sobre o

espalhamento total. Isso nos leva a uma redução na dimensionalidade do problema.

O próximo passo é efetuar a rotação dos fatores, pois apesar da diminuição de dimensionalidade, o significado dos fatores fica confuso. Isso porque, a posição dos fatores ortogonais retidos foi originalmente definida junto com os fatores que foram posteriormente descartados. Procuramos então, um melhor posicionamento para os fatores retidos, com a restrição de permanecerem ortogonais entre si, o que pode ser feito através de rotações. A técnica empregada foi a VARIMAX, cujo objetivo é rodar o conjunto de fatores para uma posição, tal que a projeção de cada elemento da matriz de espalhamento sobre o eixo de fatores seja próximo das extremidades ou da origem, ou seja, as cargas dos fatores serão o mais próximo possível de +1, -1 ou 0.

Todo o procedimento descrito acima pode ser aplicado aos dois modos de análise em que se divide a análise fatorial. O modo R, onde procura-se a interrelação entre parâmetros, e o modo Q onde a interrelação procurada é entre soluções. No modo R a matriz de espalhamento comumente usada é a matriz de correlação cujos elementos dão uma medida da possível relação linear existente entre cada dois parâmetros num espaço de soluções. Já na análise fatorial modo Q, usa-se a matriz cosseno teta (Davis, 1986), cujos elementos medem o cosseno do ângulo entre duas soluções num espaço de parâmetros. As cargas têm também interpretações diferentes para cada modo da análise fatorial. No modo R, elas representam as projeções dos fatores nos eixos de parâmetros (Figura 2.4), e no modo Q, as cargas dão as projeções dos fatores nos eixos de soluções.

Como a finalidade de utilizarmos a análise fatorial é a

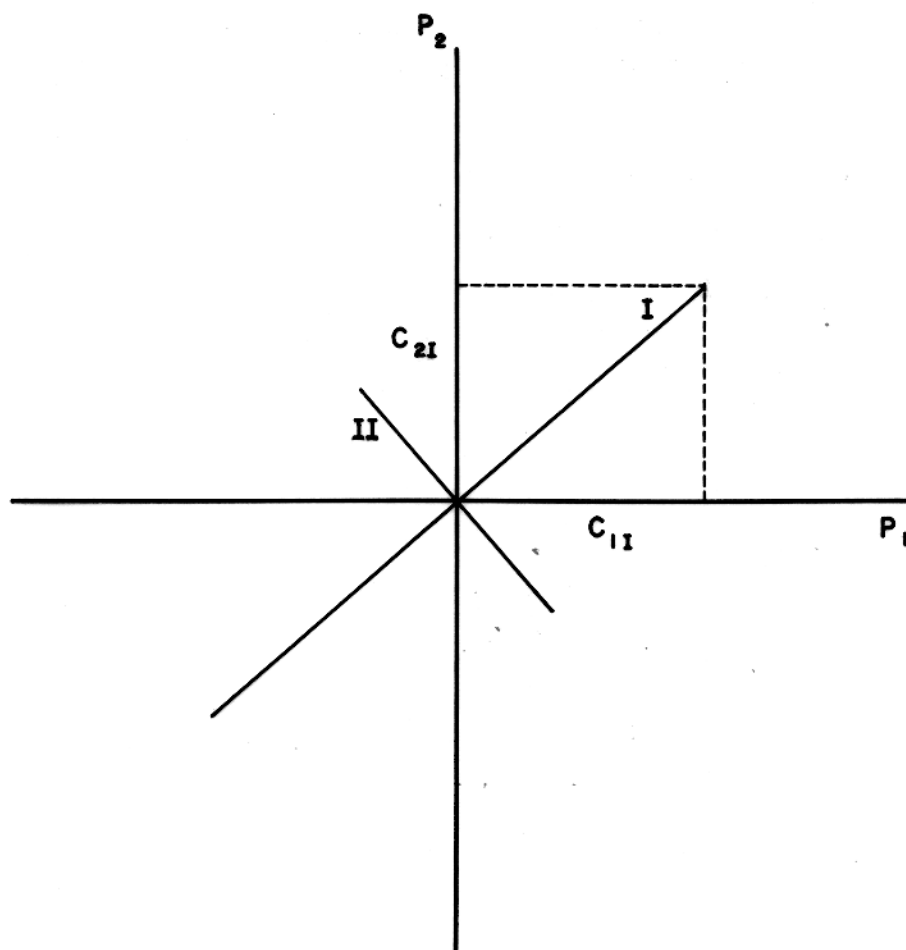


Fig. 2.4- Fatores para o caso de análise modo R com dois parâmetros P_1 e P_2 . C_{1I} e C_{2I} são as cargas dos parâmetros P_1 e P_2 no primeiro fator.

de tentar descobrir que parâmetros contribuem mais fortemente para a ambiguidade, a análise modo R seria a mais adequada. No entanto, devido a rotação dos fatores alterar a relação de cada parâmetro com os fatores e ao fato da análise modo R só detectar relações lineares entre parâmetros, a utilização do modo R nos leva a conclusões inconsistentes sobre as possíveis dependências lineares (que variam de acordo com a amostragem) e conseqüentemente sobre a ambiguidade. A Figura 2.5a, mostra um conjunto de soluções plotadas no sistema de eixos composto por dois parâmetros P_1 e P_2 . A superfície que envolve essas soluções é uma elipse cujo eixo maior é o autovetor associado ao maior autovalor (fator I) e cujo eixo menor é o autovetor associado ao menor autovalor (fator II). O fator I determina portanto, a direção de máxima correlação entre os parâmetros P_1 e P_2 , podendo o fator II ser eliminado sem grande perda de informação se ele for bem menor que o fator I. A eliminação do fator II, no entanto permite que o fator I seja rodado para uma nova posição (fator I'), em geral diferente da posição do fator não rodado I, por que este está vinculado à posição do fator II (ambos são ortogonais). Na Figura 2.5b, vemos que o fator I forma um ângulo maior com o eixo P do que o fator I' devido ao ponto A que tem grande influência na definição do segundo fator (e portanto do primeiro também), mas que não é influente na determinação da posição do fator único I', que pode portanto rodar bastante quando o segundo fator é eliminado. Como as componentes do fator I são os coeficientes de uma equação que sugere a principal combinação linear dos parâmetros, ao mudarem suas componentes, muda também a equação de combinação linear.

Para superar essa dificuldade, utilizamos um

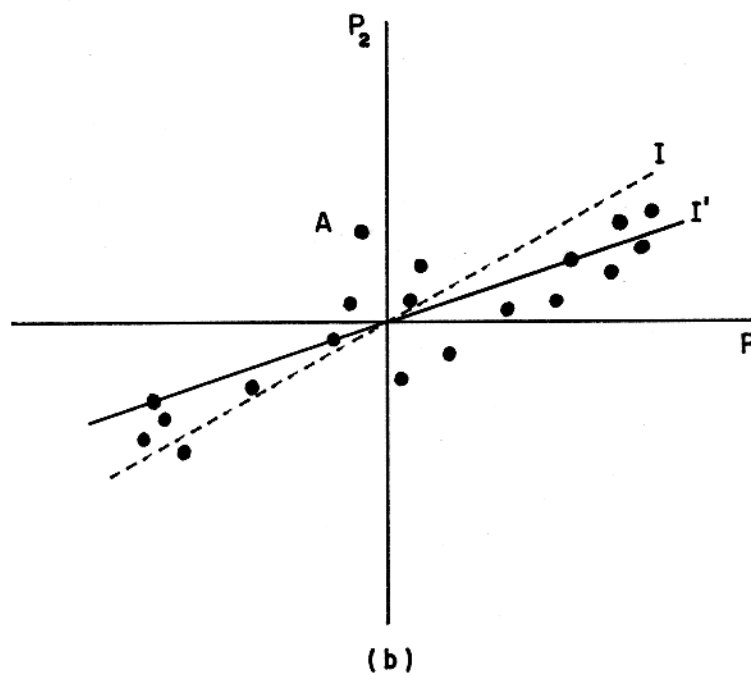
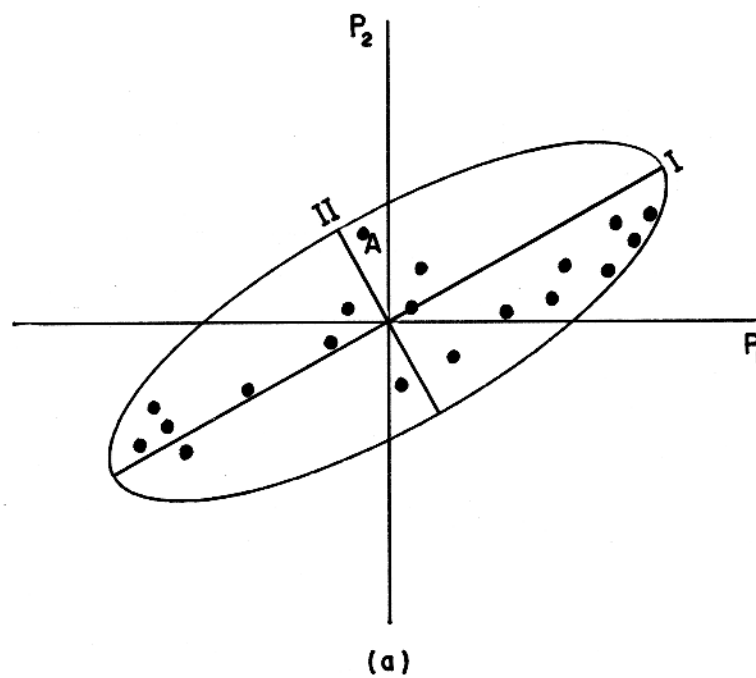


Fig. 2.5- (a) Fatores I e II em suas posições originais para o caso de análise modo R com dois parâmetros P_1 e P_2 . (b) Fator I rodado (I') após a eliminação do fator II.

procedimento que faz uso da análise modo Q, onde estaremos interessados apenas na ordenação das soluções no espaço de parâmetros e não nas posições exatas das soluções. A Figura 2.6a ilustra a projeção do conjunto de parâmetros associados a três soluções S_1, S_2 e S_3 , no plano que contém S_1 e S_2 . A posição do elipsoide (cuja projeção é a elipse) que envolve os parâmetros foi condicionado pelos três eixos-fatores. No entanto, ao eliminarmos o fator III que menos contribui para a similaridade das soluções o elipsoide se reduz a uma elipse que pode ser rodada para melhor posicionar os fatores restantes I' e II' (Figura 2.6b). Ao se efetuar essa rotação, a relação de cada solução com os fatores muda, mas a ordenação das cargas (neste caso referentes às soluções 1 e 2, por hipótese) permanece a mesma (Figura 2.7a e 2.7b). Essa ordenação das soluções só vai mudar se o ângulo de rotação dos fatores for muito grande o que só vai acontecer se retirarmos fatores cujos autovalores sejam significativos ou seja, fatores que tenham contribuição substancial na definição da matriz de similaridade das soluções. Isto, no entanto, dificilmente ocorre na análise Q, uma vez que em geral três fatores apenas, explicam mais de 99% da similaridade entre as possíveis soluções. Por outro lado na análise R é comum o fato de três fatores explicarem apenas 85 a 90% da variância total dos parâmetros. Desse modo a análise das soluções extremas ao longo dos principais fatores na análise modo Q nos dá as direções de maior ambiguidade no espaço de parâmetros, possibilitando através da inspeção visual da geometria dessas soluções a análise semi-quantitativa das principais dependências não lineares entre os parâmetros que são as causas primordiais da ambiguidade.

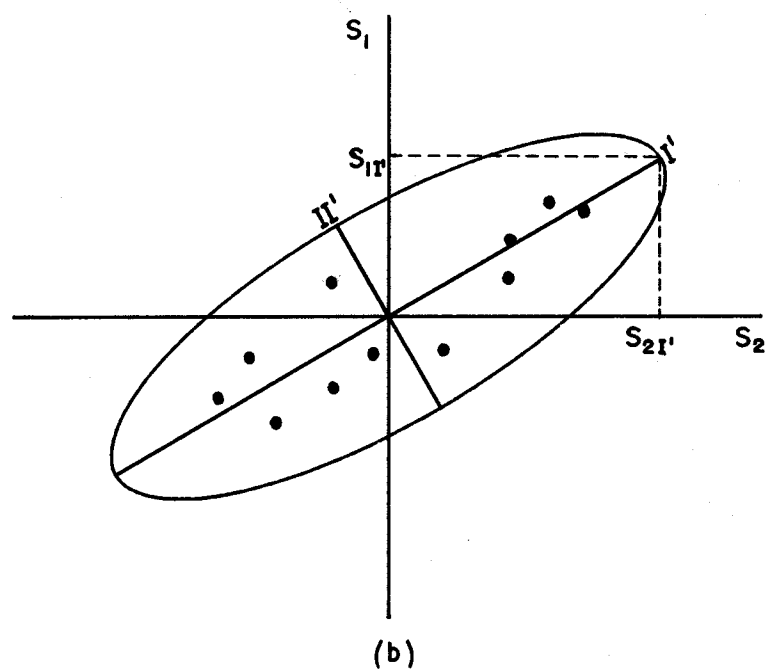
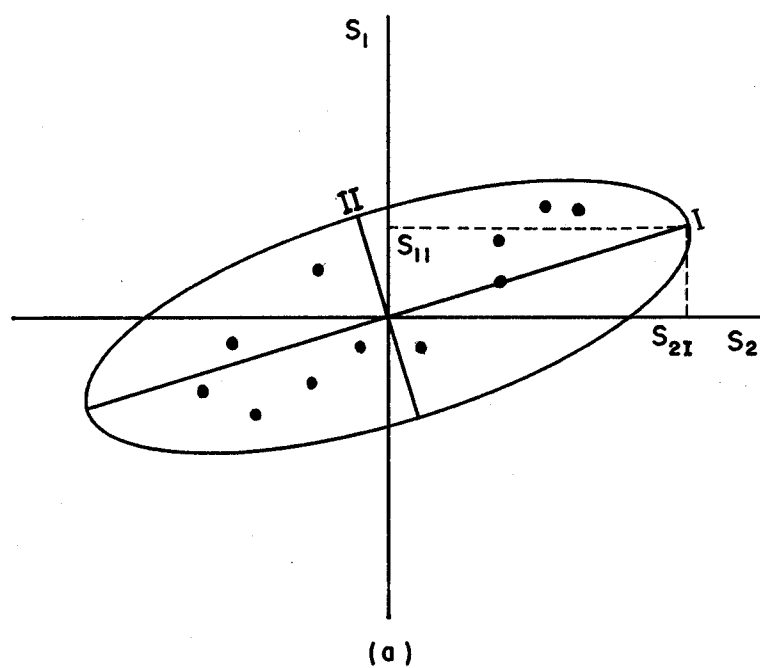


Fig. 2.6 - Fatores I e II em suas posições originais, contidas no plano das soluções S_1 e S_2 , para o caso da análise modo Q. (b) Fatores rodados I' e II' após a eliminação do fator III.

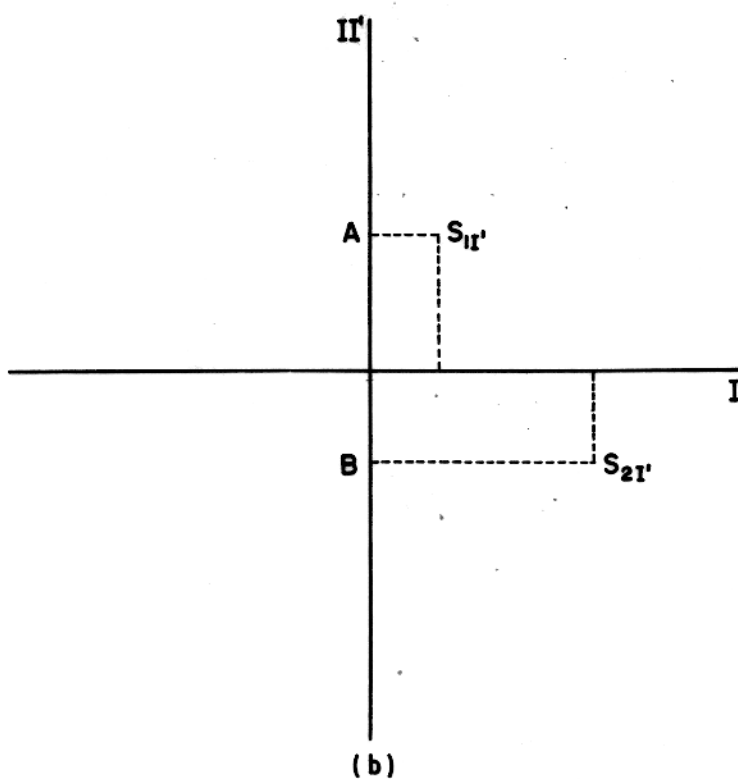
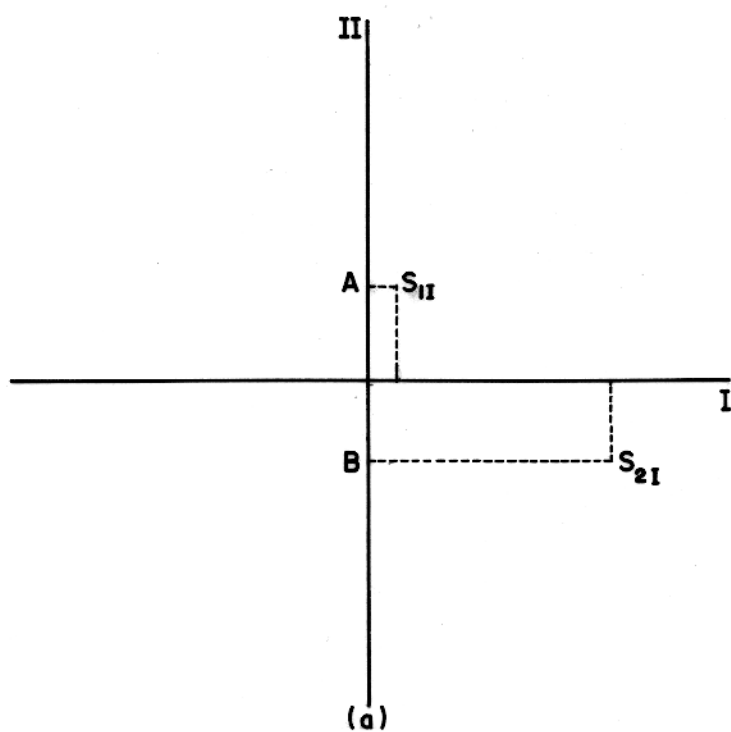


Fig. 2.7 - Relação entre as cargas S_{1I} e S_{2I} , (a) antes da rotação: $\overline{BS_{2I}} > \overline{AS_{1I}}$, (b) após a rotação: $\overline{BS_{2I'}} > \overline{AS_{1I'}}$.

3 - ANALISE DOS DADOS SINTÉTICOS

A metodologia descrita anteriormente foi aplicada a dados sintéticos (gravimétricos e magnéticos) simulando diversas causas de ambiguidade encontradas na prática, como modelo simples, presença de ruído aleatório e interferências superficiais e laterais. Esses dados constituem-se de 41 observações espaçadas de 10 metros. Na inversão, utilizamos uma aproximação inicial e um conjunto de 20 sementes (que geram números pseudo-aleatórios) para obter o conjunto de pontos no espaço das soluções que nos leva às 20 soluções diferentes. Essas soluções contem as estimativas dos parâmetros que definem o modelo interpretativo e a estimativa do nível de base que é somado ao campo calculado pela equação (2.1) no caso gravimétrico ou pela equação (2.2) no caso magnético. Apenas as estimativas dos parâmetros geométricos (h , t , w , x_0) foram consideradas para a formação da matriz de dados utilizada na análise fatorial, de modo que não é necessário a aplicação de nenhuma normalização a esses parâmetros pois, todos são expressos na mesma unidade. A matriz cosseno teta foi utilizada correspondendo ao produto $\bar{A} \bar{A}^T$ dado pela equação (2.11), com as linhas de $\bar{A}$ tendo norma euclidiana unitária. Cada fator só é retido, se ele representar pelo menos 20% da dispersão explicada pelo fator anterior (todos ordenados em ordem decrescente).

A dependência entre os parâmetros, que leva à maior dispersão das soluções alternativas, é em geral não linear, e a sua análise e caracterização é feita com base nos diagramas de cargas como os das Figuras 2.7a e 2.7b. Esta análise leva um certo grau de subjetividade, sendo, neste trabalho, realizada através da inspeção das várias soluções ordenadas de acordo com

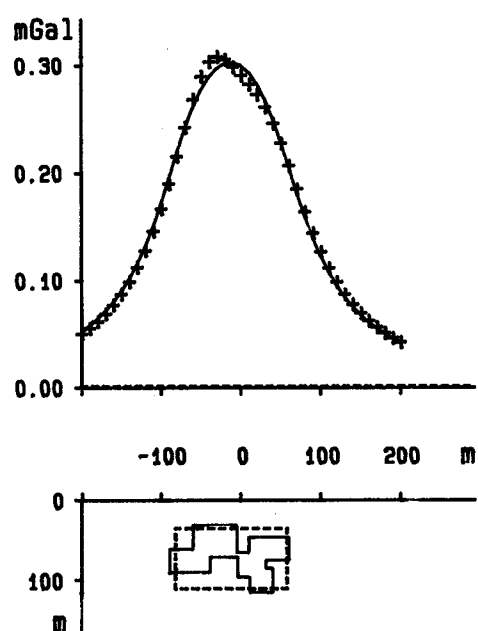
as cargas produzidas nos principais fatores. Muitas vezes, é possível, inspecionando apenas as soluções extremas, inferir quais os principais parâmetros envolvidos na ambiguidade: eles serão os responsáveis pelas diferenças fundamentais entre as soluções extremas.

3.1 Gravimetria

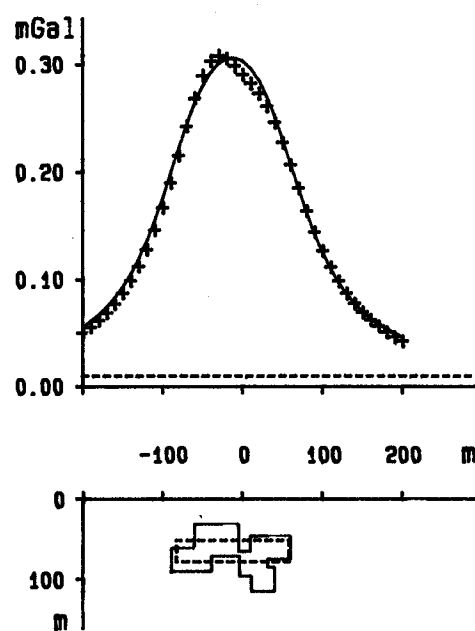
Para gravimetria, foram feitos cerca de 60 testes, cada um simulando alguma das causas de ambiguidade. Desses 60 testes, incluindo testes com corpo principal raso e profundo, escolhemos 10 para descrever em detalhes sendo as conclusões gerais discutidas no final desta seção.

1º Teste

Este teste mostra o efeito do modelo interpretativo simples. O modelo correto está representado nas Figuras 3.1a e 3.1b em linha cheia e o campo produzido por ele está representado por cruces apenas nos pontos de amostragem, simulando assim as observações. Apenas dois fatores foram retidos e as 20 soluções estão plotadas no gráfico dos fatores da Figura 3.2. O ângulo entre as soluções extremas é de aproximadamente 10 graus. As Figuras 3.1a e 3.1b mostram em linhas tracejadas as 2 soluções extremas, assinaladas na Figura 3.2 por setas, cujos campos ajustados estão mostrados em linha cheia. Como podemos observar, na solução extrema mostrada na Figura 3.1a, o corpo estimado é mais espesso e tem profundidade do topo menor que o corpo correspondente à solução extrema da Figura 3.1b, sendo a largura constante em ambos os casos. Logo, de acordo com o que vimos anteriormente, os principais parâmetros envolvidos na ambiguidade das soluções são a espessura e a profundidade do topo, variando no sentido inverso (o corpo com



(a)



(b)

Fig. 3.1 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) e (b) do 1º teste em gravimetria.

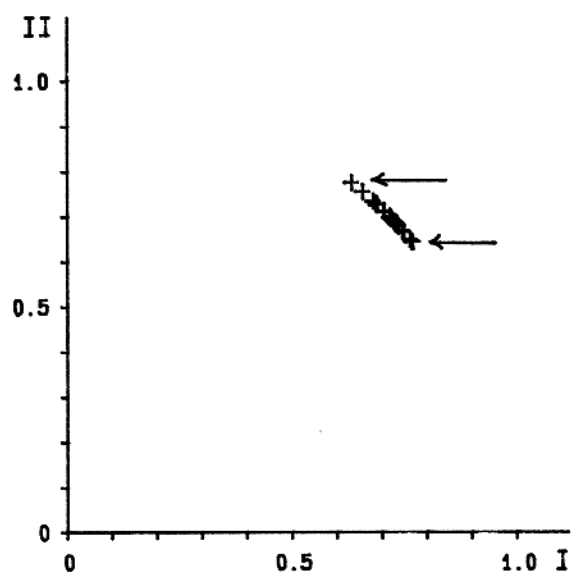


Fig. 3.2 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 1º teste em gravimetria.

maior espessura tem menor profundidade do topo, e vice-versa). Como a anomalia está bem caracterizada (ponto de inflexão bem definido), o nível de base, mostrado em linha tracejada nas Figuras 3.1a e 3.1b, pouco variou (cerca de 7×10^{-3} mGal).

2º Teste

Neste teste, é ilustrado o efeito do modelo interpretativo simples somado à presença de ruído aleatório Gaussiano de média zero e desvio padrão de 7×10^{-3} mGal, nos dados. Dois fatores foram retidos. A distribuição das soluções está mostrada na Figura 3.3, sendo o ângulo entre as soluções extremas de cerca de 16 graus. Os parâmetros envolvidos foram a espessura e a profundidade do topo, variando no sentido inverso, da mesma forma que no 1º teste. No entanto, enquanto as geometrias das soluções no teste anterior forneceram sempre corpos tabulares, aqui as soluções produzem desde corpos equidimensionais até tabulares, como mostram as soluções extremas ilustradas nas Figuras 3.4a e 3.4b. Com a presença de ruído aleatório, a anomalia continuou bem definida, mas o nível de base teve uma variação maior (de aproximadamente 24×10^{-3} mGal).

3º Teste

O teste que se segue mostra o efeito do modelo interpretativo simples somado à presença de interferências laterais (ao norte e ao sul). A Figura 3.5 ilustra a distribuição das soluções nos dois fatores retidos. O ângulo entre as soluções extremas é de aproximadamente 22 graus, o que mostra um aumento na dispersão das soluções cujas formas variam desde a equidimensional até as prismáticas, como mostram as soluções da Figura 3.6, cujas posições estão assinaladas com

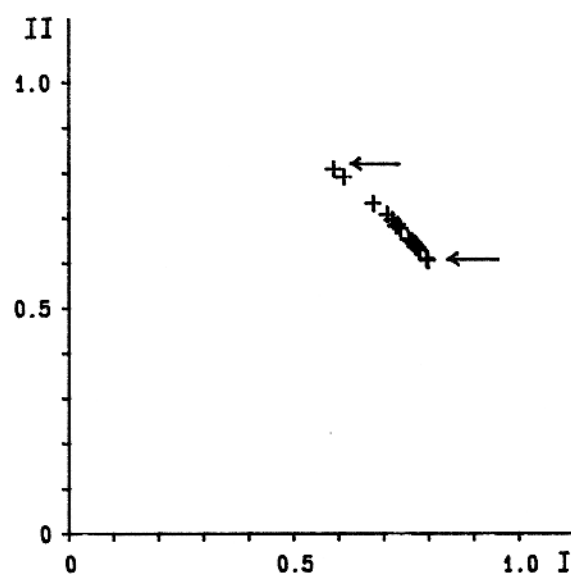
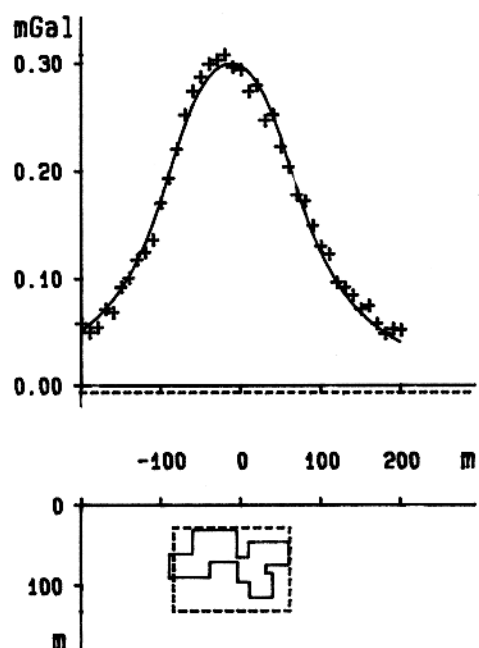
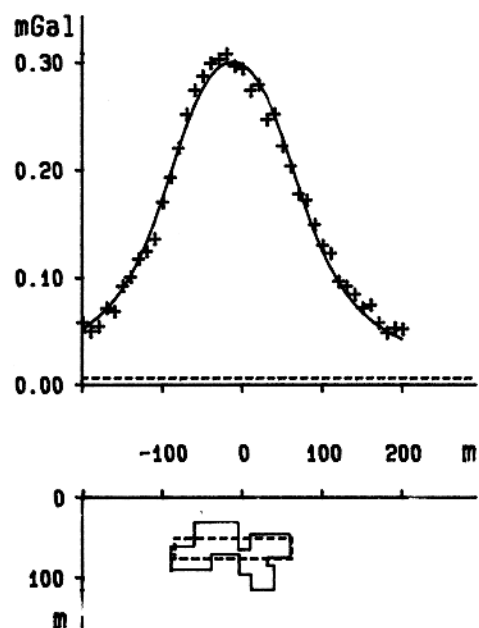


Fig. 3.3 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 2º teste em gravimetria. As setas assinalam as soluções extremas mostradas nas Figuras 3.4a e 3.4b.



(a)



(b)

Fig. 3.4 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) e (b) do 2º teste em gravimetria.

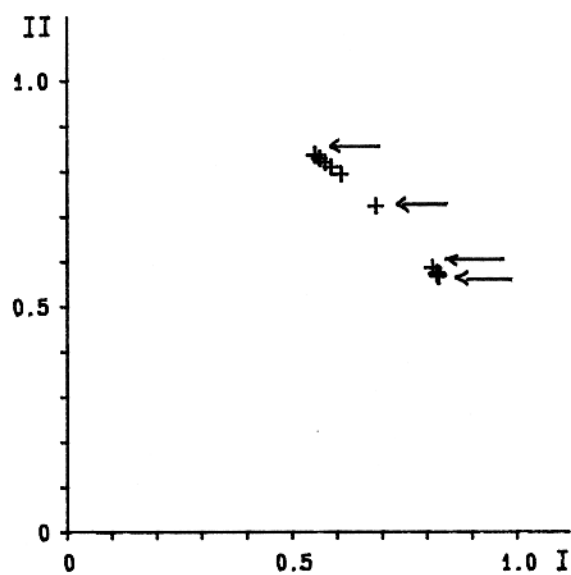
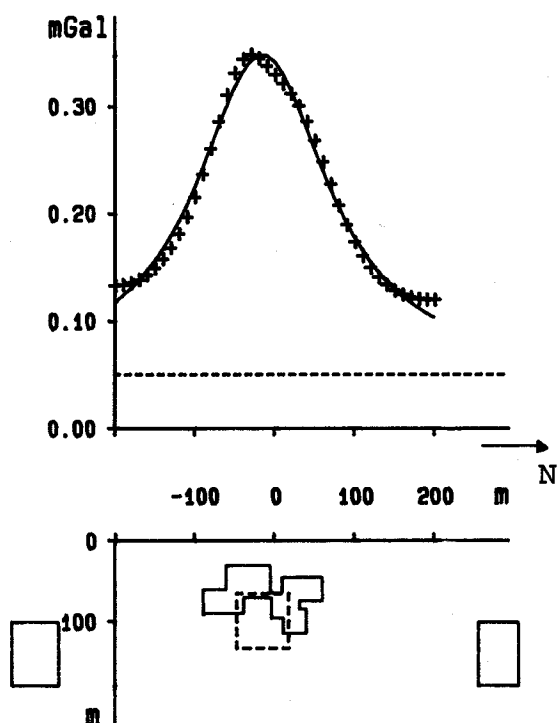
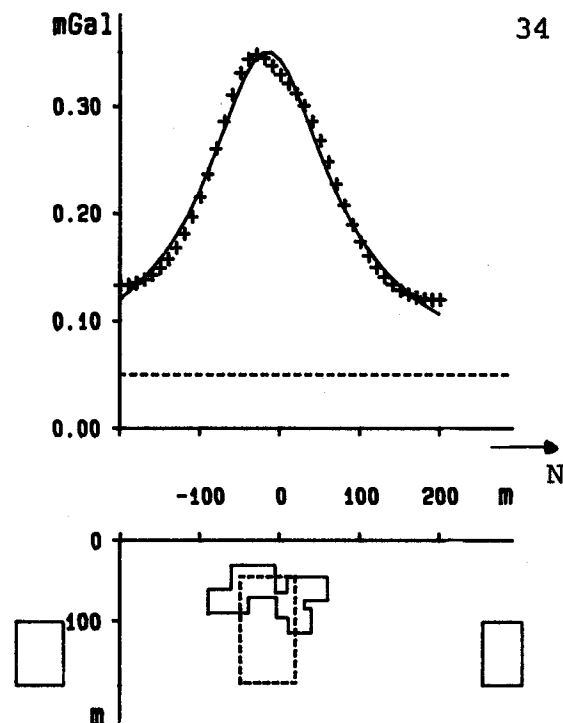


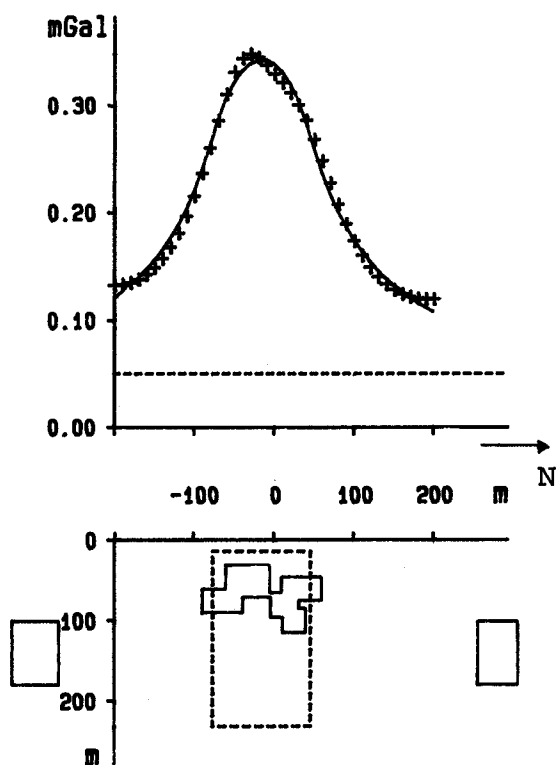
Fig. 3.5 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 3º teste em gravimetria.



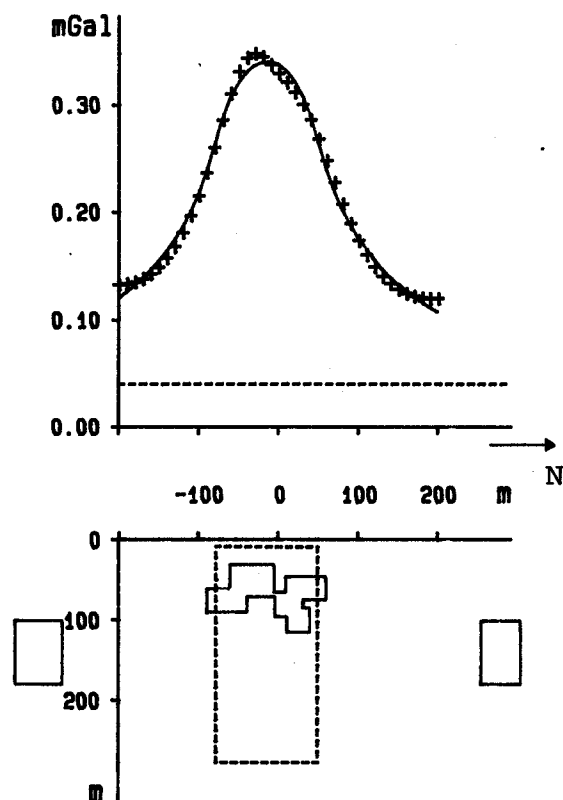
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.6 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo) para a sequência de soluções (a) a (d) do 3º teste em gravimetria.

setas horizontais na Figura 3.5. Os principais parâmetros envolvidos na ambiguidade, continuam sendo a espessura e a profundidade do topo variando no sentido inverso. O nível de base pouco variou (10×10^{-3} mGal). No entanto, devido à presença das interferências laterais a anomalia decai, dentro da área amostrada, para um valor maior que zero, fazendo com que haja um aumento do valor absoluto do nível de base.

4º Teste

Este teste apresenta o mesmo corpo principal do teste anterior para ilustrar o efeito do modelo interpretativo simples mais a presença de interferências superficiais. A partir da análise da contribuição de cada fator para a dispersão das soluções foram retidos três fatores e para representar a distribuição das soluções em relação aos fatores utilizou-se a projeção estereográfica mostrada na Figura 3.7. Na Figura 3.8 (de a a c) está representada a sequência de soluções correspondentes ao fator II, cujas posições estão assinaladas no gráfico de fatores com setas horizontais (Figura 3.7). Nas Figuras 3.8d a 3.8f, as soluções representadas, tem suas posições em relação aos fatores assinaladas por setas verticais na Figura 3.7 e correspondem ao fator III. Na primeira sequência (fator II) vemos que as soluções variam da mais espessa e rasa para a menos espessa e profunda, indicando que os parâmetros principais, espessura e profundidade do topo, variam inversamente. Na segunda sequência (fator III), todas as soluções tem forma tabular, sendo os principais parâmetros envolvidos a largura e a profundidade do topo que variam inversamente. O nível de base apresenta uma variação de cerca de 33×10^{-3} mGal.

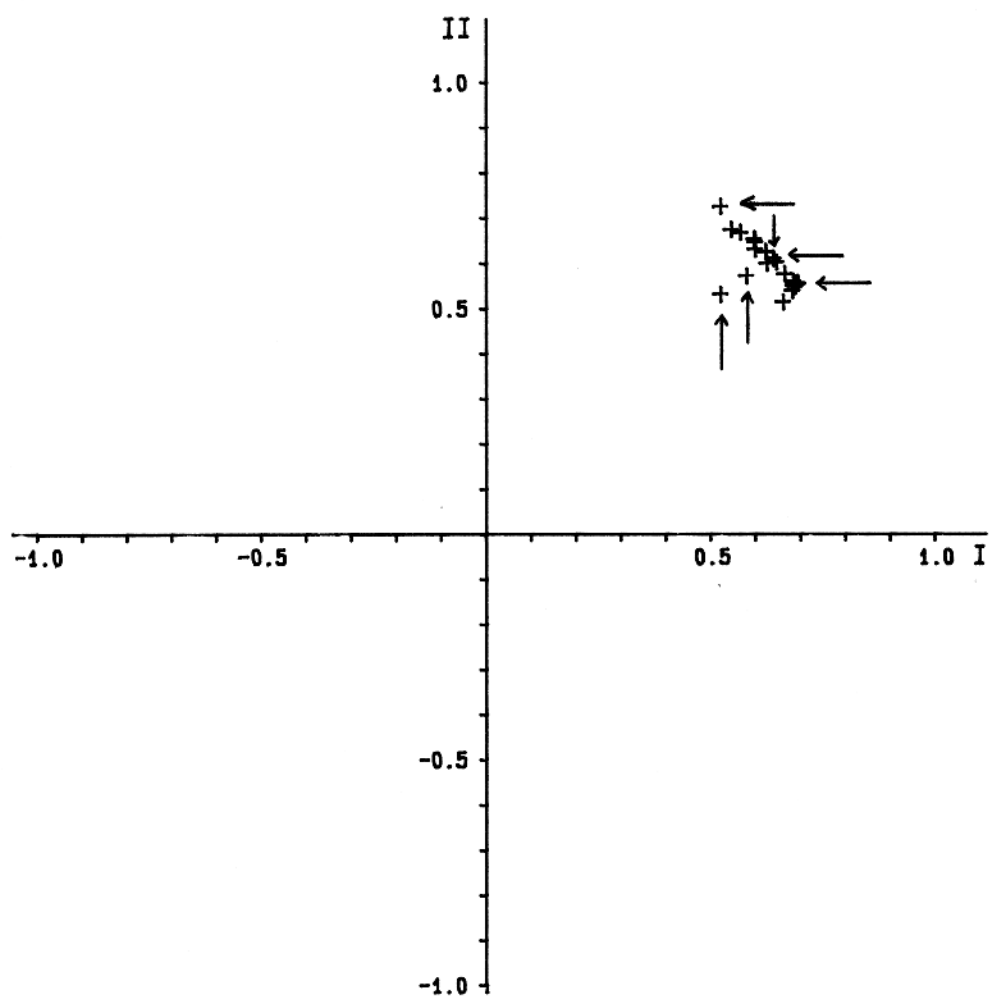
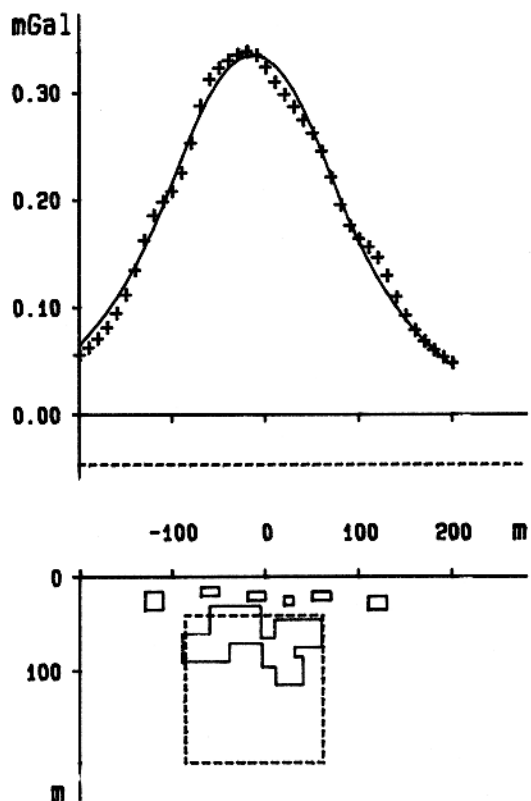
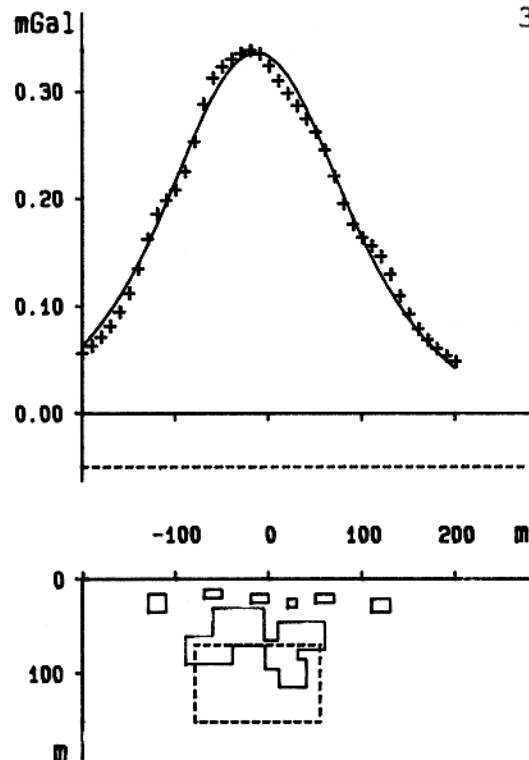


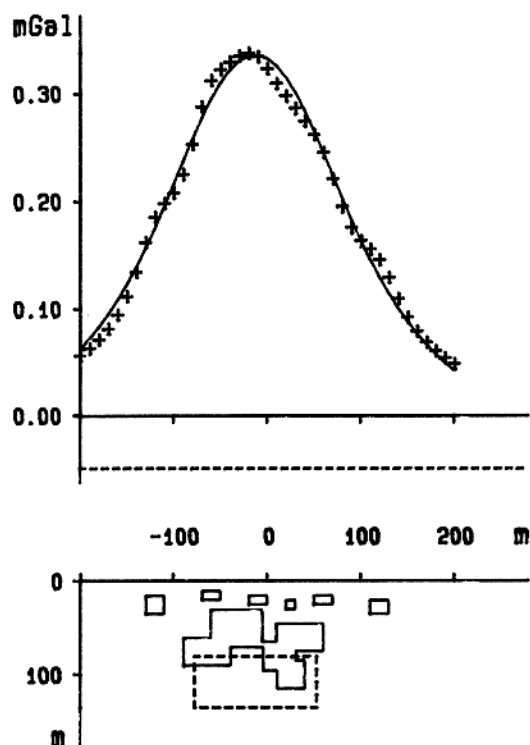
Fig. 3.7 - Projeção estereográfica das cargas (representadas por cruces) nos fatores I, II e III, para o 4º teste em gravimetria. O fator III é perpendicular ao plano da figura.



(a)

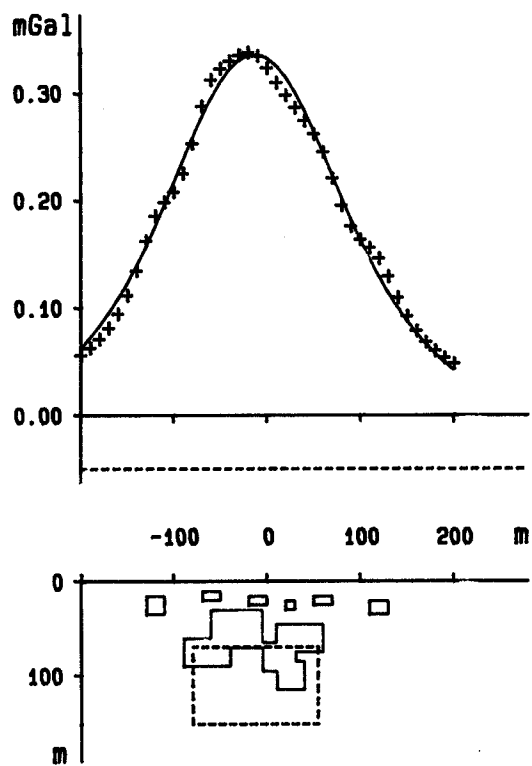


(b)

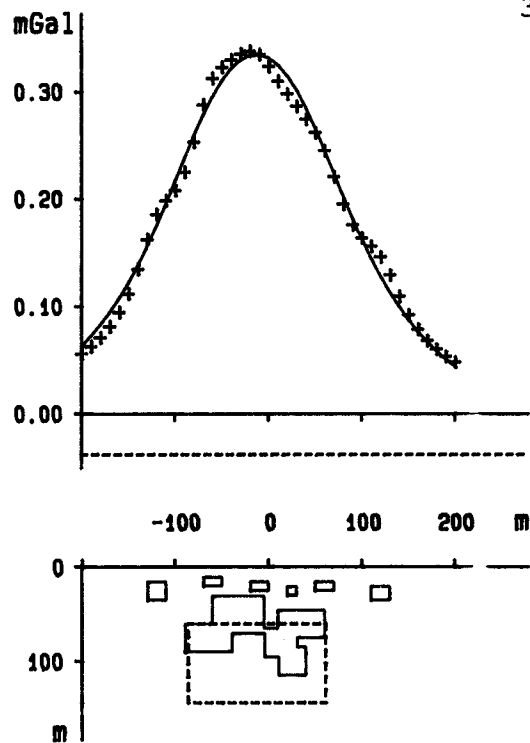


(c)

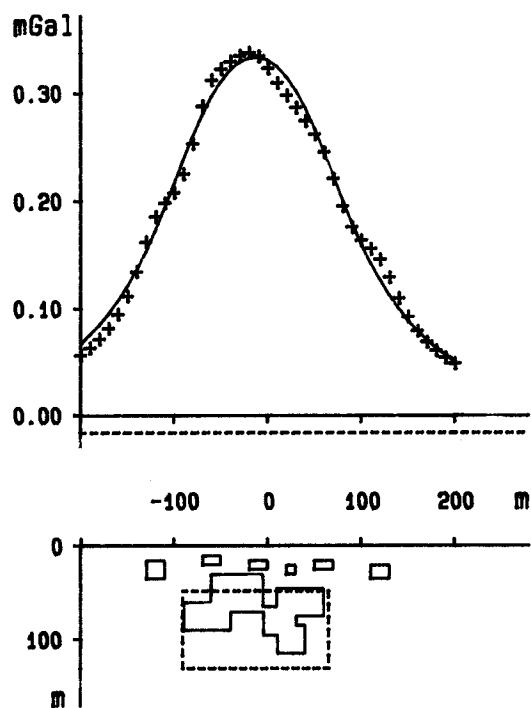
Fig. 3.8 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo) para o 4º teste em gravimetria. A sequência de soluções de (a) a (c) está relacionada ao fator II e a sequência de (d) a (f) ao fator III.



(d)



(e)



(f)

Fig. 3.8

5º Teste

Os testes que se seguem mostram os estudos feitos com o corpo principal em profundidade maior que nos testes anteriores.

O efeito estudado aqui é do modelo interpretativo simples. Dois foram os fatores retidos e as 20 soluções plotadas no plano dos fatores I e II (Figura 3.9) mostram um ângulo de 52 graus entre as soluções extremas. Esse aumento significativo da ambiguidade em relação aos testes com o corpo raso advem do fato desta anomalia ser mais suave. O fato de ela se estender muito além do perfil amostrado e do ponto de inflexão ser mal caracterizado em comparação com as anomalias anteriores faz com que os principais parâmetros envolvidos sejam a largura e a espessura que variam no sentido inverso. O nível de base apresenta variação de 73×10^{-3} mGal como consequência da má definição do ponto de inflexão, estando acoplado à espessura de modo inverso. A má definição da anomalia, permite portanto, soluções que vão desde as de forma tabular até as de forma prismática como mostram as Figuras 3.10a a 3.10d, estando as posições das soluções ilustradas, assinaladas na Figura 3.9 com setas horizontais.

6º Teste

O efeito do modelo interpretativo simples para o corpo profundo somado à presença de ruído aleatório Gaussiano de média zero e desvio padrão de 5×10^{-3} mGal, é estudado neste teste. A Figura 3.11 mostra a dispersão das 20 soluções no plano dos dois fatores retidos. Com um ângulo de 48 graus entre as soluções extremas, as soluções apresentam a mesma distribuição do teste anterior variando desde as de forma

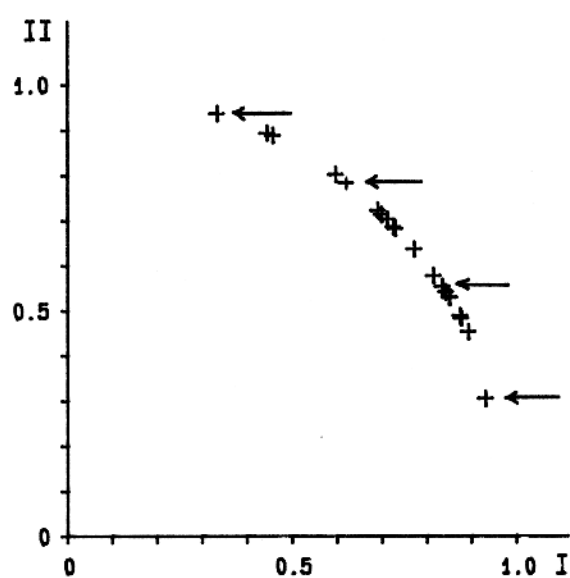
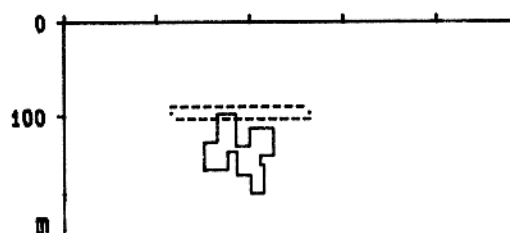
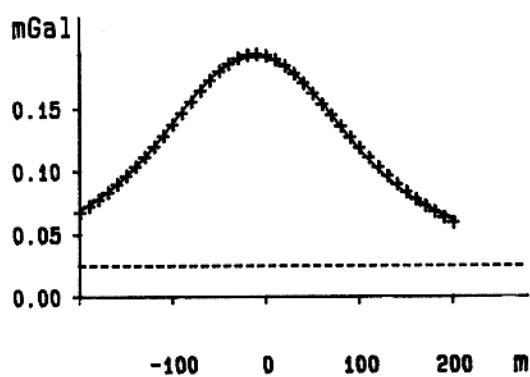
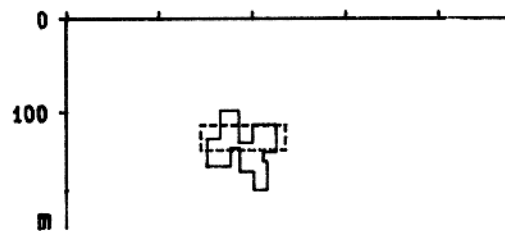
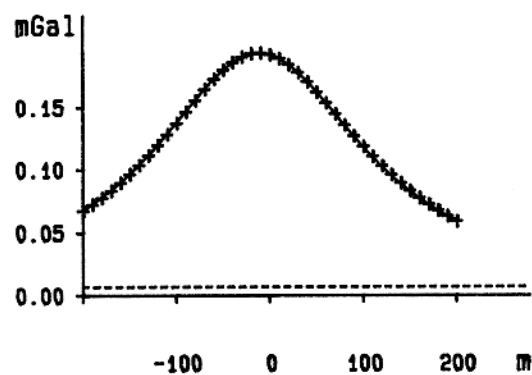


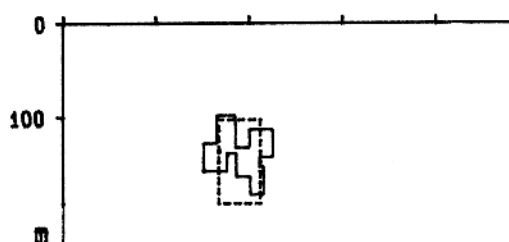
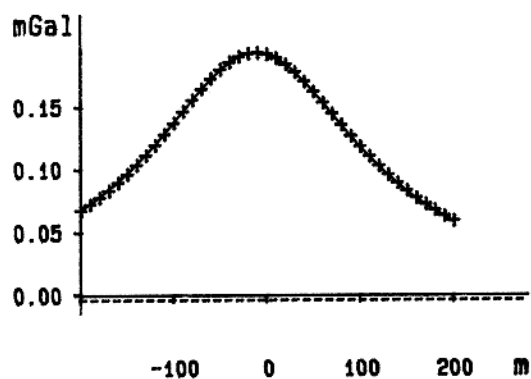
Fig. 3.9 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 5º teste em gravimetria.



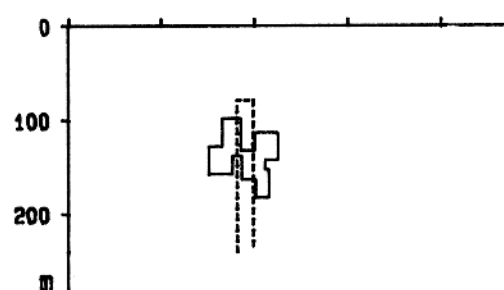
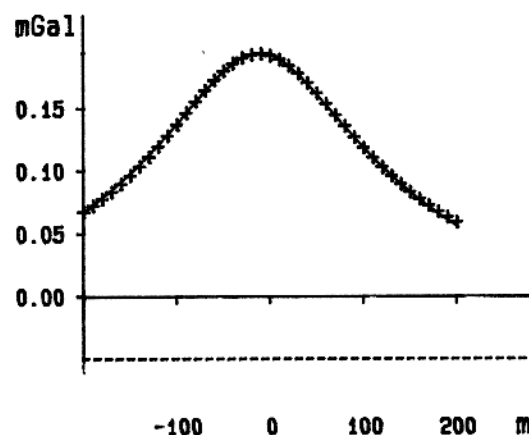
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.10 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 5º teste em gravimetria.

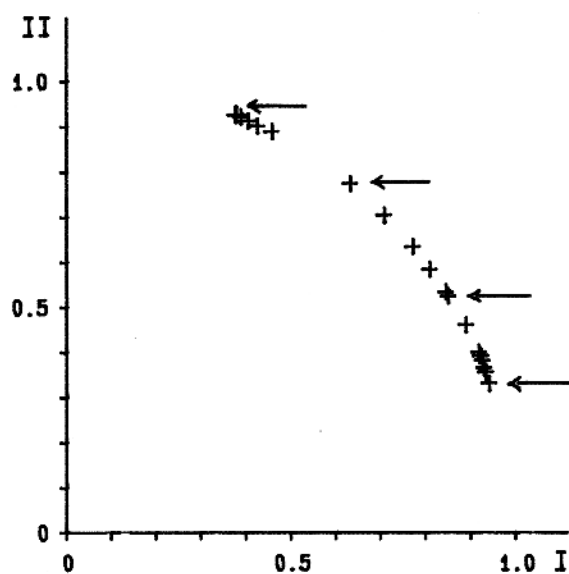
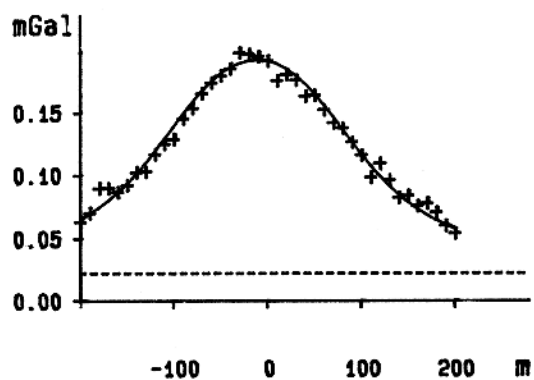


Fig. 3.11 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 6º teste em gravimetria.

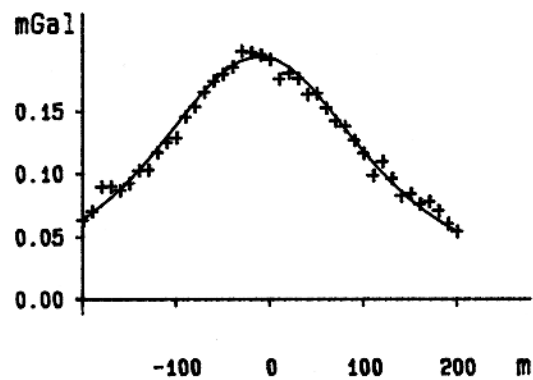
tabular até as de forma prismática, como mostram as soluções ilustradas na Figura 3.12, cujas posições estão assinaladas com setas horizontais no gráfico dos fatores (Figura 3.11). Os parâmetros envolvidos continuam sendo a largura e a espessura variando de modo inverso. O nível de base apresenta variação de 44×10^{-3} mGal, e do mesmo modo que no teste anterior, permaneceu acoplado inversamente à espessura. Conclui-se que, como no caso do corpo raso, a presença de ruído aleatório não afeta significativamente os resultados obtidos no teste anterior onde apenas o efeito do modelo interpretativo simples foi estudado, não sendo, portanto, a presença de ruído aleatório, uma causa importante de ambiguidade.

7º Teste

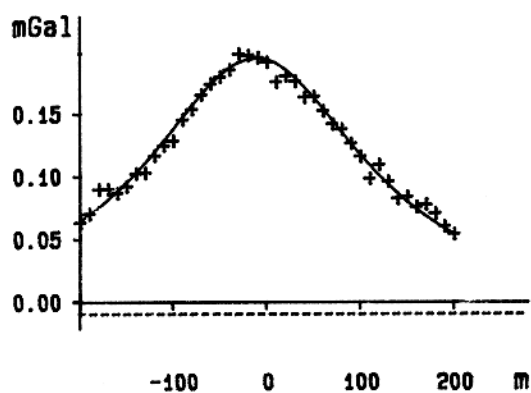
Neste teste é mostrado o efeito do modelo interpretativo simples com influência de interferência lateral (ao sul). Foram retidos dois fatores. O ângulo de dispersão das soluções (39 graus) é menor que nos dois testes anteriores (Figura 3.13), consequência da forma da anomalia, pois a presença de interferência em um dos lados do corpo principal, faz com que ocorra um desnível entre as bordas da anomalia, o qual diminui um pouco as opções para os possíveis ajustes do campo anômalo. Mesmo assim, a ambiguidade é razoavelmente grande, tendo a geometria das soluções variado desde as forma tabular, passando pelas equidimensionais, até as de forma prismática, como mostram as soluções ilustradas nas Figuras 3.14a a 3.14d, cujas posições no gráfico dos fatores (Figura 3.13) estão assinaladas com setas horizontais. Os parâmetros envolvidos são ainda a largura e a espessura, que variam no sentido inverso. O nível de base continua acoplado inversamente



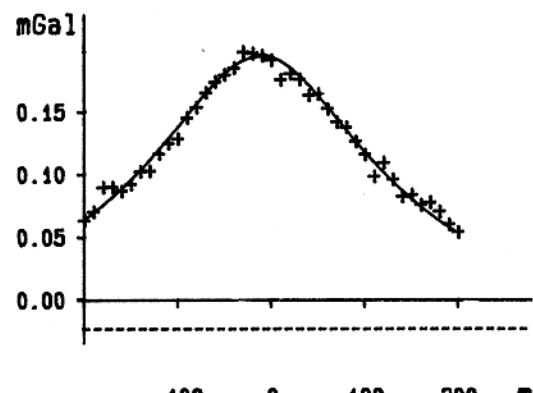
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.12 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 6º teste em gravimetria.

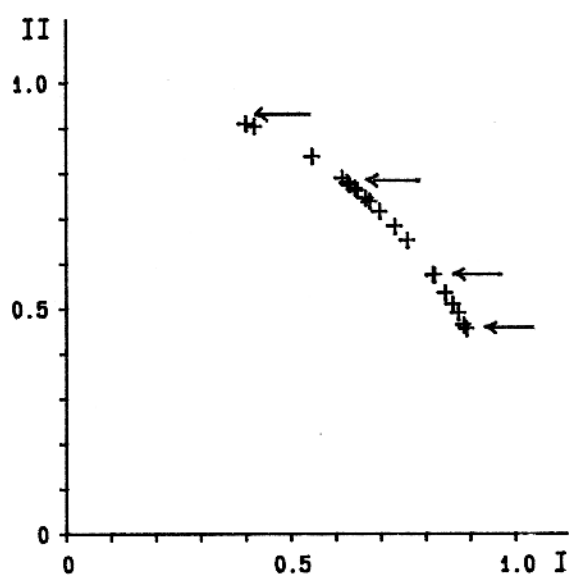
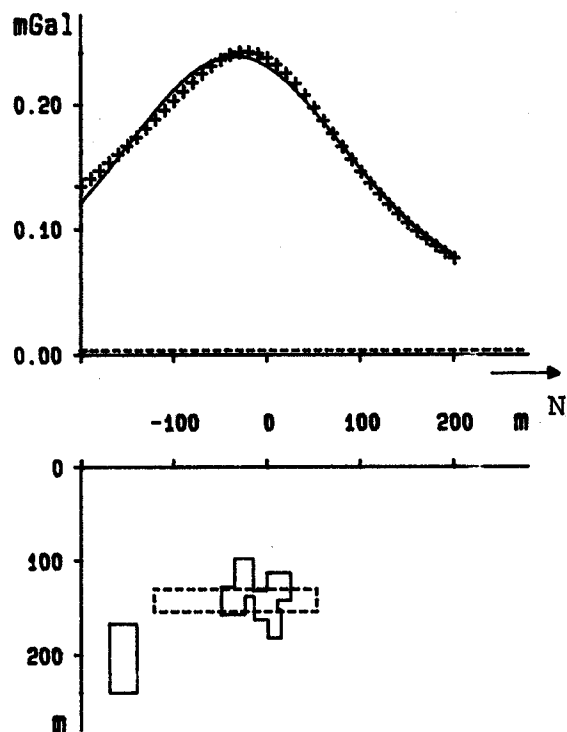
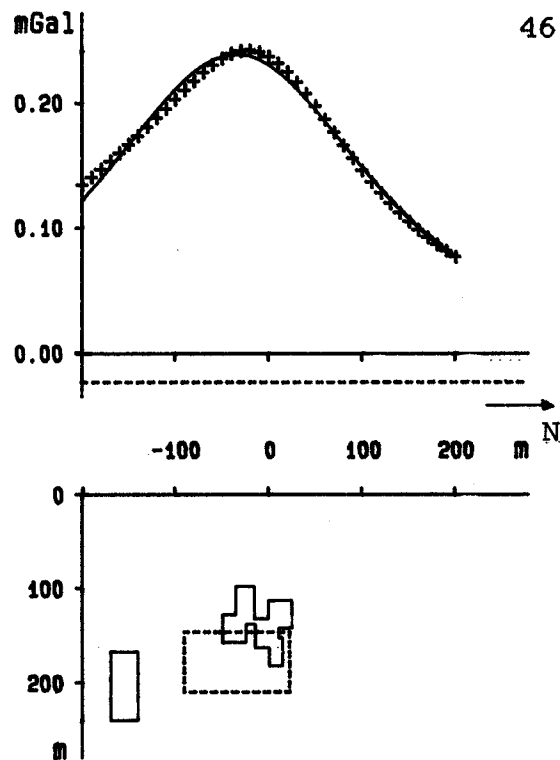


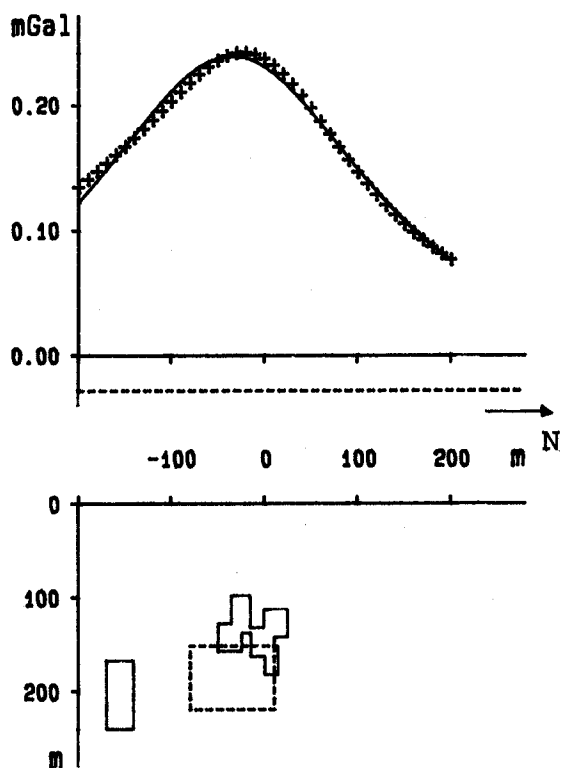
Fig. 3.13 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 7º teste em gravimetria.



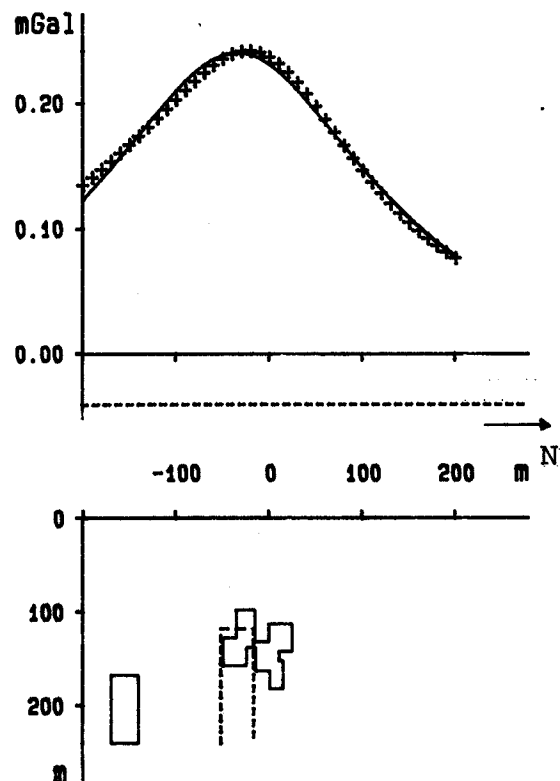
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.14 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 7º teste em gravimetria.

com a espessura, apresentando uma variação de aproximadamente 52×10^{-3} mGal.

8º Teste

Este teste mostra o efeito do modelo interpretativo simples somado à presença de interferências laterais (ao norte e ao sul). Três fatores foram retidos e a projeção estereográfica da Figura 3.15 mostra a distribuição das 20 soluções. O aparecimento de um outro nível de ambiguidade (terceiro fator) se dá pela influência das interferências laterais que suavizam a anomalia principal, descaracterizando sobremaneira o seu ponto de inflexão, o que permitirá, através da variação do nível de base, que as observações sejam interpretadas como sendo oriundas de uma anomalia amostrada em toda a sua extensão (nível de base grande e positivo) ou de uma anomalia amostrada apenas na sua parte central (nível de base pequeno ou negativo). As Figuras 3.16a e 3.16b ilustram as duas alternativas acima. Pelas Figuras 3.17a a 3.17c, a sequência de soluções correspondentes ao fator II, cujas posições na projeção estereográfica da Figura 3.15 estão assinaladas com setas horizontais, indica o envolvimento da espessura e da profundidade do topo, produzindo desde soluções prismáticas até equidimensionais. As Figuras 3.17d a 3.17f indicam, através da sequência de soluções correspondentes ao fator III (cujas posições na projeção estereográfica da Figura 3.15 estão assinaladas por setas verticais) a influência primordial da largura. Esse é o mesmo padrão observado no caso do corpo raso com interferência (4º teste) e diferente do padrão apresentado para anomalias de corpos profundos, onde no segundo fator predomina a largura (testes 5, 6 e 7). A inversão desse padrão

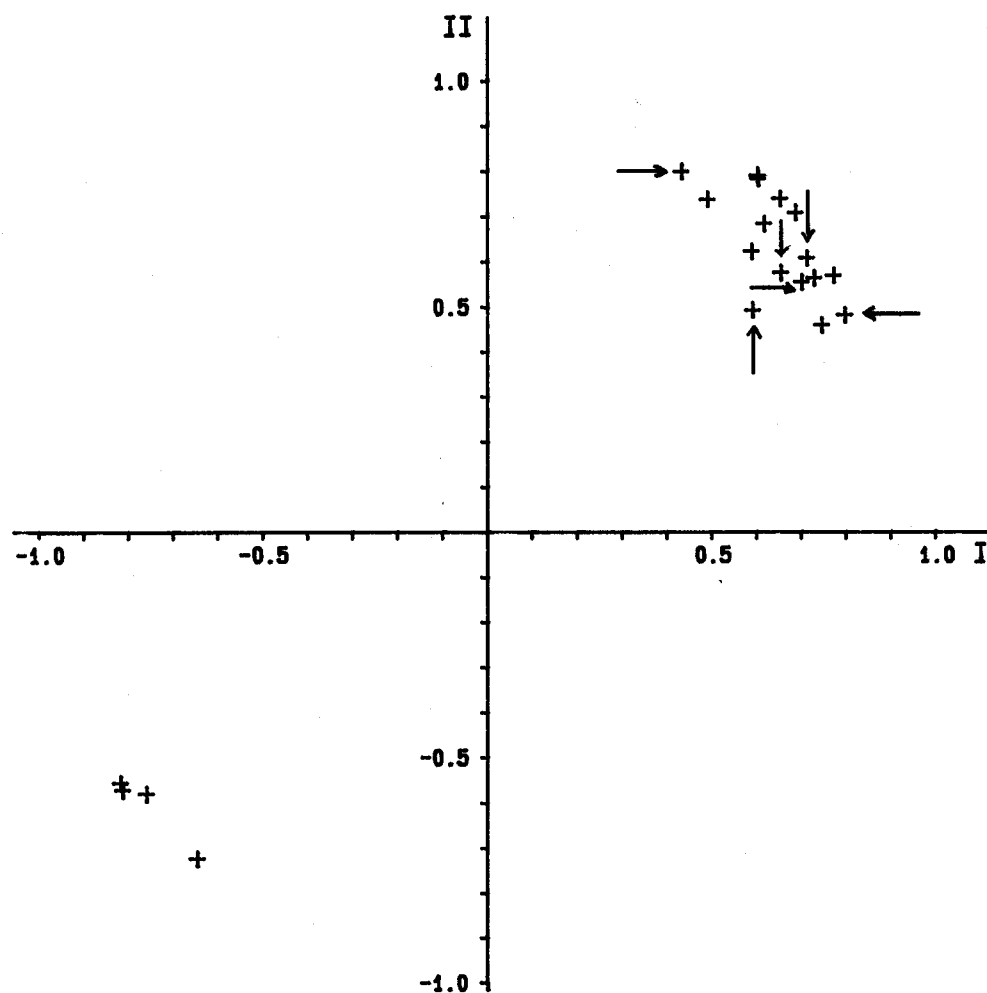


Fig. 3.15 - Projeção estereográfica das cargas (representadas por cruzeiros) nos fatores I, II e III para o 89 teste em gravimetria.

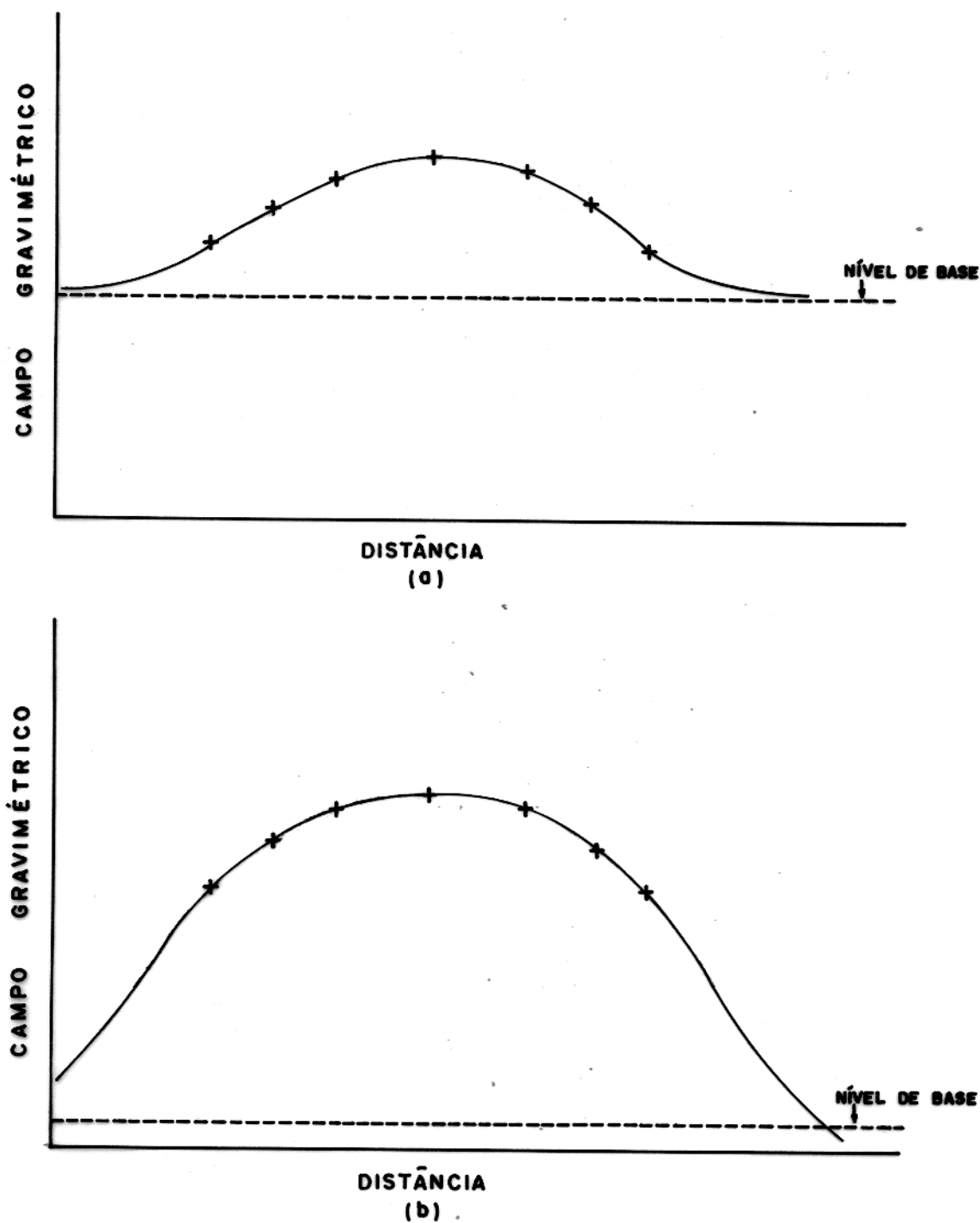
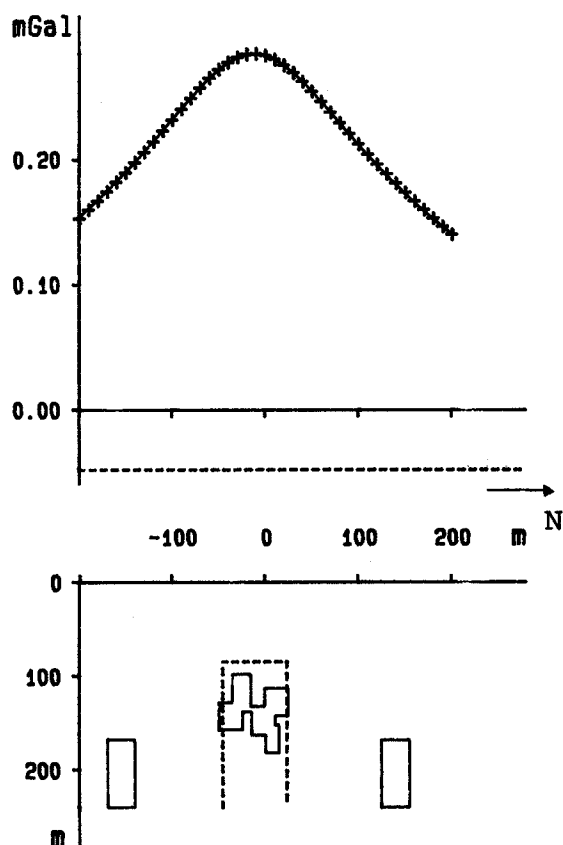
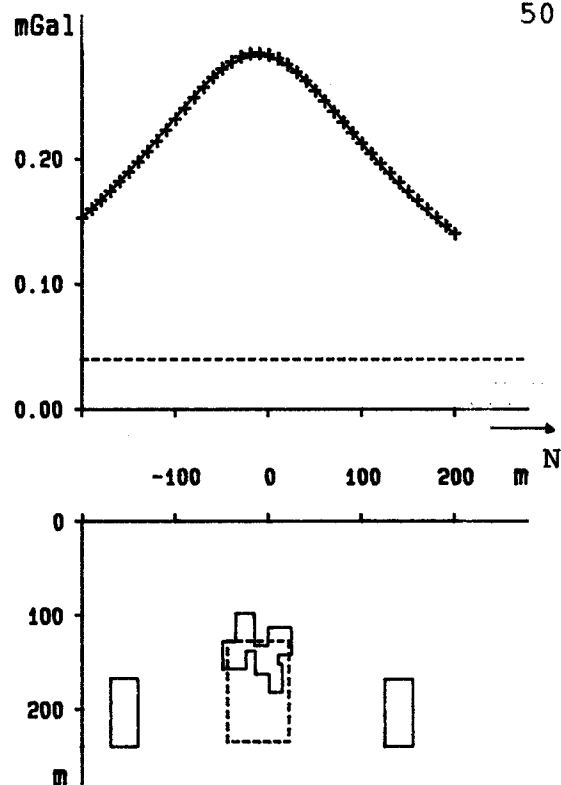


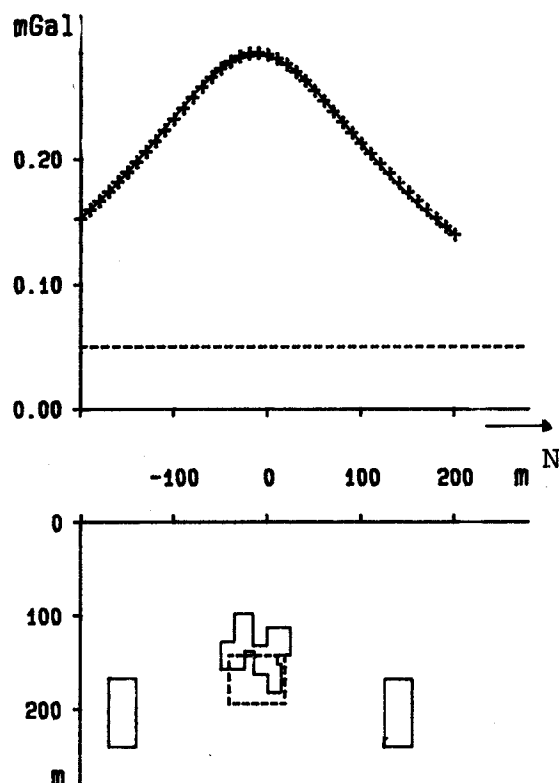
Fig. 3.16 - Observações gravimétricas (cruzes) interpretadas como se a anomalia (linha cheia) tivesse sido amostrada em toda sua extensão (a) ou apenas na sua parte central (b).



(a)

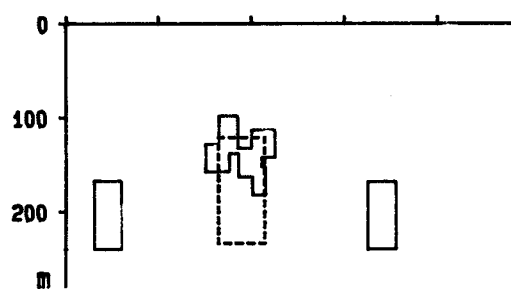
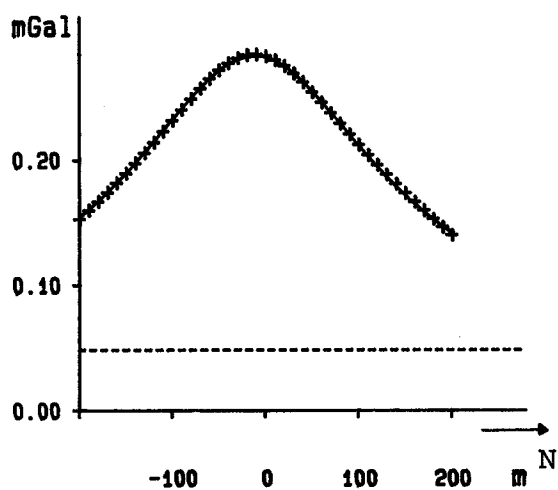


(b)

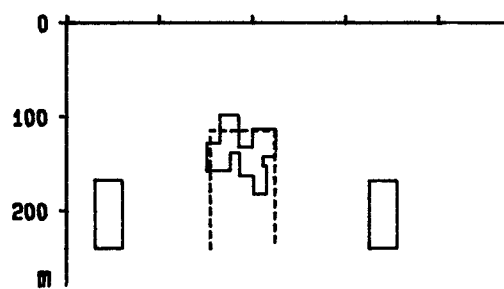
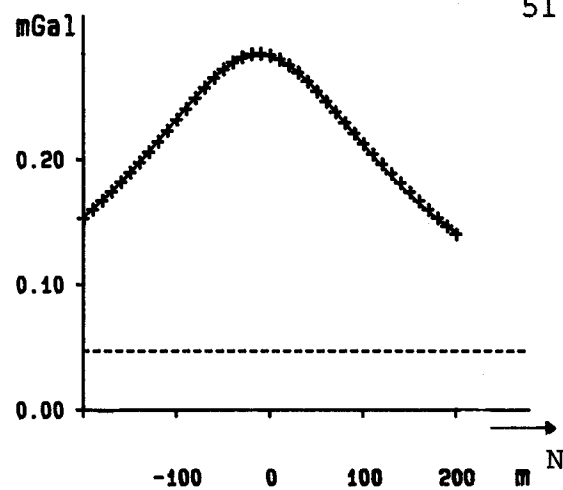


(c)

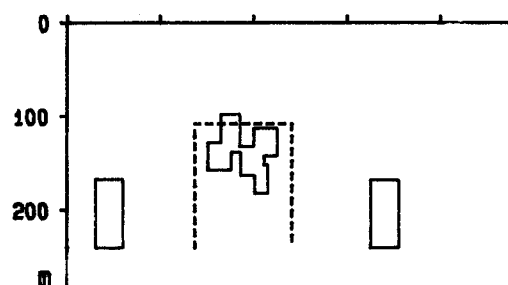
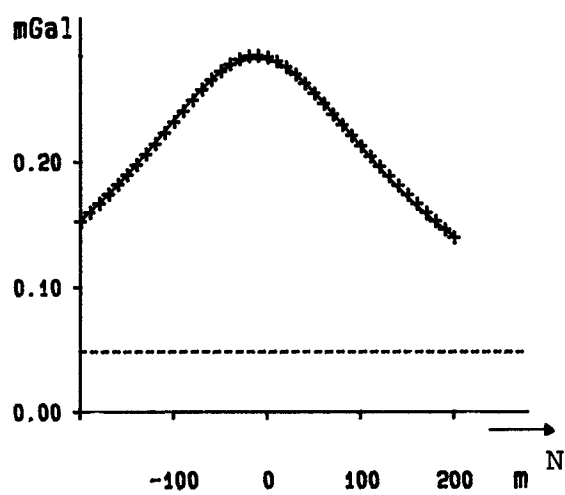
Fig. 3.17 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para o 8º teste em gravimetria. A sequência de soluções de (a) a (c), está relacionada ao fator II e a de (d) a (f) ao fator III.



(d)



(e)



(f)

Fig. 3.17

normal do corpo profundo, não se deve apenas à má caracterização da anomalia, mas também à presença de interferências laterais que fazem com que as observações sejam atenuadas em suas bordas permitindo que elas sejam interpretadas como oriundas de uma amostragem em toda a extensão da anomalia (Figura 3.16a). Isto implicaria em admitir que o ponto de inflexão, nestes casos está bem amostrado, o que reduziria a influência da largura na ambiguidade. A variação do nível de base ficou em torno de 96×10^{-3} mGal.

9º Teste

O teste a seguir exemplifica o efeito do modelo simples mais a presença de interferências superficiais. Como no teste anterior, o número de fatores retidos foi três e a distribuição das soluções no espaço desses fatores está ilustrada na projeção estereográfica da Figura 3.18. As soluções assinaladas com setas horizontais nesta Figura e mostradas nas Figuras 3.19a a 3.19c, correspondem ao fator II, com as soluções tendo geometrias prismática e tabulares. Os principais parâmetros envolvidos no fator II foram a largura e a espessura e secundariamente a profundidade do topo. A largura varia inversamente com a espessura e com a profundidade do topo como mostram as Figuras 3.19a a 3.19c. As soluções mostradas nas Figuras 3.19d a 3.19f, cujas posições estão assinaladas na Figura 3.18 com setas verticais, correspondem ao fator III que envolve a espessura e a profundidade do topo que variam inversamente, sendo todas as soluções de forma tabular. O nível de base, apresenta variação de 80×10^{-3} mGal, como no caso anterior, em consequência da má caracterização da anomalia mas aqui a presença das interferências superficiais, apesar de

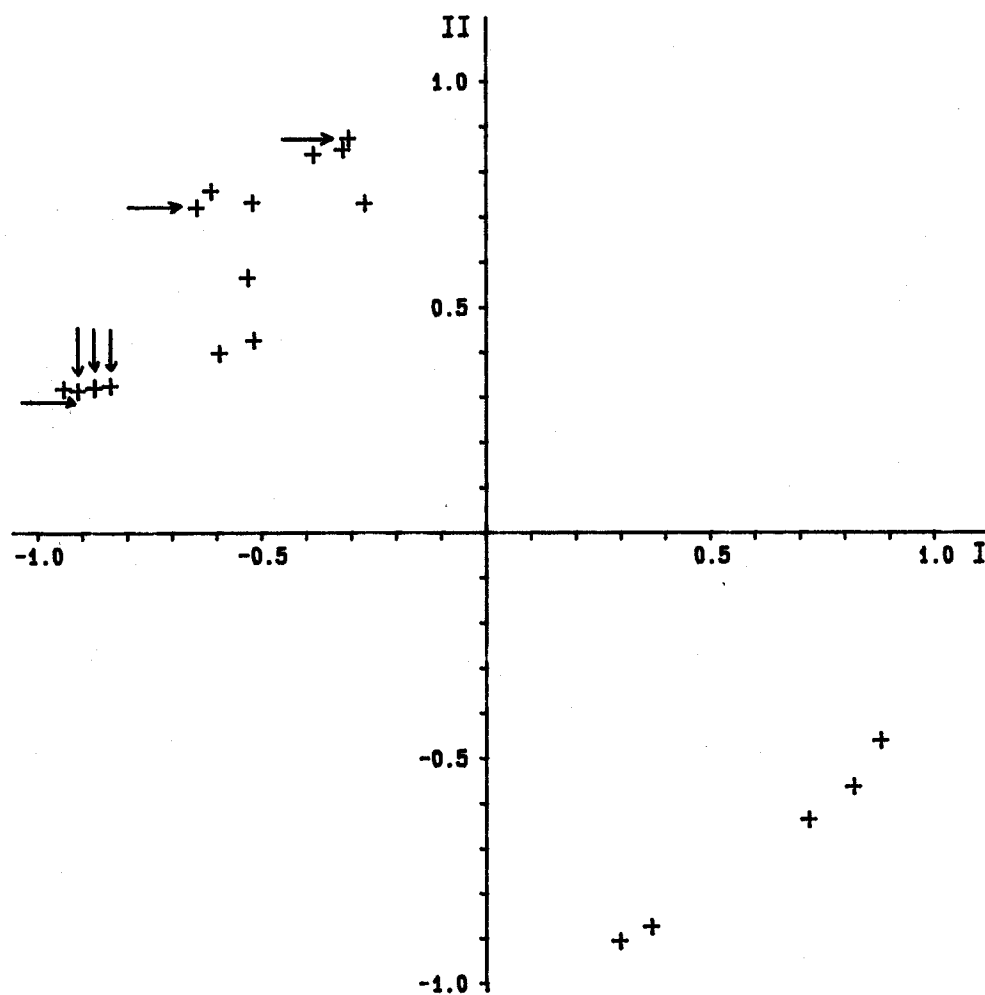
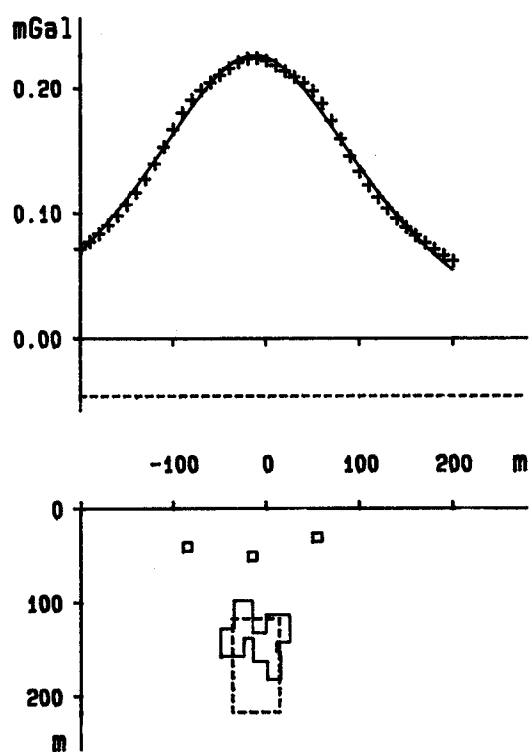
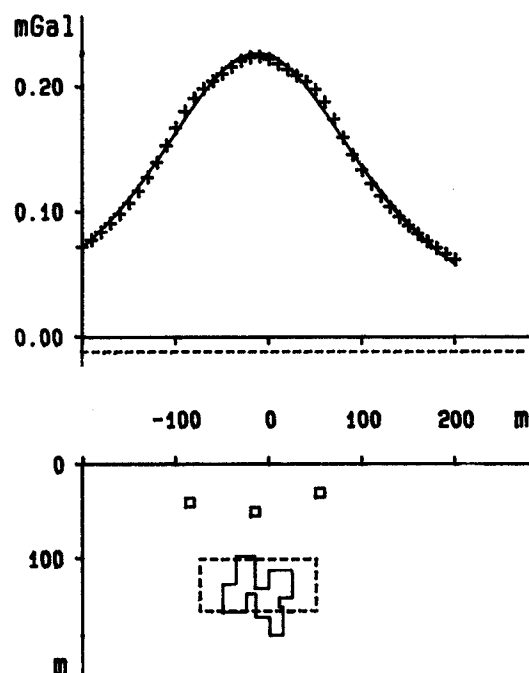


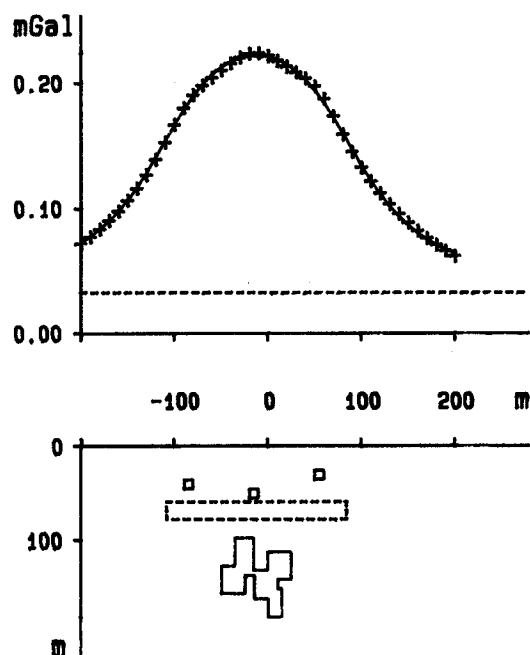
Fig. 3.18 - Projeção estereográfica das cargas (representadas por cruzeiros) nos fatores I, II e III, para o 9º teste em gravimetria.



(a)

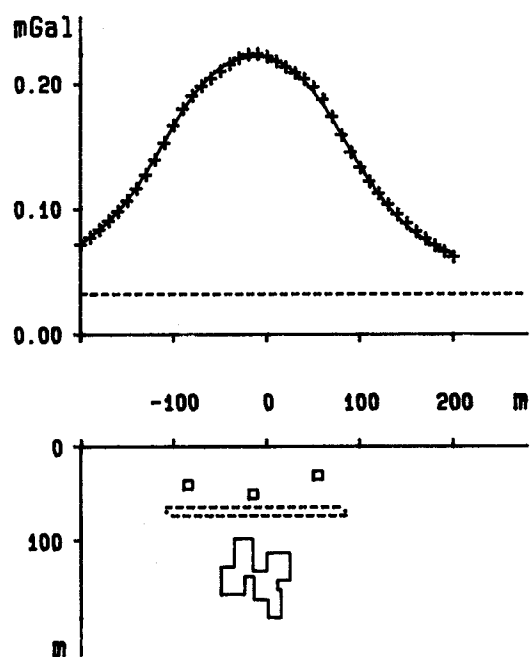


(b)

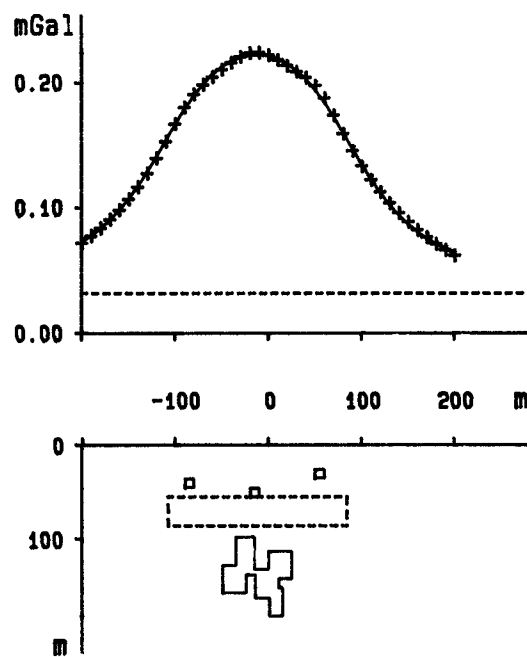


(c)

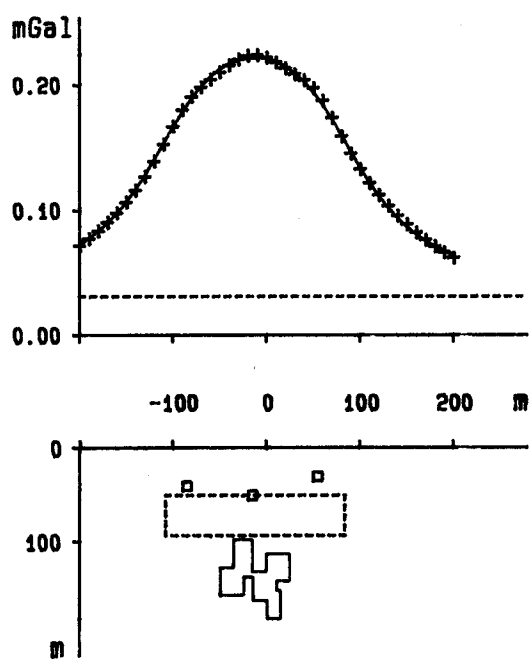
Fig. 3.19 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para o 9º teste em gravimetria. A sequência de soluções de (a) a (c), está relacionada ao fator II e a de (d) a (f) ao fator III.



(d)



(e)



(f)

Fig. 3.19

introduzir um nível adicional de ambiguidade (terceiro fator), não muda o padrão geral dos testes com o corpo profundo ou seja a largura permanece como principal parâmetro causador da ambiguidade.

10º Teste

Este teste caracteriza a importância do nível de base, principalmente nos casos de anomalias mal definidas. A anomalia é caracterizada por um corpo principal raso somado às interferências laterais e superficiais e ao ruído aleatório Gaussiano com média zero e desvio padrão de 6×10^{-3} mGal. Foram retidos dois fatores. O ângulo entre as soluções extremas é de 33 graus como mostra a distribuição das soluções na Figura 3.20. A Figura 3.21 mostra uma sequência de quatro soluções, cujas posições estão assinaladas com setas horizontais na Figura 3.20. Um fato interessante mostrado nas Figuras 3.21a a 3.21d é que, apesar da variação da geometria destas soluções ir desde as de forma prismática até as de forma tabular, não há predominância de nenhum parâmetro que possibilite a ordenação das soluções. Esse fato vem ressaltar a importância do ponto de inflexão que nesse caso, por estar mal definido (consequência das interferências e do ruído aleatório), permitiu que a largura tivesse uma influência comparável à profundidade do topo na ambiguidade impossibilitando a separação das causas de ambiguidade diretamente como descrito até então. A ordenação é conseguida através da separação preliminar das soluções com nível de base muito alto (maiores que 47×10^{-3} mGal), daquelas com nível de base mais baixo (menores que 47×10^{-3} mGal) e aplicação da análise fatorial a cada grupo. O grupo de

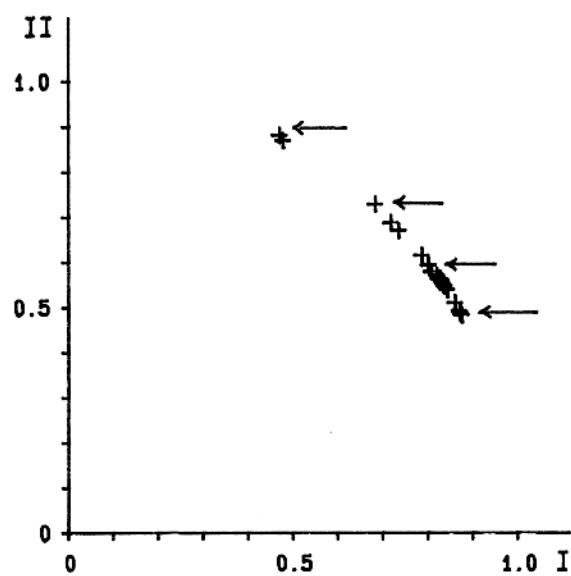
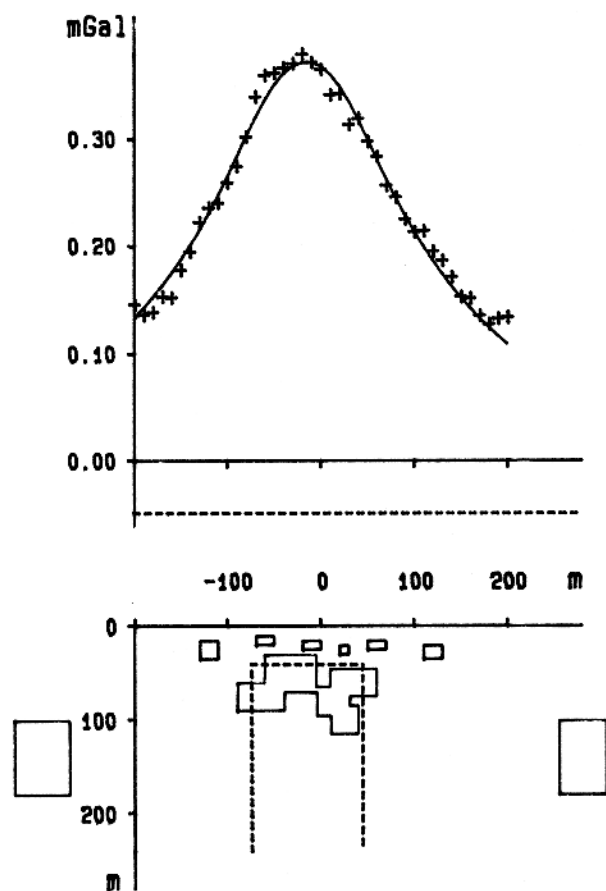
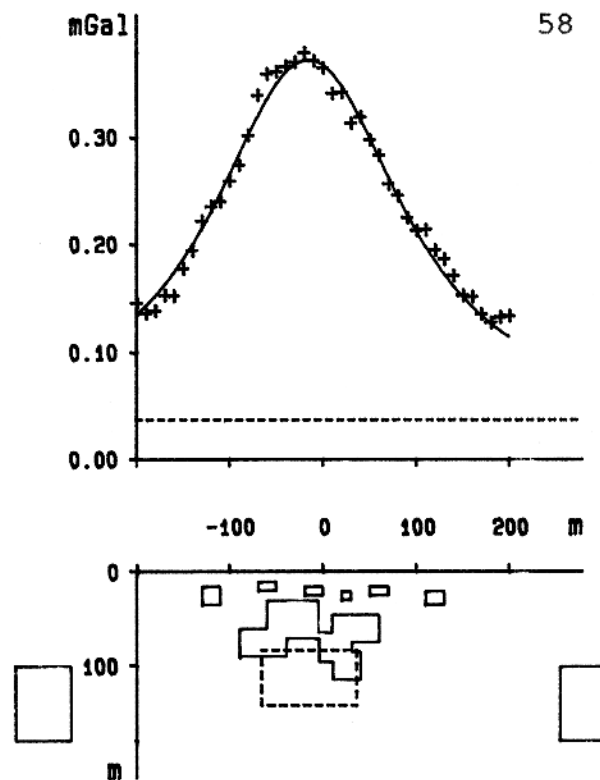


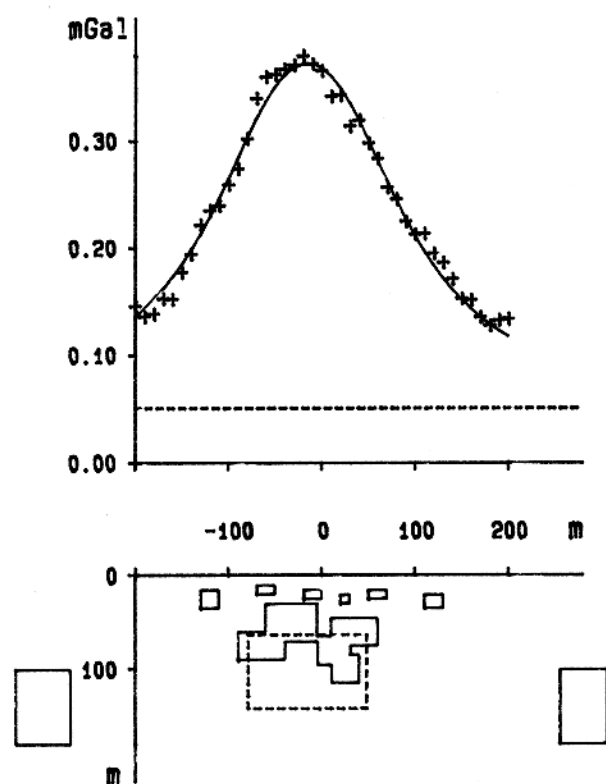
Fig. 3.20 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 10º teste em gravimetria.



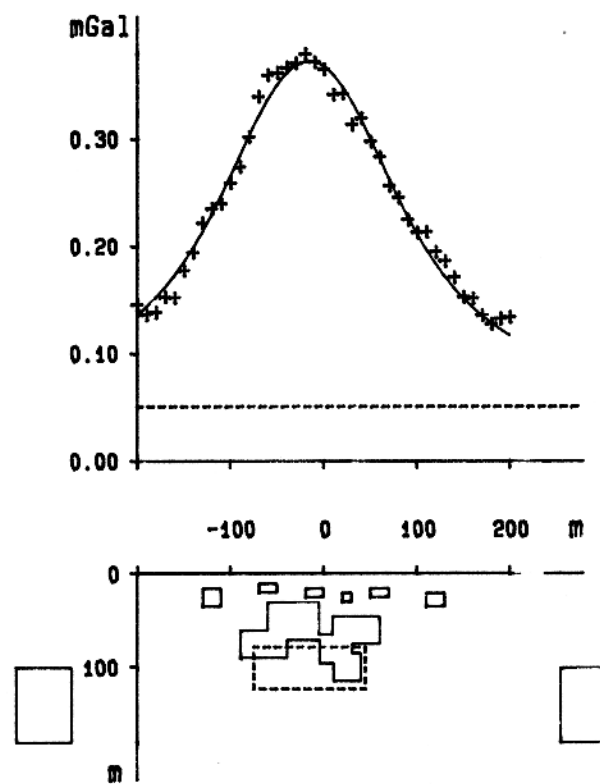
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.21 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 10º teste em gravimetria.

soluções com nível de base elevado, permite interpretar as soluções como se a anomalia tivesse sido amostrada em toda sua extensão, reduzindo a influência da largura na ambiguidade e ordenando as soluções em relação aos dois fatores retidos (Figura 3.22) com ângulo entre as soluções extremas de 11 graus. A forma das soluções varia desde a equidimensional até as tabulares como mostram as soluções ilustradas nas Figuras 3.23a a 3.23d, cujas posições estão assinaladas na Figura 3.22 com setas horizontais. Os principais parâmetros envolvidos foram a espessura e a profundidade do topo, variando no sentido inverso, que é o padrão geral verificado no caso de anomalias produzidas por corpos rasos.

O resultado da análise fatorial sobre o grupo de soluções com o nível de base mais baixo, mostrou que nos três fatores retidos (Figura 3.24), a sequência correspondente ao fator II, cujas posições estão assinaladas com setas horizontais na Figura 3.24, foi de soluções cujas formas variam de prismáticas e tabular, havendo a variação da largura e da espessura (Figuras 3.25a a 3.25c), enquanto a sequência correspondente ao fator III, ilustrada pelas Figuras 3.25d e 3.25e, e cujas posições estão assinaladas na Figura 3.24 com setas verticais, mostra a influência dos três parâmetros geométricos (profundidade do topo, espessura e largura), sendo que a profundidade do topo varia inversamente com a largura e espessura, enquanto espessura e largura variam diretamente.

De todos os testes sintéticos realizados para gravimetria e do que foi descrito acima, chegamos as seguintes conclusões:

A espessura destaca-se como principal fator isolado responsável pela ambiguidade das anomalias gravimétricas.

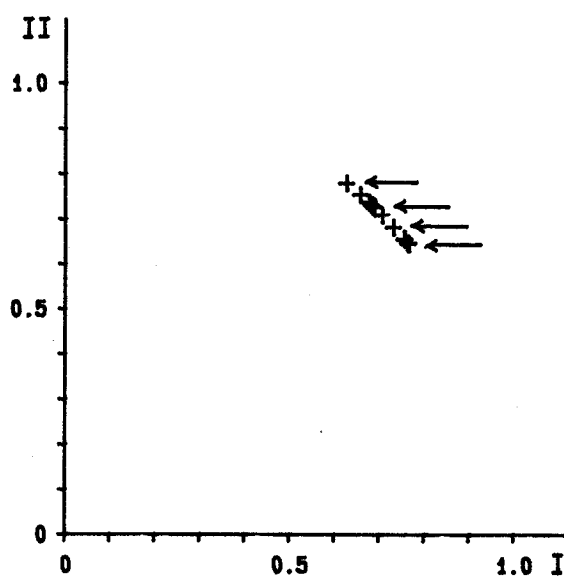


Fig. 3.22 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 12 possíveis soluções que apresentam valores elevados de nível de base, no 10º teste em gravimetria.

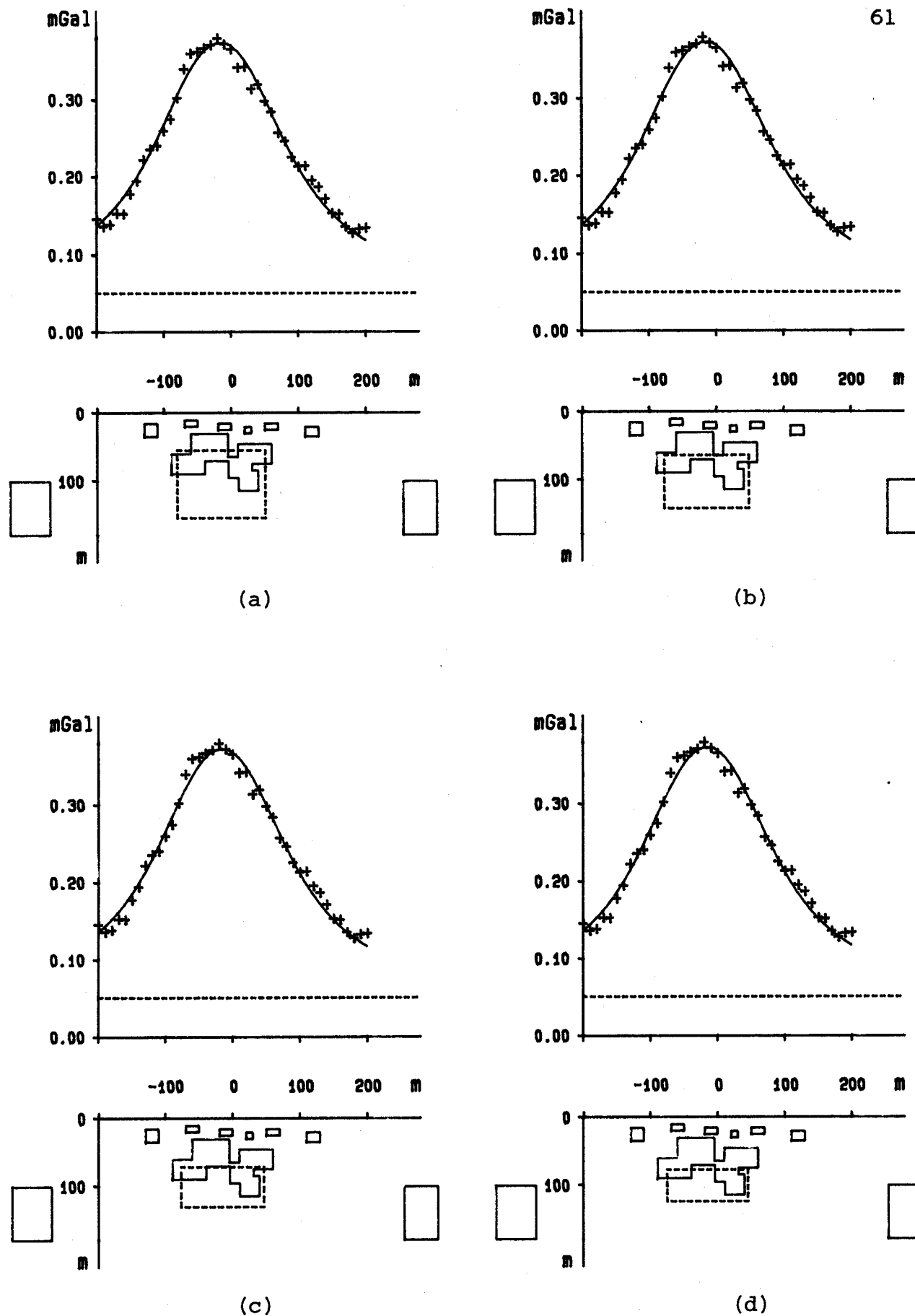


Fig. 3.23 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para sequência de soluções (a) a (d) apresentando valores elevados de nível de base no 10º teste em gravimetria.

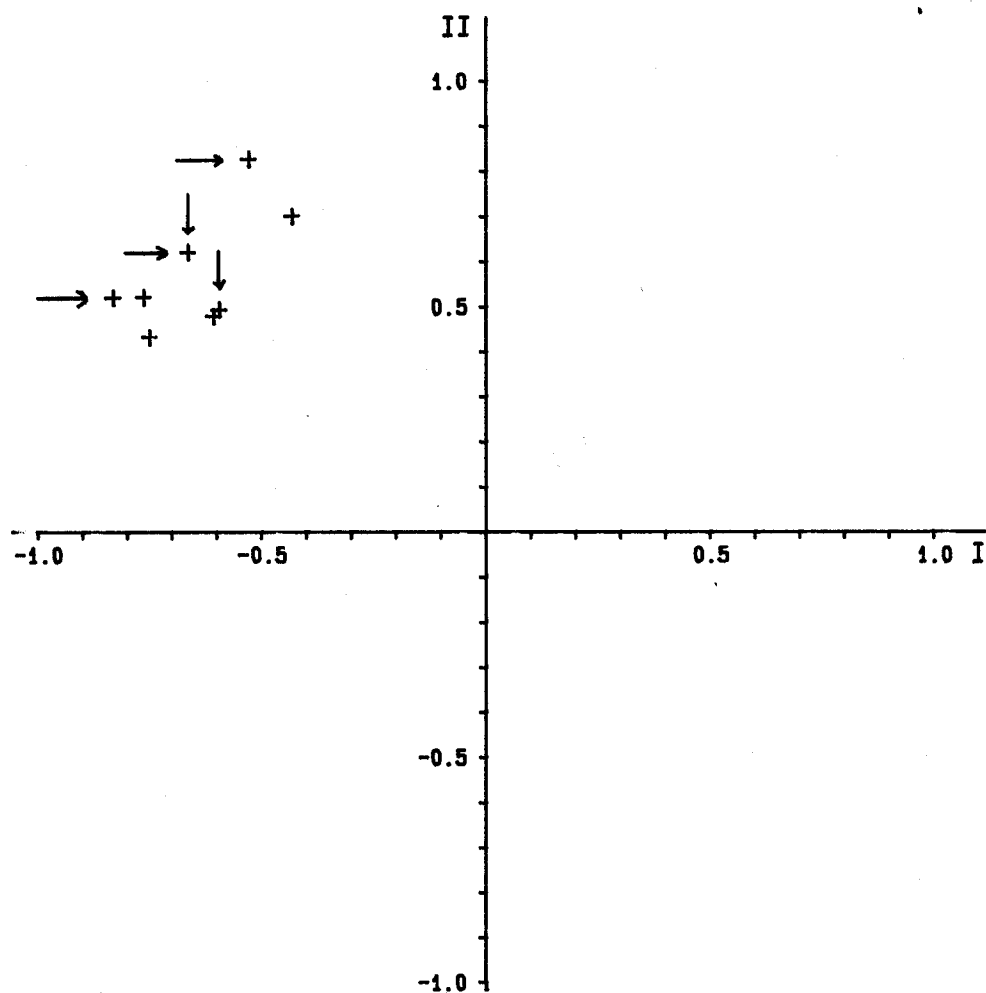


Fig. 3.24 - Projeção estereográfica das cargas (representadas por cruzes) nos fatores I, II e III, de 8 possíveis soluções, que apresentam valores reduzidos do nível de base no 10º teste em gravimetria.

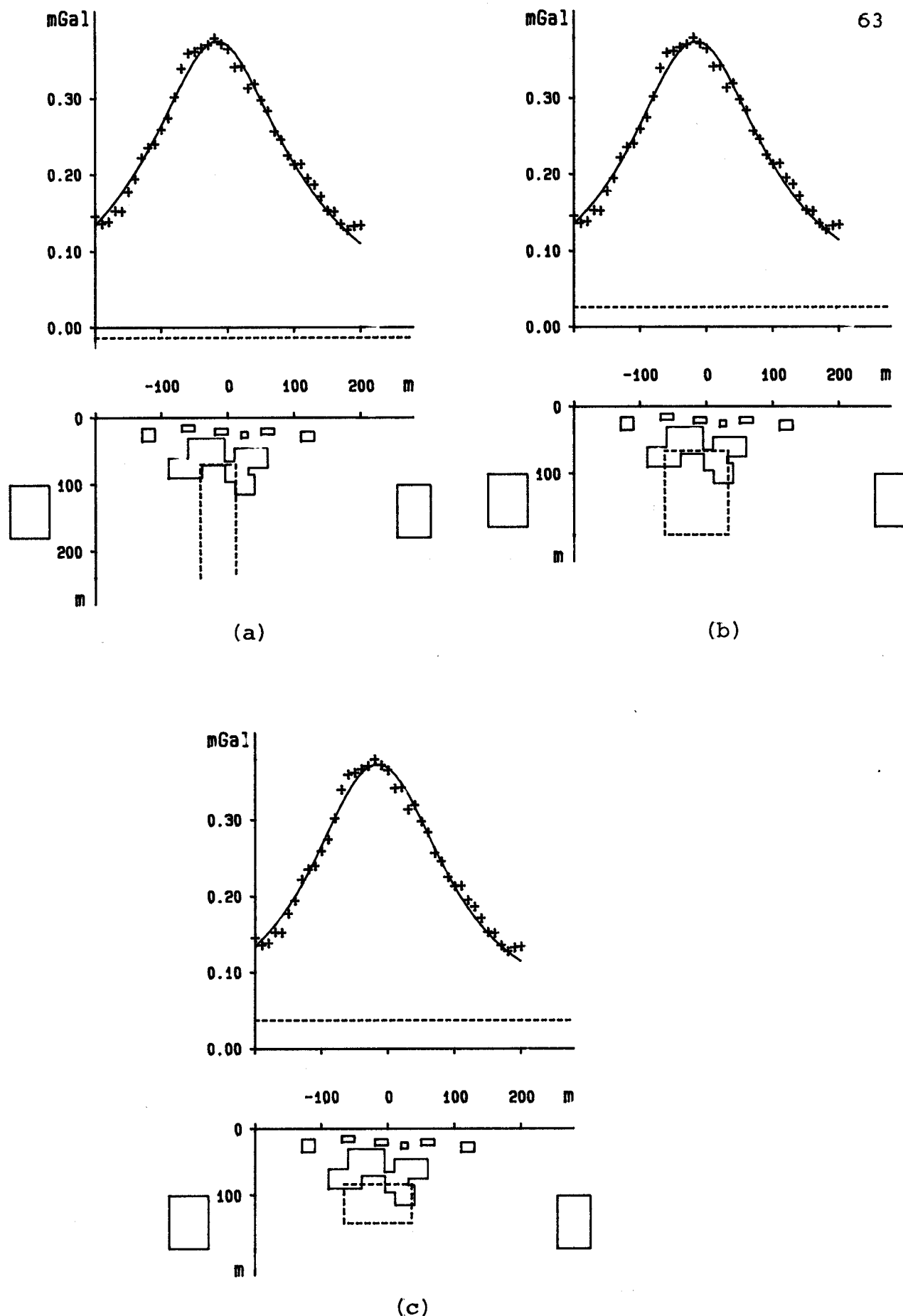


Fig. 3.25 - Anomalias gravimétricas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para as seqüências de soluções (a) a (c) correspondentes ao fator II e (d) e (e), correspondentes ao fator III, apresentando valores reduzidos de nível de base no 10º teste em gravimetria.

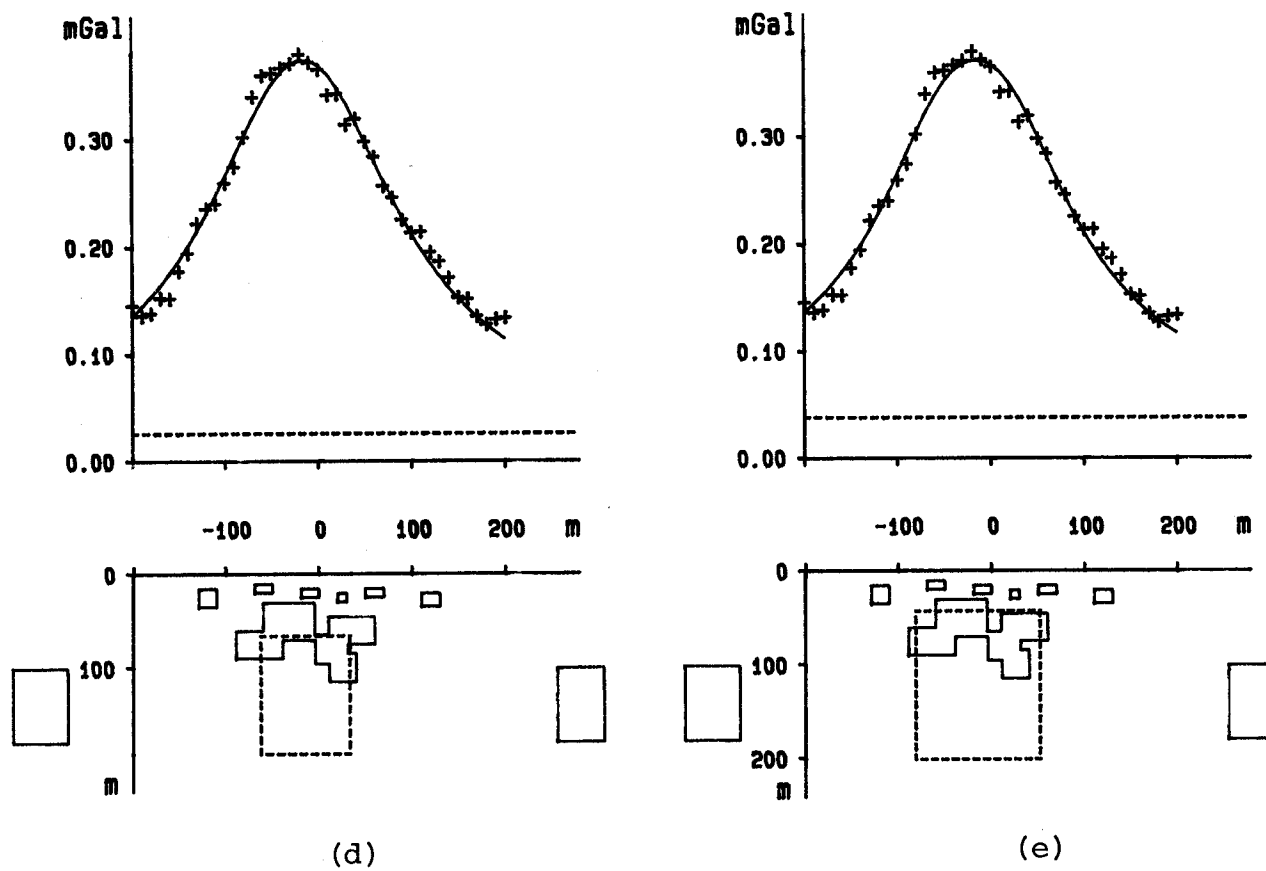


Fig. 3.25

Na ausência de ruído aleatório ou interferências, a profundidade do topo e a largura também aparecem como parâmetros responsáveis pela ambiguidade estando em geral associados individualmente à espessura. Nos testes com anomalias produzidas por corpos rasos, a associação predominante é a espessura com a profundidade do topo variando no sentido inverso, enquanto a largura aparece como parâmetro secundário. Para testes com o corpo profundo, a largura associada à espessura aparece como fator principal, passando a profundidade do topo a ser secundária, consequência da má caracterização da anomalia gravimétrica provocada pela suavização no entorno dos pontos de inflexão.

Na presença de ruído aleatório, não houve um aumento significativo da ambiguidade tanto nos testes com o corpo raso, como nos testes com o corpo profundo.

A presença de interferências, causou um aumento da ambiguidade, sendo que nos testes com o corpo raso (sinal bem definido) as interferências laterais somadas às interferências superficiais, torna o sinal mal definido o que causa, em alguns casos, uma não ordenação das soluções como mostra o 10º teste. Já nos testes com o corpo em profundidade, as interferências presentes causaram um aumento na má definição da anomalia fazendo com que, em alguns casos, o padrão observado, de largura e espessura como principais parâmetros, e da profundidade do topo como parâmetro secundário associado à ambiguidade fosse invertido como mostrado no 8º teste.

O nível de base tem uma importância significativa na ambiguidade, estando acoplado à espessura de modo inverso a a largura de modo direto. Como o nível de base em gravimetria aplicada à prospecção, não é conhecido, este tipo de

ambiguidade sempre ocorrerá na prática.

3.2 Magnetometria

Cerca de 80 testes foram realizados para magnetometria, e do mesmo modo que na gravimetria, foram simuladas algumas das causas de ambiguidade. Estes testes estão grupados em testes de alta latitude e baixa latitude onde o campo geomagnético tem inclinações de 60 e 15 graus respectivamente. Em cada caso foi analisada a influência de se fixar só a inclinação ou só o azimute do vetor magnetização, bem como o efeito de manter ambos fixos ou ambos variáveis. Mostraremos a seguir os resultados de alguns testes típicos e posteriormente sintetizaremos as principais conclusões gerais sobre os testes.

1º Teste

Este teste caracteriza-se por estudar o efeito do modelo interpretativo simples em alta latitude deixando as estimativas da inclinação e do azimute (IM' e DM') variar de -90 a 90 graus e de -100 a 100 graus respectivamente. A Figura 3.26 mostra a distribuição das 20 soluções em relação aos dois fatores retidos sendo o ângulo entre as soluções extremas de cerca de 54 graus. Como a anomalia é estreita e está bem definida, os tipos de corpos que permitem um melhor ajuste são o equidimensional e os prismáticos, como mostram as Figuras 3.27a a 3.27d, cujas posições das soluções estão assinaladas com setas horizontais na Figura 3.26. Os principais parâmetros responsáveis pelos vários tipos de soluções são, portanto, a profundidade do topo e a espessura, que variam inversamente. O nível de base apresenta variação de 30 nT, estando acoplado à espessura de modo inverso.

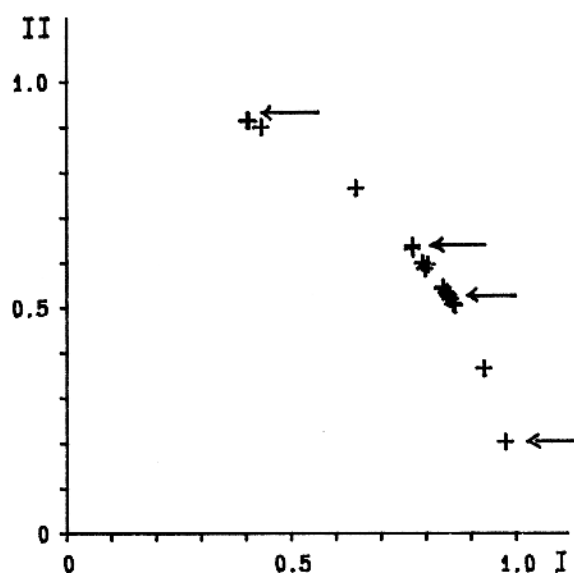
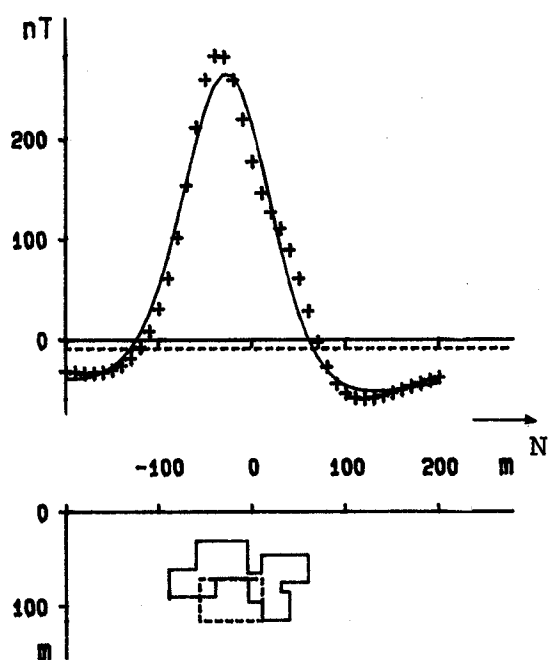
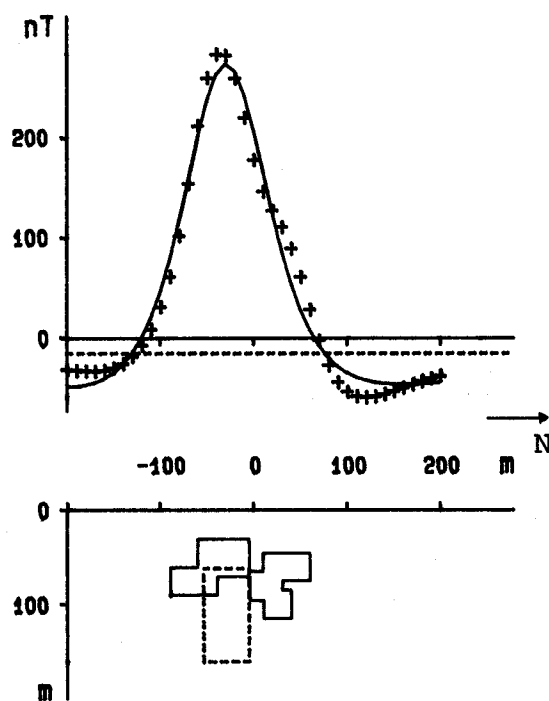


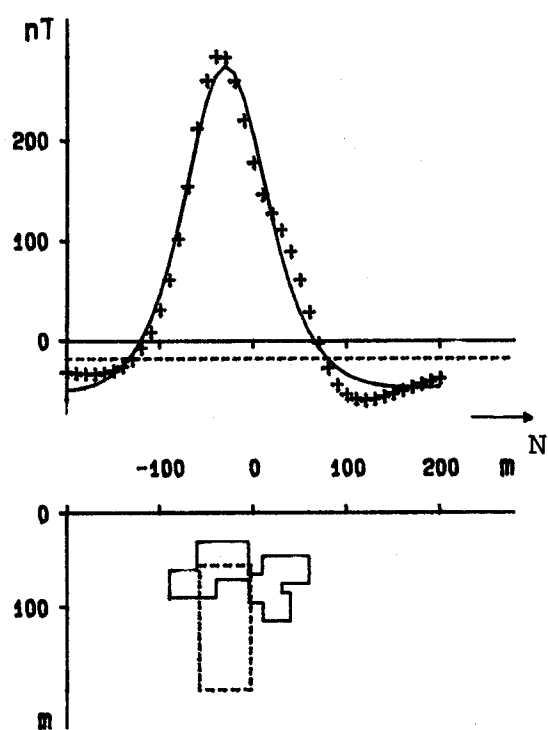
Fig. 3.26 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 1º teste em magnetometria.



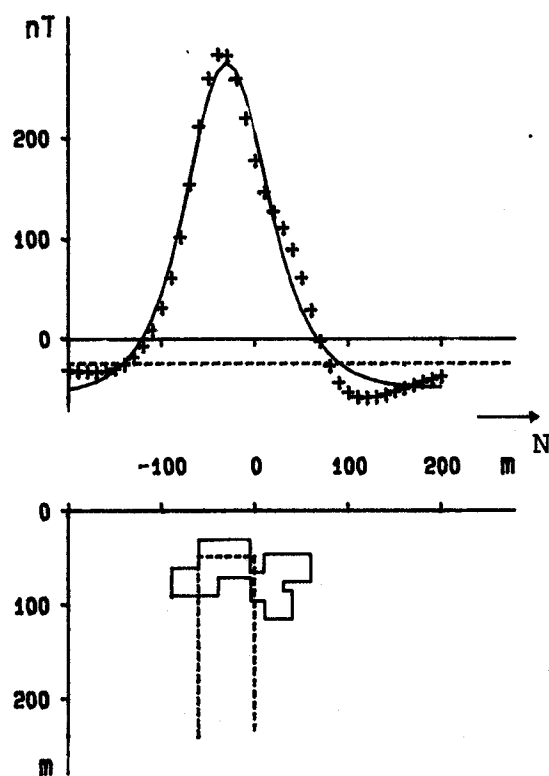
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.27 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 1º teste em magnetometria. $IT=IM=60$ graus; $DT=DM=10$ graus. IM' e DM' podem variar nos intervalos $(-90,90)$ e $(-100,100)$, respectivamente.

2º Teste

Este teste ilustra o efeito do modelo interpretativo simples em alta latitude, somado à presença de ruído aleatório Gaussiano com média zero e desvio padrão de 7 nT, e com as estimativas da inclinação e do azimute variando como no teste anterior. A distribuição das 20 soluções obtidas, em relação aos dois fatores retidos é mostrado na Figura 3.28. O ângulo entre as soluções extremas é de 53 graus. Apesar da presença de ruído aleatório, a anomalia continua bem definida e os corpos que produzem os melhores ajustes continuam sendo os aproximadamente equidimensionais e os prismáticos, como mostram as soluções cujas posições estão assinaladas com setas horizontais na Figura 3.28, e ilustradas nas Figuras 3.29a a 3.29d. A espessura e a profundidade do topo, variando inversamente, foram os principais parâmetros causadores de ambiguidade. O nível de base permaneceu acoplado à espessura, variando de modo inverso. A variação do nível de base ficou em torno de 20 nT.

3º Teste

Neste teste é estudado o efeito do modelo interpretativo simples associado à presença de interferências superficiais, com as estimativas da inclinação e do azimute podendo variar de -90 a 90 graus e -100 a 100 graus respectivamente. Foram retidos dois fatores, estando as soluções distribuídas como mostra a Figura 3.30. A forma das soluções varia de tabular a prismática passando pela forma equidimensional como mostram as Figuras 3.31a a 3.31d, cujas posições estão assinaladas na Figura 3.30 com setas horizontais. No entanto, verifica-se que a presença das interferências superficiais não causa um aumento

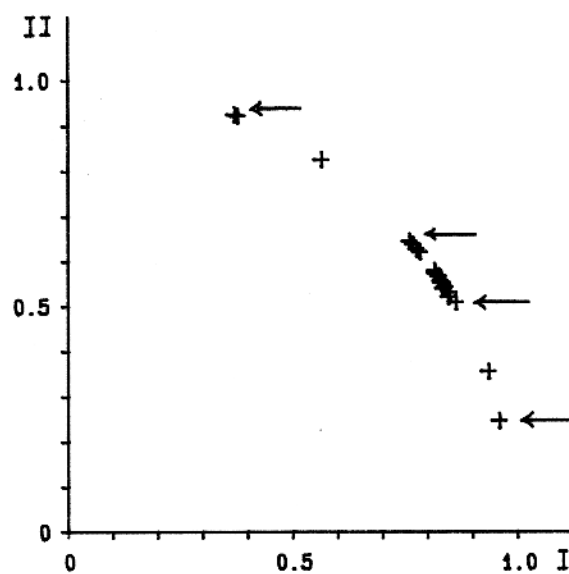
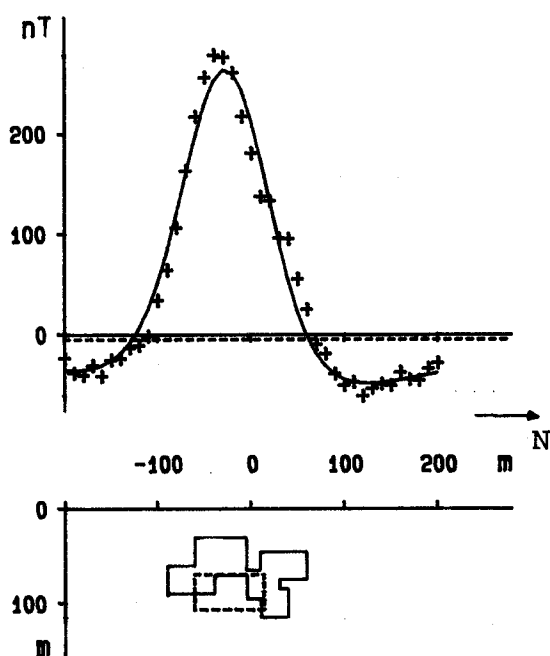
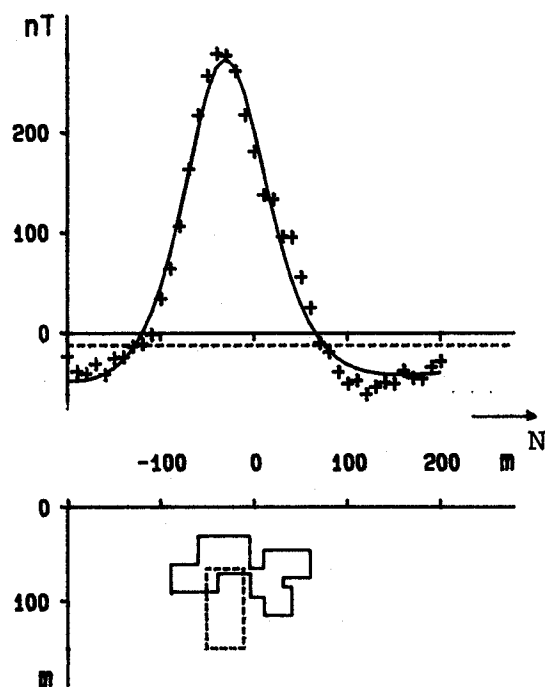


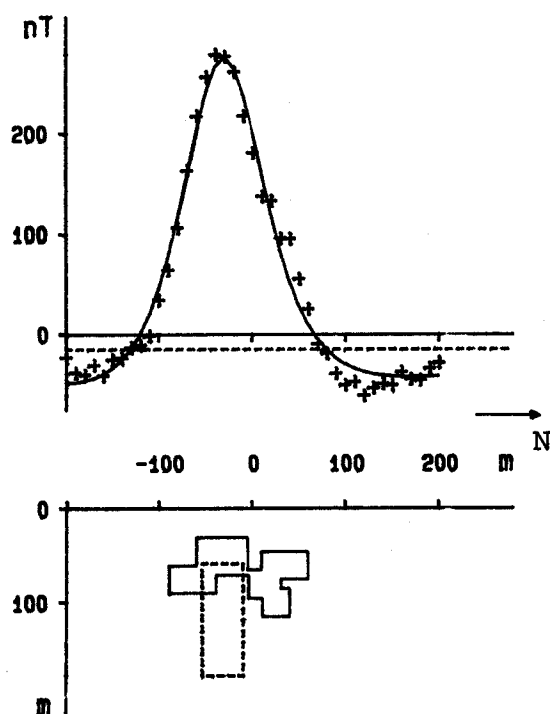
Fig. 3.28 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 2º teste em magnetometria.



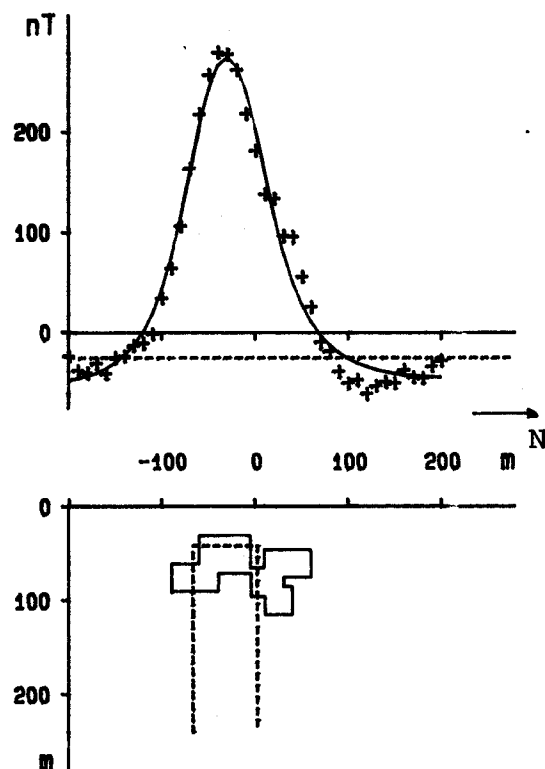
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.29 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 2º teste em magnetometria. $IT=IM=60$ graus; $DT=DM=10$ graus. IM' e DM' podem variar nos intervalos $(-90,90)$ e $(-100,100)$, respectivamente.

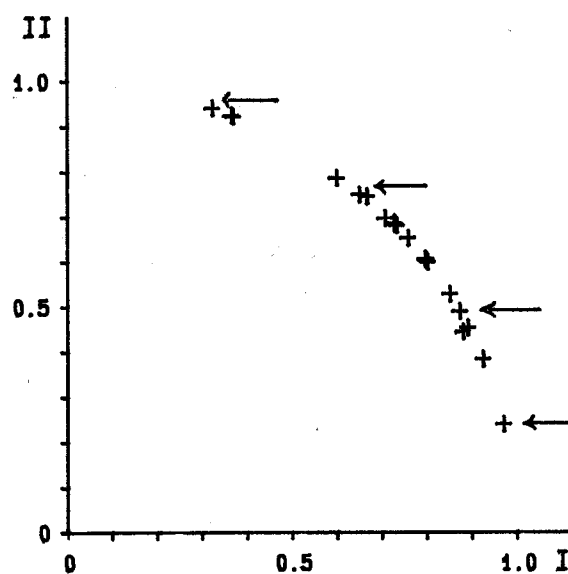
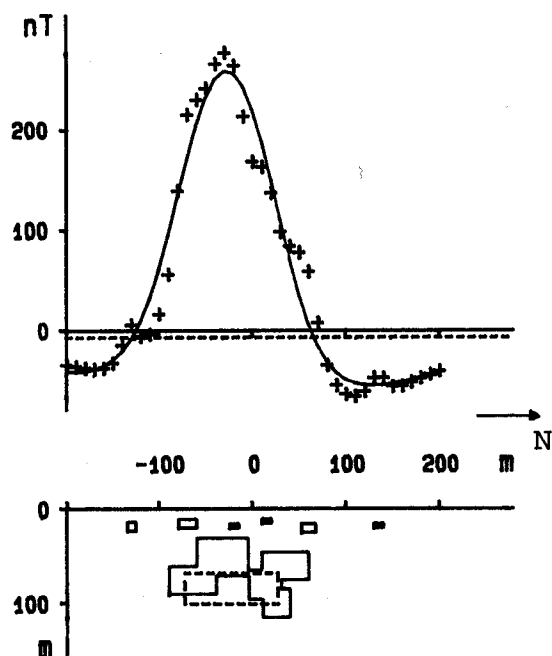
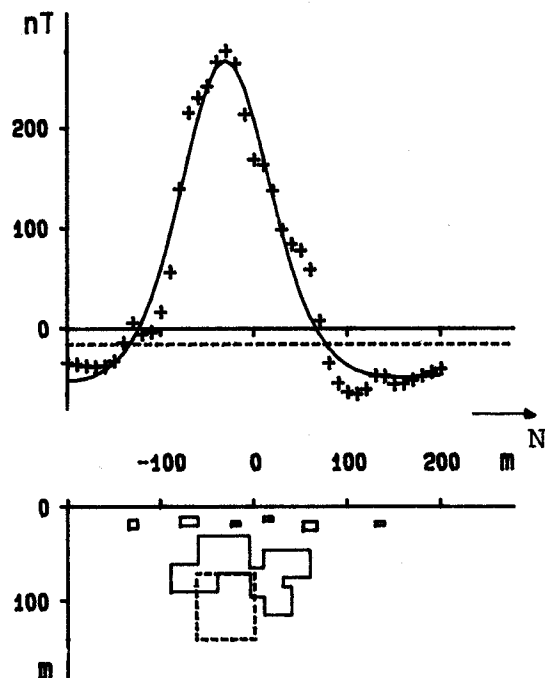


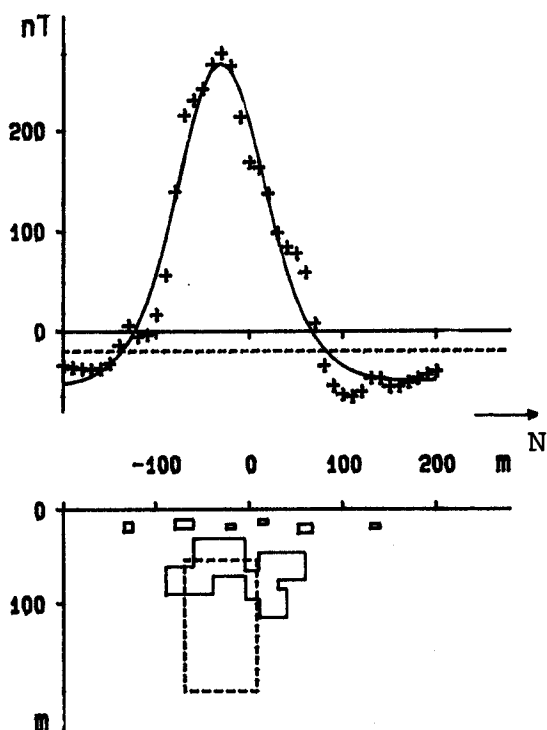
Fig. 3.30 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 3º teste em magnetometria.



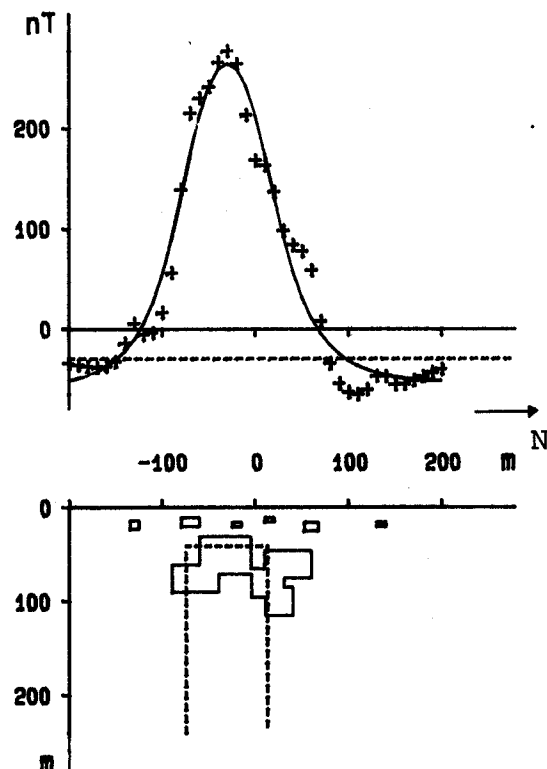
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.31 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 3º teste em magnetometria. $IT=IM=60$ graus; $DT=DM=10$ graus. IM' e DM' podem variar nos intervalos $(-90,90)$ e $(-100,100)$, respectivamente.

da ambiguidade pois o ângulo entre as soluções extremas, que neste caso é de cerca de 57 graus, é aproximadamente o mesmo dos testes anteriores. Os principais parâmetros envolvidos também são os mesmos dos testes 1 e 2 ou seja, a espessura e a profundidade do topo que variam de modo inverso. O nível de base apresenta variação de 23 nT e está acoplado à espessura de modo inverso.

4º Teste

O objetivo deste teste é ilustrar o efeito do modelo interpretativo simples mais a presença de interferências lateral (ao sul) e superficiais. As estimativas da inclinação e do azimute do vetor magnetização são mantidos fixos nos valores corretos. Este teste, como os anteriores, ilustram anomalias características de alta latitude. O número de fatores retidos foi de dois e como mostra a Figura 3.32 as soluções estão distribuídas de tal modo que o ângulo entre as soluções extremas é de 79 graus. Comparando este teste com os anteriores, observamos que, mesmo com a inclinação e o azimute fixos, houve um aumento da ambiguidade, certamente provocado pela presença da interferência lateral. Os principais parâmetros responsáveis pela ambiguidade são a espessura e a profundidade do topo que variam em sentido inverso, possibilitando soluções dos tipos prismático, equidimensional e tabular como ilustram as soluções cujas posições estão assinaladas com setas horizontais na Figura 3.32 e são mostradas nas Figuras 3.33a a 3.33d. O nível de base continua acoplado de maneira inversa à espessura, tendo uma variação maior neste teste, de cerca de 47 nT.

5º Teste

Este teste apresenta as mesmas características do teste

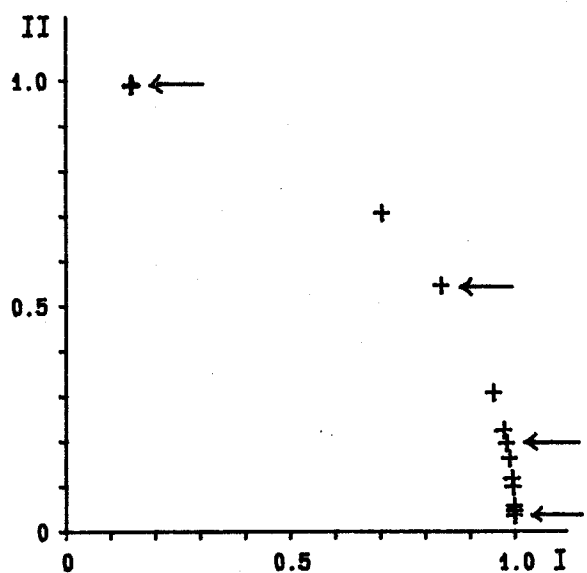
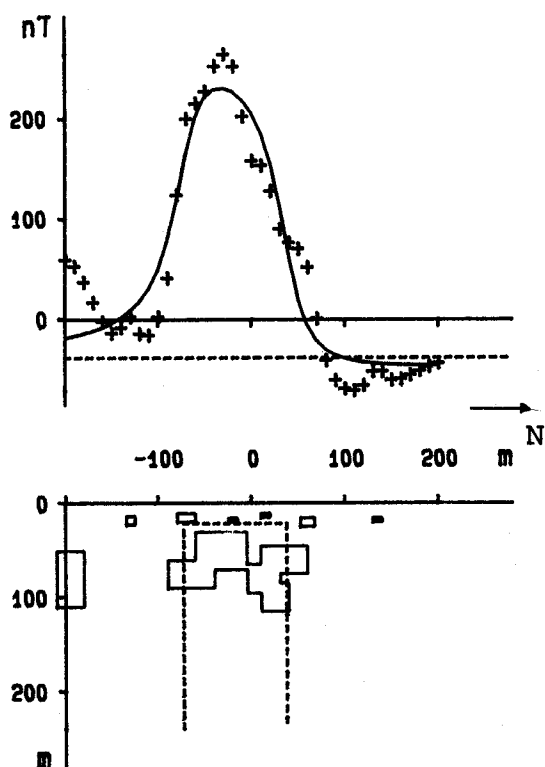
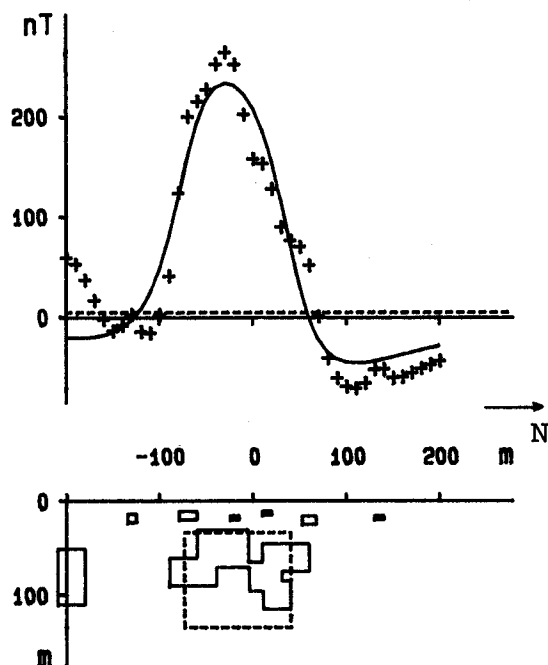


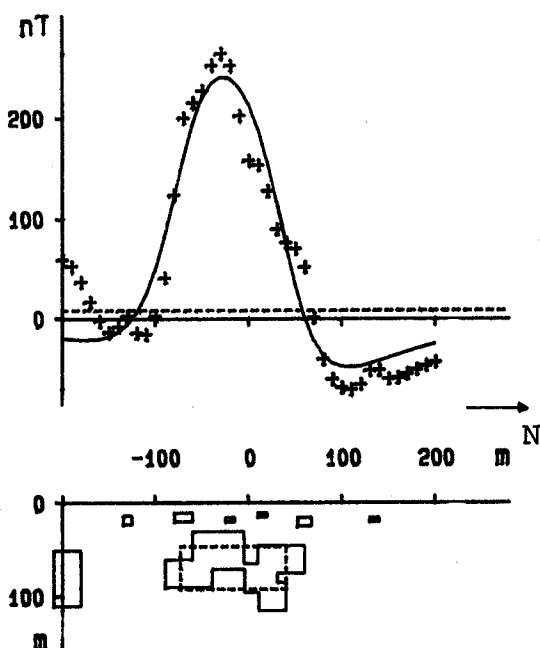
Fig. 3.32 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 4º teste em magnetometria.



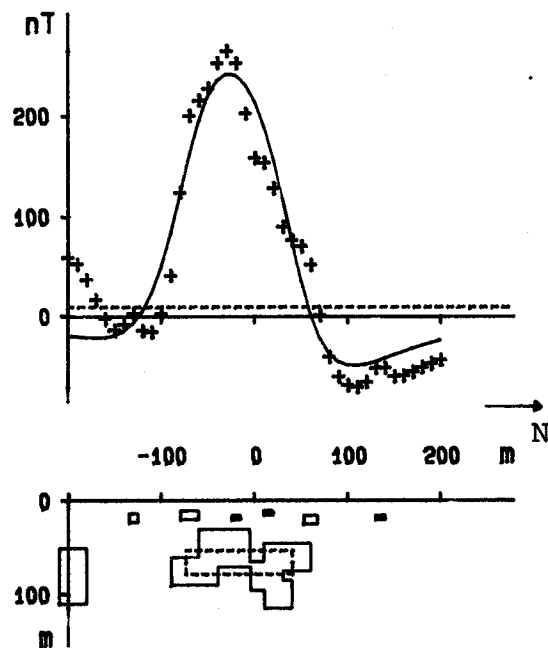
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.33 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo) para a sequência de soluções (a) a (d) do 4º teste em magnetometria. $IT=IM=60$ graus; $DT=DM=10$ graus. IM' e DM' são mantidos fixos nos valores corretos.

anterior sendo que apenas a estimativa inclinação da magnetização é mantida fixa no valor correto. Uma variação de -100 a 100 graus é permitida à estimativa do azimute. Com essa mudança, o número de fatores retidos continuou sendo dois, mas a distribuição das soluções mostrada na Figura 3.34 indica que o ângulo entre as soluções extremas é de 52 graus ou seja, menor que o ângulo do teste anterior onde tanto a inclinação como o azimute estavam fixos. Isso mostra que o conhecimento a priori do azimute não é suficiente para diminuir a ambiguidade. Testes similares mostraram comportamento semelhante para a inclinação. As Figuras 3.35a a 3.35d mostram as soluções cujas posições estão assinaladas na Figura 3.34 com setas horizontais. Elas se apresentam desde as de forma prismática como também equidimensional e tabulares. A espessura e a profundidade do topo são os principais parâmetros envolvidos na ambiguidade, estando relacionados de modo inverso. O nível de base apresenta variação menor que nos testes anteriores (16 nT) e preservou o acoplamento com a espessura de modo inverso e com a largura de modo direto.

6º Teste

O efeito do modelo simples somado à presença de interferências superficiais e lateral (ao norte) com as estimativas da inclinação e o azimute do vetor magnetização variando de -90 a 90 graus e de -100 a 100 graus respectivamente é estudado neste teste. Foram retidos dois fatores e as 20 soluções foram plotadas no gráfico dos fatores, mostrados na Figura 3.36 Observamos que as soluções cujas posições estão assinaladas com setas horizontais na Figura 3.36, assumem todas, forma tabular (Figura 3.37). Neste caso,

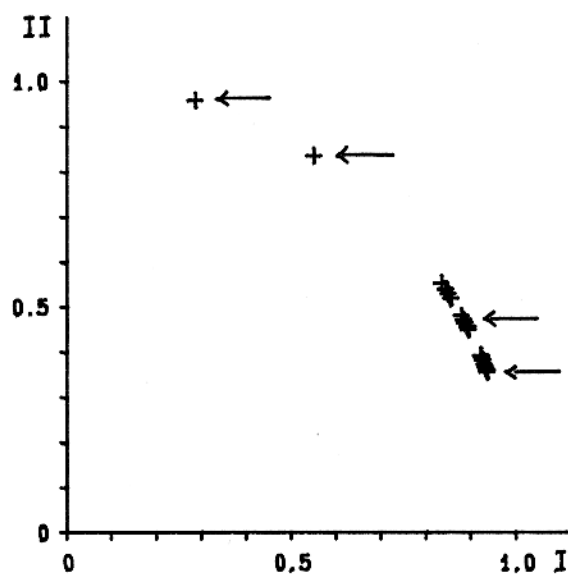
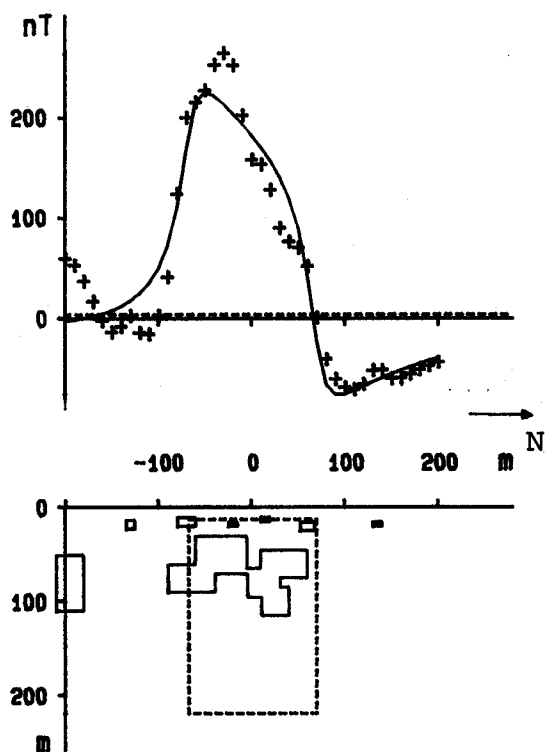
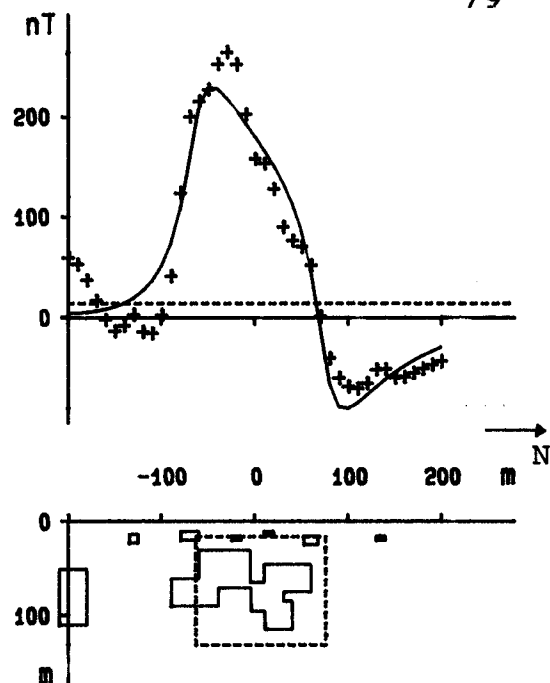


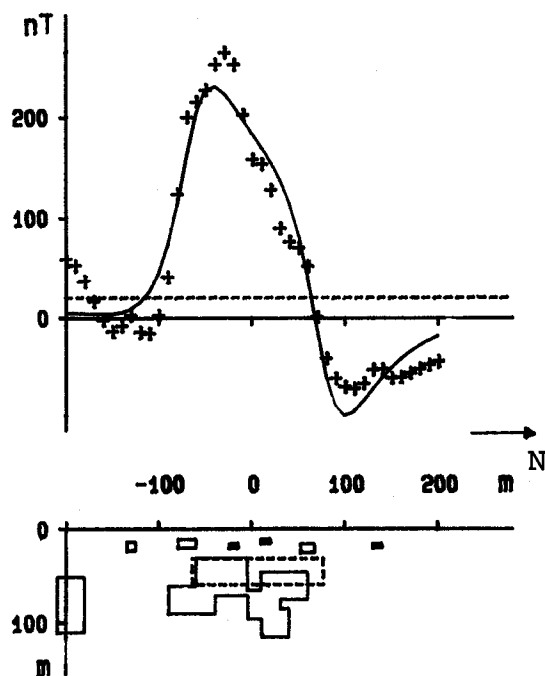
Fig. 3.34 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 5º teste em magnetometria.



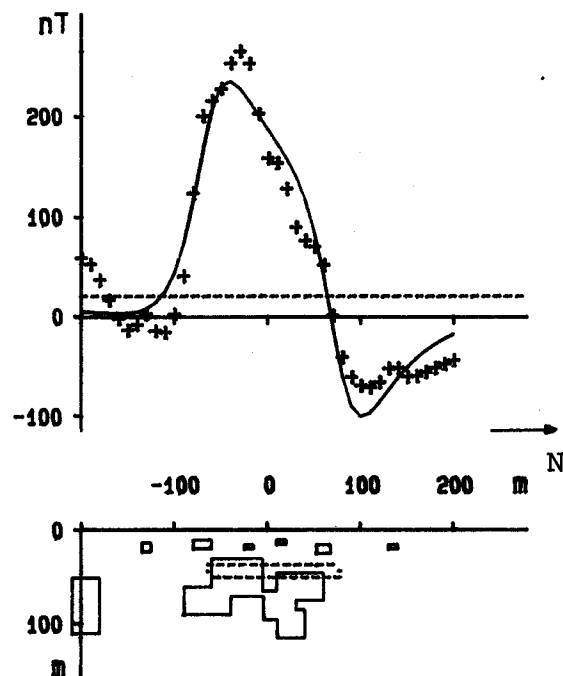
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.35 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 5º teste em magnetometria. $IT=IM=60$ graus; $DT=DM=10$ graus. IM' é mantido fixo no valor correto e DM' varia no intervalo $(-100,100)$.

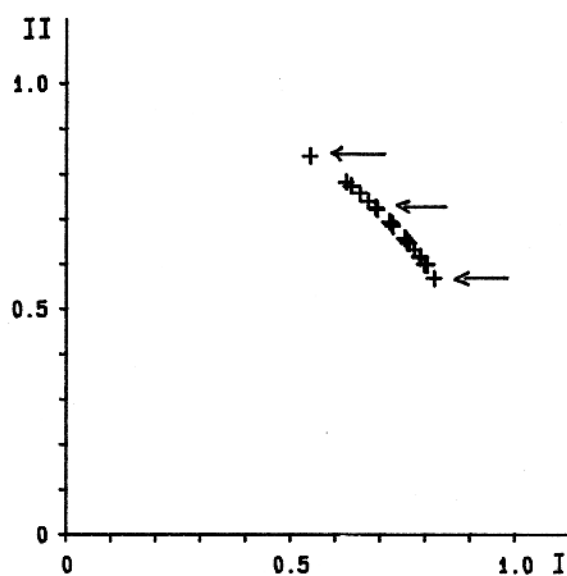
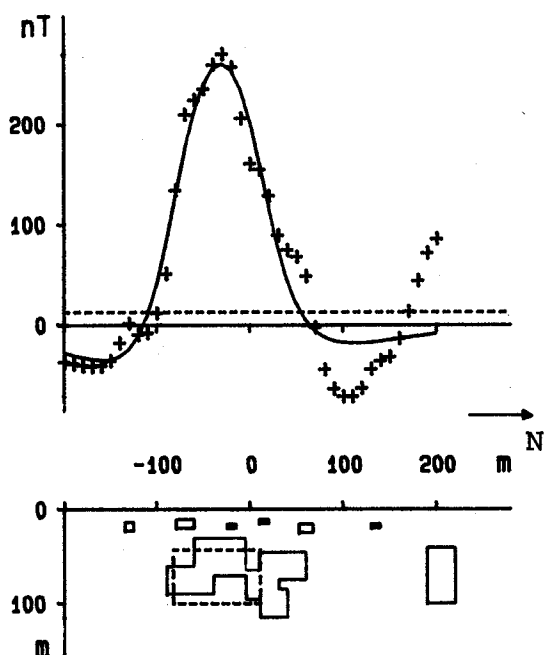
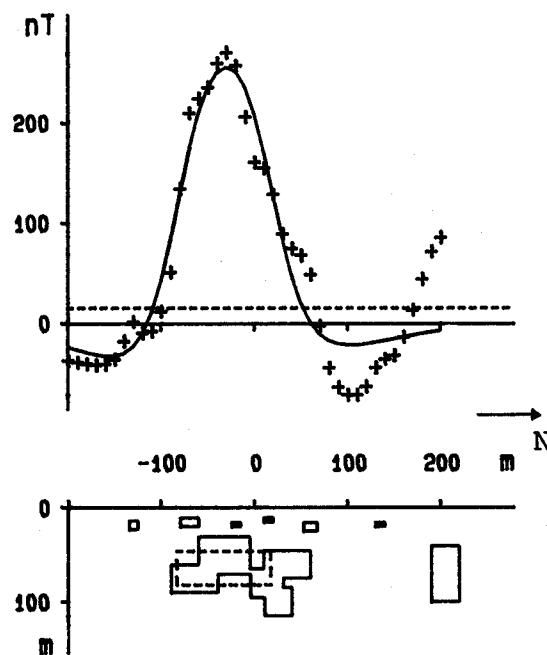


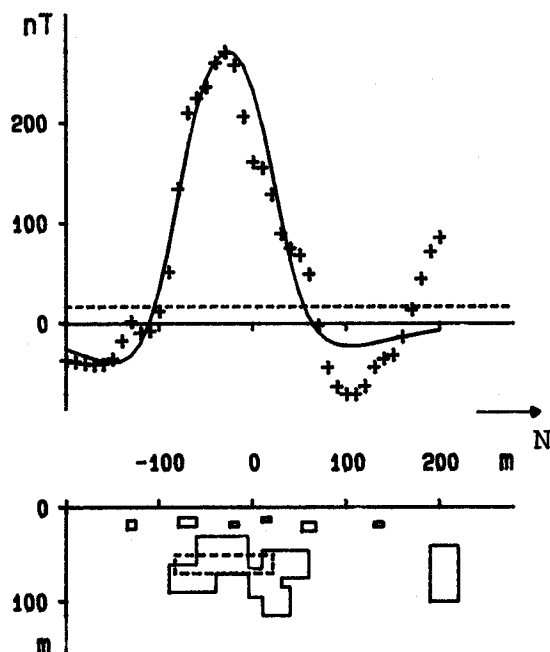
Fig. 3.36 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 6º teste em magnetometria.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.37 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (c) do 6º teste em magnetometria. $IT=IM=60$ graus; $DT=DM=10$ graus. IM' e DM' podem variar nos intervalos $(-90,90)$ e $(-100,100)$, respectivamente.

o ângulo entre as soluções extremas (22 graus) diminuiu em relação aos testes anteriores. A largura e a espessura, variando de modo inverso, aparecem como principais parâmetros relacionados à ambiguidade. No entanto, nas Figuras 3.37a a 3.37c vemos que a participação da largura é secundária e causada pela presença da interferência lateral, que por elevar em demasia somente a borda direita da anomalia, fez com que as melhores soluções produzidas pelo método dos mínimos quadrados fossem obtidas variando-se mais a largura do que a profundidade do topo como ocorreu nos testes anteriores. O nível de base pouco variou (6 nT).

7º Teste

Todos os testes anteriores representaram anomalias de alta latitude (inclinação da magnetização e do campo geomagnético igual a 60 graus) com sinal bem definido. O teste que se segue exemplifica uma anomalia de baixa latitude (15 graus) com sinal também bem definido, ressaltando o efeito do modelo simples com interferência lateral (ao sul) e as estimativas inclinação e o azimute da magnetização variando de -90 a 90 graus e de -100 a 100 graus respectivamente. O gráfico dos dois fatores retidos mostrado na Figura 3.38, apresenta a dispersão das 20 soluções, com o ângulo entre as soluções extremas de 48 graus. As Figuras 3.39a a 3.39d, mostram a sequência das soluções cujas posições estão assinaladas na Figura 3.38 com setas horizontais e que vão desde a de forma prismática até as de forma tabular. Os principais parâmetros envolvidos são a espessura e profundidade do topo, o que está de acordo com os testes em alta latitude. A variação do nível de base ficou em torno de 9 nT.

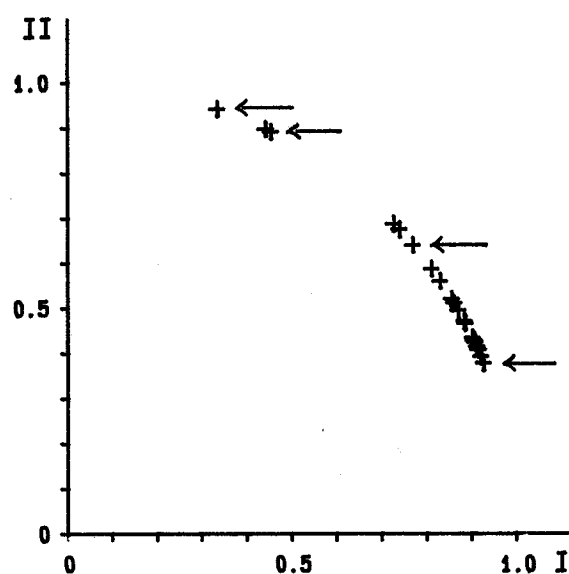
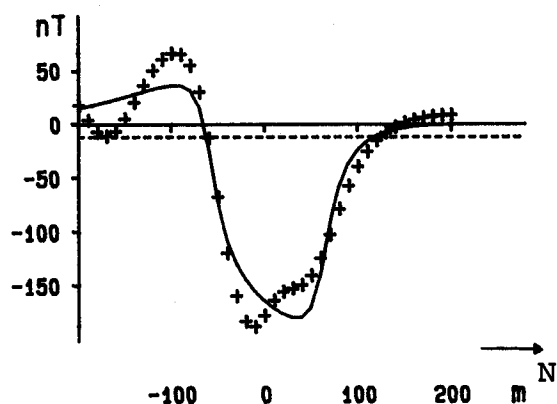
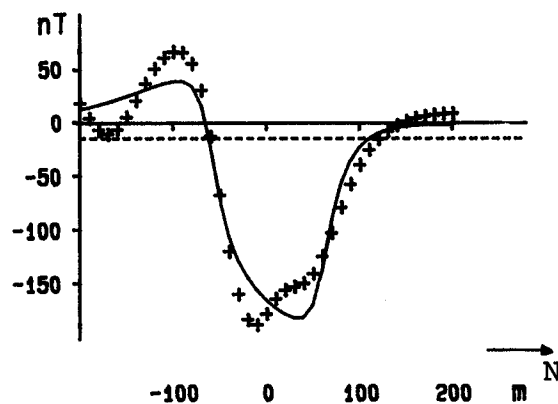


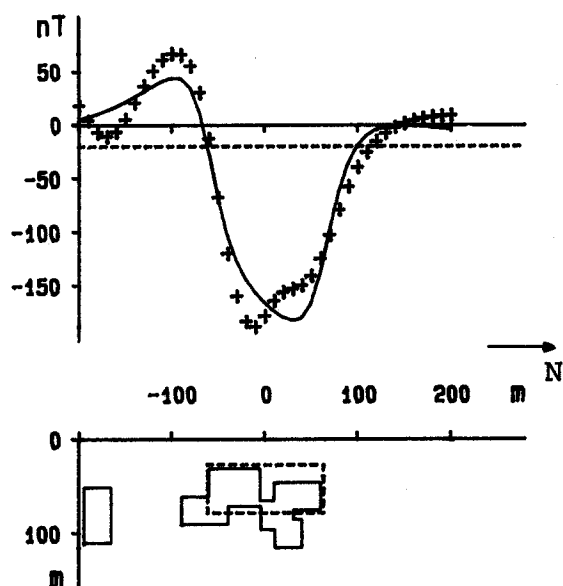
Fig. 3.38 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 7º teste em magnetometria.



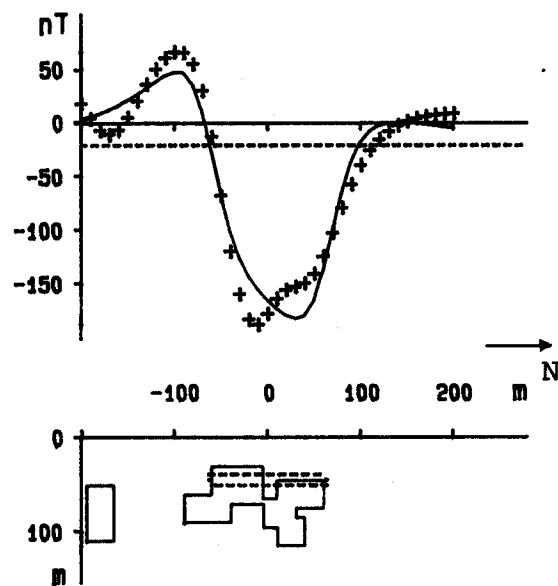
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.39 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 7º teste em magnetometria. $IT=IM=15$ graus; $DT=DM=50$ graus. IM' e DM' podem variar nos intervalos $(-90,90)$ e $(-100,100)$, respectivamente.

8º Teste

Os dois próximos testes, dizem respeito a anomalias de baixa latitude mas com sinal mal definido ($IT=IM=15$ graus; $DT=DM=10$ graus). Além do efeito do modelo simples, estudou-se o efeito da presença de interferências superficiais e lateral (ao sul, com as estimativas da inclinação e do azimute do vetor magnetização variando de -90 a 90 graus e de -100 a 100 graus respectivamente. Foram necessários três fatores para explicar 99% da dispersão das soluções, que estão plotadas no gráfico da projeção estereográfica dos fatores (Figure 3.40). A sequência das soluções, variando de tabular a prismática mostradas nas Figuras 3.41a a 3.41c cujas posições estão assinaladas na Figura 3.40 por setas horizontais, correspondem ao fator II. As soluções prismáticas, mostradas nas Figuras 3.41d a 3.41f, cujas posições estão assinaladas na Figura 3.40 por setas verticais correspondem ao fator III. Os parâmetros relacionados à dispersão das soluções explicada pelo fator II são a largura e a espessura, fato que não ocorre nos testes com sinal bem definido. Como parâmetros secundários aparecem o volume e a profundidade do topo variando no sentido inverso. O nível de base pouco variou (3 nT).

Portanto, o fato do sinal estar mal definido provoca um aumento da ambiguidade levando ao aparecimento de um outro nível de ambiguidade (terceiro fator) representado neste teste primordialmente pelo volume.

9º Teste

Neste teste é ilustrado o efeito do modelo interpretativo simples e das interferências laterais (norte e sul) e superficiais, com as estimativas da inclinação podendo

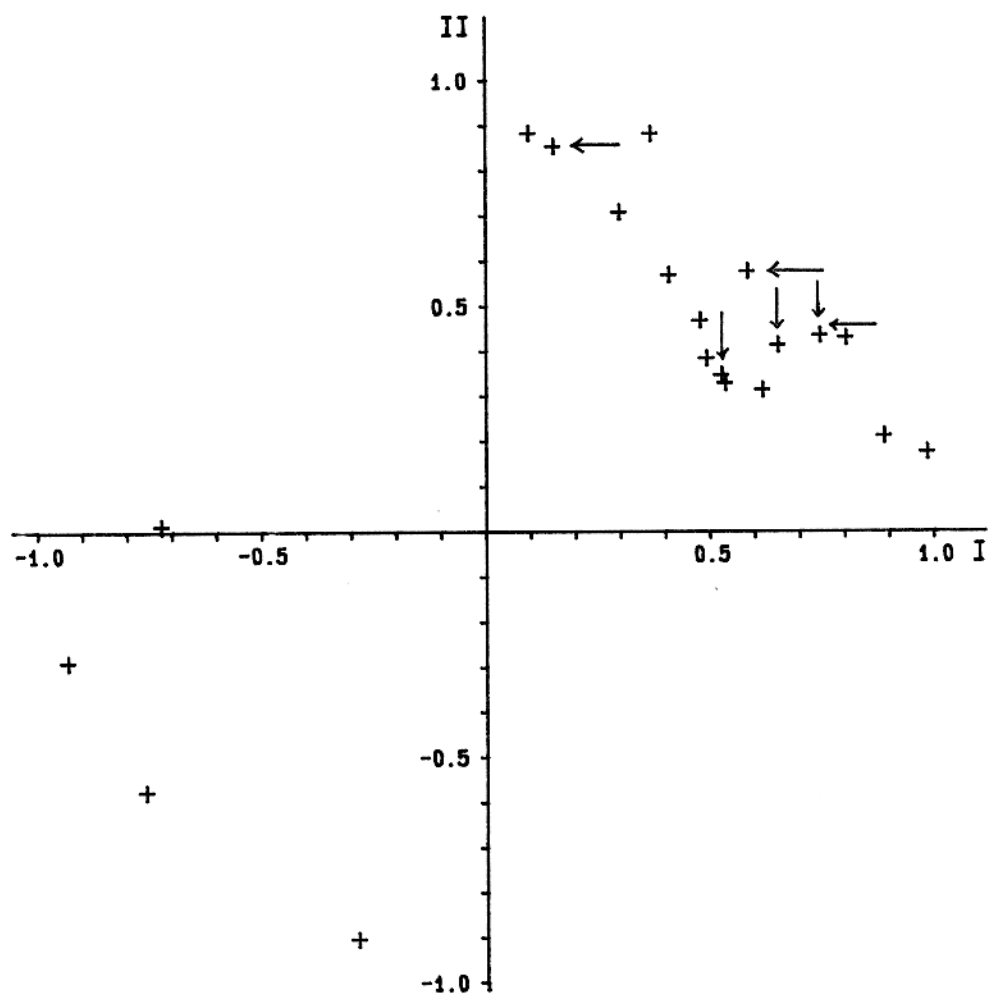
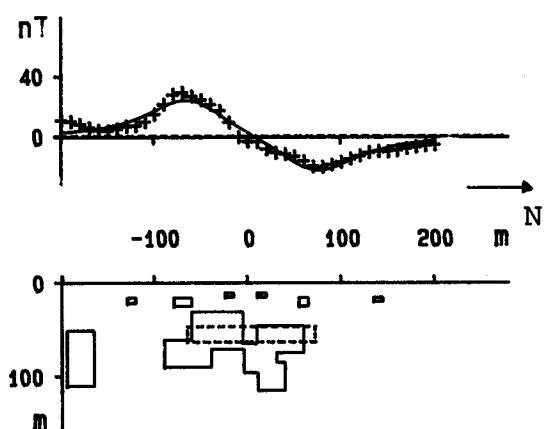
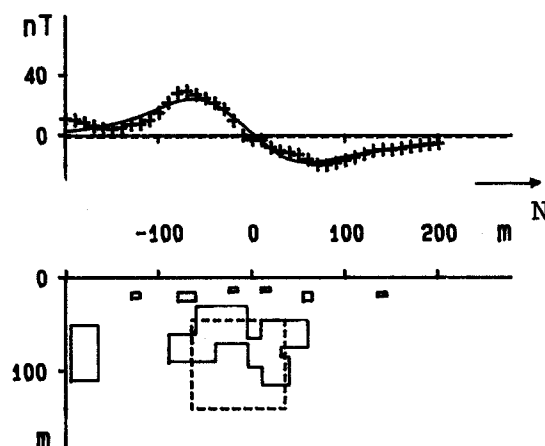


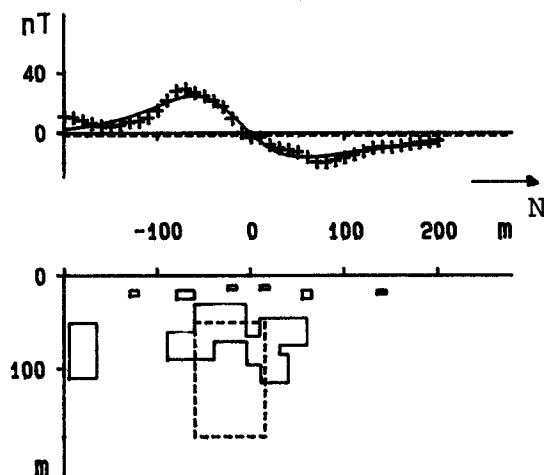
Fig. 3.40 - Projeção estereográfica das cargas (representadas por cruces) nos fatores I, II e III, para o 8º teste em magnetometria.



(a)

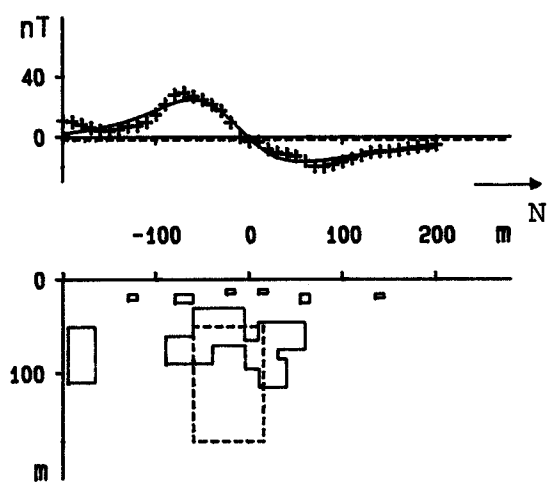


(b)

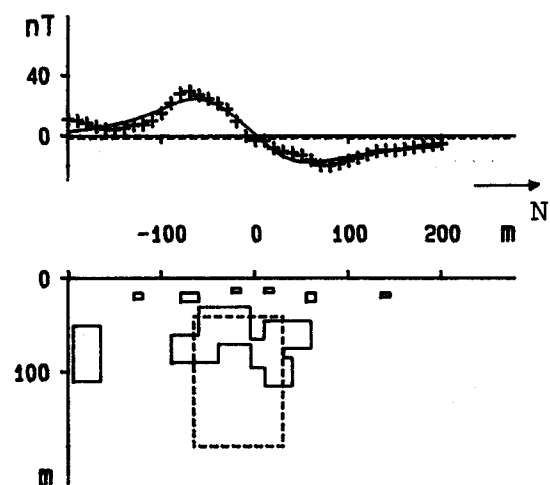


(c)

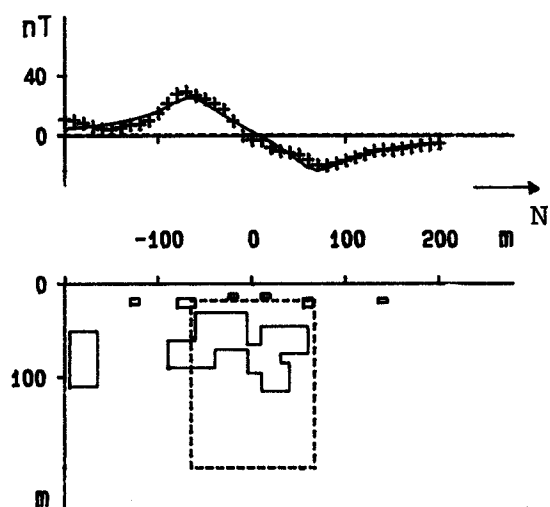
Fig. 3.41 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para as sequências de soluções (a) a (c), relacionadas ao fator II e (d) a (f), relacionadas ao fator III, do 8º teste em magnetometria. $IT=IM=15$ graus; $DT=DM=10$ graus. IM' e DM' podem variar nos intervalos $(-90,90)$ e $(-100,100)$, respectivamente.



(d)



(e)



(f)

Fig. 3.41

variar de -90 a 90 graus e o azimute do vetor magnetização mantido fixo no valor correto. Como no teste anterior, três fatores foram retidos e a Figura 3.42 mostra a distribuição das soluções no espaço gerado por estes fatores. Na Figura 3.43 estão representadas duas sequências de soluções. As correspondentes ao fator II (Figuras 3.43a a 3.43c) tem suas posições assinaladas na Figura 3.42 por setas horizontais. As correspondentes ao fator III (Figuras 3.43d a 3.43e) tem suas posições assinaladas na Figura 3.42 por setas verticais. Na primeira sequência vemos que as soluções variam de equidimensional a tabulares sendo os parâmetros espessura e profundidade do topo, (que variam no sentido inverso) os principais responsáveis pela dispersão das soluções. Esse padrão é o mesmo observado nos testes com a anomalia bem definida. A segunda sequência mostra uma variação no volume e na profundidade do topo, permanecendo a razão espessura/largura constante. O nível de base manteve-se praticamente constante apresentando variação de apenas 2 nT.

Um sinal mal definido tem, portanto, o efeito de provocar um nível adicional de ambiguidade (3 fatores) em relação ao caso do sinal bem definido (2 fatores). Além disso, o segundo fator pode estar relacionado com a profundidade do topo e a espessura ou com a largura e a espessura, como demonstrado neste teste e no anterior.

10º Teste

Em magnetometria, um fato interessante é a tendência da ambiguidade diminuir quando o campo fica demasiadamente complexo em relação ao campo do modelo interpretativo. Os testes que se seguem ilustram esse fato.

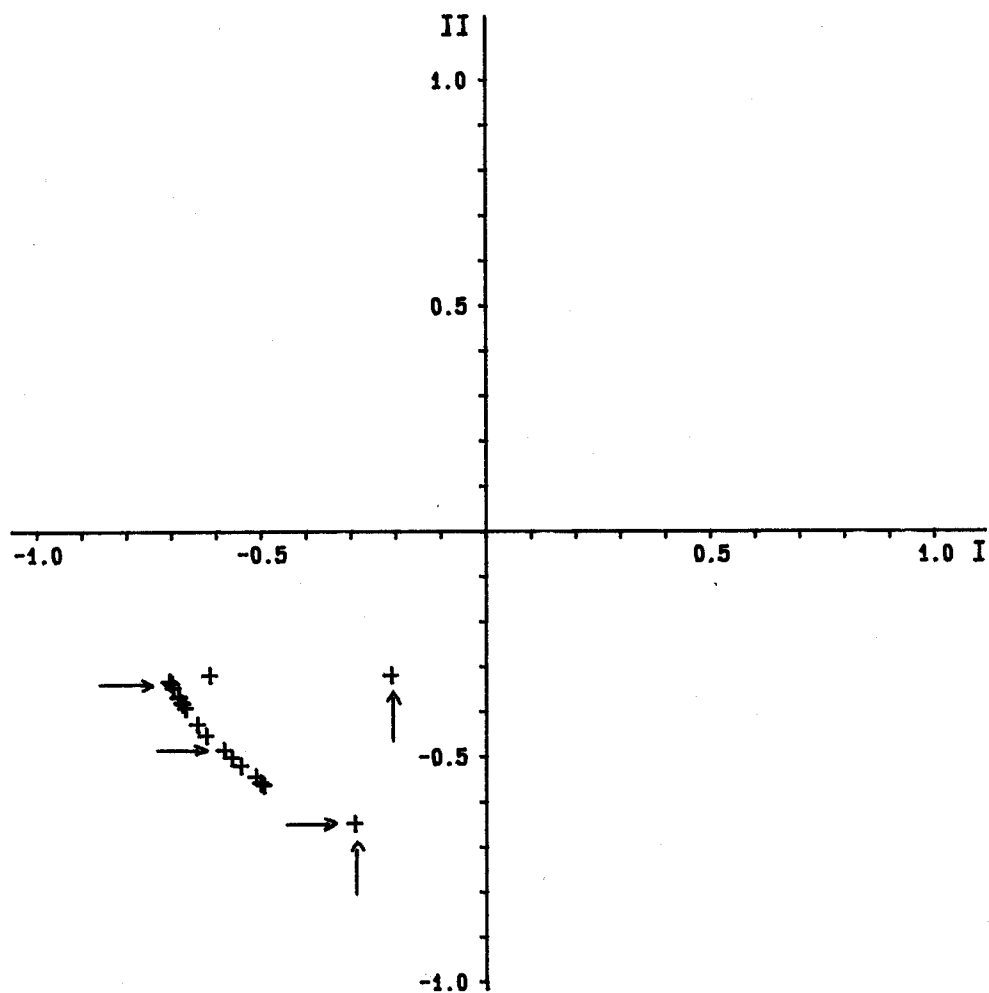


Fig. 3.42 - Projeção estereográfica das cargas (representadas por cruces) nos fatores I, II e III, para o 9º teste em magnetometria.

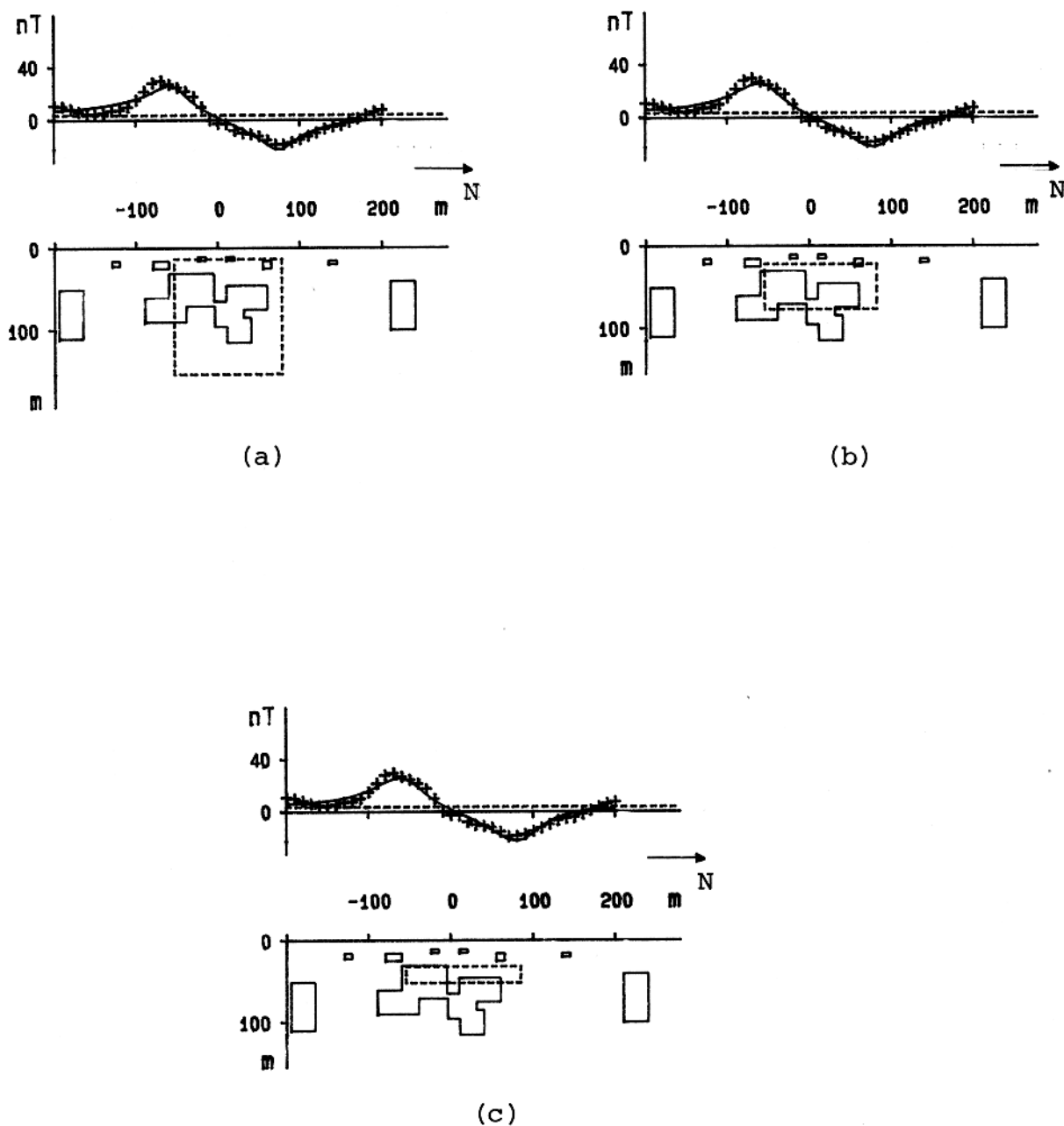
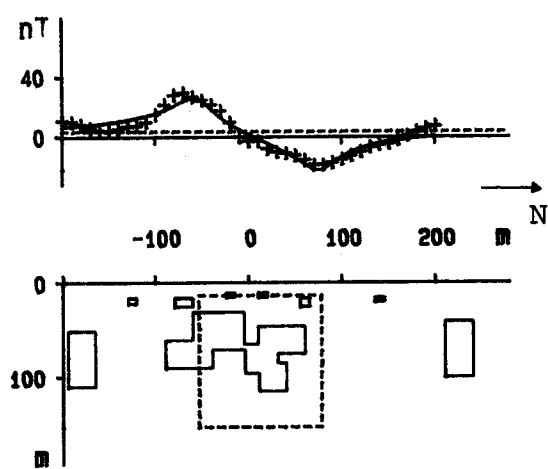
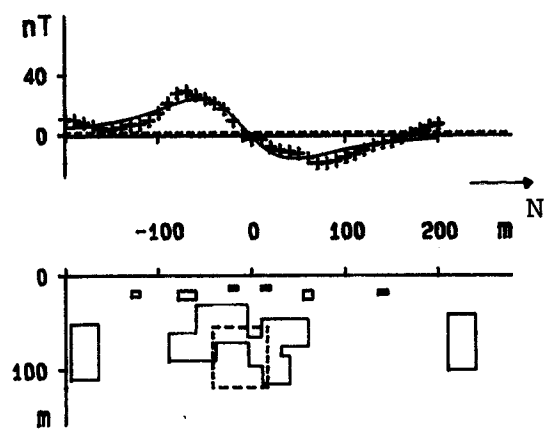


Fig. 3.43 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para as sequências de soluções (a) a (c), correspondentes ao fator II e (d) e (e), correspondentes ao fator III, do 9º teste em magnetometria. $IT=IM=15$ graus; $DT=DM=10$ graus. DM' é mantido fixo no valor correto e IM' pode variar no intervalo $(-90,90)$.



(d)



(e)

Fig. 3.43

A anomalia neste caso é causada por um corpo principal e mais um corpo interferente ao norte do corpo principal. A interpretação é feita mantendo-se a inclinação e o azimute da magnetização fixos nos valores corretos. Para explicar a dispersão das soluções foram necessários apenas dois fatores (Figura 3.44). O ângulo entre as soluções extremas é de 4 graus sendo todas de forma tabular. A dispersão das soluções é devido à espessura e a profundidade do topo que variam inversamente. No entanto, como mostram as soluções extremas (Figuras 3.45a e 3.45b), tem-se praticamente uma só solução. O nível de base se mantém constante.

11º Teste

Para mostrar que a pequena ambiguidade ilustrada no teste anterior é consequência da tentativa de ajustar uma anomalia demasiadamente complexa por um campo simples, produzido por um único corpo, pelo método dos mínimos quadrados, procurou-se trincar a anomalia ao sul e ao norte, retirando o efeito da interferência ao norte que no caso é a principal causa da complexidade do campo.

O número de fatores retidos permaneceu em dois. No entanto, a dispersão das soluções aumentou (Figura 3.46), passando o ângulo entre as soluções extremas de 4 graus para 23 graus. A forma das soluções também variou desde equidimensionas até tabulares como mostram as soluções ilustradas nas Figuras 3.47a a 3.47d cujas posições estão assinaladas na Figura 3.46 com setas horizontais. Os principais parâmetros responsáveis pela ambiguidade continuaram sendo a espessura e a profundidade do topo, o que está de acordo com os testes feitos com sinal bem definido. O nível de base

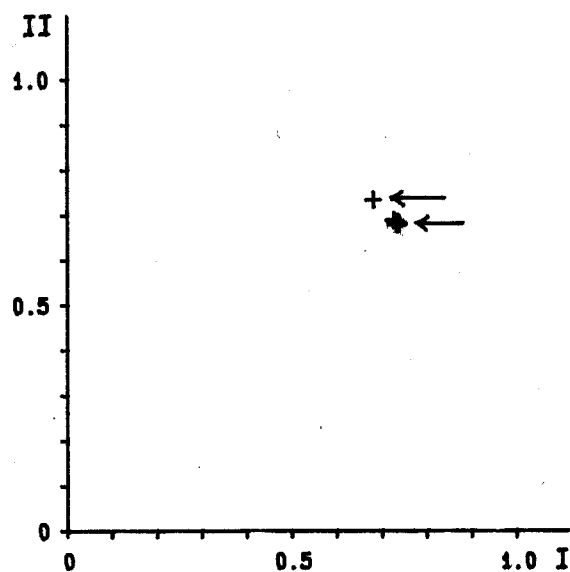


Fig. 3.44 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 10º teste em magnetometria.

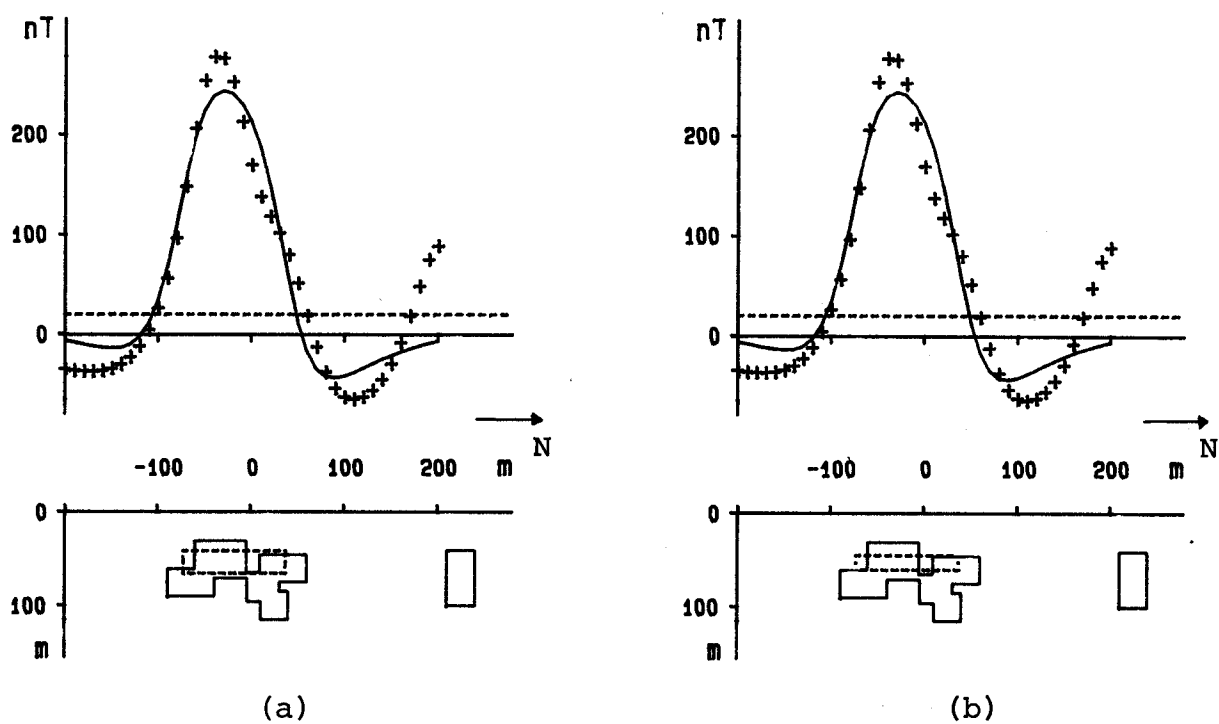


Fig. 3.45 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) e (b) do 10º teste em magnetometria. $IT=IM=60$ graus; $DT=DM=10$ graus. IM' e DM' são mantidos fixos nos valores corretos.

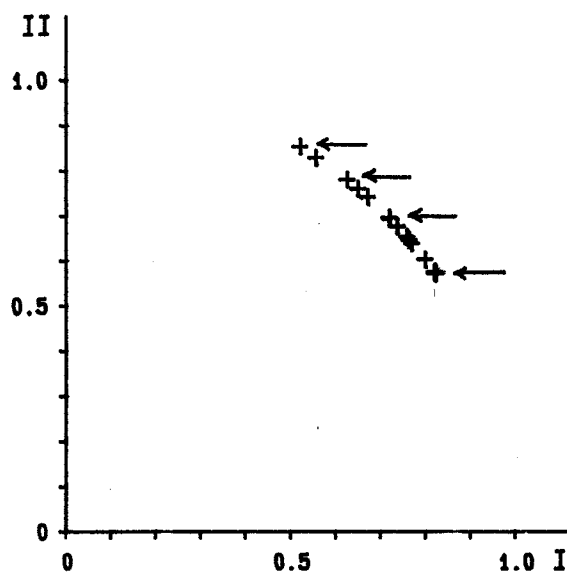
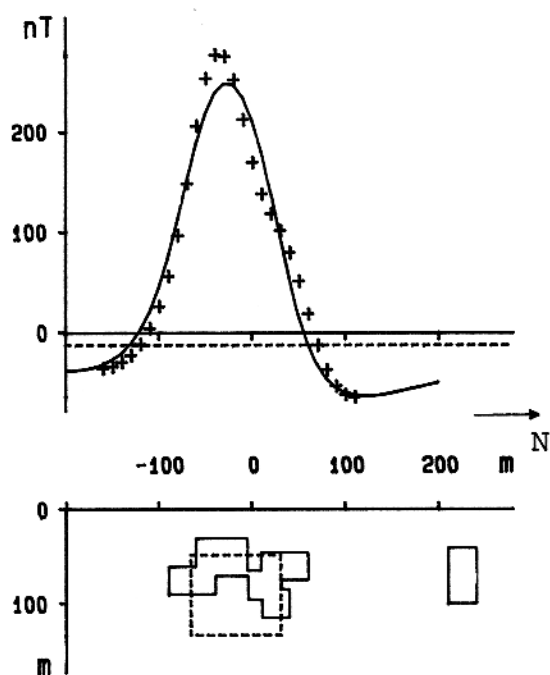
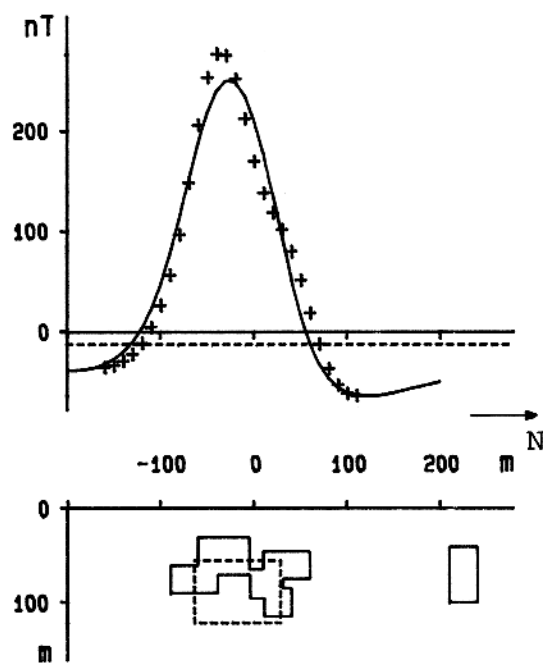


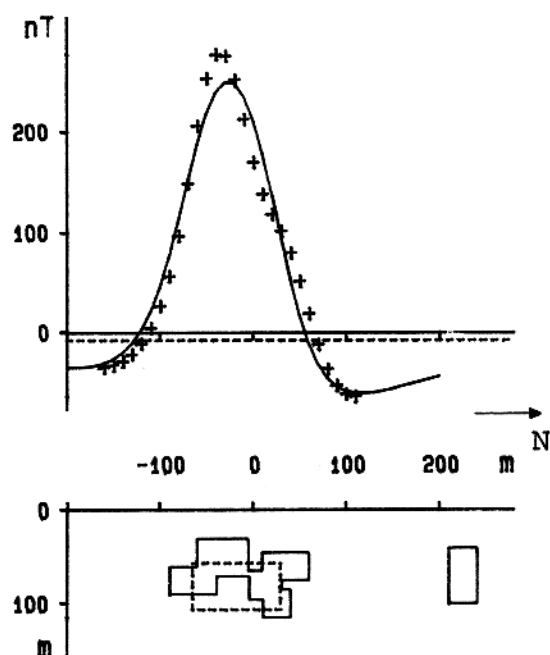
Fig. 3.46 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para o 11º teste em magnetometria.



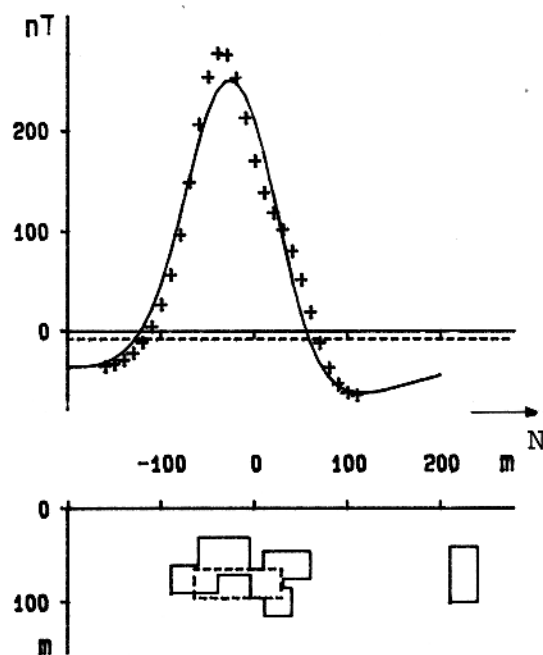
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.47 - Anomalias magnéticas 'observada' e ajustadas (acima) modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do 11º teste em magnetometria. $IT=IM=60$ graus; $DT=DM=10$ graus. IM' e DM' são mantidos fixos nos valores corretos.

apresentou pouca variação (5 nT), fato que já havia ocorrido em outros testes magnéticos.

Sintetizamos abaixo as principais conclusões dos testes realizados para magnetometria incluindo os que não foram descritos neste trabalho.

O principal fator isolado responsável pela ambiguidade das anomalias magnéticas é a espessura.

Na ausência de ruído aleatório e interferências o papel da profundidade do topo e da largura na ambiguidade depende da anomalia estudada. Se ela for bem definida, a profundidade do topo associa-se à espessura sendo, juntamente com esta os principais parâmetros causadores de ambiguidade. A largura, neste caso, geralmente está associada ao terceiro fator. Mesmo em casos em que a largura aparece associada ao segundo fator, ela está associada à espessura e tem papel secundário. No caso da anomalia estar mal definida a largura, sempre associada à espessura, pode contribuir significativamente para a ambiguidade passando a estar associada ao segundo fator.

A presença de ruído aleatório, nos testes com sinal mal e bem definidos, não causa um aumento significativo da ambiguidade.

Na presença de interferências, houve um aumento da ambiguidade. Nos testes com sinal bem definido, o aumento da ambiguidade está ligado ao aumento da complexidade da anomalia. No entanto, existe um limite acima do qual, a anomalia se torna tão complexa que a ambiguidade é reduzida drasticamente. Esse efeito depende também do método de ajuste empregado e é particularmente notório no caso dos mínimos quadrados. Nos testes com sinal mal definido, também ocorreu um aumento da ambiguidade, que de um modo geral é maior que o aumento

observado nos testes com sinal bem definido.

O nível de base não tem papel muito importante na ambiguidade devido à anomalia estar bem amostrada incluindo suas partes positivas e negativas. O nível de base acopla-se principalmente à espessura de modo inverso e à largura de modo direto.

Os resultados para alta latitude (60 graus) e baixa latitude (15 graus) não foram qualitativamente diferentes. A fixação dos valores da inclinação e do azimute do vetor magnetização podem produzir uma redução na ambiguidade, mas não de forma espetacular nem consistente.

4 - APLICAÇÃO A DADOS REAIS

A metodologia desenvolvida foi aplicada a anomalias gravimétrica e magnética reais incorporando-se, sempre que possível, as informações geológicas ou geofísicas disponíveis.

4.1 Gravimetria

Os dados gravimétricos estudados estão sob a forma de um perfil com direção leste-oeste, cortando o "Diablo Plateau" e o "Salt Basin Graben" ambos situados no estado do Texas, E.U.A.. A Figura 4.1 mostra este perfil e a interpretação geológica representada por um modelo 2-D apresentado por Keller et al. (1985). Nesta interpretação é sugerida a presença de rochas máficas da crosta superior sob o "Diablo Plateau" o que explicaria o alto gravimétrico a oeste. A leste, o "Salt Basin Graben" é marcado por um baixo gravimétrico que pode ser explicado pela presença de rochas sedimentares (Paleozóicas e Cenozóicas) associadas ao graben por uma mudança na estrutura da crosta (Keller et al., 1985).

Neste trabalho, os dados gravimétricos apresentados por Keller et al. (1985) foram truncados a leste resultando em 35 observações que foram analisadas através da metodologia descrita no capítulo 2, presumindo-se como modelo interpretativo um único prisma bidimensional vertical com espessura finita. Este modelo interpretativo simples não leva em conta a presença de outras fontes interferentes que certamente devem ocorrer, conforme exemplificado pela interpretação de Keller et al. (1985). Consequentemente, estas fontes interferentes devem influenciar de modo significativo na ambiguidade das soluções.

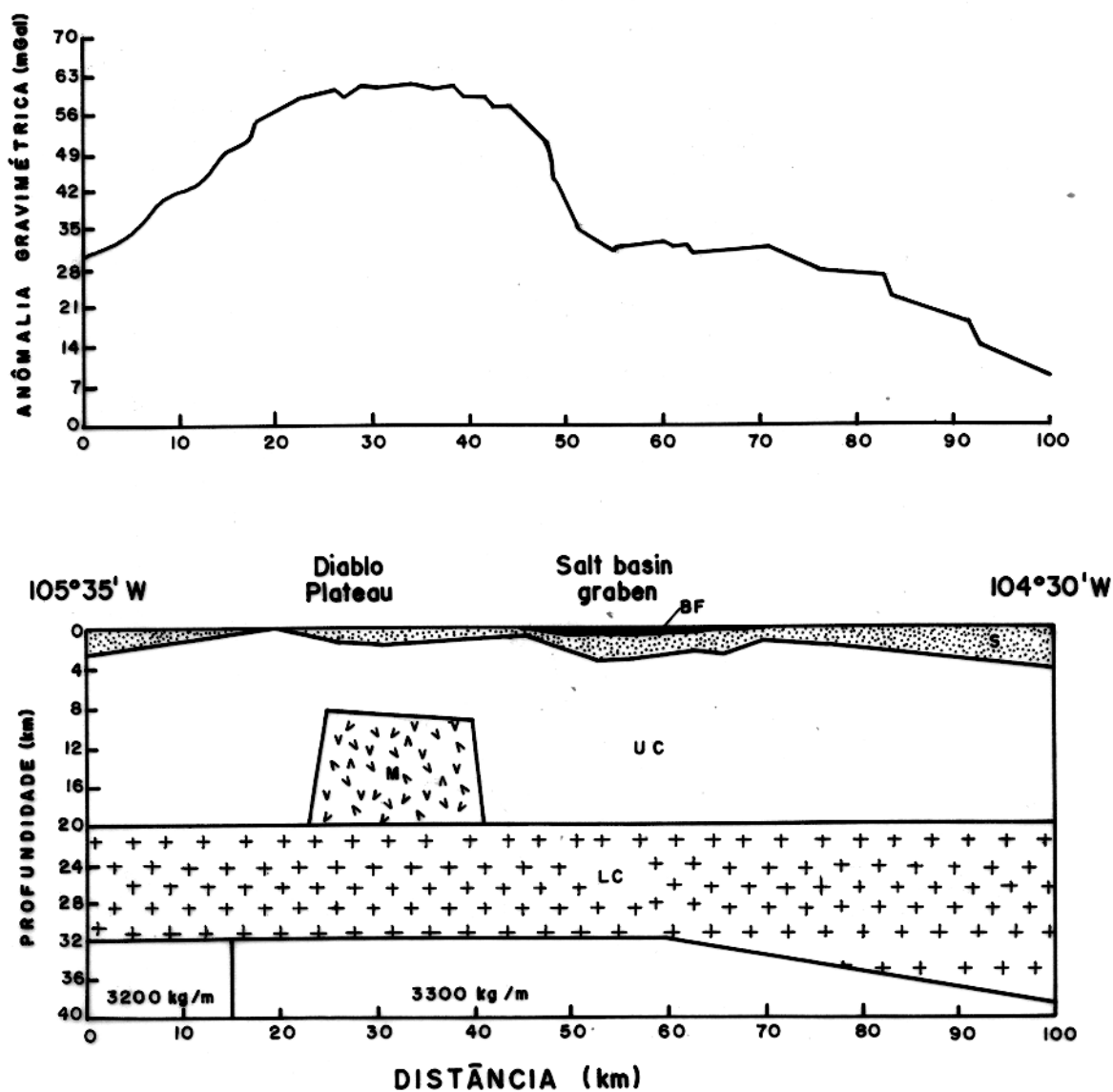


Fig. 4.1- Perfil anômalo Bouguer cortando o "Salt Basin Graben" e modelo geológico apresentado por Keller et al. (1985). BF é o "Bolson Fill" (2300 kg/m^3), S são rochas sedimentares (2600 kg/m^3), UC e LC são a crosta superior e inferior (2700 e 3100 kg/m^3 respectivamente), e M é uma intrusão máfica (2900 kg/m^3).

Utilizaremos as informações contidas no modelo geológico descrito por Keller et al. (1985) sob a forma de vínculos aos parâmetros que queremos determinar. A Tabela 4.1 mostra os limites inferiores e superiores utilizados para cada parâmetro do modelo interpretativo.

Os intervalos das estimativas encontradas para os vários parâmetros obtidos para 20 possíveis soluções, estão compiladas também na Tabela 4.1. Apesar dos vínculos impostos aos parâmetros a ambiguidade é considerável. Foram retidos dois fatores em relação aos quais as soluções distribuem-se como ilustrado na Figura 4.2. O ângulo entre as soluções extremas é de 24 graus tendo as soluções sempre forma tabular, como mostram as soluções cujas posições estão assinaladas com setas horizontais Figura 4.2 e ilustradas nas Figuras 4.3a a 4.3d. A profundidade da base e a profundidade do topo são os principais parâmetros responsáveis pela dispersão das soluções. A anomalia é caracterizada pelo sinal mal definido com os pontos de inflexão pouco caracterizados. Associados a esse fato, a presença de interferências (sugerida pela interpretação de Keller et al., 1985) e o desconhecimento do nível de base podem ter levado a profundidade da base e a profundidade do topo (variando de modo direto), a ser os principais parâmetros causadores de ambiguidade. Padrão semelhante foi observado no 9º teste sintético para gravimetria onde o efeito do modelo simples mais a presença de interferências laterais foi estudada para corpos produzindo sinais mal definidos. A única diferença deste teste com o teste sintético está na variação das profundidades da base e do topo de modo direto, o que pode ser explicado pela forma achatada do topo da anomalia neste teste, permitindo ajustes que decaíssem de maneira suave e

Tabela 4.1 - Vínculos utilizados e intervalos de estimativas obtidas no teste com dados gravimétricos do "Salt Basin Graben". pb é a profundidade da base do prisma e NB é o nível de base.

	Limites inferiores	Limites superiores	Intervalos de estimativas
h (m)	5.0	16.0	5.0 ---- 15.0
pb (km)	12.0	30.0	12.0 ---- 29.0
w (km)	10.0	70.0	31.0 ---- 35.0
d (kg/m ³)	160.0	300.0	160.0 ---- 297.0
x0 (km)	10.0	50.0	30.5 ---- 30.6
NB (mGal)	-50.0	50.0	4.0 ---- 23.0

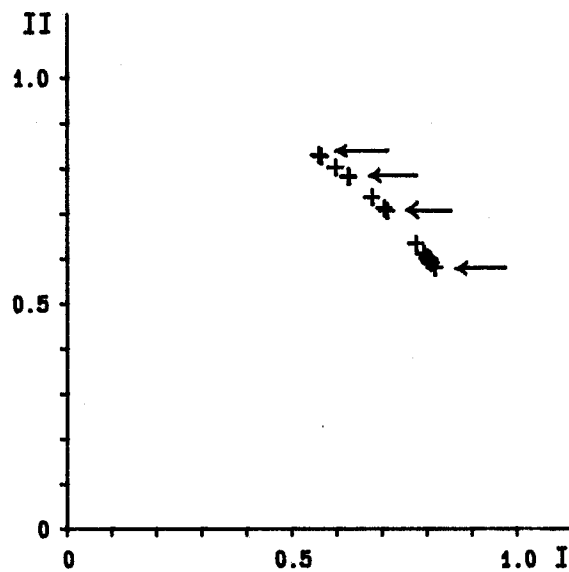
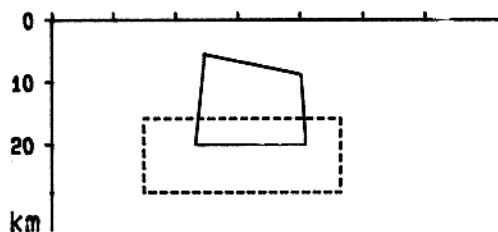
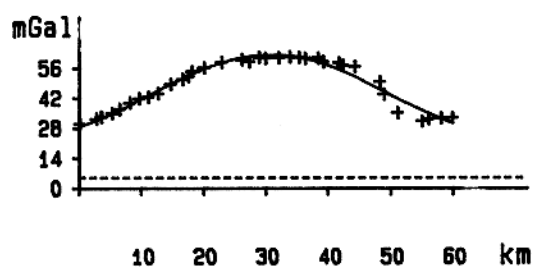
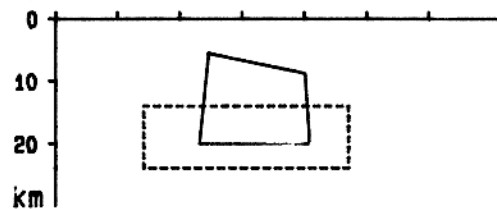
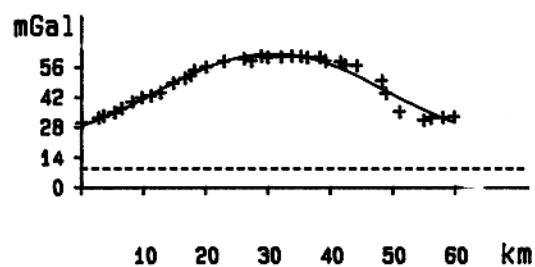


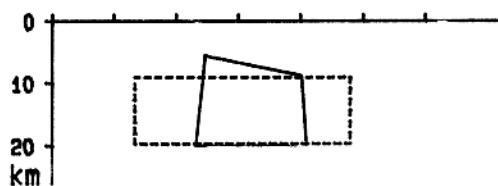
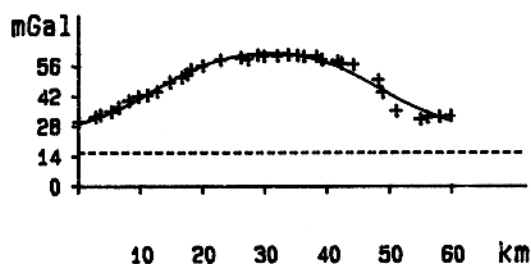
Fig. 4.2 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para a anomalia gravimétrica do "Salt Basin Graben".



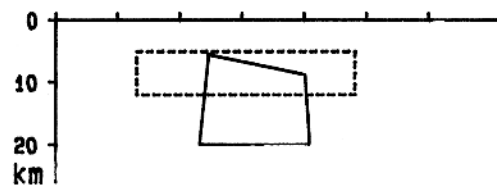
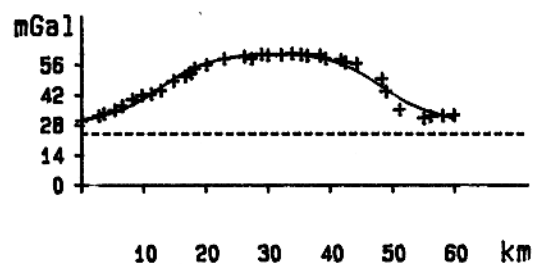
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.3 - Anomalias gravimétricas observada e ajustadas (acima) e modelos de Keller et al.(1985) (linha cheia) e ajustados (tracejado) (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) da área de "Salt Basin Graben".

aproximadamente constante desde o pico da anomalia até as bordas, correspondendo essas anomalias a corpos profundos e espessos (Figuras 4.3a e 4.3b). As Figuras 4.3c e 4.3d, ilustram outro tipo de ajuste possível, que decaem lentamente tanto próximo ao pico como próximo às bordas, decaindo rapidamente somente próximo ao ponto de inflexão, correspondendo esses ajustes a corpos rasos e pouco espessos. O nível de base variou, permanecendo acoplado à profundidade da base como nos testes com dados sintéticos.

4.2 Magnetometria

Os dados magnéticos estudados são causados por uma intrusão de diabásio em forma de dique, situado na bacia Paleozóica do Parnaíba. Esta bacia é composta por sedimentos químicos e clásticos, desprovidos de minerais magnéticos, penetrados por rochas basálticas do Jurássico e do Cretáceo. A topografia na vizinhança do dique estudado é aproximadamente plana e horizontal. Há evidência de forte intemperismo fazendo com que a parte superficial aflorante do diabásio não apresentasse propriedade magnética notável. O afloramento do dique em estudo, permitiu a medida in situ da profundidade do topo em relação ao sensor (1.9 m), da largura (2 m) e da posição do centro do dique relativo a uma origem arbitrária (11 m). O campo geomagnético tem uma inclinação de -5.5 graus e azimute de 205 graus relativo ao eixo y. A localização do dique estudado está indicada por um círculo negro no mapa da Figura 4.4. O perfil com um total de 13 observações irregularmente espaçadas ao longo da direção perpendicular ao dique está representado na Figura 4.5.

Na aplicação da metodologia a esses dados magnéticos,

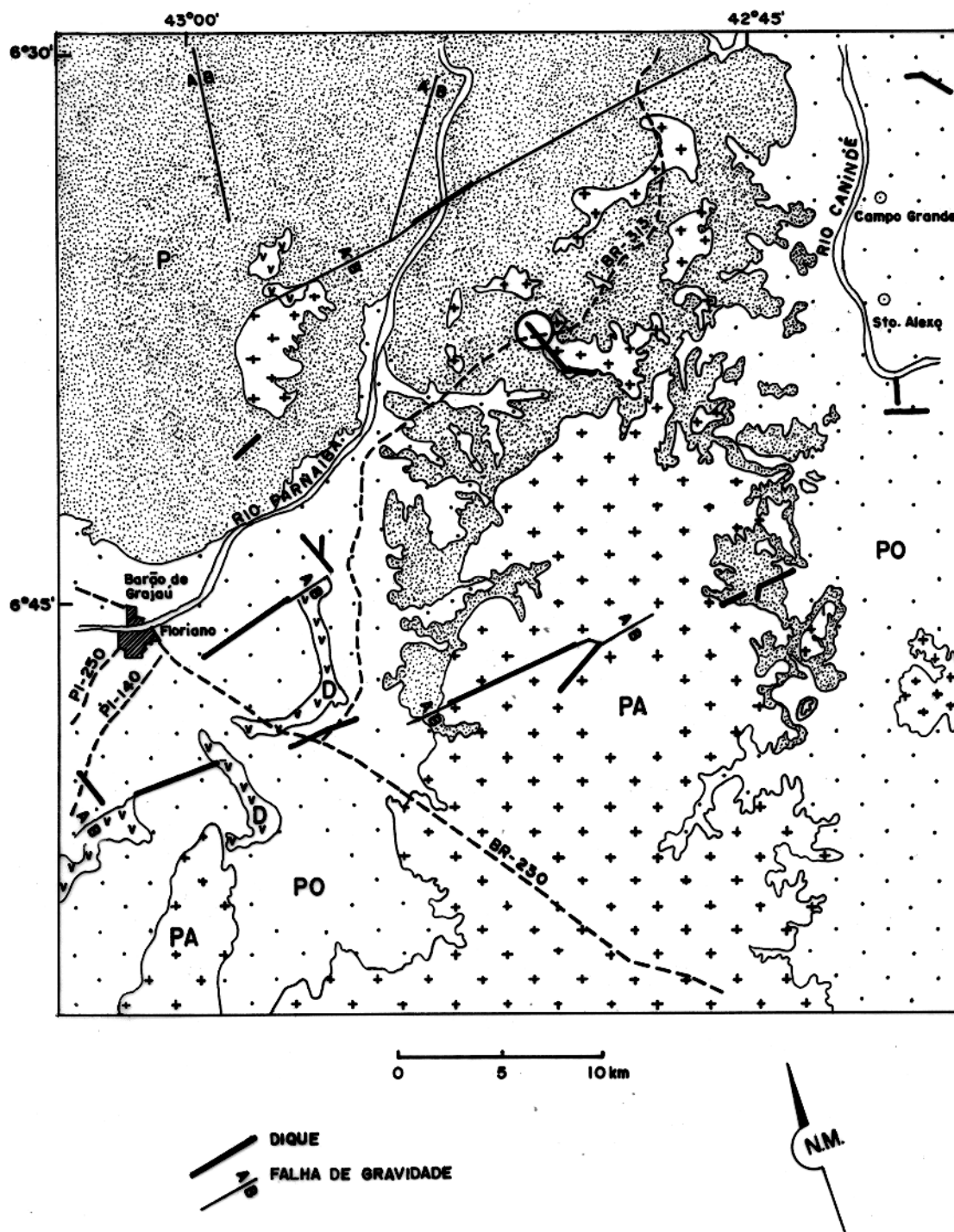


Fig. 4.4 - Mapa geológico da parte centro-leste da bacia do Parnaíba. As rochas sedimentares correspondem as Formações Piauí (P), Pastos Bons (PA) e Poti (PO). D são rochas diabásicas.

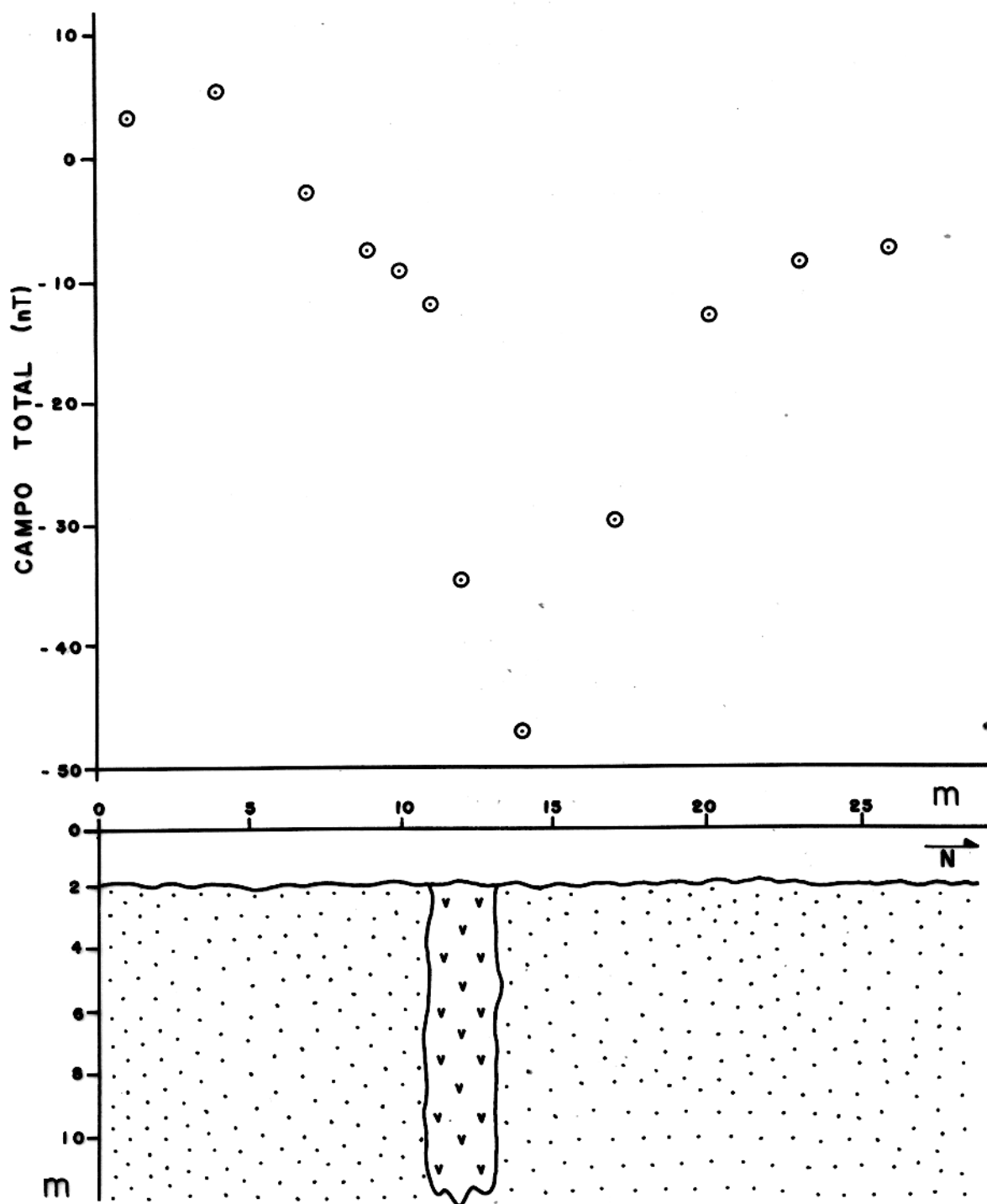


Fig. 4.5 - Perfil magnético sobre dique intrusivo da bacia do Parnaíba (acima) e modelo geológico (abaixo).

apesar da informação geológica disponível indicar que o corpo em estudo tem espessura muito grande, com profundidade do topo, largura e posição do centro conhecidos, utilizamos preliminarmente na inversão, vínculos menos restritivos para os parâmetros, como mostrado na Tabela 4.2. Nos resultados mostrados também na Tabela 4.2, observa-se uma superestimativa da profundidade do topo em relação ao valor medido, o que seria esperado devido à oxidação da magnetita na superfície. A estimativa da posição do centro do corpo ficou em torno de 13 m, um pouco diferente do valor medido de 11 m, consequência do acoplamento desse parâmetro com a inclinação e azimuth do vetor magnetização. Os valores obtidos da inclinação e do azimuth, apesar da variação existente, indicam que a magnetização do corpo estudado deve ser predominantemente induzida.

No estudo da ambiguidade, dois fatores foram retidos, e as 20 soluções encontradas distribuíram-se como mostra a Figura 4.6 com ângulo de 51 graus entre as soluções extremas. A anomalia apresenta características de baixa latitude com sinal razoavelmente definido, pois apesar da baixa amplitude, as bordas estão bem amostradas. Essa razoável caracterização do sinal não permitiu muita variação da forma das soluções sendo todas prismáticas como mostram as Figuras 4.7a a 4.7d cujas posições estão assinaladas com setas horizontais na Figura 4.6. No entanto, o desconhecimento do nível de base e a subamostragem sobre o centro do corpo fez com que apenas a espessura influenciasse a ambiguidade. A largura aparece como causa secundária e não claramente denotada havendo por vezes comportamento não monotônico desse parâmetro ao longo das soluções ordenadas de acordo com os fatores retidos.

Para tentar reduzir a influência da largura nas

Tabela 4.2 - Vínculos utilizados e intervalos de estimativas obtidas empregando-se os dados magnéticos da Figura 4.5.

	Limites inferiores	Limites superiores	Intervalos de estimativas
h (m)	1.9	3000.0	1.9 ---- 3.0
t (m)	10.0	5000.0	10.0 ---- 317.0
w (m)	0.5	10.0	0.8 ---- 4.0
IM (graus)	-90.0	90.0	-12.0 ---- -1.0
DM (graus)	0.0	360.0	190.0 ---- 344.0
x0 (m)	0.0	90.0	13.1 ---- 13.6
m (A/m)	0.5	2.0	0.9 ---- 1.9
NB (nT)	-50.0	50.0	5.0 ---- 13.0

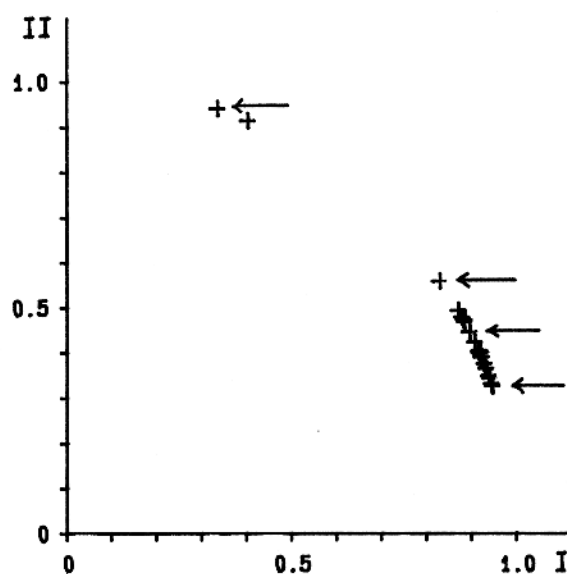
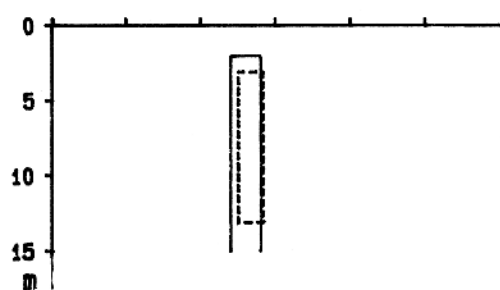
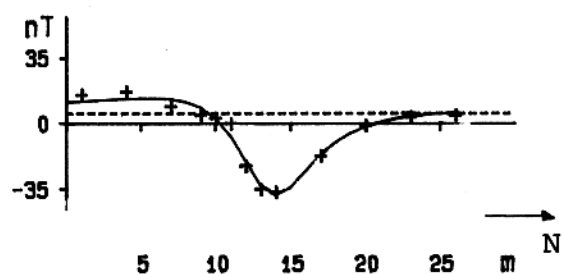
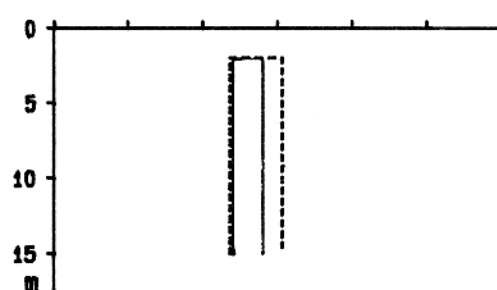
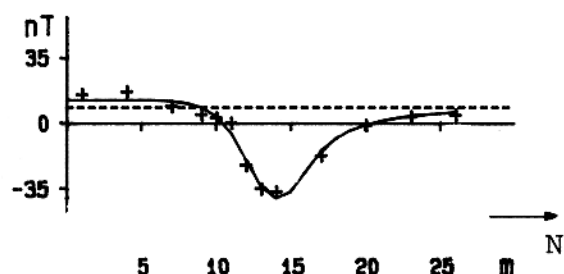


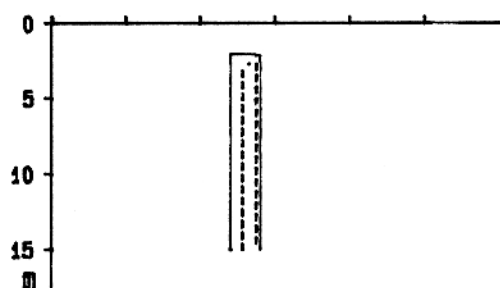
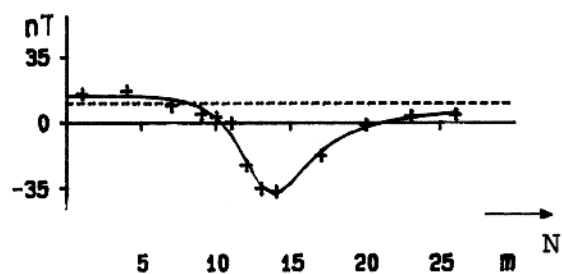
Fig. 4.6 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para anomalia magnética causada por um dique intrusivo da bacia do Parnaíba.



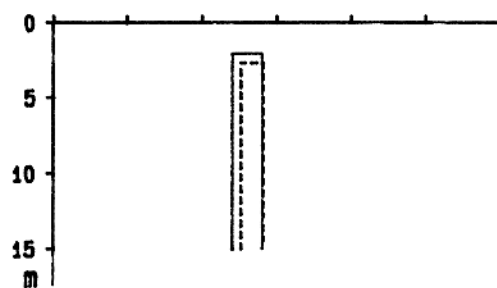
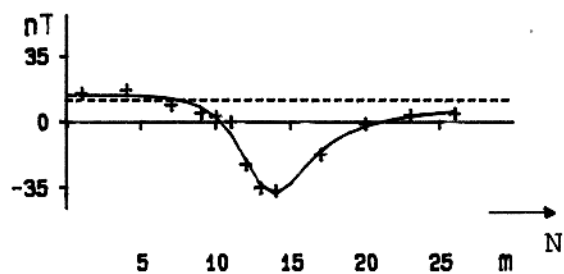
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.7 - Anomalias magnéticas observada e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para o teste com vínculos menos restritivos, na área da bacia do Parnaíba.

soluções, o número de observações sobre o corpo foi artificialmente aumentado em quatro. As observações adicionais, localizadas entre 15 e 20 metros da origem, foram obtidas a partir do ajuste do campo mostrado na Figura 4.7a. O resultado obtido para as estimativas dos parâmetros (Tabela 4.3) foi semelhante ao mostrado antes. Na análise da ambiguidade, dois fatores foram retidos, sendo que as soluções se distribuíram em relação aos fatores com ângulo de 51 graus entre as soluções extremas (Figura 4.8). A forma das soluções permaneceu prismática, apesar de termos adensado a amostragem do campo sobre o corpo. As soluções continuaram ordenando-se apenas em relação à espessura como ilustram as soluções das Figuras 4.9a a 4.9d, cujas posições estão assinaladas na Figura 4.8 com setas horizontais. A ordenação das soluções somente em relação à espessura nos dois testes anteriores ocorreu por causa do desconhecimento do nível de base. A influência desse efeito foi minimizada separando-se as soluções em dois grupos de acordo com os valores das estimativas do nível de base submetendo-se cada um à análise fatorial. O nível de base variou gradativamente de 4 nT até de 12 nT, sendo estabelecido o valor de 10 nT como limite entre os dois grupos. No primeiro grupo ficaram as soluções com nível de base maiores que 10 n , tendo sido retidos apenas dois fatores e sendo o ângulo entre as soluções extremas em torno de 15 graus (Figura 4.10). As Figuras 4.11a a 4.11d cujas posições estão assinaladas na Figura 4.10 com setas horizontais, mostram que a forma das soluções permaneceu prismática, sendo a espessura e a largura (variando de modo inverso) os principais parâmetros causadores de ambiguidade (embora a espessura não possa ser integralmente representada na Figura 4.10). Este padrão foi observado com

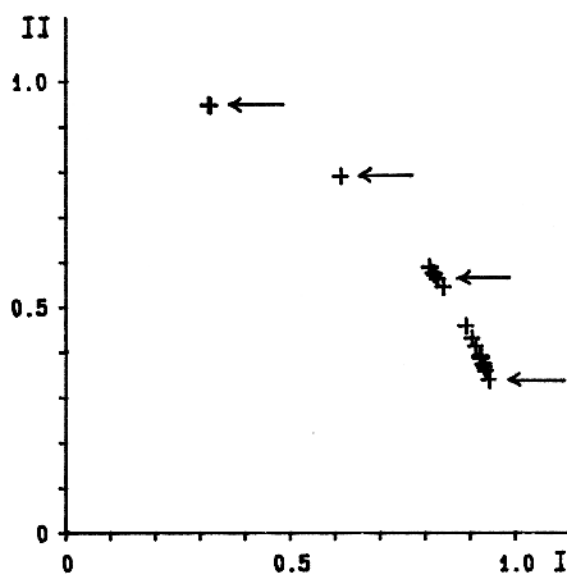
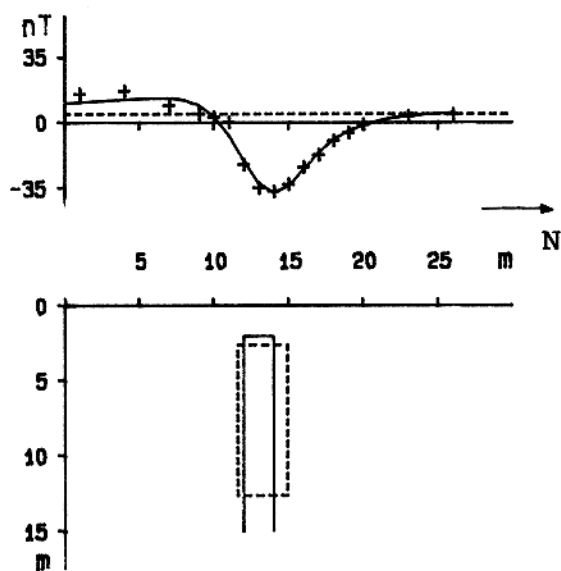
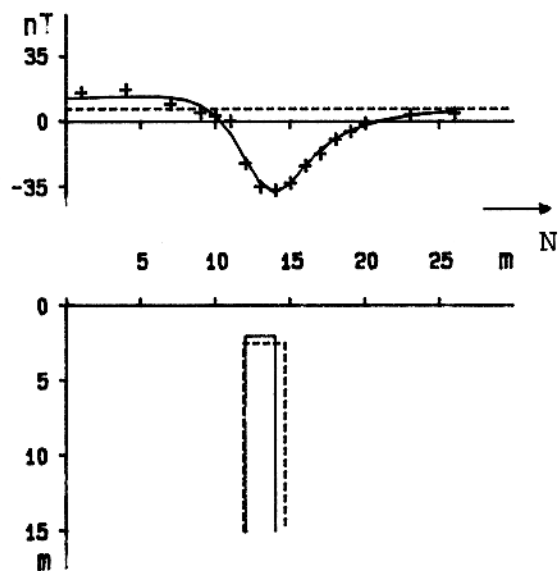


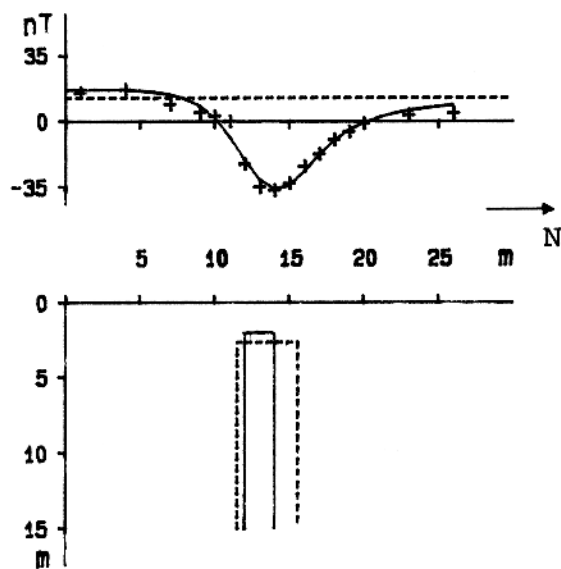
Fig. 4.8 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 20 possíveis soluções para a anomalia magnética da Figura 4.5, aumentada artificialmente de 4 observações.



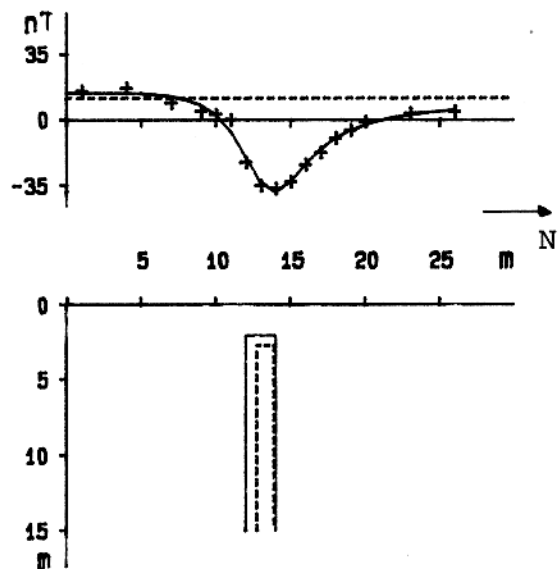
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.9 - Anomalias magnéticas observada e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d) do teste com o número de observações aumentado, referente ao dique intrusivo da bacia do Parnaíba.

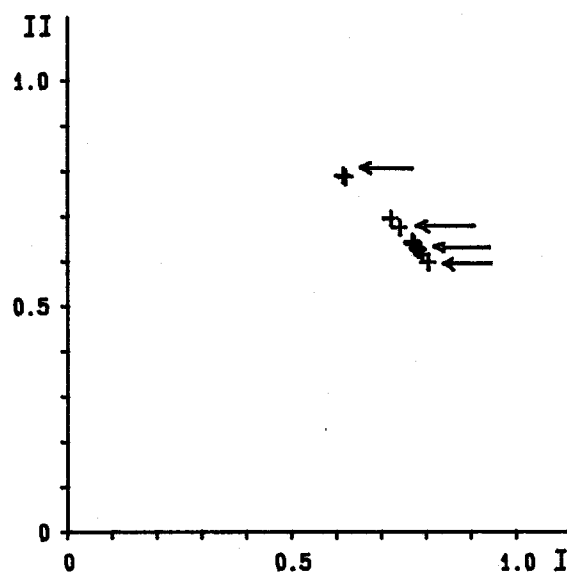
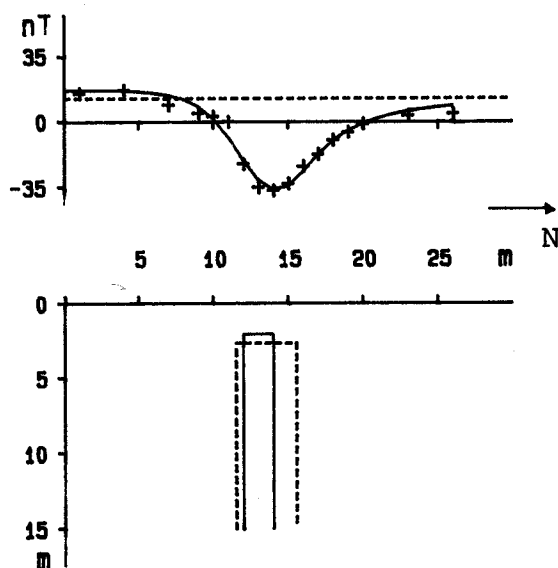
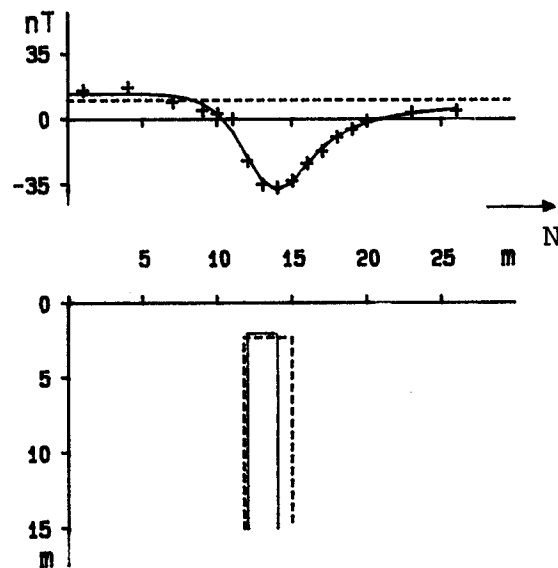


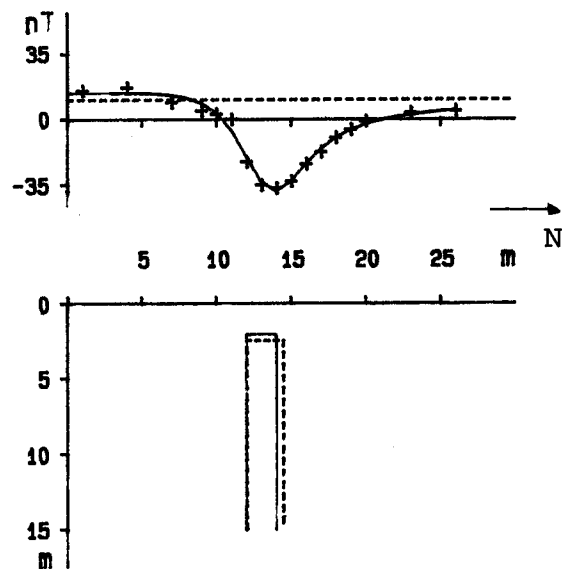
Fig. 4.10 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II de 12 possíveis soluções para a anomalia do teste anterior, tendo valores elevados de nível de base.



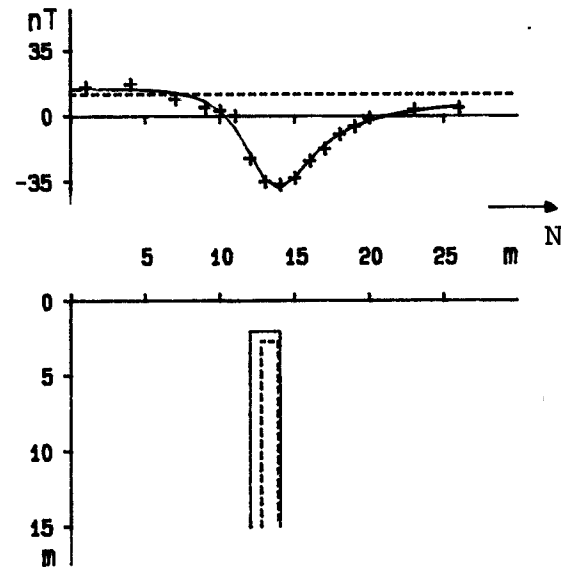
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.11 - Anomalias magnéticas observada e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d), referentes às 12 possíveis soluções com nível de base elevado.

frequência em anomalias com sinal mal definido em testes com dados sintéticos. No segundo grupo, onde as soluções tem nível de base menores que 10 nT, também foram retidos dois fatores (Figura 4.12), tendo neste caso o ângulo entre as soluções extremas ficado em torno de 50 graus. Como no primeiro grupo, as soluções mantiveram-se prismáticas estando ilustradas pelas soluções, com posições assinaladas por setas horizontais na Figura 4.12 e mostradas nas Figuras 4.13a a 4.13d. No entanto, os principais parâmetros envolvidos foram a espessura e a profundidade do topo, variando de modo inverso (embora a espessura não possa ser integralmente representada na Figura 4.13). Este padrão é característico de anomalias com sinal bem definido em testes com dados sintéticos. Essa mudança do padrão observado no primeiro e no segundo grupos, vem confirmar que a anomalia estudada ocupa uma posição intermediária entre os casos de sinal bem e mal definidos. Essa situação peculiar, permitiu também que o nível de base passasse a ter papel semelhante ao observado em gravimetria, permitindo inclusive a ordenação das soluções após serem separadas pelos seus valores de nível de base.

É interessante observar o que ocorre quando reduzimos drasticamente os limites permitidos para a largura no entorno do seu valor medido, utilizando os dados da Figura 4.5. As estimativas obtidas para os vários parâmetros estão compilados na Tabela 4.3. Para essa situação o número de fatores retidos continuou sendo dois. As soluções distribuíram-se como mostra a Figura 4.14 e o ângulo entre as soluções extremas ficou no entorno de 52 graus. As soluções permaneceram com a forma prismática. As Figuras 4.15a a 4.15d mostram soluções, cujas posições estão assinaladas na Figura 4.14 com setas

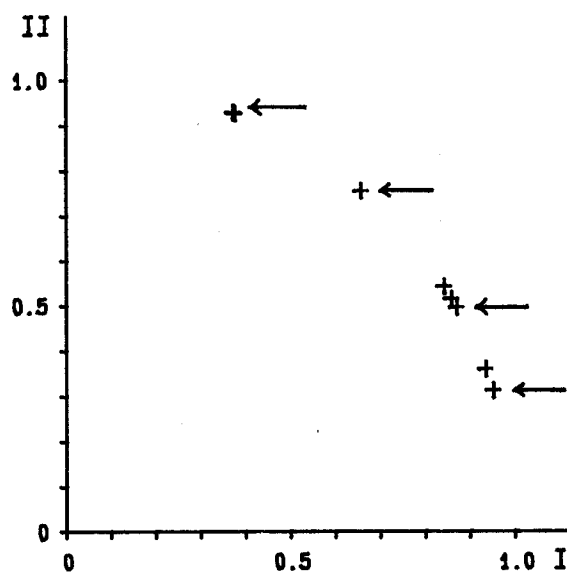
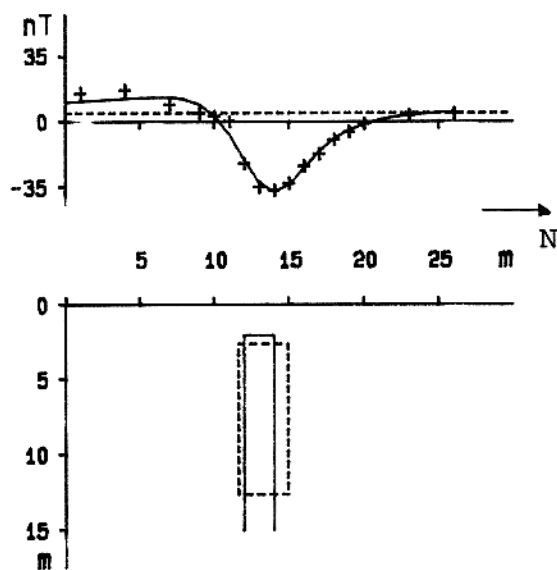
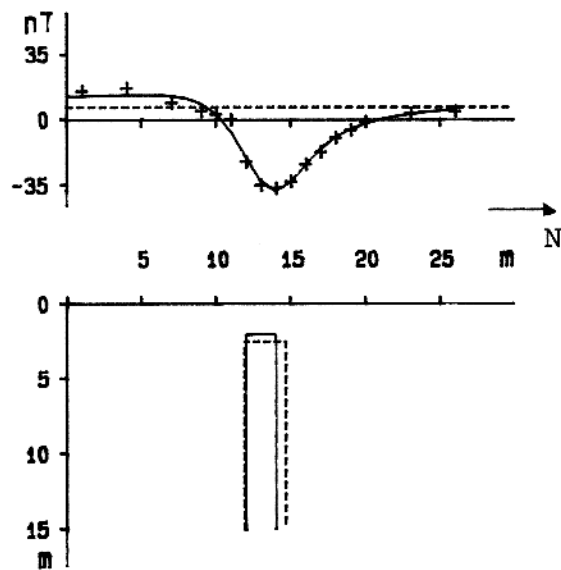


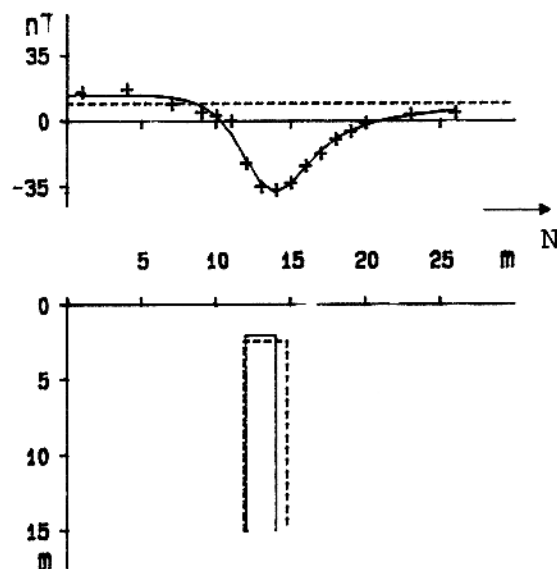
Fig. 4.12 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II das 8 possíveis soluções apresentando nível de base reduzido para o teste com a anomalia magnética, sobre o dique da bacia do Parnaíba aumentada.



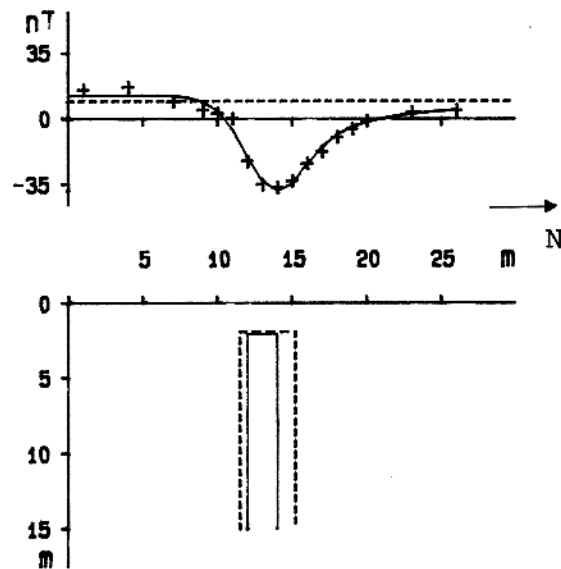
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.13 - Anomalias magnéticas observada e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) a (d), referentes às 8 soluções apresentando nível de base reduzido no teste com a anomalia da bacia do Parnaíba aumentada.

Tabela 4.3 - Intervalos de estimativas. (a) Empregando-se os dados magnéticos da Figura 4.5 acrescidos de 4 observações e os vínculos da Tabela 4.2. (b) Empregando-se os dados magnéticos da Figura 4.5 e reduzindo os vínculos da largura no entorno do valor medido (1.9 a 2.1 metros).

	Intervalos de estimativas (a)		Intervalos de estimativas (b)	
h (m)	1.9	2.0	2.0	3.0
t (m)	10.0	318.0	10.0	436.0
w (m)	0.8	4.0	1.9	2.0
IM (graus)	-10.0	-1.0	-12.0	-4.0
DM (graus)	195.0	349.0	199.0	331.0
x0 (m)	13.2	13.5	13.1	13.3
m (A/m)	0.5	1.9	0.5	1.9
NB (nT)	4.0	12.0	4.0	12.0

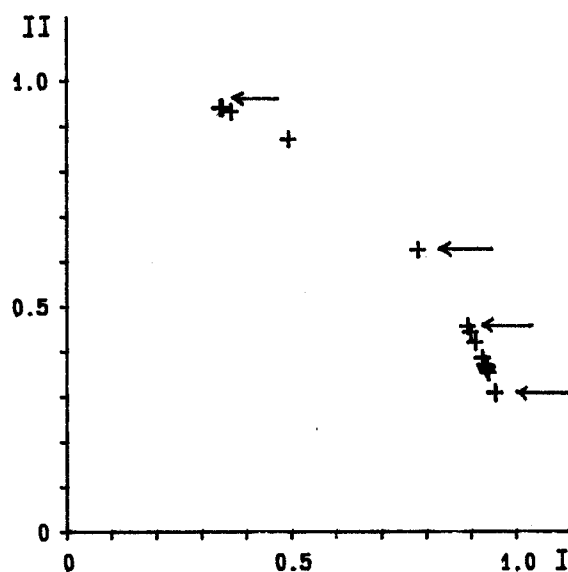
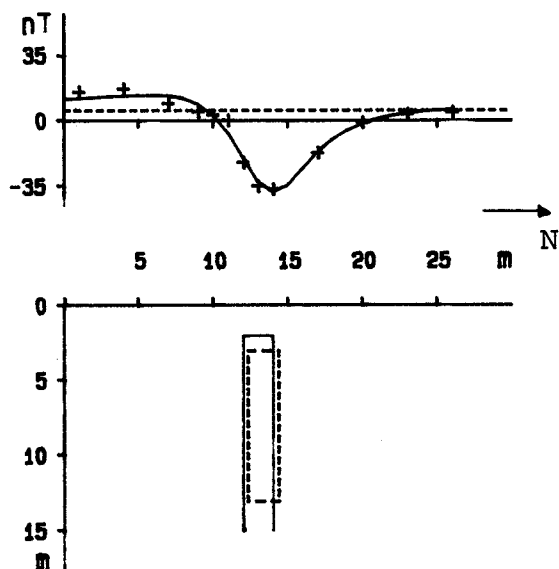
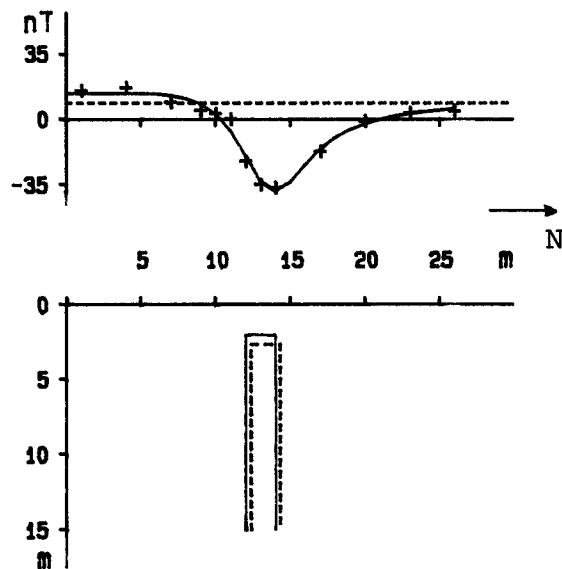


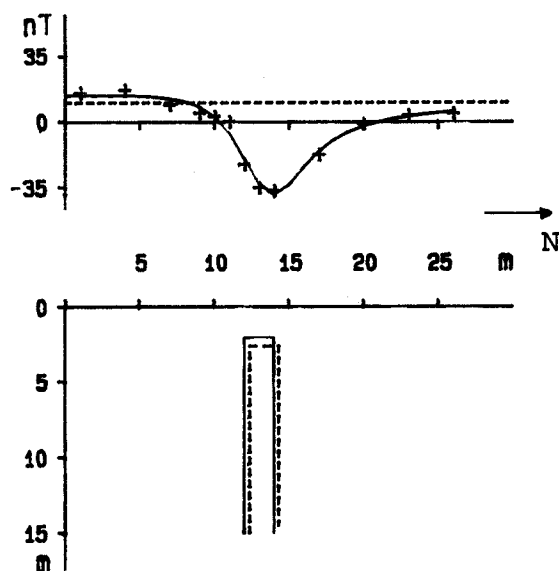
Fig. 4.14 - Cargas (representadas por cruces) nos fatores I e II das 20 possíveis soluções para o caso da anomalia magnética da Figura 4.5, com os vínculos restritos da largura.



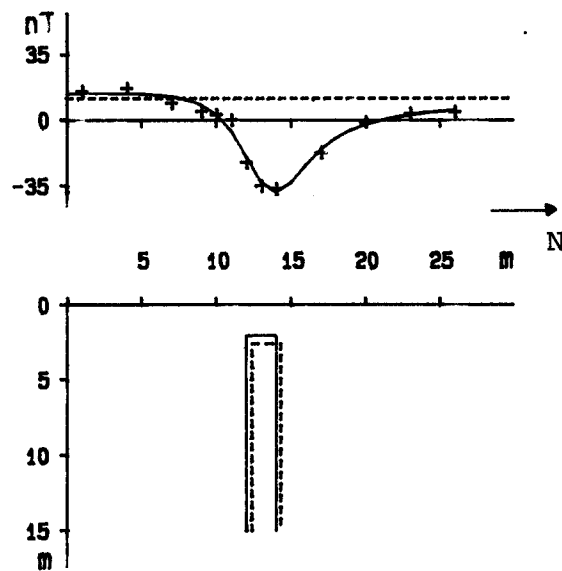
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.15 - Anomalias magnéticas observada e ajustadas (acima) e modelos real e ajustados (abaixo), para a sequência de soluções (a) e (d) referentes ao teste com vínculos restritos da largura.

horizontais. A espessura (embora não podendo ser integralmente representada) e a profundidade do topo são os principais parâmetros responsáveis pela ambiguidade. O nível de base variou de 7 nT e está acoplado à espessura. Esse exemplo vem ressaltar a importância do uso da informação a priori seja geológica ou geofísica na análise da ambiguidade, pois mesmo estando a anomalia subamostrada sobre o centro do corpo e não se tendo informação sobre o nível de base, foi possível ordenar as soluções em relação à influência da espessura e da profundidade do topo, apenas vinculando a largura no entorno do valor medido.

5 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma metodologia para o estudo da ambiguidade na interpretação de dados de campo potencial causada pela discretização e truncamento da anomalia e pela presença de ruídos aleatório e geológico. Várias soluções alternativas, supostamente representativas da região de maior ambiguidade no espaço de parâmetros são obtidas, sendo posteriormente agrupadas e ordenadas pela análise fatorial modo Q, a fim de caracterizar essa região por um hiperelipsoide cujos eixos estão relacionados aos fatores.

Esta metodologia foi aplicada a dados gravimétricos e magnéticos sintéticos e reais. Para dados sintéticos em gravimetria a espessura destaca-se como principal parâmetro responsável pela ambiguidade em geral associada à profundidade do topo nos testes com anomalias bem definidas, e a largura, acoplada à espessura, os principais parâmetros associados à ambiguidade nos testes com anomalias mal definidas. A presença de ruído aleatório, não aumenta a ambiguidade nem altera a importância relativa dos parâmetros responsáveis pela ambiguidade, o que não ocorre quando a anomalia está afetada por interferências laterais ou superficiais. O nível de base acopla-se à espessura de modo inverso e à largura de modo direto.

Em magnetometria, os testes sintéticos efetuados nos levaram a conclusões semelhantes às obtidas em gravimetria. No entanto, na presença de interferências, para o caso do sinal bem definido, a ambiguidade sofre uma acentuada redução quando a anomalia se torna muito complexa. A fixação da inclinação e do azimute do vetor magnetização, não necessariamente causa uma redução da ambiguidade.

As ambiguidades em gravimetria e magnetometria são portanto causadas, essencialmente pelos mesmos fatores, tendo, a presença de ruído aleatório e de interferências, influências semelhantes nos dois campos.

A aplicação da metodologia a dados reais ilustrou a sua utilidade prática na caracterização de soluções alternativas e dos principais parâmetros envolvidos na ambiguidade. Do ponto de vista prático a caracterização destes parâmetros, em determinado estágio de um programa de prospecção, é importante na orientação de futuros trabalhos geofísicos ou geológicos, com o objetivo de obter informação adicional sobre pelo menos um dos dos parâmetros ligados à causa principal de ambiguidade. Isto reduziria sobremaneira a ambiguidade em interpretações posteriores.

Apesar de, neste trabalho, termos empregado a metodologia a dados de campo potencial e de termos restringido nosso estudo a corpos bidimensionais por simplicidade, estas particularizações não constituem restrições da metodologia. A metodologia apresentada neste trabalho pode ser estendida tanto a dados bidimensionais como a outros métodos geofísicos.

Esta metodologia é suficientemente flexível para ser aplicada em qualquer estágio de um programa de prospecção. Ela permite a incorporação de diferentes quantidades de informação a priori através de vínculos para os parâmetros, desde o estágio onde nenhuma informação a priori é conhecida até o ponto onde informações geológicas e geofísicas possam ser incorporadas sob a forma de limites às estimativas dos parâmetros.

Comparada a outros métodos de análise de ambiguidade a metodologia estudada destaca-se por não precisar satisfazer premissas como a da não unicidade ser causada apenas pela con-

taminação dos dados por ruído aleatório com uma determinada distribuição de probabilidade. Essas premissas são necessárias, por exemplo, para a análise de ambiguidade através da região de confiança, que também define a priori a geometria da região de ambiguidade fazendo com que essa abordagem, apesar de ser a mais comumente usada produza uma análise restrita e válida apenas no entorno de uma possível solução encontrada, não sendo portanto representativa da verdadeira região de ambiguidade no espaço de parâmetros.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-CHALABI, M. -1971- Some studies relating to non-uniqueness in gravity and magnetic inverse problems. *Geophysics*, 36(5): 835-855.
- AL-CHALABI, M. -1972- Interpretation of gravity anomalies by nonlinear optimisation. *Geophys. Prosp.*, 20(1):1-16.
- ANDER, M. E.; HUESTIS, S. P. -1987- Gravity ideal bodies. *Geophysics*, 52(9):1265-1278.
- BACKUS, G.; GILBERT, F. -1968- The resolving power of gross Earth data. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 16:169-205.
- BEALE, E. M. L. -1960- Confidence regions in non-linear estimation. *J. Roy. Stat. Soc. Serie B*, 22:41-76.
- BECK, J. V. and ARNOLD, K. J. -1977- Parameter estimation in engeneering and science. New York, John Wiley & Sons. 501 p.
- BHATTACHARYYA, B. K. -1980- A generalized multibody model for inversion of magnetic anomalies. *Geophysics*, 45(2):225-270.
- BOX, M. J. -1965- A new method of constrained optimizations and a comparison with other methods. *Computer J.*, 8:42-52.
- CORBATO, C. E. -1965- A least-squares procedure for gravity interpretation. *Geophysics*, 30(2):228-233.
- DAVIS, J. C. -1986- Statistics and data analysis in geology. New York, John Wiley & Sons. 550 p.
- FANSELAU, G.; BALLANI, L.; BOTTGER, A. -1980- Approximative solution of ambiguity problems in inverse interpretation. *Acta Geodaet. Geophys. et Montanist.*, 15:221-234.
- GOLTSMAN, F. M. -1970- Estimates of moments of complex source distributions. *Physics of the Solid Earth*, 6:768-773.
- JACKSON, D. D. -1973- Marginal solutions to quasi-linear inverse problems in geophysics: The edgohog method.

- Geophys. J. R. Astr. Soc., 35:121-136.
- KEILIS-BOROK, V. I., and YANOVSKAJA, T. B. -1967- Inverse problems of seismology. Geophys. J. R. Astr. Soc., 13:223-234.
- KELLER, G. R.; SMITH, R. A.; HINZE, W. J. and AIKIN, C. L. V. -1985- Regional gravity and magnetic study of west Texas. In Hinze; W. J. Ed., The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps. Tulsa, Soc. Expl. Geophys. p. 198-212.
- MCGRATH, P. H., and HOOD, P. J. -1970- The dipping dike case: a computer curve-matching method of magnetic interpretation. Geophysics, 35:831-848.
- NELDER, J. A., and MEAD, R. -1965- A simplex method for function minimization. Computer J., 7:308-313.
- PARKER, R. L. -1974- Best bounds on density and depth from gravity data. Geophysics, 39(5):644-649.
- PARKER, R. L. -1975- The theory of ideal bodies for gravity interpretation. Geophys. J. R. Astr. Soc., 42:315-334.
- PEDERSEN, L. B. -1977- Interpretation of potential field data- A generalized inverse approach. Geophys. Prosp., 25(2):199-230.
- RICHARDSON, J. A., and KUESTER, J. M. -1973- The complex method for constrained optimization. ACM Comm, 16(8):487-489.
- ROY, A. -1962- Ambiguity in geophysical interpretation. Geophysics, 27(1):90-99.
- TARANTOLA, A., and VALETTE, B. -1982- Inverse problems = Quest for information. J. Geophys., 50:159-170.
- TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E.; KEYS, D.A. - 1976- Applied Geophysics. London, Cambridge University Press. 860p