



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDOS DOS EFEITOS DO MANTO DE INTEMPERISMO SOBRE ANOMALIAS DE
VLF GERADAS POR CORPOS INCLINADOS: MODELAGEM NUMÉRICA ATRAVÉS
DE PROGRAMA eGs.**

GILBERTO EMANOEL REIS VOGADO

BELÉM - PARÁ

2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**ESTUDOS DOS EFEITOS DO MANTO DE INTEMPERISMO SOBRE ANOMALIAS DE
VLF GERADAS POR CORPOS INCLINADOS: MODELAGEM NUMÉRICA ATRAVÉS
DE PROGRAMA eGs.**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR
GILBERTO EMANOEL REIS VOGADO
COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS
NA ÁREA DE GEOFÍSICA

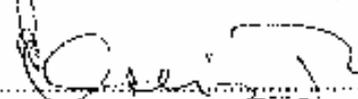
DATA DE APROVAÇÃO: 02/09/2005

NOTA: 85% (Excelente)

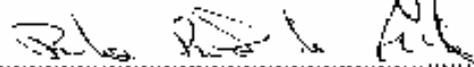
COMITÊ DE TESE:



Dr. Om Prakash Verma (Orientador)



Dr. Luiz Rijo



Dr. Paulo Roberto de Carvalho

BELÉM

2005

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

Vogado, Gilberto Emanuel Reis

Estudos dos efeitos do manto de intemperismo sobre anomalias de VLF geradas por corpos inclinados: **modelagem numérica através de programa eGs. / Gilberto Emanuel Reis Vogado; orientador, Om Prakash Verma. - 2005**

116f. : il

Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2005.

1.Efeito do manto 2. Anomalias VLF 3. Modelagem numérica 4. eGs I.
Verma, Om Prakash, orient. II Título.

CDD 20. ed.: 622.292

À minha esposa e meus filhos, Roseane, Gilberto e Lucas, pela alegria e o amor que me deram forças para vencer esta trajetória.
Aos meus Pais, Raimunda, Nazaré e Sebastião, minhas avós Severina e Benedita (i.m) pelo dom da vida e os valores cristãos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, como o centro de nossa existência e fé para vencer obstáculos.

À minha família, Roseane, José, Gilberto e Lucas, pela compreensão nas horas de ausência, força por acreditarem na vitória e incentivo a outros horizontes.

Aos meus pais, por sempre terem me proporcionado à oportunidade de estudar e, me ensinado o valor e importância do conhecimento para a evolução do ser humano.

Aos meus familiares: irmãos, sobrinhos e cunhados pelo apoio, em especial, ao Cláudio Vogado Junior que não mediu esforços para o suporte tecnológico.

Ao meu Professor e Orientador, Dr. Om Prakash Verma, pelo apoio e disponibilidade em aceitar-me como orientando. Ressalto sua competência pelos ensinamentos que muito contribuíram na estrutura, elaboração e execução deste trabalho.

Aos membros da Banca Examinadora Dr. Om Prakash Verma, Dr. Luiz Rijo e Dr. Paulo Roberto de Carvalho pela positiva contribuição para qualidade e conclusão deste trabalho.

Ao corpo docente Centro de Geociências pelos ensinamentos.

Aos funcionários do Centro de Geociências, pelo apoio; e, principalmente pela funcionária Benildes Lopes, pela incansável dedicação, companheirismo e verdadeira amizade.

Aos meus amigos, Vinícius, Glauco Pereira e Rodrigo Silva, pela valiosa contribuição.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	v
RESUMO	1
ABSTRACT	3
1 – INTRODUÇÃO	4
2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
2.1 – MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS	6
2.2 – VLF	7
2.3 – CAMPO DEVIDO A UMA ANTENA VLF	10
2.4 – EQUIPAMENTOS VLF	14
2.5 – PROCEDIMENTO EM CAMPO	18
2.6 – POLARIZAÇÃO ELÍPTICA	19
2.7 – VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO MÉTODO VLF	22
2.8 – INTERPRETAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA NO MÉTODO VLF	23
2.9 – MANTO GALVÂNICO E MANTO INDUTIVO	26
3 – MODELAGEM NUMÉRICA DA VLF ATRAVÉS DA eGs	31
4 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO MANTO GALVÂNICO	37
4.1 – EFEITOS DO MANTO GALVÂNICO	40
4.2 – EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO CORPO	40
4.3 – EFEITOS DO MERGULHO	48
4.4 – EFEITOS DA PROFUNDIDADE	48

5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MANTO GALVÂNICO	56
5.1 – ANÁLISE DA CONDUTÂNCIA DO MANTO	56
5.2 – EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO CORPO	58
5.3 – EFEITOS DO MERGULHO DO CORPO	58
5.4 – EFEITOS DA PROFUNDIDADE	62
5.5 – GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS	62
6 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO MANTO INDUTIVO	69
6.1 – EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO MANTO INDUTIVO	69
6.2 – EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO CORPO	70
6.3 – EFEITOS DO MERGULHO	77
6.4 – EFEITOS DA PROFUNDIDADE	77
7 – ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MANTO INDUTIVO	85
7.1 – ANÁLISE DA CONDUTÂNCIA DO MANTO	85
7.2 – EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO CORPO	87
7.3 – EFEITOS DO MERGULHO DO CORPO	87
7.4 – EFEITOS DA PROFUNDIDADE	91
7.5 – GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS	91
8 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Comportamento do campo magnético gerado pela antena de rádio VLF	8
Figura 2.2 – Cobertura mostrando as mais importantes estações militares de VLF (<i>Operating Manual - SCOPAS SE-81</i>)	8
Figura 2.3 – Esquema indicando os campos devido a um monopolo de corrente	13
Figura 2.4 – Sistema Eletromagnético - ENVI VLF - <i>Scintrex/Geonics - Sensor ENVI VLF</i>	15
Figura 2.5 – Esquema do receptor VLF-EM (<i>TELFORD et al, 1990</i>)	15
Figura 2.6 – Relações entre os campos primário e secundário	19
Figura 2.7 – Elipse de polarização	20
Figura 2.8 – Perfis típicos de <i>Tilt Angle</i> e <i>Elipsidade</i> sobre um corpo condutor vertical	28
Figura 2.9 – Representação esquemática do ambiente geológico geral encontrado na prospecção de depósitos de sulfetos	29
Figura 2.10 – Representação de manto indutivo homogêneo	30
Figura 2.11 – Representação de manto indutivo heterogêneo	30
Figura 2.12 – Representação de manto galvânico homogêneo	30
Figura 2.13 – Representação de manto galvânico heterogêneo	30
Figura 3.1a – Modelo de <i>Kaikkonen, 1979</i> – Disposição Geométrica do Corpo Condutor na inclinação de 45°	32
Figura 3.1b – Comparação dos resultados (<i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com manto e sem manto) gerados por eGs e com o modelo de <i>Kaikkonen (1979)</i>	32
Figura 3.2a – Modelo de <i>Saydam, 1981.</i> – Disposição Geométrica do Corpo Condutor na vertical	33

Figura 3.2b - Comparação dos resultados (<i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da condutância do corpo) gerados por eGs e com o modelo de <i>Saydam</i> (1981)	34
Figura 3.3a – Modelo de <i>Sinha</i> , 1990 – Disposição Geométrica do Corpo Condutor na inclinação de 60°	35
Figura 3.3b – Comparação dos resultados (<i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da resistividade da rocha encaixante) gerados por eGs e com o modelo de <i>Sinha</i> (1990)	36
Figura 4.1- Perfil típico de um semi-plano inclinado de $\theta = 60^\circ$, sem manto	39
Figura 4.2- Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da Condutância do Manto, inclinação $\theta = 90^\circ$ e profundidade $D = 5$ m	42
Figura 4.3- Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da Condutância do Manto, inclinação $\theta = 60^\circ$ e profundidade $D = 5$ m	43
Figura 4.4- Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da Condutância do Manto, inclinação $\theta = 45^\circ$ e profundidade $D = 5$ m	44
Figura 4.5- Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da Condutância do Manto, inclinação $\theta = 30^\circ$ e profundidade $D = 5$ m	45
Figura 4.6 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da condutância do Corpo, inclinação $\theta = 90^\circ$ e profundidade $D = 5$ m	46
Figura 4.7 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da condutância do Corpo, inclinação $\theta = 45^\circ$ e profundidade $D = 5$ m	47
Figura 4.8 - Mudança das anomalias do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação do mergulho para o Corpo C1($\sigma t = 1$ S) localizado a uma profundidade de 5 m.....	50
Figura 4.9 - Mudança das anomalias do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação do mergulho para o Corpo C3($\sigma t = 5$ S) localizado a uma profundidade de 5 m.....	51
Figura 4.10 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da profundidade do corpo C1($\sigma t = 1$ S) com inclinação $\theta = 90^\circ$	52

Figura 4.11 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da profundidade do corpo C3 ($\sigma t = 5$ S) com inclinação $\theta = 90^\circ$	53
Figura 4.12 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da profundidade do corpo C1($\sigma t = 1$ S) com inclinação $\theta = 45^\circ$	54
Figura 4.13 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da profundidade do corpo C3($\sigma t = 5$ S) com inclinação $\theta = 45^\circ$	55
Figura 5.1- mudança das anomalias pico-a-pico com a variação da condutância do manto para o corpo C1($\sigma t=1$ S), localizado nas profundidades de 5 m e 10 m.....	57
Figura 5.2 - Variação dos valores pico-a-pico de <i>Tilt Angle</i> com a condutância do corpo a uma profundidade de 5 m para $\theta = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ e 30° , na presença dos mantos M0(sem manto), M1, M2, M3 e M4	59
Figura 5.3 - Variação dos valores pico-a-pico de <i>Elipsidade</i> com a condutância do corpo a uma profundidade de 5 m para $\theta = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ e 30° , na presença dos mantos M0(sem manto), M1, M2, M3 e M4	60
Figura 5.4 - Variação do coeficiente de assimetria com o mergulho do corpo C1($\sigma t = 1$ S)	61
Figura 5.5 - Variação dos valores pico-a-pico de <i>Tilt Angle</i> com a profundidade do topo do corpo C1($\sigma t = 1$ S)	63
Figura 5.6 - Variação dos valores pico-a-pico de <i>Elipsidade</i> com a profundidade do topo do corpo C1($\sigma t = 1$ S)	64
Figura 5.7 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 90^\circ$	65
Figura 5.8 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 60^\circ$	66
Figura 5.9 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 45^\circ$	67

Figura 5.10 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 30^\circ$	68
Figura 6.1 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da Condutância do Manto	71
Figura 6.2 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da Condutância do Manto	72
Figura 6.3 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da Condutância do Manto	73
Figura 6.4 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da Condutância do Manto	74
Figura 6.5 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da condutância do Corpo	75
Figura 6.6 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da condutância do Corpo	76
Figura 6.7 - Mudança das anomalias do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação do mergulho para o Corpo C1($\sigma t=1S$) localizado a uma profundidade de 20m	79
Figura 6.8 - Mudança das anomalias do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação do mergulho para o Corpo C3($\sigma t=5S$) localizado a uma profundidade de 20m	80
Figura 6.9 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da profundidade do corpo C1($\sigma t =1S$) com inclinação $\theta = 90^\circ$	81
Figura 6.10 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da profundidade do corpo C3($\sigma t=5S$) com inclinação $\theta = 90^\circ$	82
Figura 6.11 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da profundidade do corpo C1($\sigma t=1S$) com inclinação $\theta = 45^\circ$	83
Figura 6.12 - Mudança da resposta do <i>Tilt Angle</i> e da <i>Elipsidade</i> com a variação da profundidade do corpo C3($\sigma t=5S$) com inclinação $\theta = 45^\circ$	84

Figura 7.1 - Mudança das anomalias pico-a-pico com a variação da condutância do manto para o corpo C1($\sigma t=1S$)	86
Figura 7.2 - Variação dos valores pico-a-pico de <i>Tilt Angle</i> com o parâmetro de resposta do corpo a uma profundidade	88
Figura 7.3 - Variação dos valores pico-a-pico de <i>Elipsidade</i> com o parâmetro de resposta do corpo a uma profundidade de 15 m	89
Figura 7.4 - Variação do coeficiente de assimetria com o mergulho do corpo C1($\sigma t =1S$)	90
Figura 7.5 - Variação dos valores pico-a-pico de <i>Tilt Angle</i> com a profundidade do topo do corpo C1($\sigma t=1S$)	92
Figura 7.6 - Variação dos valores pico-a-pico de <i>Tilt Angle</i> com a profundidade do topo do corpo C1($\sigma t=1S$)	93
Figura 7.7 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 90^\circ$	94
Figura 7.8 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 60^\circ$	95
Figura 7.9 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 45^\circ$	96
Figura 7.10 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 30^\circ$	97

RESUMO

As referências apresentadas e utilizadas através de métodos indutivos de propagação eletromagnética E.M., são utilizadas na prospecção de minerais, entre outros, haja vista que em regiões tropicais existem camadas superficiais condutivas (manto intemperismo) que levam a influenciar, evidentemente, na interpretação do resultado real. Em nossa região Amazônica, o manto apresenta-se bastante desenvolvido e condutivo.

O objetivo deste trabalho é estudar os efeitos dos mantos sobre anomalias VLF, devidos a corpos tabulares inclinados em contato ou não com o manto (manto galvânico e manto indutivo). Deste modo, foram realizadas umas séries de experimentos em modelagens numéricas através da eGs, considerando-se diferentes parâmetros de resposta para o manto e para o corpo.

Os trabalhos de modelagem numérica, bem como seus resultados foram apresentados por diversas situações, como: variação da profundidade do topo do condutor, variação do mergulho do condutor, variação da condutância do manto, entre outros.

Para interpretação dos resultados, foi gerado um conjunto de curvas considerando-se valores pico-a-pico das anomalias de *Tilt Angle* e de *Elipsidade*. Os resultados foram sintetizados em um outro conjunto de curvas reunidas em diagramas de Argand.

A medida em que se aumenta a profundidade, o pico-a-pico e a forma do pico da anomalia do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* diminuem na presença do manto, ou na ausência do mesmo, fazendo com que este se afaste do ponto de "Cross-Over". Para um condutor da mesma espessura, o aumento da condutância causa um aumento nas anomalias de *Tilt Angle* e da *Elipsidade*.

O efeito geral na variação do mergulho do condutor é o de causar uma assimetria nos perfis de *Tilt Angle* e *Elipsidade*.

O aumento da condutância do manto de intemperismo causa uma diminuição nas anomalias de *Tilt Angle* e de *Elipsidade*. Há rotação de fase no sentido anti-horário, sendo mais intensa para grandes valores de condutância do corpo.

Na presença do manto, o corpo parece estar a uma profundidade inferior à verdadeira e, tendendo, a ser menos condutivo.

ABSTRACT

In this dissertation I have studied the effect of partially conducting overburden on the VLF anomalies of an underlying inclined conducting half-plane. In tropical climate, overburden is normally well developed due to climatic conditions. This study is realized through numerical modeling using finite elements and algorithms computing the results employing the eGs developed by Luiz Rijo of the Department of Geophysics of the Federal University of Pará, Brazil. In these numerical experiments two geoelectrical situations between the overburden and the underlying half-plane are considered: one when they are in galvanic contact called as “galvanic overburden” and the other when they are not in contact called as “inductive overburden”. The depth, dip and conductance of the half-plane is varied alongwith the conductance of the overburden in this study. The results are presented in the form of Tilt-Angle and Ellipticity profiles.

The Ellipticity profiles are highly affected by the presence of both types of the conducting overburden. The minor positive and negative peaks in the central part of the profile disappear as the overburden conductance increases. Initially there is an enhancement in the ellipticity anomaly at the lower conductance of the overburden but then it decreases as the overburden conductance increases. However, the tilt-angle anomalies decrease monotonously. Also, in both the ellipticity and the tilt-angle profiles, the distance between the peaks become shorter due the overburden. Consequently, the target depth is interpreted as shallower than the real. The index of asymmetry, used to determine the dip of the half-plane, is also affected by the overburden. Therefore, the dip determination is hampered in the presence of the overburden. An anticlock wise rotation in Argand diagram due to increase in the overburden conductance, result in interpretation a target of less conductance than the real value. Therefore, the presence of the conducting overburden should be taken into the consideration during interpretation of the VLF anomalies.

1 – INTRODUÇÃO

Os Métodos Eletromagnéticos (E.M) tem sido bastante utilizados na prospecção de corpos condutivos em subsuperfície. Os métodos E.M indutivos envolvem a propagação dos campos eletromagnéticos de baixas frequências na terra, os quais são produzidos por fontes portáteis ou, em outros casos, por fontes fixas como no *Very Low Frequency* (VLF).

Um dos efeitos prejudiciais ao bom desempenho do método E.M. consiste nas correntes secundárias nas camadas superficiais e nas rochas encaixantes condutivas, como por exemplo, as argilas, as quais podem blindar parcialmente ou totalmente o campo primário dos condutores mais profundos, produzindo assim anomalias muito fracas e de difícil interpretação, podendo desta forma, não serem detectadas.

Vários estudos tem sido realizados através de modelos analíticos, analógicos e numéricos para avaliar o efeito de uma camada do manto de intemperismo em prospecção indutiva E.M. Embora o manto de intemperismo se apresente muitas vezes condutivo, na grande parte dos trabalhos ele é considerado altamente resistivo. Nas regiões tropicais e subtropicais, principalmente na Amazônia o manto apresenta-se bastante espesso e condutivo. Dentre os trabalhos para pesquisa dos efeitos do manto de intemperismo nas anomalias de *Very Low Frequency* – VLF, destacamos:

Kaikkonen (1979), publicou os resultados da sua pesquisa pela técnica de elementos finitos. Com este método o autor calculou numericamente a resposta do VLF para uma placa condutiva com mergulho, e tendo efeito de cobertura, em função do ângulo de inclinação, amplitude (Hz/Hx) e *Elipsidade*. Neste trabalho foi verificado que o efeito da cobertura condutiva é mais visível nos perfis de *Elipsidade*, sendo esta, componente bastante confiável para discernir um fraco de um forte condutor.

Saydam (1981), interpretou anomalias VLF utilizando medidas do ângulo de inclinação e de *Elipsidade*. Os resultados apresentados são válidos somente para condutores finos verticais. As análises mostram que a amplitude e a forma do ângulo de inclinação e *Elipsidade* das anomalias VLF obtidos para condutores delgados são freqüentemente afetadas pelo produto condutividade-espessura do condutor, a

resistividade que envolve o meio, profundidade do condutor e também a cobertura condutiva. Foi verificado que se fixando todos estes parâmetros citados anteriormente e variando-se a frequência em um intervalo de 15 a 30 KHz não se evidencia um efeito significativo em toda a resposta VLF do condutor.

Farias (1996), teve como objetivo o mapeamento de feições estruturais (falhas e fraturas) e a prospecção de água subterrânea, com a aplicação do método VLF e HLEM (*Horizontal Loop Electromagnetic*), visando o estudo hidrogeológico do Município de São Domingos do Araguaia. Empregando a modelagem numérica por elementos finitos.

O objetivo deste trabalho é avaliar as modificações de anomalias VLF devido à camada de intemperismo, sobre anomalias E.M. de corpos condutivos inclinados, em contato ou não com o manto. Consideraremos manto galvânico quando há contato deste com o corpo e, manto indutivo, quando não há contato com o corpo. Esse estudo é realizado através de técnica numérica de elementos finitos empregando programa computacional eGs.

O programa, *electrical Geophysics suite (eGs)*, desenvolvido no departamento de Geofísica da Universidade Federal do Pará (UFPA), pelos alunos de mestrado, *Pereira (2005)* e *Silva (2005)*, sob a orientação do prof. Dr. Luiz Rijo, consiste numa suíte de programas destinadas para facilitar o estudo de modelagem e interpretação de dados geofísicos elétricos e eletromagnéticos. Este programa contém, também, um conjunto de interfaces gráficas efetivada em *DELPHI* para uso de bibliotecas de ligação dinâmicas (dll), desenvolvidas em linguagem *Fortran*.

Assim, foram realizadas várias simulações objetivando a investigação dos efeitos do manto de intemperismo sobre anomalias devidos a corpos inclinados. Consideraram-se vários parâmetros de resposta para o manto e diferentes parâmetros de resposta para o corpo tais como: mergulho, profundidade, entre outros.

2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 – MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

Estes métodos geofísicos baseiam-se na utilização de campos eletromagnéticos de baixas frequências produzidos por fontes portáteis, fontes naturais ou, por fontes fixas como no VLF.

Existem diversas classificações para as dezenas de métodos E.M. existentes que podem tomar como base o parâmetro que é determinado, banda de frequência, modo de operação, tipo e posição da fonte que é empregada.

A fonte pode apresentar-se de duas maneiras: fixa ou móvel. Sendo fixa, podemos citar como exemplo o método *TURAM* onde é utilizado como fonte uma “loop”, geralmente retangular dispendo-se na superfície do terreno. O método VLF faz uso de campos gerados por antenas especificamente construídas para comunicação de submarinos, recaindo nesta categoria. Para estudar respostas de anomalias VLF através de modelagem analógica, utiliza-se o par de Helmholtz para a geração de um campo uniforme (*Verma*, 1981).

Quando o campo é gerado através de corrente injetada por eletrodos em contato ôhmico com o terreno, eles são chamados métodos E.M. condutivos, onde tem sido pouco utilizados na prática. Já os métodos E.M. indutivos são mais utilizados, os quais ocorrem quando o campo primário é gerado através de bobina transmissora.

Uma das vantagens dos métodos indutivos é que eles favorecem o uso de sistemas aéreos, os quais são geralmente utilizadas conjuntamente com equipamentos aeromagnéticos, com uma vasta aplicação em áreas de reconhecimento para exploração mineral. Também, em regiões onde o solo é altamente resistivo, como nas regiões áridas e polares, os métodos indutivos de prospecção E.M. podem ser empregados com bastante sucesso.

Os métodos indutivos E.M. não apresentam bom desempenho em regiões onde o solo possui uma certa condutividade. Isto ocorre pelo fato de que as correntes induzidas nestes solos podem mascarar e modificar as respostas E.M. de corpos mais profundos.

2.2 – VLF

A prospecção geofísica com o método VLF (*Very Low Frequency*) vem ocorrendo desde os anos 60, quando *Geonics Ltd* (1964) confeccionou o primeiro instrumento VLF, e medidas de componentes do campo magnético, em regiões mineralizadas, têm sido descrito por *Paal* (1965/1968). Desde então o método tem-se tornado extensivamente utilizado na prospecção mineral e mapeamento geológico, particularmente na localização de zonas de falhas e fraturas.

O método VLF utiliza transmissores fixos (antena vertical), por onde se passa corrente alternada (dipolo elétrico), e conseqüentemente, as linhas de campo magnético se distribuem concentricamente, no plano horizontal em torno do transmissor, mas nas regiões distantes da estação pode ser considerada uma onda plana (Figura 2.1), permanecendo assim caso se mantenham estáveis as condições geoeletricas do meio onde se propaga.

Estes sinais se propagam principalmente entre a ionosfera e a superfície da terra, servindo como guias de onda, e é a componente magnética quem mais transporta energia no subsolo. No entanto, nos condutores são induzidas correntes que vão produzir campos secundários, e o campo resultante (campo primário mais secundário) terá intensidade, direção e possivelmente fase diferentes das do campo primário.

O método VLF baseia-se em medir uma dessas mudanças, indicando a presença de condutores e por vezes, algumas das suas características.

Os transmissores de alta potência (Tabela 2.1) operam na faixa de frequência de 15 – 30 KHz, localizados em várias partes do mundo (Figura 2.2), de natureza militar, são utilizados na comunicação com submarinos.

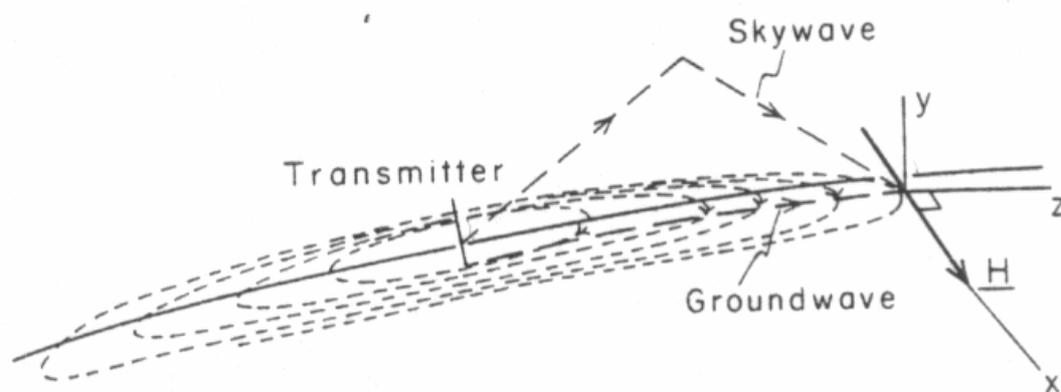


FIGURA 2.1- Comportamento do campo magnético gerado pela antena de rádio VLF

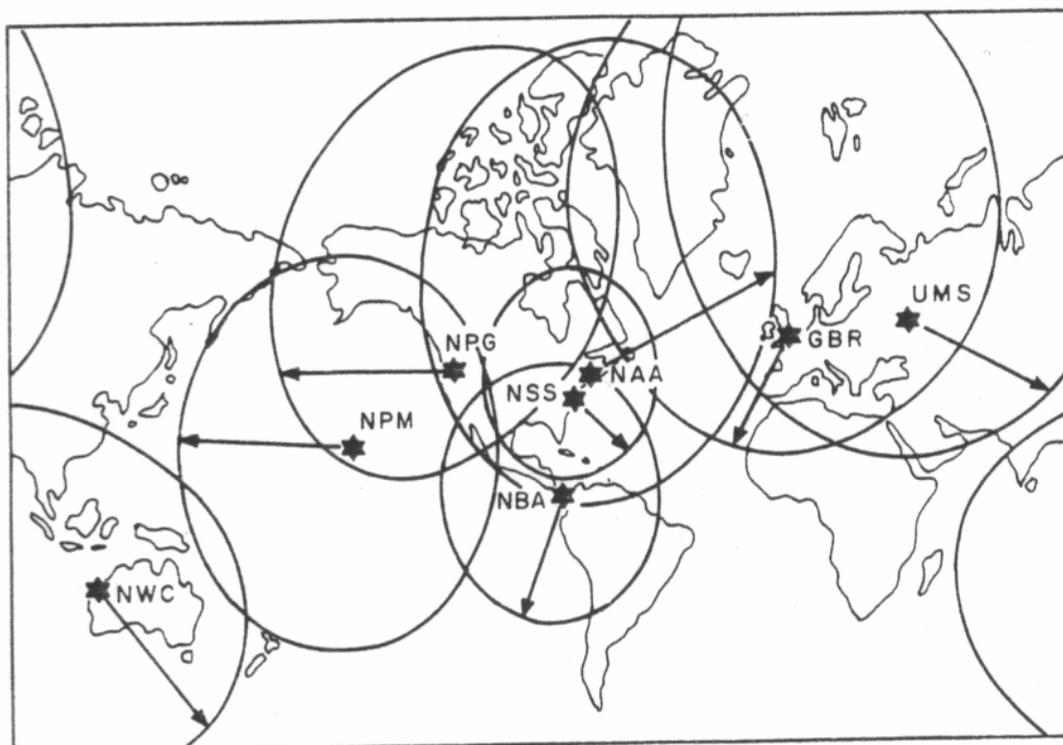


FIGURA 2.2- Cobertura mostrando as mais importantes estações militares de VLF (*Operating Manual - SCOPAS SE-81*)

TABELA 2.1- Relação dos transmissores mais potentes

Estação	Localização	Freq kHz	Poder de Radiação (kw)
USA			
NAA	Cutler Maine 67W17-44N39	24.0	1000
NKL	Seattle, Washington 121W55-48N12	24.8	125
NSS	Annapolis, Maryland 76W27-38N57	21.4	400
NAU	Puerto Rico 67W11-18N23	28.5	100
NPM	Lualualei, Hawai 158W09-21N25	23.4	600
EUROPA			
GBR	Rugby, England 01W11-52N22	16.0	750
UMS	Moscow, Russia 37E01-55N49	17.1	1000
JXZ	Helgeland, Normay 13E01-66N25	16.4	350
FUO	Boedeaux, France 00W48-44W65	15.1	500
AUSTRÁLIA			
NWC	North West Cape 114E09-21S47	22.3	1000
JAPÃO			
NDT	Yosami 137E01-34N58	17.4	50

2.3 – CAMPO DEVIDO A UMA ANTENA VLF

A propagação de ondas de rádio em frequências VLF tem sido estudada por vários anos, principalmente por *Wait* (1970). A propagação de ondas de rádio é um assunto complicado, isto por que diferentes parâmetros governam as perdas da propagação a várias distâncias do transmissor. Desta forma, torna-se bastante interessante saber a intensidade do campo em função da distância do transmissor, assim como sua variação no tempo.

Considerando que a fonte transmissora seja um monopolo elétrico vertical de comprimento h localizado no plano horizontal. Pode-se mostrar que as componentes eletromagnéticas do campo a uma distância radial r na superfície do condutor ($\theta = \pi/2$ na Figura 2.3) é dado por *Wait* (1967).

$$E_z = \frac{n_0 I_0 h}{2\pi} \times \left[\frac{i\beta}{r} + \frac{1}{r^2} - \frac{i}{\beta r^3} \right] \times e^{-i\beta r} \cdot e^{i\omega t}, \text{ (V/m)} \quad (1)$$

e

$$H_\phi = \frac{I_0 h}{2\pi} \times \left[\frac{i\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right] \times e^{-i\beta r} \cdot e^{i\omega t}, \text{ (A/m)} \quad (2)$$

Onde: $I_0 \cdot e^{i\omega t}$ é a corrente fluindo na base da antena.

$\omega = 2 \pi f$ (frequência angular)

$n_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} = 120 \pi \Omega$ (impedância intrínseca no espaço livre)

$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ (permeabilidade magnética no vácuo (henry/m))

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ (permissividade elétrica no vácuo (farad/m))

A quantidade β é a constante de programação, a qual é dada por:

$$\beta = 2 \pi \lambda^{-1}, \quad (3)$$

onde λ é o comprimento de onda no espaço livre.

Nas equações (1) e (2) os termos proporcionais a r^{-3} , r^{-2} e r^{-1} são chamados de termos eletrostático, indução e radiação, respectivamente. Quando $r \gg \lambda$ as componentes do campo para um monopolo situado em um condutor perfeito, medido na superfície, consiste de um campo elétrico vertical e um campo magnético horizontal, os quais estão em fase. A razão $E_z/H_\phi = n_0$ é independente da distância radial r . Essas componentes são mostradas na Figura 2.3.

Agora pode ser mostrado que a componente normal exterior do produto vetorial $E \times H$ (chamado vetor de Poynting) pode ser integrada sobre uma superfície fechada, o resultado é proporcional à energia que flui através da superfície (Stratton, 1941).

Se esta integração é calculada sobre uma superfície muito grande ($r \gg \lambda$) (hemisfério centrado no monopolo transmissor), utilizando-se os campos elétrico e magnético similares àqueles dados pelas equações (1) e (2), chegamos a concluir que a potência total fluindo através da superfície esférica é dada por:

$$P = \frac{4\pi}{3} n_0 \left(\frac{I_0 h}{\lambda} \right)^2 \quad (4)$$

a qual é independente do raio da esfera desde que a área da superfície esférica aumente com r^2 , enquanto que o produto vetorial diminui com r^{-2} para regiões muito distantes.

A equação (4) nos permite reescrever as equações (1) e (2) com formulações mais úteis as quais nos permite calcular a potência de um transmissor VLF que são:

$$E_z = 9,5 \frac{\sqrt{P}}{r}, \quad (5)$$

$$H_\phi = \frac{E_z}{n_0}, \quad (6)$$

$$\left(\frac{H_z}{H_x} \right) = 0,5$$

Onde P é a potência irradiada em watts e E_z e H_ϕ são os valores de pico dos campos elétrico e magnético em volts por metro e amperes por metro, respectivamente. As unidades mais utilizadas na engenharia são E em milivolts por metro, P em quilowatts, e r em quilômetros. Assim:

$$E_z(mV/m) = 300 \frac{\sqrt{P(kw)}}{r(km)}. \quad (7)$$

Finalmente na literatura de propagação de ondas E.M. o campo elétrico vertical é freqüentemente dado em decibéis, relativo a $1mVm$, assim:

$$\begin{aligned} E_z[db, 1mV/m] &= 20 \log \left(\frac{E_z(mV/m)}{1mV/m} \right) \\ &= 20 \log E_z(mV/m) \\ &= 49,54 + 10 \log P(kw) - 20 \log r(km) \end{aligned} \quad (8)$$

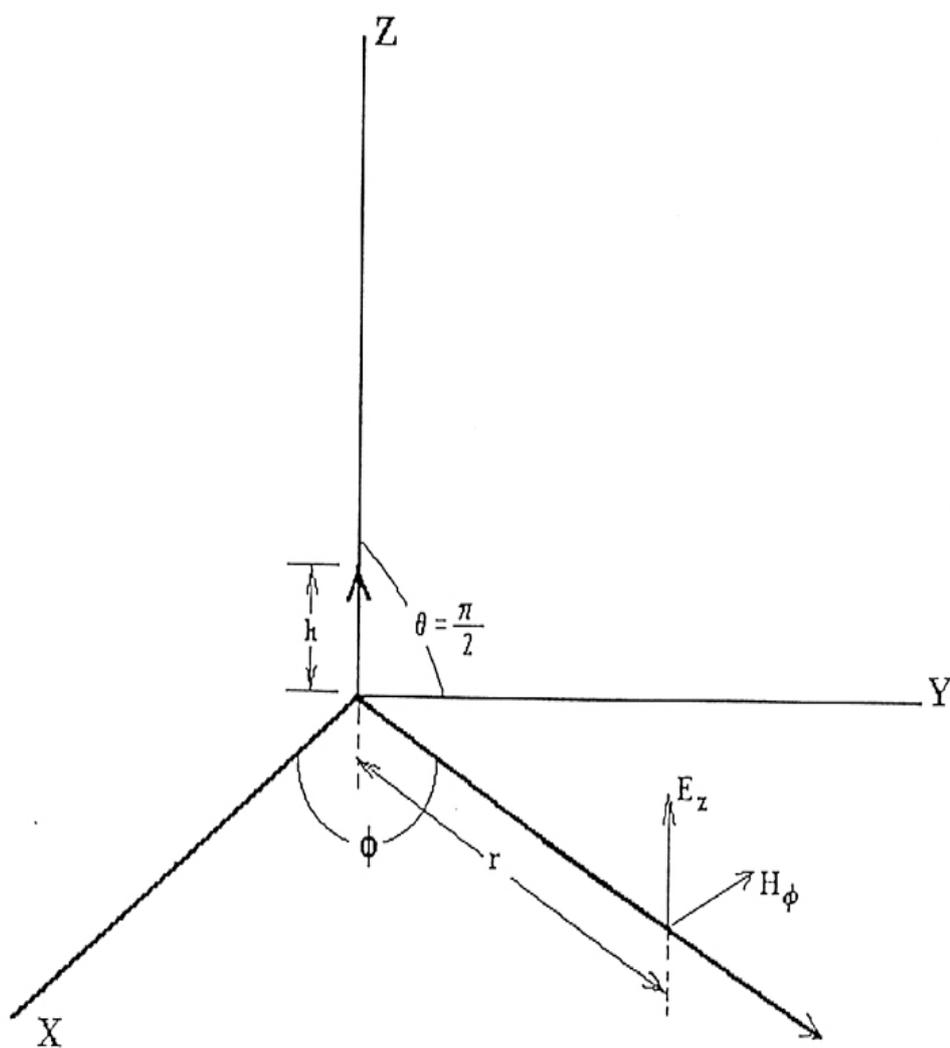


FIGURA 2.3- Esquema indicando os campos devido a um monopolo de corrente

2.4 – EQUIPAMENTOS VLF

Pelo fato de normalmente utilizar transmissores fixos o método VLF possui equipamentos bastante simplificados (Figura 2.4). Consistem quase sempre de um rádio receptor dotado de grande sensibilidade, aonde vem acoplado um inclinômetro. Ao depender do modelo de equipamento pode ou não apresentar medidas de intensidade de campo.

Os receptores são aparelhos constituídos por um sistema de duas bobinas ortogonais (figura 2.5). Uma delas é orientada no plano horizontal para captar o campo primário; a outra detecta as anomalias verticais do campo secundário.

Em 1973, foi introduzido um equipamento (*EM16-Geonics*) que permitia o controle da potência de sinal primário e a orientação de acordo com a estrutura geológica. Este instrumento foi bastante útil na solução de problemas estruturais, porém apresentava algumas desvantagens:

- 1) Perdas de sinais durante o contato elétrico;
- 2) Distorções no campo primário devido a linhas de transmissões elétricas e/ ou telefônicas.

Além do *Geonics EM 16*, existem outros equipamentos para realizar as investigações no método VLF, os quais tomam medidas de outras quantidades a serem analisadas nas interpretações, como por exemplo: *Geonics EM 18*, que mede as componentes em fase e em quadratura do campo magnético vertical; o *Geonics EM 16R*, que toma leituras referentes as componentes em fase e em quadratura do campo elétrico horizontal em relação ao campo elétrico vertical medido ao longo da direção radial do transmissor, entre outros. A (Tabela 2.2) mostra alguns receptores VLF juntamente com as quantidades medidas.



FIGURA 2.4 - Sistema Eletromagnético - ENVI VLF - Scintrex/Geonics - Sensor ENVI VLF

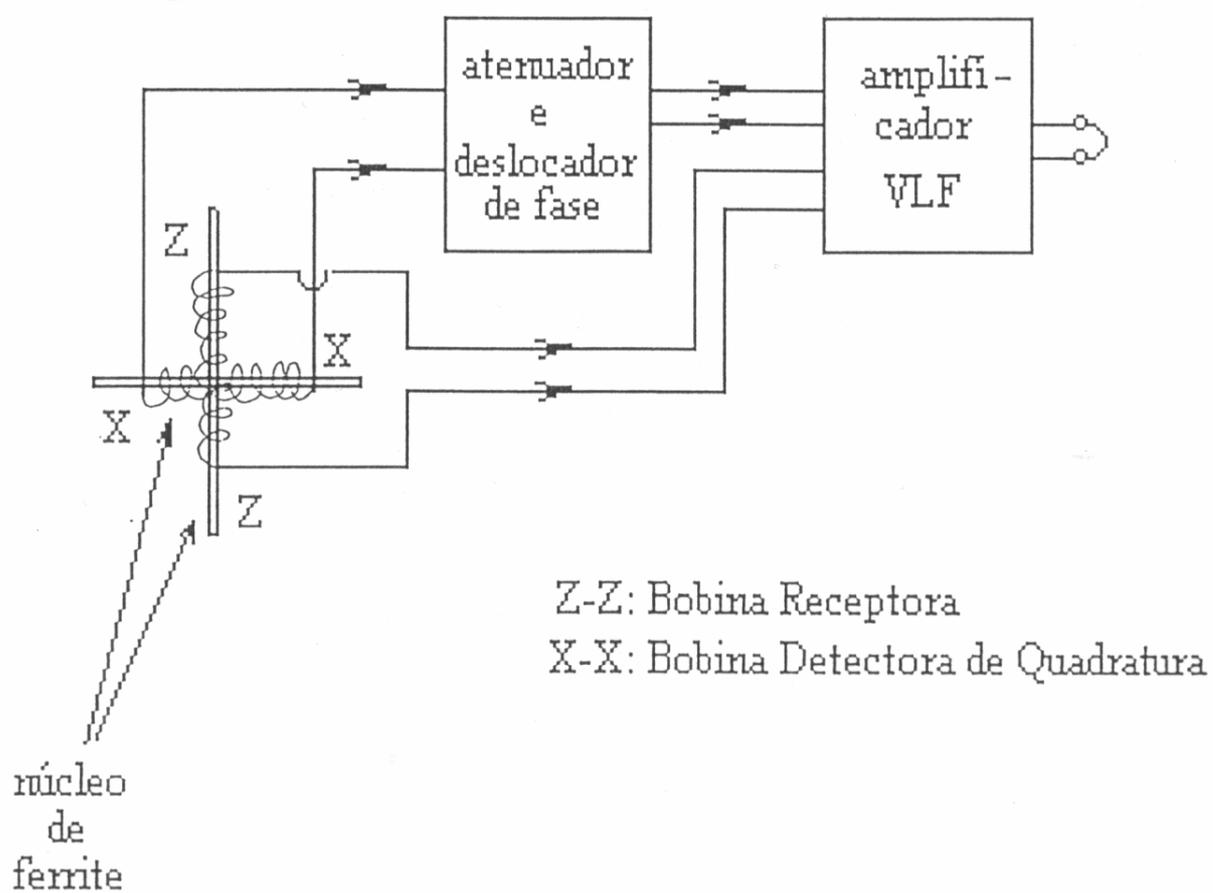


FIGURA 2.5- Esquema do receptor VLF-EM (TELFORD et al, 1976).

TABELA 2.2- Receptores VLF colocados em ordem cronológica aproximada

Instrumento	A/G	Quantidade Medida	Referência de Fase	Número de Bobina
Geonics EM 16	G	T, E	H_y	2
Geonics EM 18	A	H_z (I, Q)	H_y	2
Crone Radem	G	$ T, H_y $		2
Geonics EM 16R	G	E_x (I, Q)	H_y	
Barringer Radiophase	A	H_x (I, Q) H_y (I, Q) H_z (I, Q)	E_z	3
Barringer E-Phase	A	E_x (Q)	E_z	
Herz Totem 2A	A	H_z (Q), $ H_y $	H_y	3
Scintrex VLF 3	G	H_z (I, Q)	H_y	2
Scintrex VLF 4	G	H_z (I, Q) E_x (I, Q)	H_y	
Phoenix VLF 2	G	T, E	H_y	2
ABEM Wadi	G	H_z (I, Q)	H_y	2
BRGM VLF 2	G	T, E E_x (I, Q)	H_y	3
EDA Omni Plus	G	T, H_z (I, Q), H E_x (I, Q)	H_y	3

Onde as quantidades medidas possuem os seguintes significados:

H_x - campo magnético horizontal normal ao campo magnético primário	T - <i>Tilt Angle</i> (Figura 2.7)
H_y - na direção do campo magnético primário	E - <i>Elipsidade</i> (Figura 2.7)
H_z - campo magnético vertical	I - componente em Fase
E_x, E_y - componentes do campo elétrico horizontal	Q - componente em Quadratura
E_x - ao longo da direção radial do transmissor	$ $ - Amplitude
E_z - componente do campo elétrico vertical	A - ar e G - terra

2.5 – PROCEDIMENTO EM CAMPO

Com o aparelho funcionando devidamente, a seleção do transmissor é o primeiro passo no trabalho de campo. O mapa de cobertura das estações (Figura 2.2) auxilia inicialmente na escolha de um campo suficientemente forte na área pesquisada. A obtenção do sinal máximo dá-se com a bobina receptora orientada no plano horizontal. O levantamento é feito normalmente em linhas paralelas à componente magnética do campo primário utilizado.

No trabalho de campo é necessário uma verificação periódica no sinal da estação uma vez que o mesmo pode variar com a temperatura. A recepção apesar de ser adequada durante todo o dia, mostra-se melhor no período da manhã.

Em canais de mais altas frequências (Tabela 2.1) ocorrem oscilações nas leituras, e para adquirir um certo equilíbrio e assegurar a maioria dos tipos de medidas, convém manter o ganho do sinal no amplificador entre os valores de 30 a 100.

É importante dizer que um campo transmissor muito forte pode impedir o sinal de outras estações, sendo conveniente orientá-lo para pequenos ângulos em relação ao " *strike* " do condutor e esta operação do campo fica particularmente sensível.

Em trabalho de reconhecimento é comum empregar a técnica do ângulo de inclinação, restando as outras para detalhamento em áreas anômalas.

O campo magnético primário sofre tanto atenuação como mudança de fase. Os campos secundários apresentam uma série de variações que podem ser medidas, como: amplitude vertical e horizontal, ângulo de inclinação, azimute, componente de quadratura, entre outros.

Mesmo em áreas de baixa condutividade o campo primário acoplado a certos condutores sofrerá mudanças de fase, provocando o deslocamento de uma ou duas vezes no campo secundário medido na superfície. O deslocamento de fase, contudo, pode auxiliar na distinção entre camadas condutoras em profundidade e as próximas da superfície.

Quando se compara sinal na direção vertical e na horizontal através da Elipse de Polarização (Figura 2.7) determina-se às variações no campo secundário.

2.6 – POLARIZAÇÃO ELÍPTICA

Medidas do campo secundário são normalmente feitas em VLF pela comparação dos sinais na direção vertical e horizontal (Figura 2.6). Desde que o campo primário seja aproximadamente horizontal, obtêm-se as medidas da intensidade do campo secundário; pode-se também determinar, aproximadamente, a fase do campo secundário em relação ao primário.

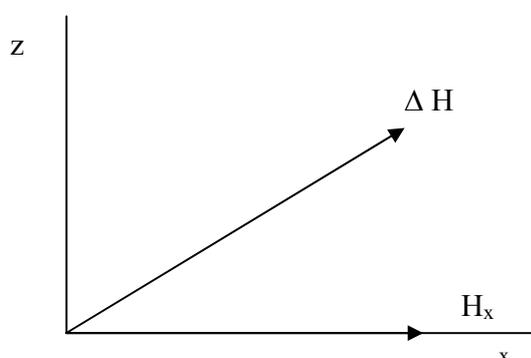


FIGURA 2.6 - Relações entre os campos primário e secundário

Para entender como estas medidas são realizadas, faz-se necessário conhecer os parâmetros da Elipse de Polarização (Figura 2.7).

O desenvolvimento teórico da elipse de polarização foi feito por *Stratton* (1941), sua equação final para um campo magnético polarizado é dada por:

$$\frac{X^2}{H_x^2} + \frac{Z^2}{H_z^2} - 2 \frac{XZ \cos \phi}{H_x H_z} = \sin^2 \phi, \quad (9)$$

Onde a nomenclatura é ilustrada na Figura 2.7. O ângulo θ é a diferença de fase entre os campos vertical e horizontal, ou seja, $\theta = \theta_z - \theta_x$.

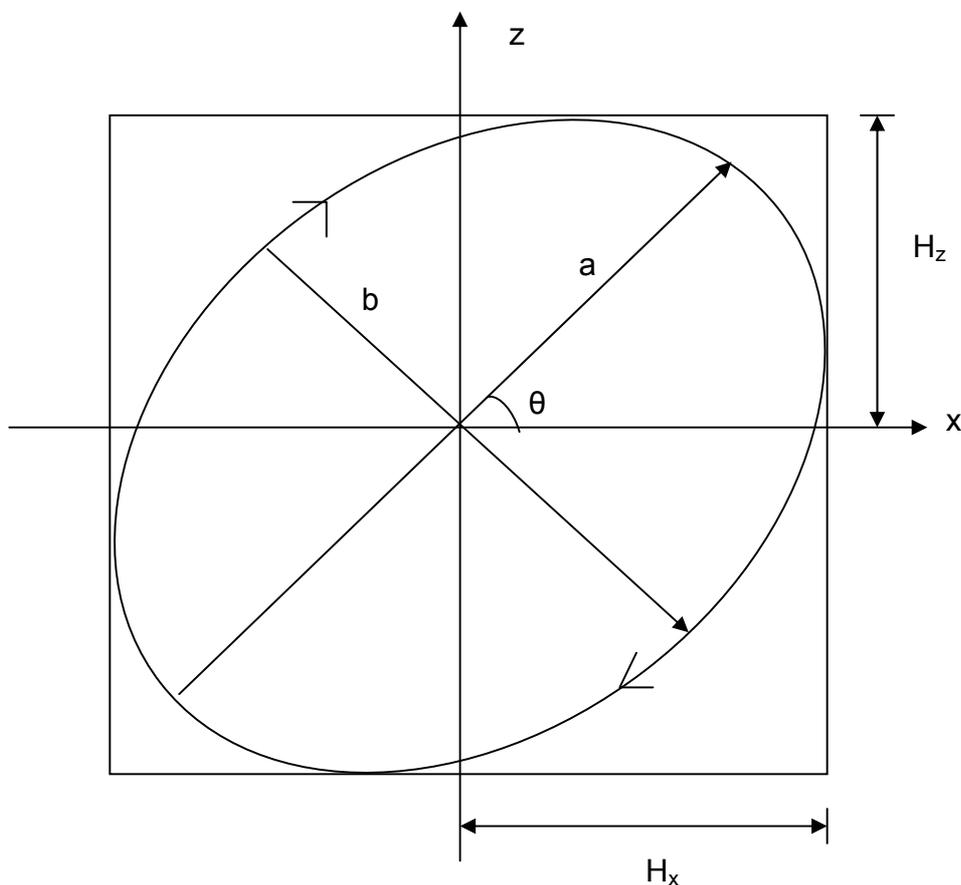


FIGURA 2.7 – Elipse de polarização

O ângulo θ é comumente chamado de “*Tilt Angle*”, este ângulo é um dos parâmetros da *Elipse* bastante utilizado em prospecção, principalmente no método VLF, o qual é dado por:

$$\operatorname{tg}(2\theta) = \pm \frac{2 \left(\frac{H_z}{H_x} \right) \cos \phi}{1 - \left(\frac{H_z}{H_x} \right)^2}, \quad (10)$$

A razão b/a (Figura 2.7) é definida como *Elipsidade*, este parâmetro também é utilizado para obter respostas na prospecção E.M, em particular no método VLF, o qual é dado por:

$$\varepsilon = \frac{b}{a} = \frac{H_z H_x \text{sen}\phi}{\left| H_z e^{i\phi} \text{sen}\theta + H_x \cos\theta \right|^2}, \quad (11)$$

Reescrevendo estas equações em termos das componentes em fase ($H_z(I)$) e em quadratura ($H_z(Q)$), onde:

$$H_z(I) = \frac{H_z}{H_x} \cos\phi, \quad (12)$$

e

$$H_z(Q) = \frac{H_z}{H_x} \text{sen}\phi, \quad (13)$$

obtém-se:

$$\text{tg}(2\theta) = 2H_z(I) \frac{1}{1 - \left(\frac{H_z}{H_x} \right)^2}, \quad (14)$$

e

$$\varepsilon = \frac{b}{a} = \frac{H_z(Q)}{\left| [H_z(I) + iH_z(Q)] + \cos\theta \right|^2}$$

ou

$$\varepsilon = \frac{b}{a} = H_z(Q) \frac{1}{(H_z(I) \text{sen}\theta + \cos\theta)^2 + (H_z(Q) \text{sen}\theta)^2}. \quad (15)$$

As equações (14) e (15) relacionam θ e ε com as componentes do campo vertical, multiplicadas com o fator de correção os quais estão em função da razão H_z / H_x e ϕ .

Para intensidades relativamente pequenas de campo secundário ($H_z \ll H_x$) a equação (14) reduz-se a:

$$\text{tg}(2\theta) = 2 H_z (I), \quad (16)$$

Esta equação indica que a tangente da inclinação (ϵ , portanto, a inclinação por si só, para pequenos ângulos) é aproximadamente proporcional a componente real do campo secundário, medido na direção vertical.

O erro nesta aproximação cresce para grandes campos secundários, alcançando aproximadamente 10% para $\left(\frac{H_z}{H_x}\right) = 0,5$.

A elipsidade pode ser escrita como:

$$\epsilon = H_z (Q), \quad (17)$$

Esta última expressão mostra uma direta proporcionalidade entre a elipsidade e a componente em quadratura do campo secundário vertical. A aproximação inerente nesta expressão leva a pequenos erros a grandes campos secundários aplicados (*Paterson & Ronka, 1971*).

2.7 – VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO MÉTODO VLF

O método possui vantagens tanto por parte dos aparelhos utilizados quanto pelas feições geológicas encontradas no campo. Podemos citar as vantagens:

- Relacionados aos equipamentos utilizados:
 - a) Aparelhos portáteis, leves, com leituras claras e rápidas, operado por uma só pessoa.
 - b) Os gastos são reduzidos, pelo fato de não utilizar transmissor,.
 - c) Utilizam-se baterias comuns, pois a potência é baixa.
 - d) Por utilizar transmissor fixo, possui direção de campo constante e amplitude de sinal uniforme na área de investigação.
 - e) As utilizações de freqüências consideradas altas à geofísica, da ordem de, 15 – 30 KHz realçam feições superficiais como cobertura e camadas com água subterrânea.
- Relacionadas as feições geológicas, podemos citar as seguintes vantagens:
 - a) Pode atingir boas profundidades em áreas onde não existem rochas muito condutivas;

- b) Sulfetos pouco disseminados podem ser detectados, pois altas frequências provocam fatores de resposta em corpos de condutividade média. Da mesma maneira são detectadas falhas, brechas e contatos;
- c) Pode ser utilizada em área de topografia acidentada, embora seja necessário um tratamento semiquantitativo para corrigir as distorções dos perfis em terrenos condutivos;
- d) Zonas de granito fraturadas são favorecidas na prospecção de águas subterrâneas com método VLF.

Mesmo com todas essas vantagens, o método apresenta algumas limitações, todas elas de caráter geológico:

- a) Algumas áreas podem ser prejudicadas pela limitação da escolha do transmissor fixo, não podendo ser detectado condutores com “*strike*” entre 45° e 105°, ou seja, não se pode fazer a orientação do transmissor de acordo com a estrutura geológica;
- b) As áreas do tipo vulcanos sedimentares, zonas fraturadas de gnaisses e granito restringem sensivelmente o uso do método VLF, pois estas áreas apresentam condutores com direções bastante variadas;
- c) O método tem dificuldades em reconhecer anomalias de condutividade e de profundidade, porém medidas com diferentes frequências podem auxiliar na distinção;
- d) Terrenos condutivos limitam extremamente a profundidade de penetração durante a prospecção, devido as frequências empregadas no método.

2.8 – INTERPRETAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA NO MÉTODO VLF

No que se trata de interpretação qualitativa devemos levar em conta que todos os sistemas de observação de dados usados na prática, usam o campo primário como sendo aproximadamente horizontal. Então, sendo a componente VLF primária horizontal, as condutividades locais adicionarão componentes verticais e conseqüentemente teremos, localmente, um campo total inclinado.

Devemos ter em mente que o campo primário ao penetrar em áreas condutivas tem suas ondas encurtadas para dezenas de metros, em função da condutividade e da frequência utilizada. A amplitude decresce rapidamente (chega a desaparecer), muito embora o campo magnético permaneça na horizontal.

A depender do sistema de trabalho teremos informações diferentes. No caso de medidas do ângulo de inclinação, os seus perfis darão consideráveis informações sobre o condutor. Nesse caso o “*cross-over*” (ponto onde o ângulo muda de sinal) localiza o topo do condutor, a declividade do “*cross-over*” indica a sua profundidade e a simetria do perfil indica grosseiramente a inclinação do condutor. Um típico par de perfis de *Tilt Angle* e *Elipsidade* são mostrados na Figura 2.9 a qual ilustra as quantidades medidas nos perfis e são utilizadas na interpretação. O pico-a-pico de *Tilt Angle* ($\theta_{\text{máx}}$) e pico-a-pico de *Elipsidade* ($\varepsilon_{\text{máx}}$) são medidas absolutas entre o mínimo e o máximo dos perfis. A distância lateral entre o mínimo e o máximo dos perfis de *Tilt Angle* (distância Δx) também é utilizada nas investigações para se fazer a estimativa da profundidade do condutor. Entretanto a distinção entre a condutividade e a profundidade da anomalia é normalmente difícil, e medidas em diferentes frequências ajudam a interpretação comparativa.

No que diz respeito à interpretação quantitativa as técnicas de modelamento analógico e numérico são fortes instrumentos de interpretação de dados eletromagnéticos e tem sido requisitado no sentido de se obter resultado melhor.

Um modelamento que corresponda na íntegra à situação real da terra (com variação na condutividade, geometria irregular, anisotropia e presença de cobertura), é difícil de ser simulado e não oferece soluções tratáveis. Por isso os modelos estudados são corpos mais simplificados como uma esfera, diques ou lâminas infinitas, e não se deve esperar um alto grau de precisão nas interpretações, a menos que se trabalhe com condições extremamente favoráveis (*Grant and West, 1965*).

Coney, em 1977, estudou o comportamento de condutores no meio não condutivo (ar), onde variavam a profundidade do topo do condutor, o mergulho e sua condutividade. Entretanto, as dificuldades encontradas foram muitas e na tentativa de superar boa parte delas desenvolvem-se as primeiras técnicas de modelamento numérico.

Fraser (1969), para resolver o problema de ruídos causados pela alta frequência utilizada no método VLF, desenvolveu um filtro numérico simples, o qual transforma o “*cross-over*” da anomalia (ponto onde o gráfico da anomalia intercepta o eixo dos x) em pico, aplicando, para isso, diferenças sucessivas nos dados de inclinação do perfil. Este processo de filtragem deixa os dados apropriados à confecção de mapas de contorno, delineando, desta maneira, as estruturas geológicas que produzem os sinais anômalos. Fraser desenvolveu este filtro, para satisfazer os seguintes critérios:

- a) Deslocar os dados de inclinação de 90 graus, para converter “*cross-over*” e inflexão em pico, produzindo quantidades contornáveis;
- b) Atenuar o grande comprimento de onda, para aumentar a resolução da anomalia local;
- c) Não aumentar o ruído randômico nos dados;
- d) Ser de fácil aplicação.

Os dois primeiros critérios são satisfeitos calculando $M_2 - M_1$, em que M_1 e M_2 são duas medidas consecutivas. O terceiro critério, é obedecido com a aplicação de um filtro suavizador passa-baixo sobre o conjunto de três medidas sucessivas, como segue: $(M_2 - M_1) / 4 + (M_3 - M_2) / 2 + (M_4 - M_3) / 4$, resultando em $\frac{1}{4} \cdot [(M_3 + M_4) - (M_1 + M_2)]$. Onde M_1, M_2, M_3 e M_4 são quatro medidas consecutivas. Finalmente, eliminando a constante de multiplicação, tem-se o último critério satisfeito, e um filtro efetivo: $(M_3 + M_4) - (M_1 + M_2)$. Onde este ponto é plotado no meio das medidas M_2 e M_3 .

Este filtro é amplamente usado na interpretação de anomalias VLF, embora muitos geofísicos prefiram trabalhar com os dados brutos, pelas seguintes razões:

- a) A filtragem pode deslocar o pico da anomalia levemente ao longo do perfil;
- b) As respostas de estruturas complexas podem ser substancialmente alteradas no processo de filtragem;
- c) A resposta de um contato torna-se semelhante à de um corpo condutor.

Esses são bons argumentos para se utilizar tanto os dados brutos quanto os filtrados no procedimento de interpretação VLF.

Kaikkonen (1979), estudou os efeitos de manto sobre anomalias VLF de uma placa inclinada através de modelagem numérica usando técnica de elementos finitos

em função do ângulo de inclinação, amplitude (Hz / Hx) e *Elipsidade*. Foi verificado que o efeito da cobertura condutiva é mais visível nos perfis de *Elipsidade*, sendo esta componente bastante confiável para discernir um fraco de um forte condutor.

Olsson (1980), através do método da solução teórica verificou a resposta VLF de anomalias causadas por um semiplano perfeitamente condutor para diferentes condições de manto e ângulo de mergulho. Neste trabalho computou-se anomalias VLF para diferentes condutividades e espessuras de cobertura e também para diferentes ângulos de mergulho do corpo do tipo semiplano. Foi verificado que as curvas de anomalia mostram respostas razoavelmente complicadas. Concluiu-se que isto ocorre principalmente devido à forma de fase e atenuação do campo causada pela condutividade da cobertura e da rocha encaixante, fazendo com que a profundidade do corpo condutor seja sempre maior que a profundidade real.

Saydam (1981), interpretou anomalias VLF utilizando medidas do ângulo de inclinação e de elipsidade. Os resultados apresentados são válidos somente para condutores finos verticais. As análises mostram que a amplitude e a forma do ângulo de inclinação e elipsidade das anomalias VLF obtidos para condutores delgados são freqüentemente afetadas pelo produto condutividade-espessura do condutor, a resistividade que envolve o meio, profundidade do condutor e também a cobertura condutiva. Foi verificado que se fixando todos estes parâmetros citados anteriormente e variando-se a freqüência em um intervalo de 15 a 30 kHz não se evidencia um efeito significativo em toda a resposta VLF do condutor.

Farias (1996), teve como objetivo o mapeamento de feições estruturais (falhas e fraturas) e a prospecção de água subterrânea, com a aplicação do método VLF e HLEM (*Horizontal Loop Electromagnetic*), visando o estudo hidrogeológico do Município de São Domingos do Araguaia. Empregando a modelagem numérica por elementos finitos.

2.9 – MANTO GALVÂNICO E MANTO INDUTIVO

Os dados de levantamento EM geralmente são interpretados considerando o causador das anomalias sendo um corpo condutor solitário, porém a situação geológica real do depósito é muito mais complexa. A figura 2.8 mostra o modelo geológico mais

simplificado da ocorrência de sulfetos maciços. A presença do manto condutivo na vizinhança do alvo modifica bastante as respostas eletromagnéticas (*Parasnis, 1971; Palacky, 1975; Lajoie & West, 1977; Palacky & Sena, 1979; e Barongo, 1987*).

O manto de intemperismo em modelagem é, em geral, considerado homogêneo o que foge a realidade quando analisamos efeito gerados no campo, pois anomalias produzidas pela irregularidade do manto do intemperismo e/ou por heterogeneidade do subsolo mesmo sem importância econômica geram variações que podem confundir o alvo investigado (*Villegas – Garcia & West, 1983*)

Existem diferentes situações geoeletricas com relação ao manto e ao corpo. Os efeitos nas anomalias variam de acordo com essas situações, que cabe definir, portanto dois tipos de mantos o indutivo e o galvânico, os quais podem, ainda ser considerados homogêneo ou heterogêneo.

Situação em que o manto não está em contato com o corpo, como mostra as figuras 2.10 e 2.11. Os casos para manto indutivo homogêneo foram estudados por *Lowrie & West (1965), Silva & Verma (1986) e Queiroz & Verma (1987)*. Eles observaram: a) mudança na base referencial dos perfis, b) rotação horária da fase e conseqüente inversão da componente em quadratura, c) redução na amplitude, e d) aparecimento de um pico extra no perfil de quadratura dos corpos semi-planos de baixo mergulho, efeito observado de forma inédita por (*Silva & Verma, 1986 e Neres & Verma, 1989*).

Como conseqüências do efeito do manto indutivo, o corpo é interpretado como sendo mais condutivo e mais profundo do que é realmente. O pico extra na quadratura complica bastante a quantificação da anomalia, principalmente quando este ocorre nas vizinhanças da reversão. Por outro lado, para as situações investigadas por *Silva & Verma (1986)*, esses dois efeitos funcionam como indicadores qualitativos dos parâmetros dos corpos e dos mantos.

Situação em que o manto está em contato com o corpo, como mostra as figuras 2.12 e 2.13. Os casos para o manto galvânico homogêneo foram estudados por *Joshi et al. (1984) Neres & Verma (1989) e Silva & Verma (1997)*, entre outros. Eles observaram: a) rotação anti-horária da fase, b) aumento na amplitude, e c) aparecimento do pico-extra no perfil de quadratura dos corpos tipo semi-plano com

pequeno mergulho. E, como consequência desses efeitos, o corpo será interpretado como sendo de menor condutância e estar menos profundo.

A maioria dos estudos foram feitos para manto homogêneo devido às facilidades analíticas e de simulação analógica. No entanto, o manto de intemperismo são ruídos geológicos que contaminam bastante as anomalias e dificultam muito sua interpretação. *Olm* (1981) estudou, através da modelagem em escala reduzida, a retirada de ruídos causados por heterogeneidades no manto-indutivo das anomalias eletromagnéticas de corpos empregando a técnica de diferença de freqüências.

O trabalho realizado por *Silva* (2000) teve como objetivo estudar a capacidade do método de diferença de freqüências em retirar das anomalias de corpos tabulares inclinados, os efeitos produzidos pelas diferentes condições de mantos e pelas heterogeneidades neles presentes, através de modelagem analógica.

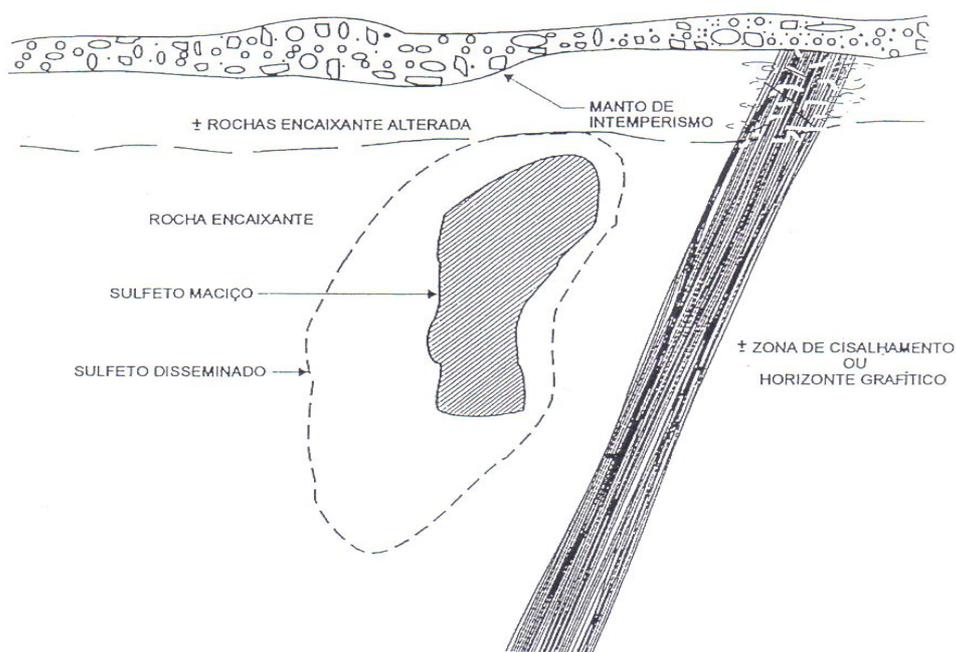


FIGURA 2.8 - Representação esquemática do ambiente geológico geral encontrado na prospecção de depósitos de sulfetos.

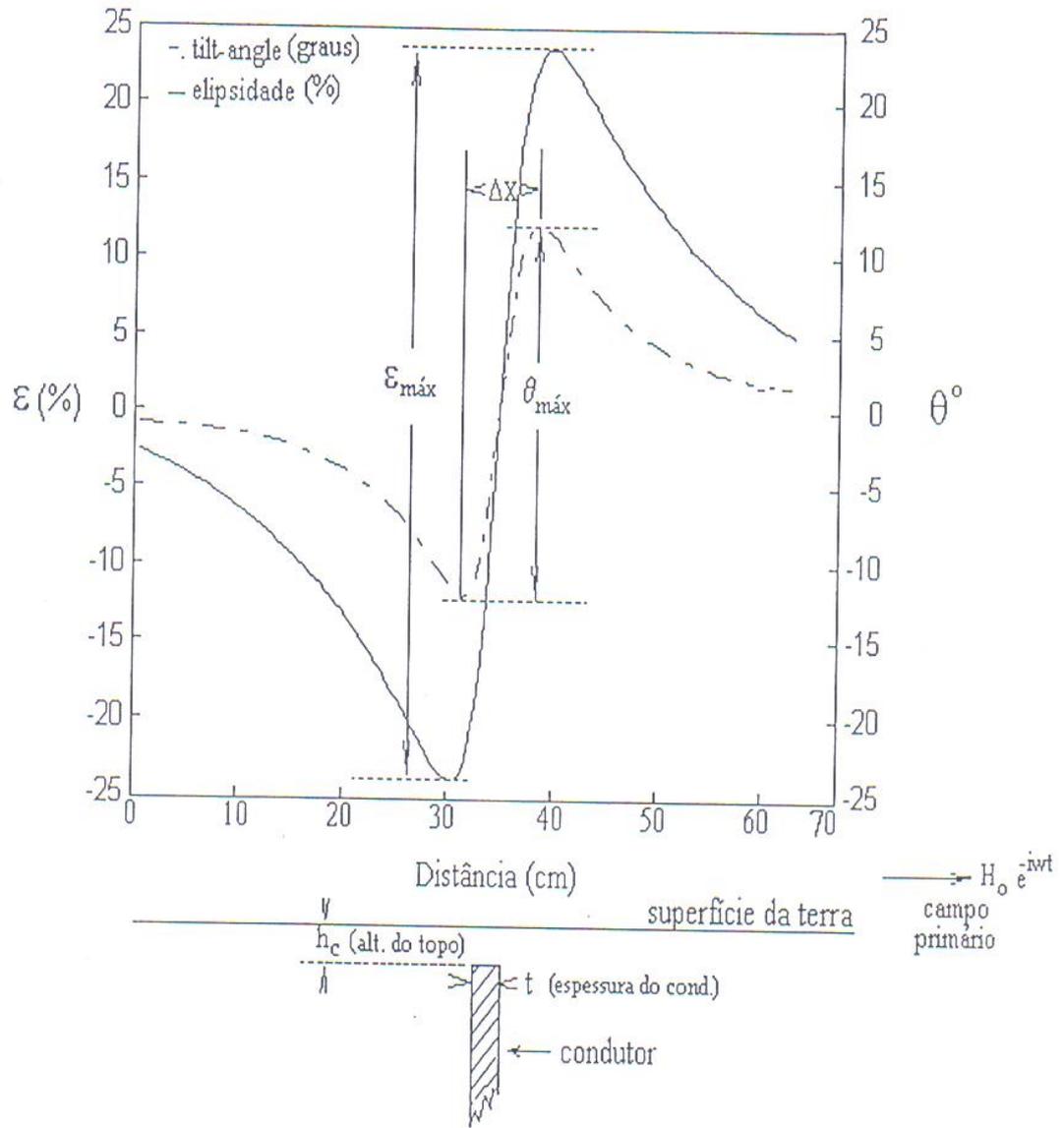


FIGURA 2.9 – Perfis típicos de Tilt Angle e Elipsidade sobre um corpo condutor vertical

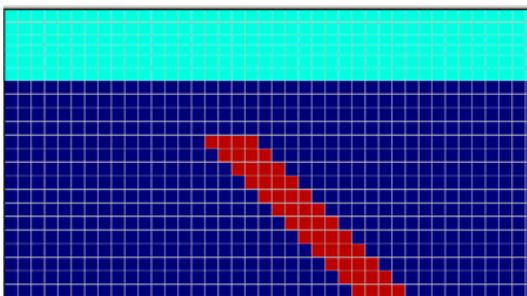


FIGURA 2.10 – Representação de manto indutivo homogêneo

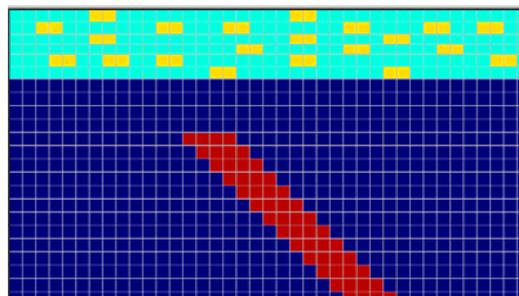


FIGURA 2.11 – Representação de manto indutivo heterogêneo

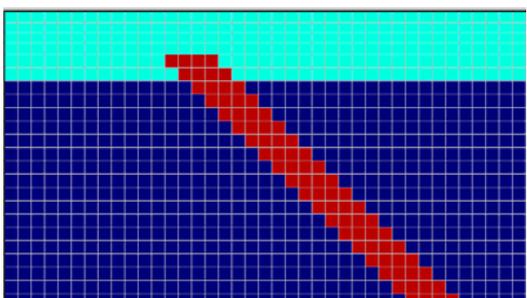


FIGURA 2.12 – Representação de manto galvânico homogêneo

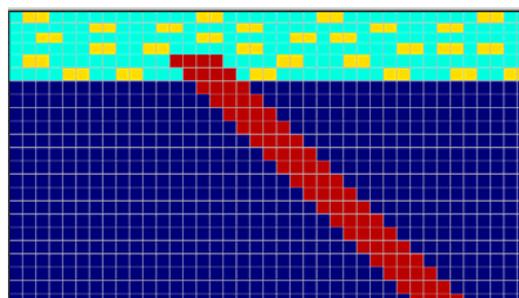


FIGURA 2.13 – Representação de manto galvânico heterogêneo

3 – MODELAGEM NUMÉRICA DA VLF ATRAVÉS DA eGs

A eGs foi desenvolvida no Departamento de Geofísica da UFPA, pelos alunos de mestrado *Pereira* (2005) e *Silva* (2005) sob a orientação do prof. Dr. Luiz Rijo, onde contém uma suíte de programas destinadas para facilitar o estudo de modelagem e interpretação de dados geofísicos elétricos e eletromagnéticos, consistindo em um conjunto de interfaces gráficas efetivada em *Delphi* para uso de bibliotecas de ligação dinâmicas (*Dynamic Link Libraries – dll*), desenvolvidas em linguagem *Fortran* e na sua resolução aplica o método dos elementos finitos, o qual é uma importante ferramenta para fornecer soluções aproximadas a problemas de contorno.

A formulação matemática de problemas geofísicos, em particular nos métodos eletromagnéticos, é de grande complexidade e geralmente de difícil solução, sendo que na maioria dos casos é impossível obter uma solução analítica. Como consequência, as respostas eletromagnéticas referentes a corpos condutivos em subsuperfície, não eram entendidas por completo, o que dificultava as interpretações dessas anomalias. Com o objetivo de prever os efeitos provocados por diferentes situações geológicas nas investigações EMs e geofísicas em geral, e com isso criar subsídios para uma interpretação mais confiável, os esforços voltaram-se em direção a um tratamento teórico conhecido como modelagem ou simulação, o qual pode ser em escala reduzida ou analógico e numérico ou digital.

Na modelagem digital, os resultados são obtidos a partir de modelos matemáticos, representados normalmente por soluções numéricas aproximadas ou, quando possível, pela solução analítica exata, com as simulações realizadas no computador. Na solução numérica aproximada, é necessário fazer uso de ferramentas matemáticas, desde as mais simples como a integração numérica e convolução, até as mais sofisticadas, como o método das equações diferenciais, através das técnicas dos elementos finitos e diferenças finitas, e o método das equações integrais. Vários resultados importantes surgiram na literatura, nos últimos anos, contribuindo bastante para as interpretações de anomalias EMs (*Vozoff, 1971; Lajoie & West, 1977; Rijo, 1977; Kaikkonen, 1979 e 1980; Olsson, 1980 e 1983; Saydam, 1981; Poddar, 1982*)

Neste capítulo, recalculamos as anomalias VLF dos modelos de *Kaikkonen*, 1979 (FIGURA 3.1a e 3.1b.); *Saydam*, 1981 (FIGURA 3.2a e 3.2b) e *Sinha*, 1990 (FIGURA 3.3a e 3.3b), através da *electrical Geophysics suite* (eGs) para que os resultados obtidos fossem comparados com os dados originais dos autores, e que tivéssemos uma confiabilidade na eGs.

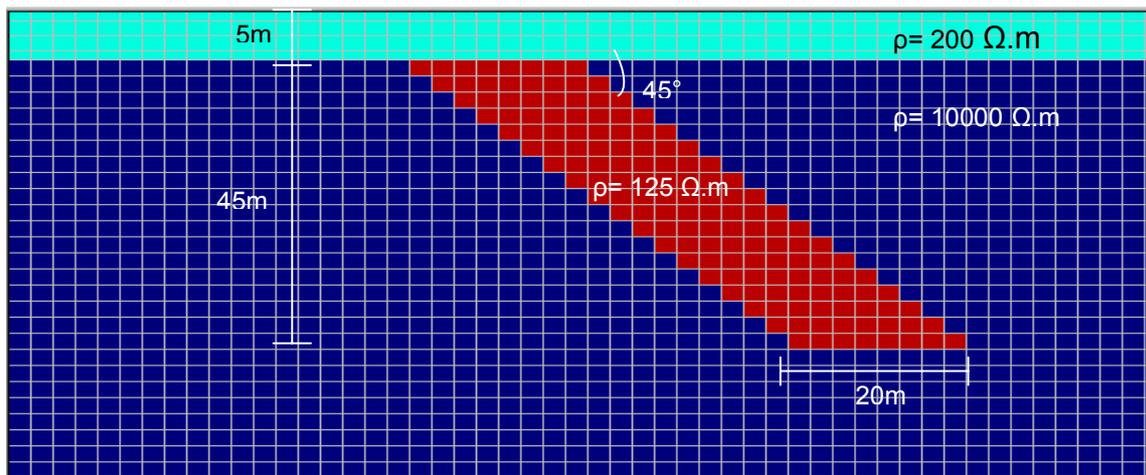


FIGURA 3.1a – Modelo de *Kaikkonen*, 1979 – Disposição Geométrica do Corpo Condutor na inclinação de 45°

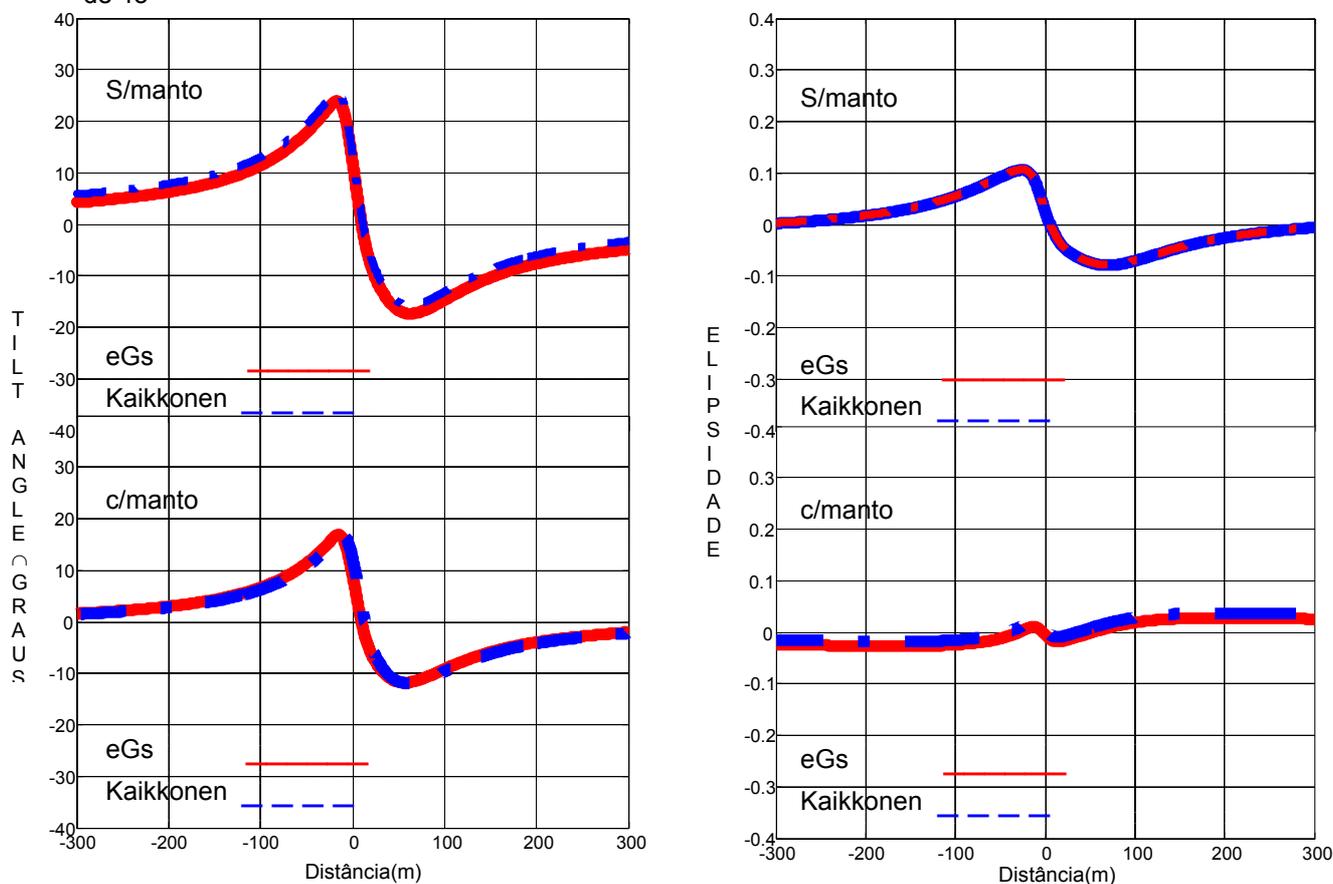


FIGURA 3.1b - Comparação dos resultados (*Tilt Angle* e da *Elipsidade* com manto e sem manto) gerados por eGs e com o modelo de *Kaikkonen* (1979).

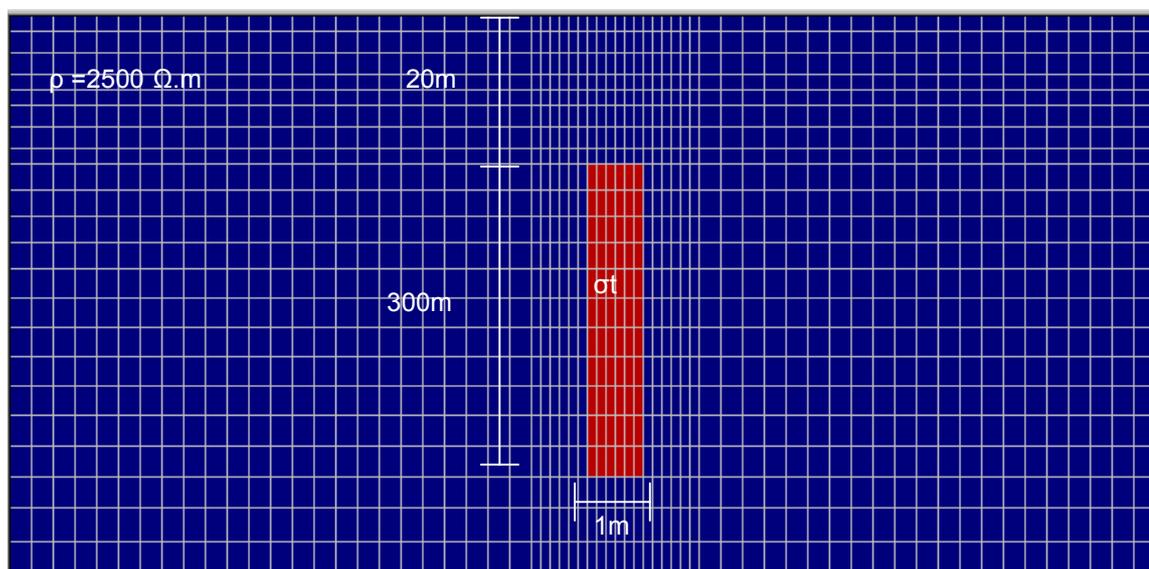


FIGURA 3.2a - Modelo de *Saydam*, 1981. – Disposição Geométrica do Corpo Condutor na vertical

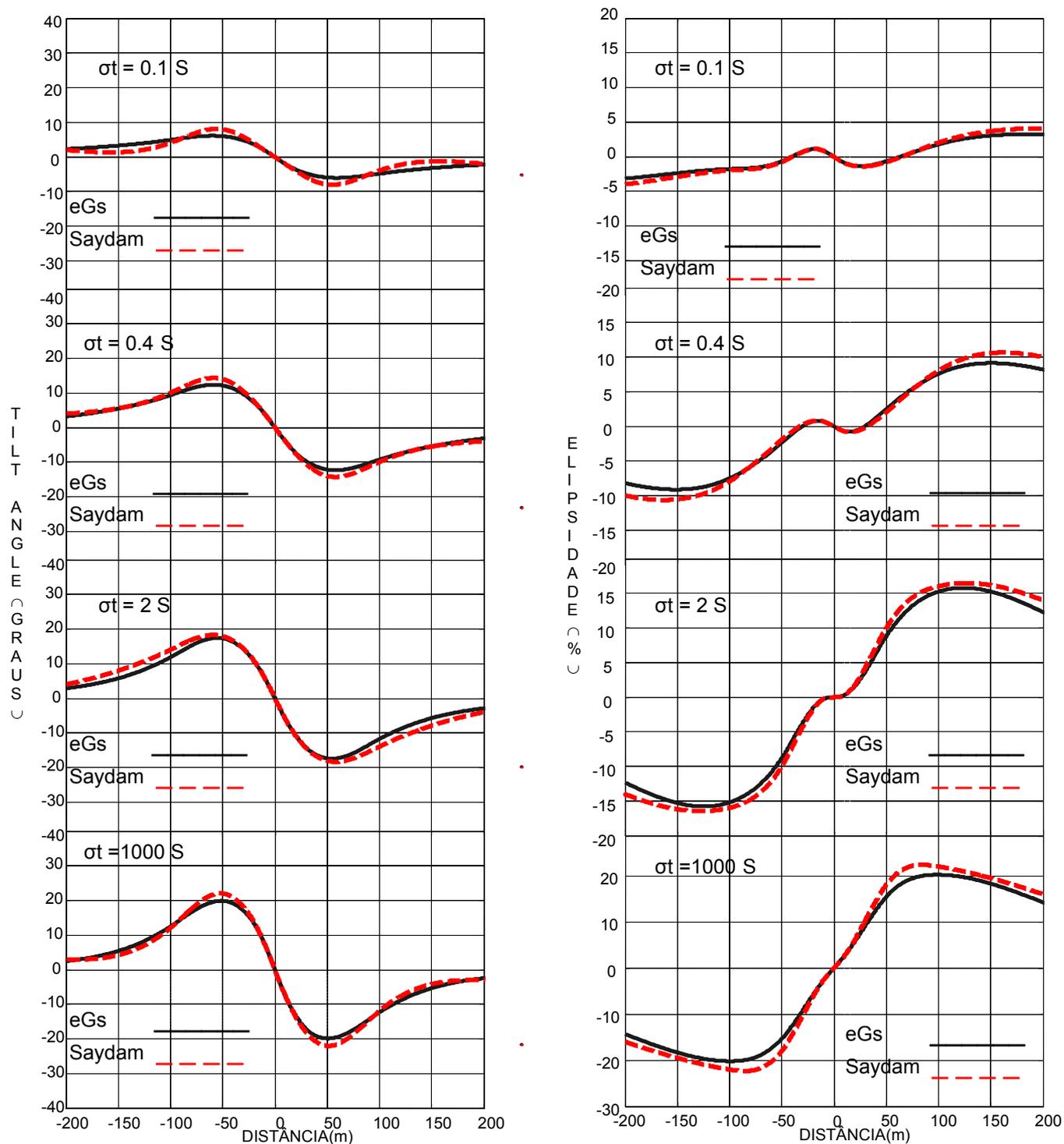


FIGURA 3.2b - Comparação dos resultados (*Tilt Angle* e a *Elipsidade* com a variação da condutância do corpo) gerados por eGs e com o modelo de Saydam (1981).

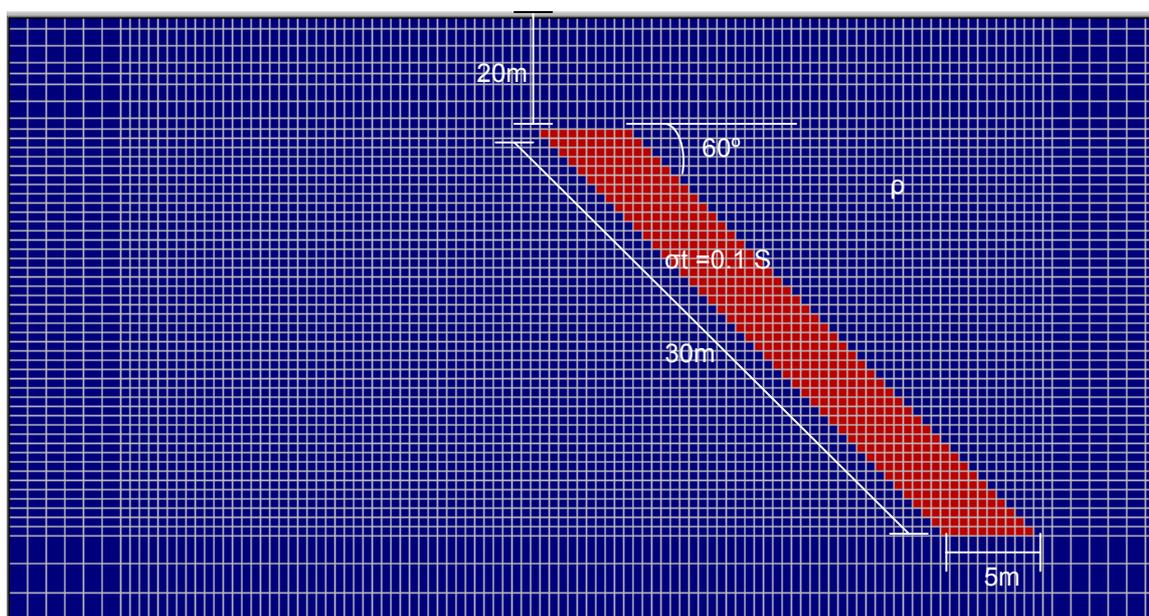


FIGURA 3.3a – Modelo de *Sinha*, 1990 – Disposição Geométrica do Corpo Condutor na inclinação de 60°.

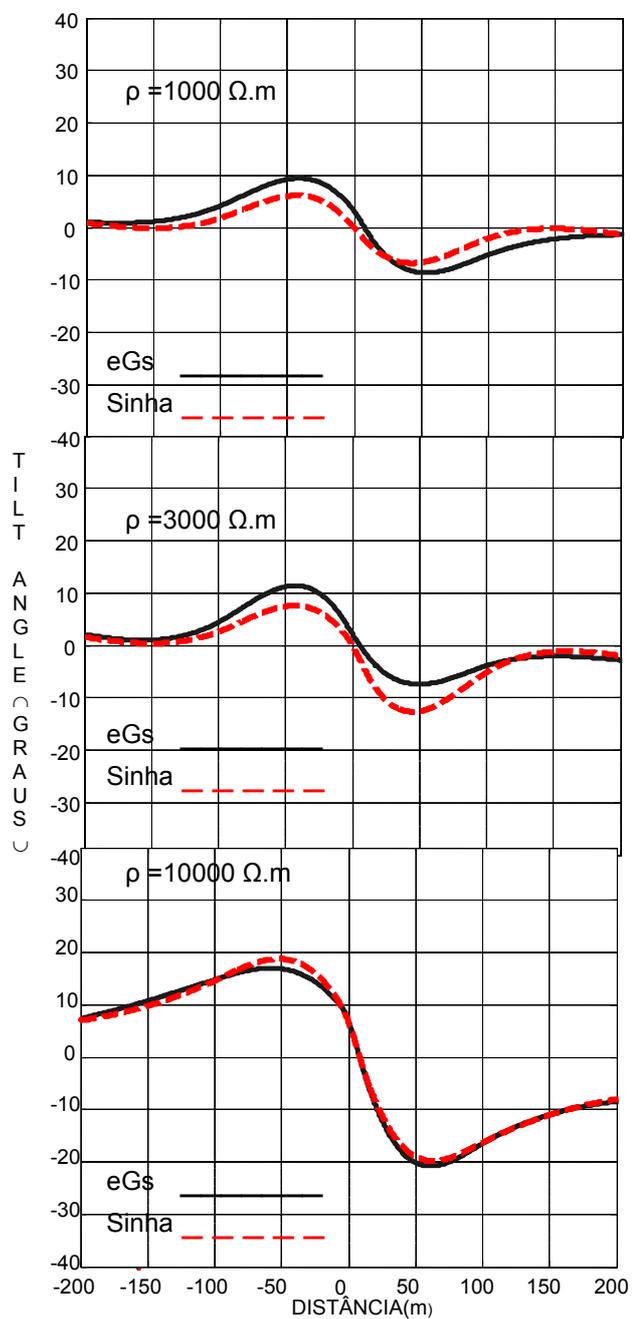


FIGURA 3.3b – Comparação dos resultados (*Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da resistividade da rocha encaixante) gerados por eGs e com o modelo de Sinha (1990).

4 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO MANTO GALVÂNICO:

As respostas eletromagnéticas de corpos tabulares para o método VLF podem ser representadas de várias formas de perfis como real e imaginária. Neste trabalho os perfis foram confeccionados sob a forma dos parâmetros da elipse de polarização que são o *Tilt Angle* e a *Elipsidade*.

Todos os experimentos realizados foram mantidos na frequência de 17KHz e condutividade de rocha encaixante de 10^{-4} S/m

Os parâmetros de resposta do manto e do corpo que serão utilizados neste trabalho estão apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2. Os parâmetros do manto na tabela 4.1 estão baseado nos dados publicados por *Palacky e Kadokaru (1979)* sobre diferentes litologias no Brasil. O maior valor de condutância corresponde a mantos sobre Xistos na localidade de Nova Lima (MG) e vulcano básico em Santa Luzia (BA).

Neste trabalho, convencionou-se chamar de lado à direita do mergulho a região que a partir do topo do condutor se estende na região do mergulho do mesmo, e de lado à esquerda do mergulho, aquela que ocorre na direção oposta (Figura 4.1). Deste modo, a anomalia pode então ser descrita considerando-se os valores pico-a-pico dos lados à direita e à esquerda ao mergulho que aqui são referidos como, respectivamente, pico-a-pico à direita e pico-a-pico à esquerda.

A apresentação dos resultados será realizada demonstrando os efeitos de manto (seção 4.1) sobre perfis de *Tilt Angle* e de *Elipsidade*, variando a condutância dos mantos M0(sem manto), M1($\sigma t=0.1S$), M2($\sigma t=0.2S$), M3($\sigma t=0.5S$) e M4($\sigma t=1S$) sobre as respostas dos corpos C1($\sigma t=1S$), C2($\sigma t=2S$), C3($\sigma t=5S$) e C4($\sigma t=10S$) a uma profundidade (D) de 5 m para mergulhos de 90°, 60°, 45° e 30°. Em segundo plano serão apresentados os efeitos do parâmetro de resposta do condutor (seção 4.2) onde são ilustrados perfis de *Tilt Angle* e de *Elipsidade* que mostram a variação das anomalias com a condutância dos corpos C1, C2, C3 e C4. Os efeitos são mostrados para os ângulos de mergulho ($\theta =90^\circ$ e 45°), estando os corpos a uma profundidade de 5 m na presença dos mantos M0, M1, M2 e M3 de espessura de 10 m.

Na seção 4.3 apresentam-se os efeitos do mergulho do corpo sobre anomalias de tilt angle e de elipsidade. Para este experimento utilizou-se os corpos C1(

$\sigma t=1S$) e C3($\sigma t=5S$), o qual foi colocado na profundidade de 5 m com mergulhos $\theta =90^\circ$, 60° , 45° e 30° na presença dos mantos M0, M1, M2 e M3.

Na seção 4.4 apresentam-se os efeitos da profundidade sobre anomalias de *Tilt Angle* e de *Elipsidade*, as quais foram obtidas variando-se a profundidade do topo do condutor C1 e C3 ($h_c = 2; 5$ e 10 m) mergulhando com os ângulos $\theta = 90^\circ$ e 45° na presença dos mantos M0, M1, M2 e M3.

TABELA 4.1 – Parâmetros do Manto:

Manto	Espessura(m) (t_m)	Condutividade(S/m) (σ_m)	Condutância(S) ($\sigma_m t_m$)
M ₀ (sem manto)	0,0	0,0	0,0
M ₁	10	0,01	0,1
M ₂	10	0,02	0,2
M ₃	10	0,05	0,5
M ₄	10	0,1	1

TABELA 4.2 – Parâmetros do Corpo:

Corpo	Espessura(m) (t_c)	Condutividade(S/m) (σ_c)	Condutância(S) ($\sigma_c t_c$)
C ₁	10	0,1	1
C ₂	10	0,2	2
C ₃	10	0,5	5
C ₄	10	1	10

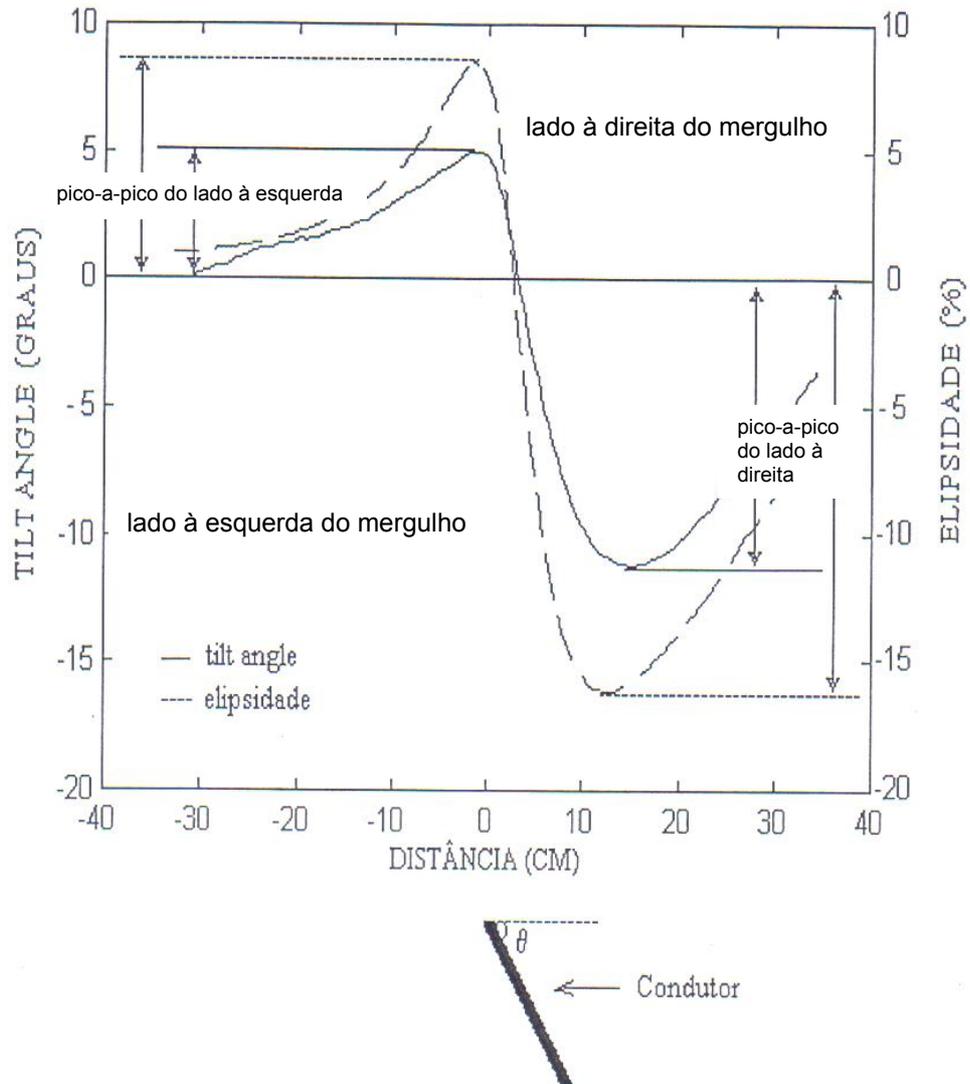


FIGURA 4.1- Perfil típico de um semi-plano inclinado de $\theta = 60^\circ$, sem manto

4.1 – EFEITOS DO MANTO GALVÂNICO:

As figuras 4.2 a 4.5 mostram os efeitos de condutância do manto Galvânico sobre respostas dos corpos C1($\sigma t=1S$), C2($\sigma t=2S$), C3($\sigma t=5S$) e C4($\sigma t=10S$) a uma profundidade de 5,0m e diferentes mergulhos, na presença dos mantos M0(sem manto), M1($\sigma t=0.1S$), M2($\sigma t=0.2S$), M3($\sigma t=0.5S$) e M4($\sigma t=1S$).

Nas respostas de *Tilt Angle*, verifica-se que estando o corpo nas diversas inclinações (Figuras 4.2 a 4.5) as anomalias diminuem com o aumento da condutância do manto.

Para os perfis de *Elipsidade* nota-se que para os corpos mergulhando com os ângulos de 90°, 60°, 45° e 30° (Figuras 4.2 a 4.5), respectivamente, as anomalias diminuem com o aumento da condutância dos mantos M1, M2, M3 e M4.

Observou-se que os picos menores (negativo e positivo), quase acima do topo dos corpos, no perfil de *Elipsidade* para sem manto (M0) desaparece na presença do manto. Ocorre uma inversão no sentido da anomalia de *Elipsidade* em presença do manto.

Após o aumento inicial das anomalias (pico-a-pico) da *Elipsidade* com a presença do manto, essas começam a diminuir com o aumento da condutância do manto. Ocorre também um estreitamento na distância lateral entre o mínimo e o máximo dos perfis de *Elipsidade* (distância Δx), indicando presença rasa do corpo, temos que o parâmetro Δx é usado para estimar profundidade do corpo.

4.2 – EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO CORPO

As figuras 4.6 e 4.7 ilustram perfis de *Tilt Angle* e de *Elipsidade* mostrando a variação das anomalias com a variação da condutância dos corpos C1($\sigma t=1S$), C2($\sigma t=2S$), C3($\sigma t=5S$) e C4($\sigma t=10S$). Os efeitos são mostrados para os ângulos de mergulho 90° e 45°, estando os corpos a uma profundidade de 5 m na presença dos mantos M0(sem manto), M1, M2 e M3.

Para essas situações, verificou-se que o aumento da condutância do corpo causa um crescimento no valor das anomalias de *Tilt Angle* e da *Elipsidade* (Figuras 4.6

e 4.7). Entretanto observou-se que é bastante difícil fazer a distinção entre os perfis de *Tilt Angle* para os corpos mais condutivos. Nota-se que os perfis de *Tilt Angle* para os corpos C3 e C4 são praticamente iguais (Figuras 4.6 e 4.7).

Nos perfis de *Elipsidade*, estando os corpos na posição vertical e em contato com o manto M1 (Figura 4.6d), observou-se um aumento nos perfis em relação ao manto M0 (Figura 4.6b). Com o aumento da condutividade do manto (mantos M2 e M3) (Figuras 4.6f, h) os perfis dos corpos C3 e C4 ficam bastante difíceis de ser identificados, além do mais se nota que o corpo C1 possui a menor resposta pico-a-pico (Figura 4.7h).

Ao colocarmos os corpos mergulhados com o ângulo 45° e em contato com os mantos mais condutivos (M2 e M3), observa-se que os picos à direita tendem a ficar igual para os corpos mais condutivos, enquanto que os picos à esquerda tendem a diferenciar os corpos de condutividade distintos (Figura 4.7f, h).

MANTO GALVÂNICO

EFEITO DE CONDUTÂNCIA DO MANTO, $\theta = 90^\circ$

Manto M0 (sem manto) _____ Manto M1 ($\sigma = 0.1$ S) _____ Manto M2 ($\sigma = 0.2$ S) _____
 Manto M3 ($\sigma = 0.5$ S) _____ Manto M4 ($\sigma = 1$ S) _____, $D = 5$ m

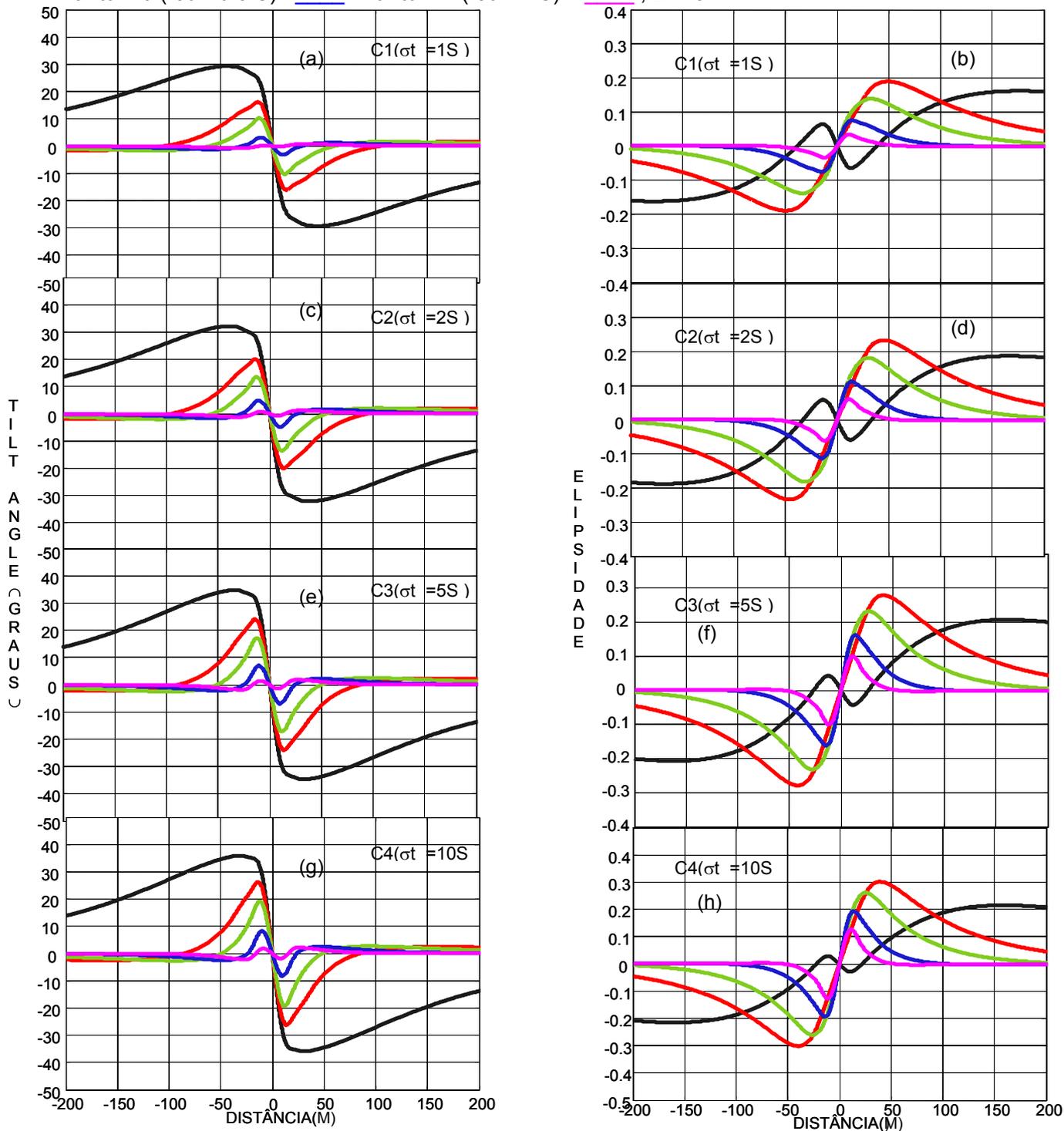


Fig 4.2- Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da Condutância do Manto, inclinação $\theta = 90^\circ$ e profundidade $D = 5$ m

MANTO GALVÂNICO

EFEITO DE CONDUTÂNCIA DO MANTO, $\theta = 60^\circ$

Manto M0 (sem manto) _____ Manto M1 ($\sigma = 0.1 \text{ S}$) _____ Manto M2 ($\sigma = 0.2 \text{ S}$) _____
 Manto M3 ($\sigma = 0.5 \text{ S}$) _____ Manto M4 ($\sigma = 1 \text{ S}$) _____, $D = 5 \text{ m}$

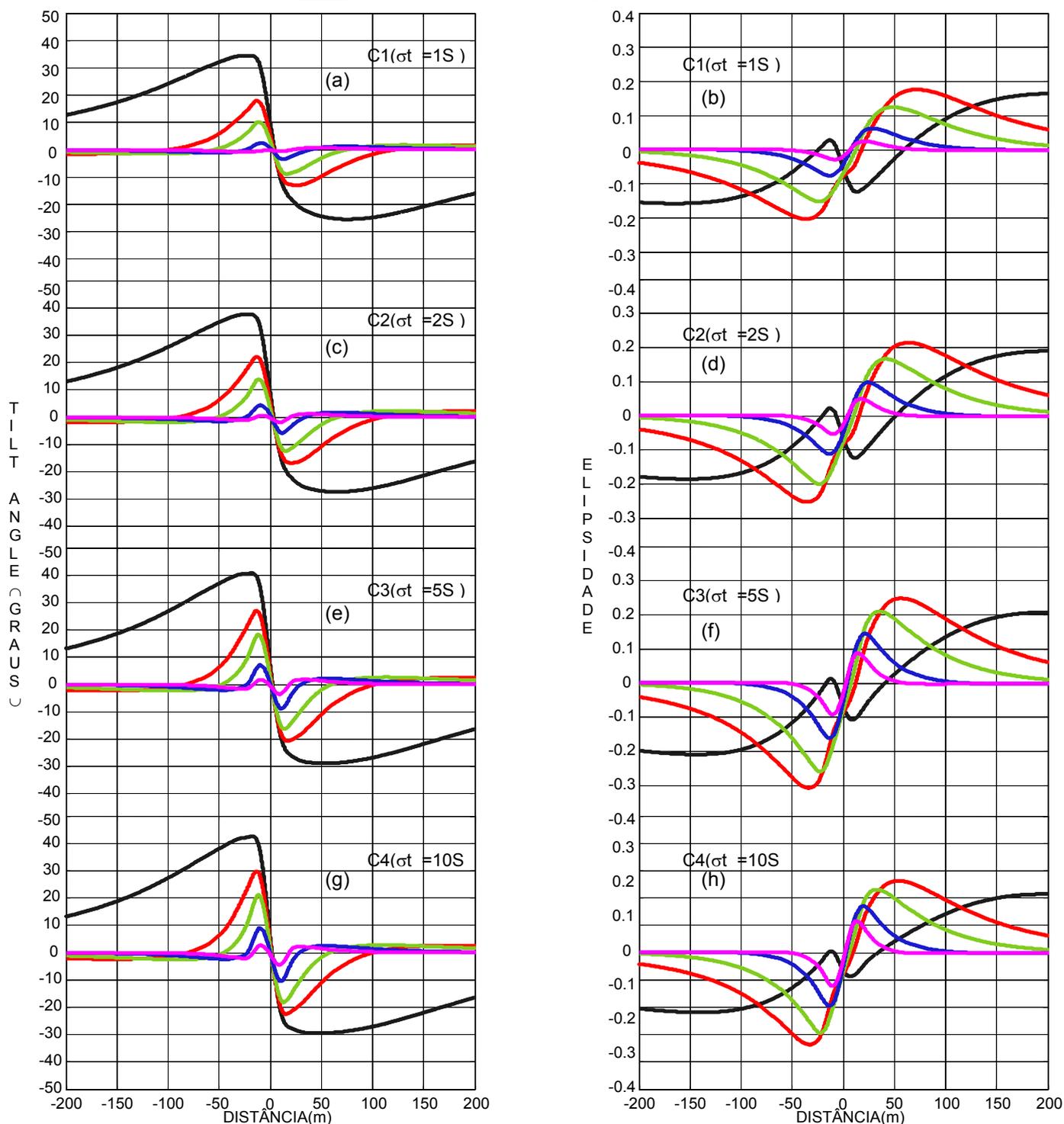


Fig 4.3- Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da Condutância do Manto, inclinação $\theta = 60^\circ$ e profundidade $D = 5 \text{ m}$

MANTO GALVÂNICO

EFEITO DE CONDUTÂNCIA DO MANTO, $\theta = 45^\circ$

Manto M0 (sem manto) _____ Manto M1 ($\sigma = 0.1 \text{ S}$) _____ Manto M2 ($\sigma = 0.2 \text{ S}$) _____
 Manto M3 ($\sigma = 0.5 \text{ S}$) _____ Manto M4 ($\sigma = 1 \text{ S}$) _____, $D = 5 \text{ m}$

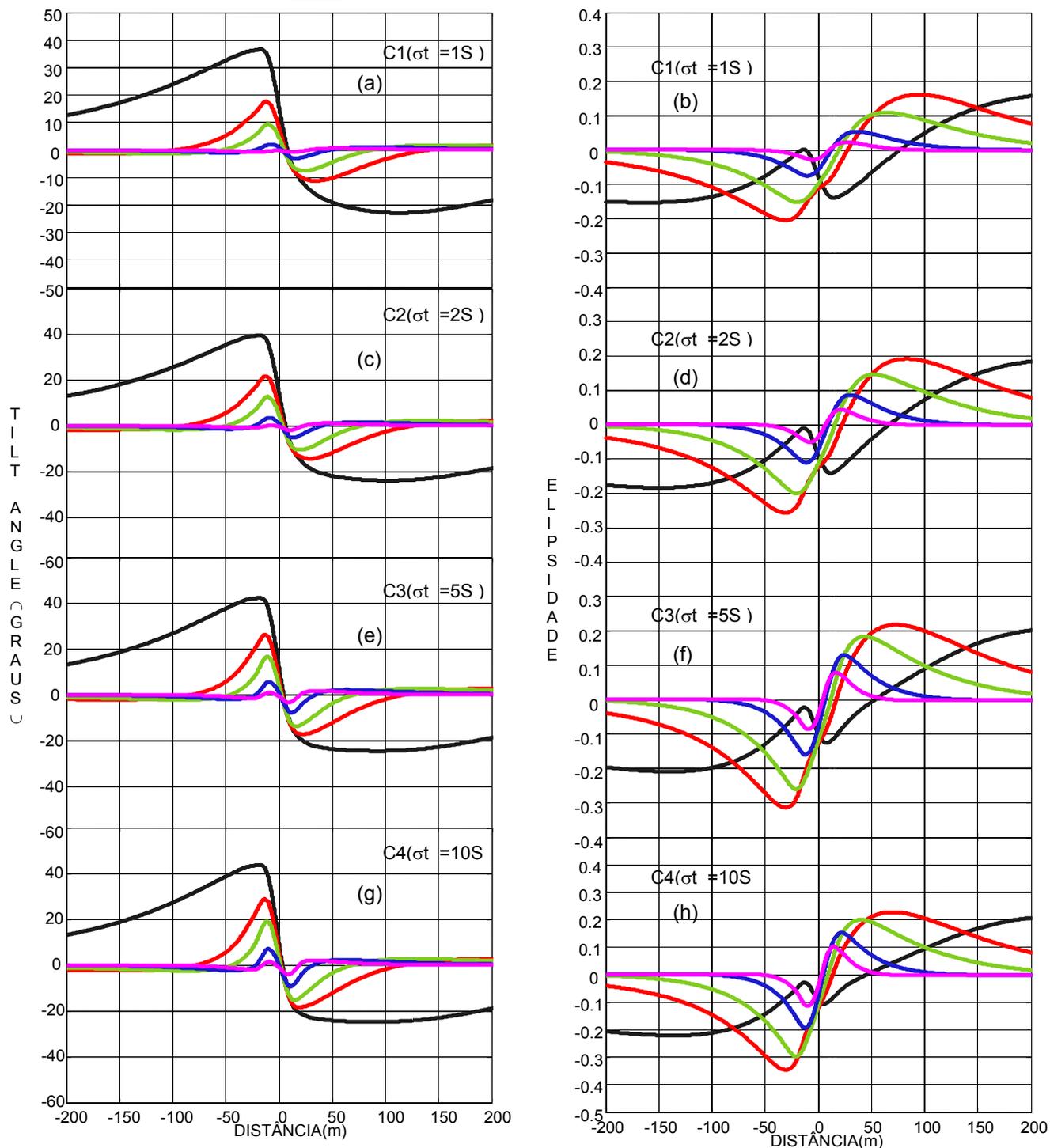


Fig 4.4- Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da Condutância do Manto, inclinação $\theta = 45^\circ$ e profundidade $D = 5 \text{ m}$

MANTO GALVÂNICO

EFEITO DE CONDUTÂNCIA DO MANTO, $\theta = 30^\circ$

Manto M0 (sem manto) _____ Manto M1 ($\sigma = 0.1$ S) _____ Manto M2 ($\sigma = 0.2$ S) _____
 Manto M3 ($\sigma = 0.5$ S) _____ Manto M4 ($\sigma = 1$ S) _____, $D = 5$ m

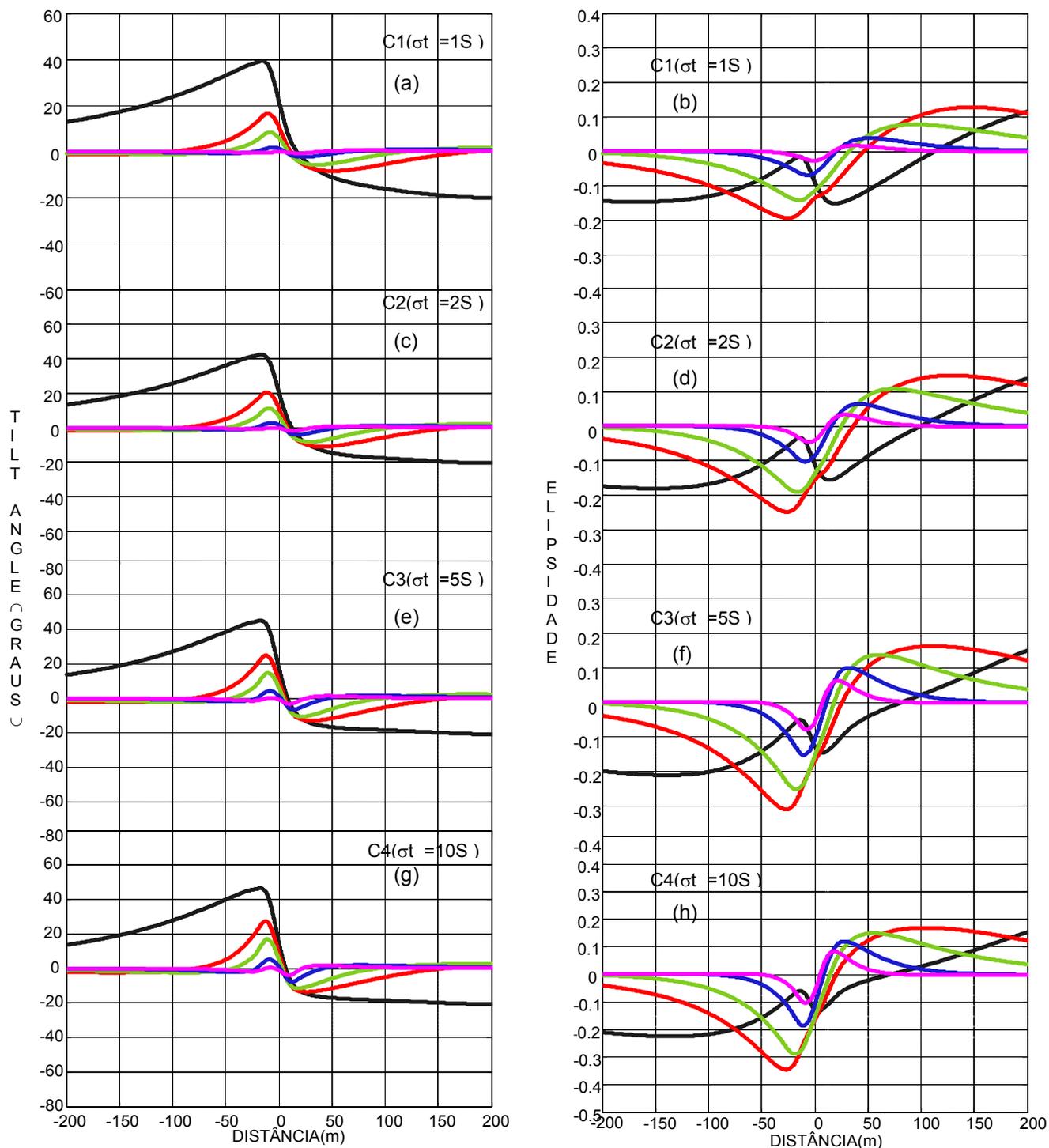


Fig 4.5- Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da Condutância do Manto, inclinação $\theta = 30^\circ$ e profundidade $D = 5$ m

MANTO GALVÂNICO

EFEITO DE CONDUTÂNCIA DO CORPO, $\theta = 90^\circ$

Corpo C1 ($\sigma = 1$ S) _____ Corpo C2 ($\sigma = 2$ S) _____ Corpo C3 ($\sigma = 5$ S) _____
 Corpo C4 ($\sigma = 10$ S) _____, $D = 5$ m

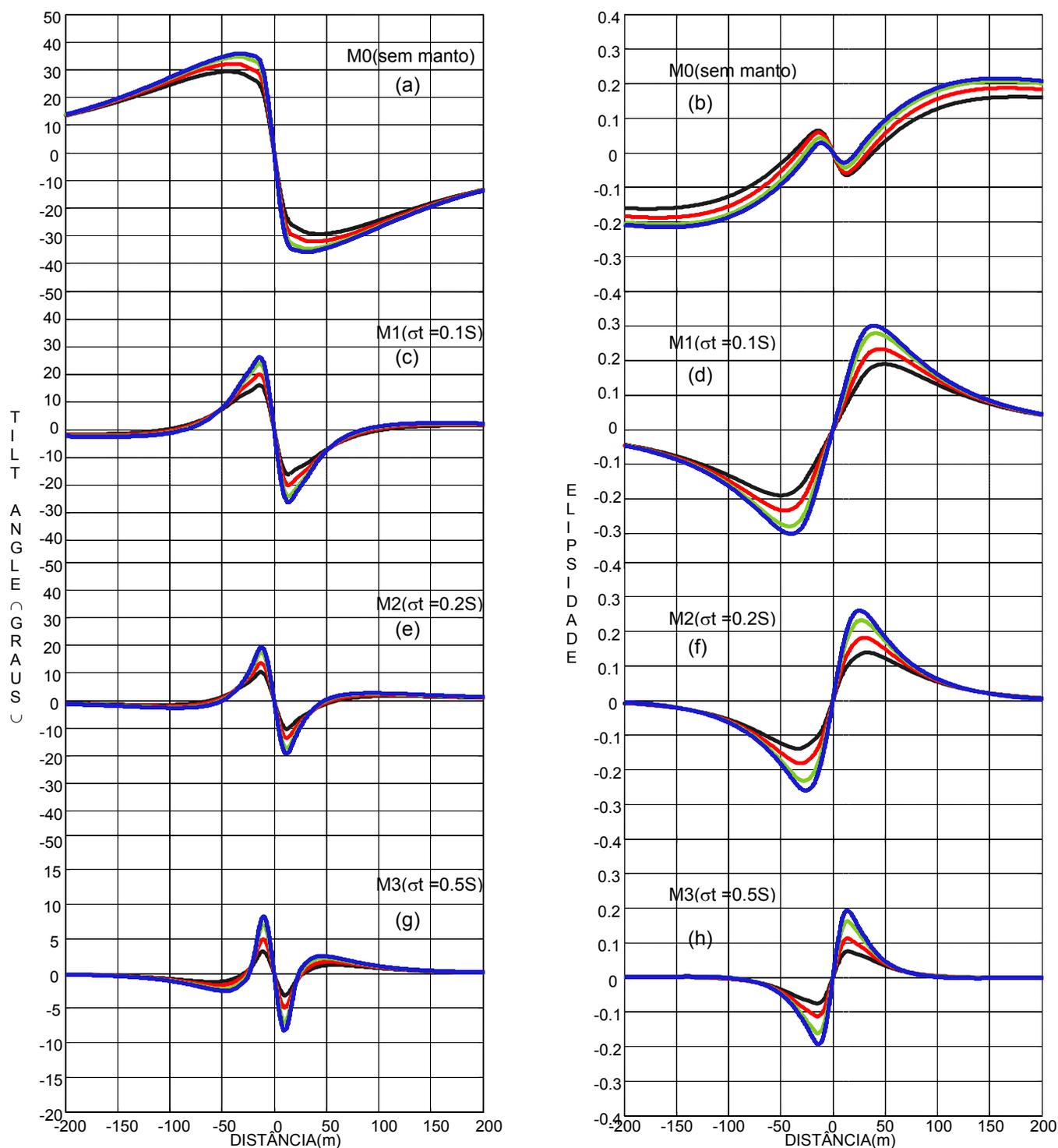


Fig 4.6 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da condutância do Corpo, inclinação $\theta = 90^\circ$ e profundidade $D = 5$ m

MANTO GALVÂNICO

EFEITO DE CONDUTÂNCIA DO CORPO, $\theta = 45^\circ$

Corpo C1 ($\sigma = 1$ S) _____ Corpo C2 ($\sigma = 2$ S) _____ Corpo C3 ($\sigma = 5$ S) _____
 Corpo C4 ($\sigma = 10$ S) _____, $D = 5$ m

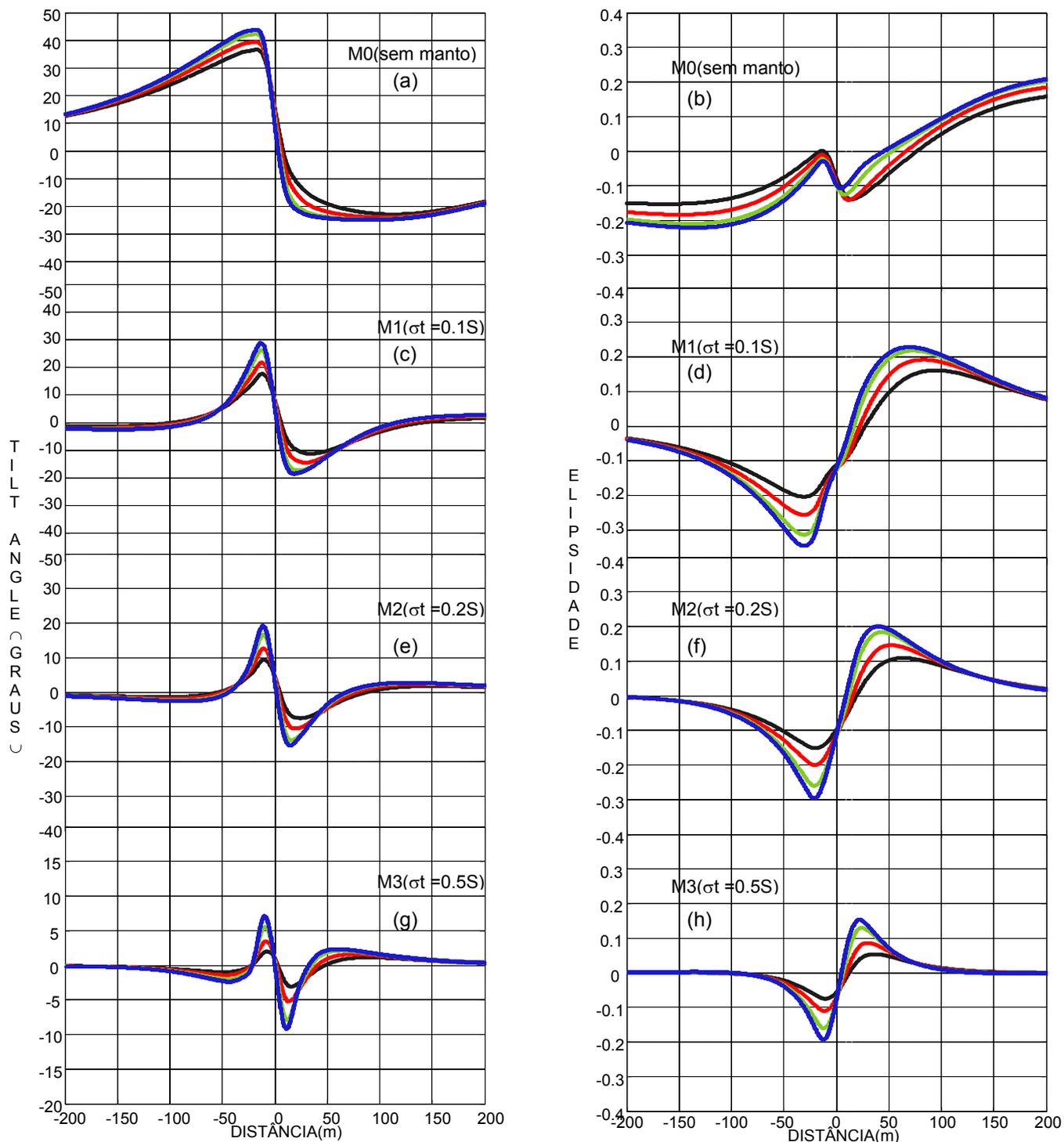


Fig 4.7 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da condutância do Corpo, inclinação $\theta = 45^\circ$ e profundidade $D = 5$ m

4.3 – EFEITOS DO MERGULHO

As figuras 4.8 e 4.9 ilustram os efeitos causados pelo mergulho do condutor. Para este experimento utilizaram-se os corpos C1($\sigma t = 1$ S) e C3($\sigma t = 5$ S), o qual foi colocado na profundidade de 5 m com mergulhos de 90°, 60°, 45° e 30° na presença dos mantos M0(sem manto), M1, M2 e M3.

Na ausência do manto e estando o corpo localizado a uma profundidade de 5 m (Figuras 4.8a, b e 4.9a, b), o maior efeito causado pelo mergulho do condutor é a assimetria nos perfis tanto de *Tilt Angle* quanto da *Elipsidade*.

Observa-se nas figuras 4.8d, f e h e 4.9d, f e h, que o maior pico das anomalias é dado pelo lado esquerdo do mergulho do corpo.

A medida em que diminuimos o mergulho do condutor para os mantos M1, M2 e M3, o pico à esquerda e à direita diminui tanto para os perfis de *Tilt Angle* quanto para os perfis de *Elipsidade* (Figuras 4.8 a 4.9).

Entretanto observou-se que é bastante difícil fazer a distinção entre os perfis (à esquerda) de *Tilt Angle* na presença dos mantos M1 e M2 (Figuras 4.8c, e & 4.9c, e). Nos perfis de *Elipsidade*, nota-se que os picos à direita do mergulho diminui à medida que o manto torna-se mais condutivo para os corpos C1($\sigma t=1$ S) e C3($\sigma t=5$ S) localizado na profundidade de 5 m (Figuras 4.8d, f, h e 4.9d, f, h).

4.4 – EFEITOS DA PROFUNDIDADE

As figuras 4.10 a 4.13 mostram perfis variando-se a profundidade do topo do condutor sem manto (M0) e com os mantos M1 ($\sigma t = 0.1$ S), M2 ($\sigma t = 0.2$ S) e M3 ($\sigma t = 0.5$ S) presentes. Foi utilizado nestes experimentos o corpo C1 ($\sigma t = 1$ S) e C3($\sigma t = 5$ S) mergulhando com os ângulos de 90° e 45°.

Para os corpos com mergulhos 90° e 45° e sem manto, o efeito da variação da altura do topo do condutor é de reduzir as respostas tanto de *Tilt Angle* quanto de *Elipsidade* (Figuras 4.10a, b; 4.11a, b; 4.12a, b e 4.13a, b). O formato das anomalias é notadamente modificado, pois os picos afastam-se do *Cross-Over*, tornando-se mais achatados à medida que o corpo fica mais profundo.

Observa-se que o ângulo de cada perfil no ponto de *Cross-Over* é bastante reduzido para corpos mais profundos. Um fato a ser observado é que os picos de anomalias de *Tilt Angle* ocorrem mais distante do ponto de *Cross-Over* quando comparado aos de *Elipsidade*.

Na presença do manto de intemperismo a amplitude das anomalias de *Elipsidade* aumenta enquanto as anomalias de *Tilt Angle* apresentam uma pequena atenuação em relação àquelas tomadas sem manto, a uma mesma profundidade, deixando a impressão de que o corpo condutor está a uma profundidade mais rasa do que a verdadeira.

MANTO GALVÂNICO

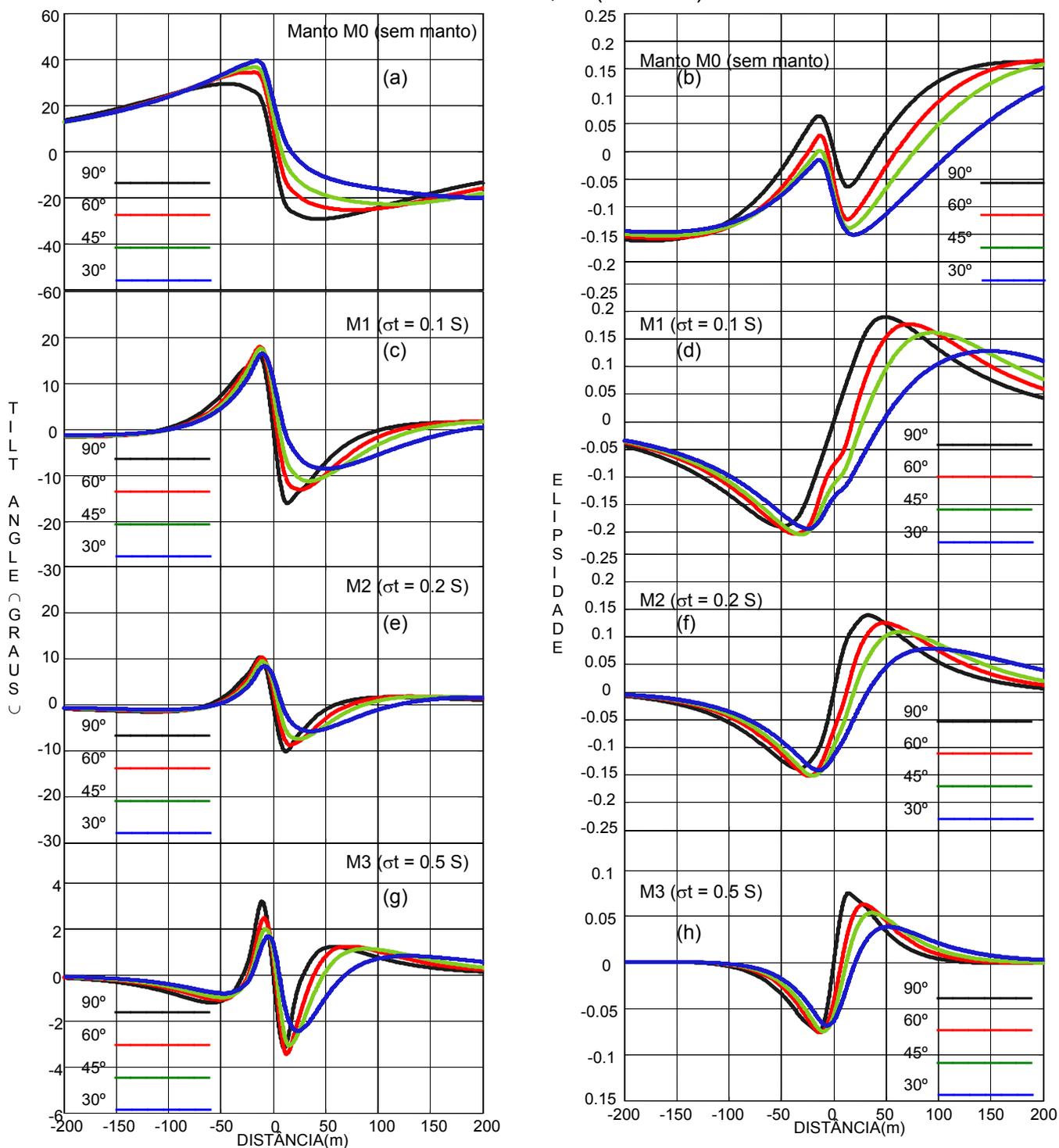
EFEITOS DO MERGULHO, C1($\sigma = 1$ S) e D = 5 m

Fig 4.8 - Mudança das anomalias do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação do mergulho para o Corpo C1($\sigma = 1$ S) localizado a uma profundidade de 5 m

MANTO GALVÂNICO
EFEITOS DO MERGULHO, C3 ($\sigma t = 5$ S) e $D = 5$ m

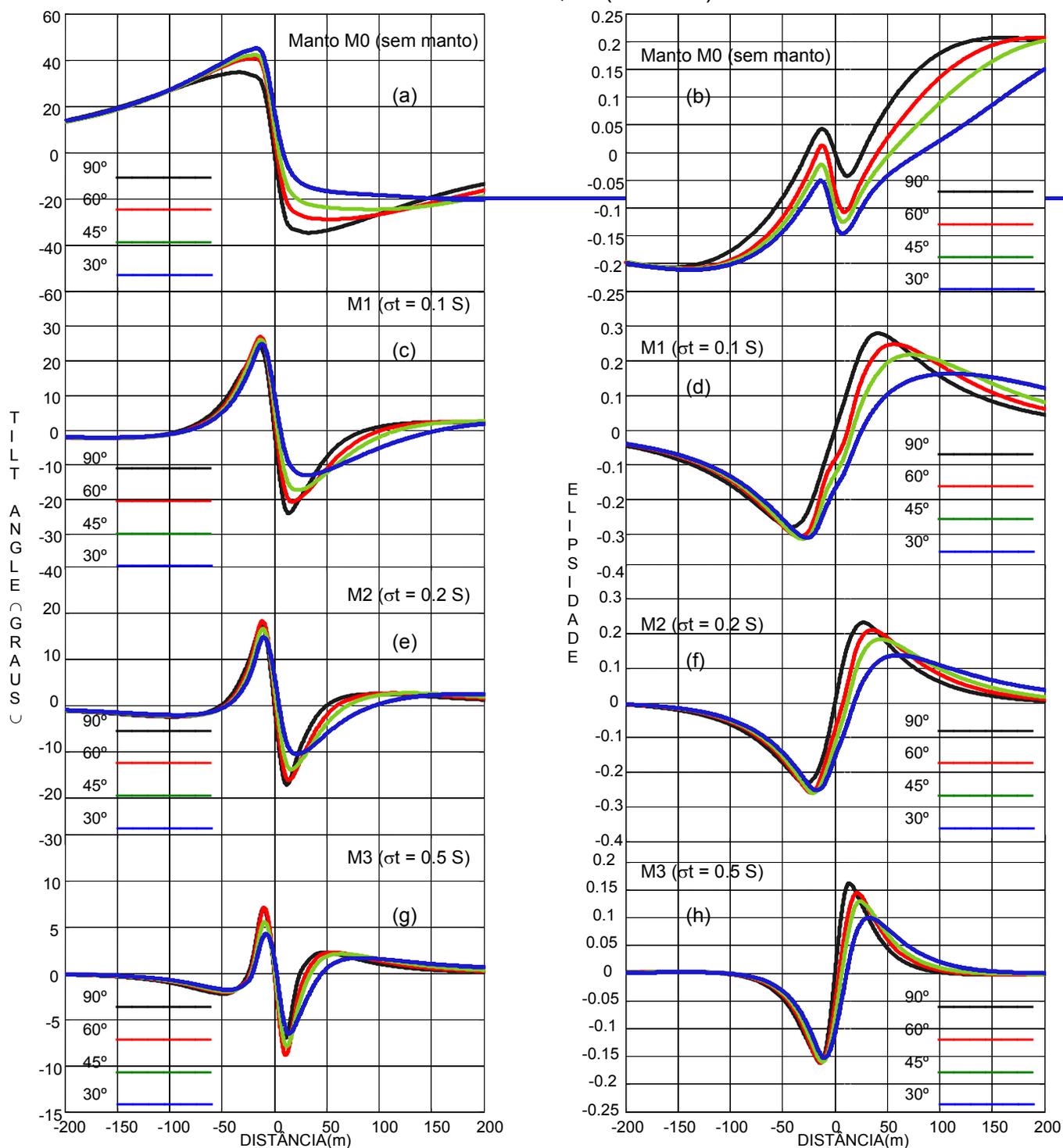


Fig 4.9 - Mudança das anomalias do *Tilt Angle* e da *Elipsoidade* com a variação do mergulho para o Corpo C3 ($\sigma t = 5$ S) localizado a uma profundidade de 5 m

MANTO GALVÂNICO

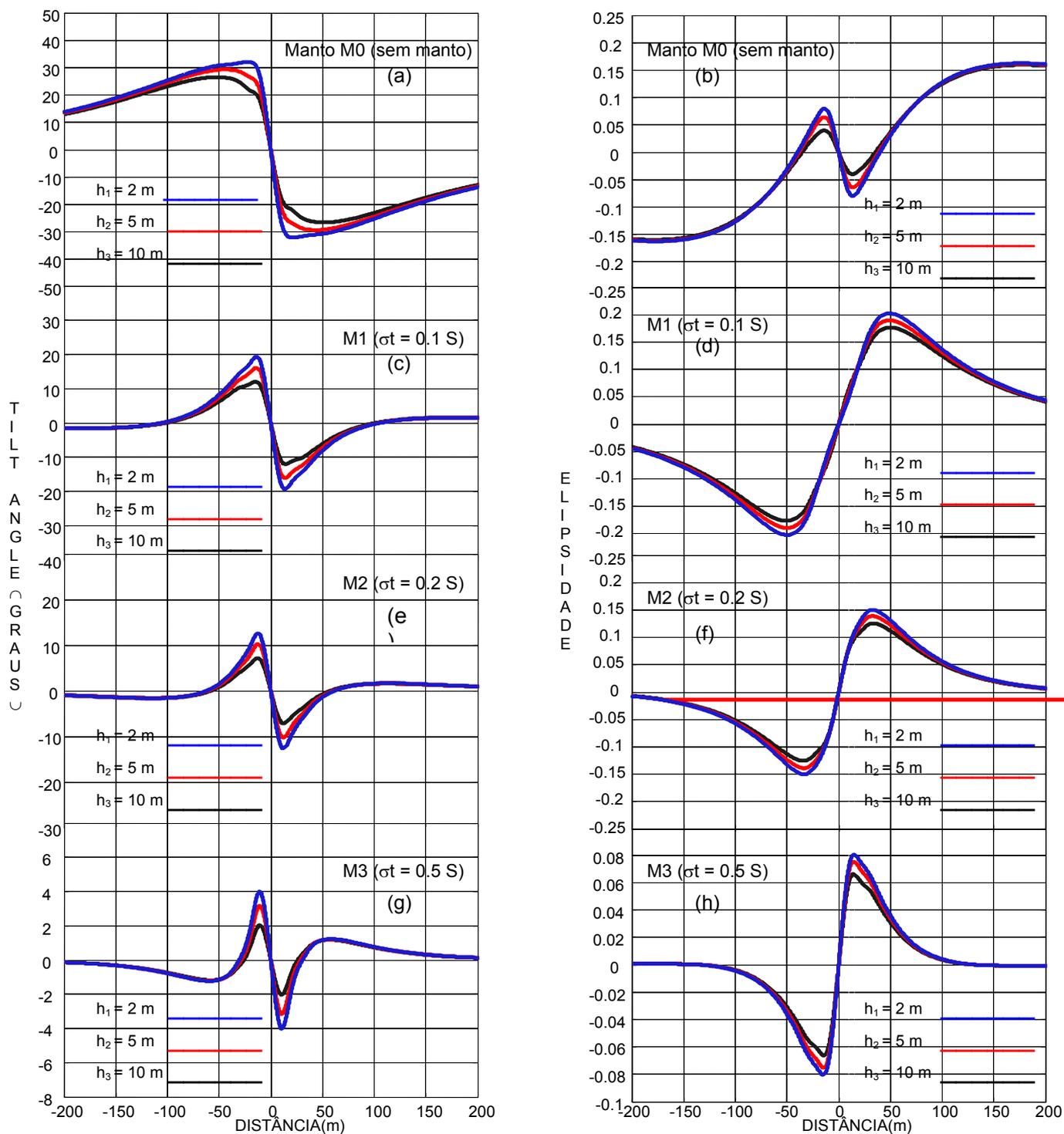
EFEITO DA PROFUNDIDADE DO CORPO, $C1(\sigma t = 1 \text{ S})$ e $\theta = 90^\circ$ 

Fig 4.10 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da profundidade do corpo $C1(\sigma t = 1 \text{ S})$ com inclinação $\theta = 90^\circ$

MANTO GALVÂNICO
EFEITO DA PROFUNDIDADE DO CORPO, C3 ($\sigma_t = 5$ S) e $\theta = 90^\circ$

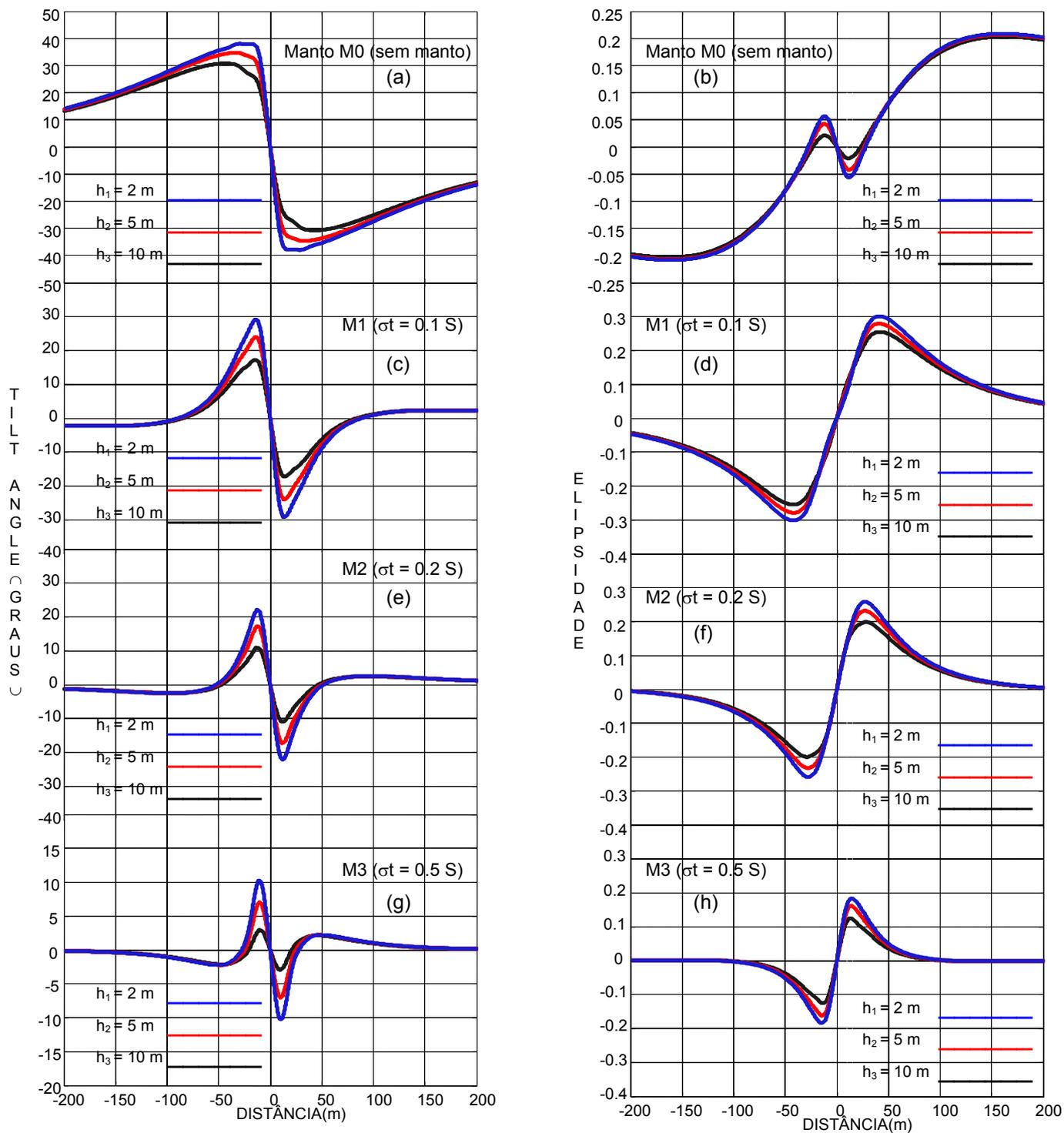


Fig 4.11 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da profundidade do corpo C3 ($\sigma_t = 5$ S) com inclinação $\theta = 90^\circ$

MANTO GALVÂNICO
EFEITO DA PROFUNDIDADE DO CORPO, $C1(\sigma t = 1 \text{ S})$ e $\theta = 45^\circ$

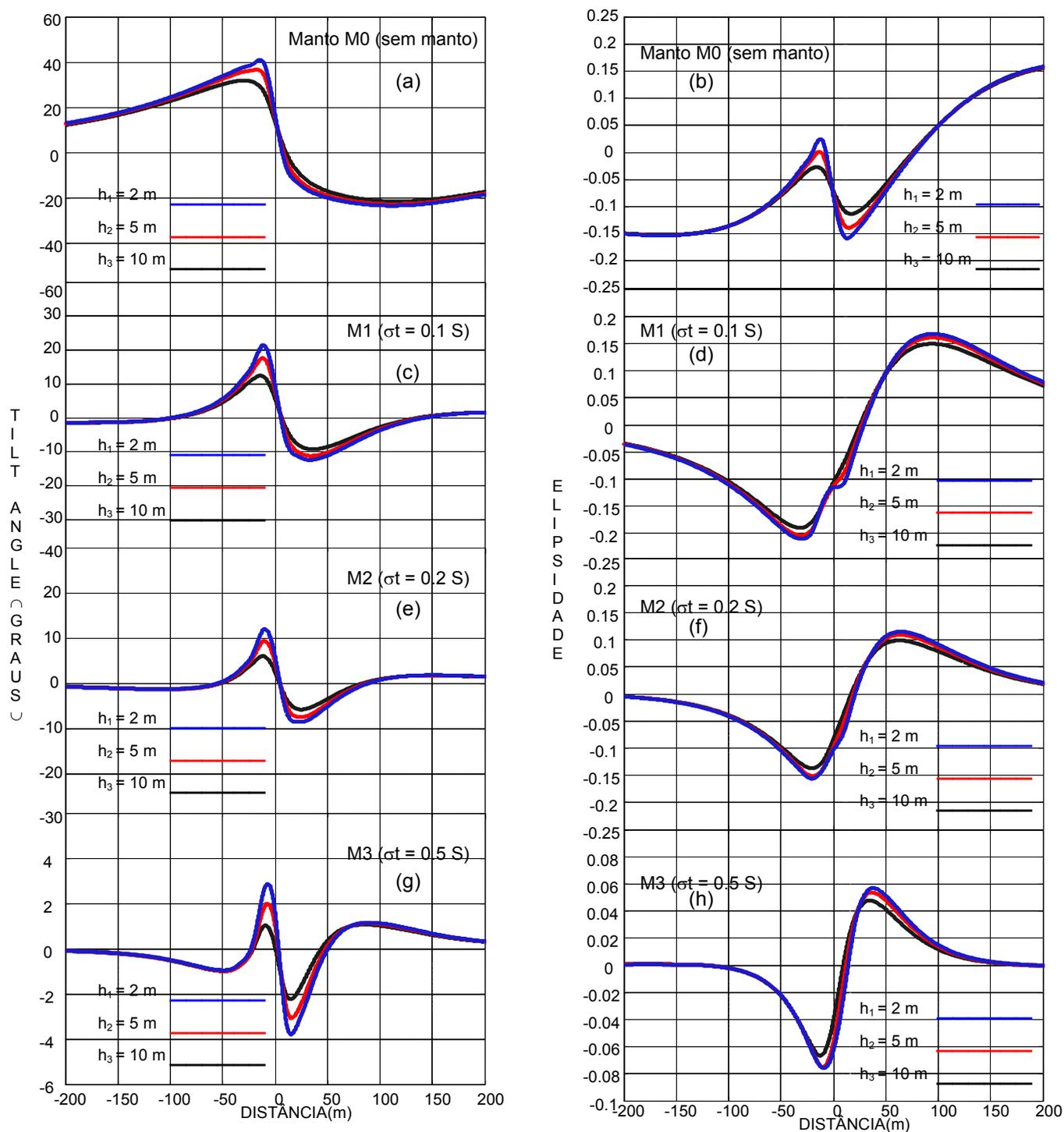


Fig 4.12 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da profundidade do corpo $C1(\sigma t = 1 \text{ S})$ com inclinação $\theta = 45^\circ$

MANTO GALVÂNICO
EFEITO DA PROFUNDIDADE DO CORPO, $C3(\sigma t = 5 \text{ S})$ e $\theta = 45^\circ$

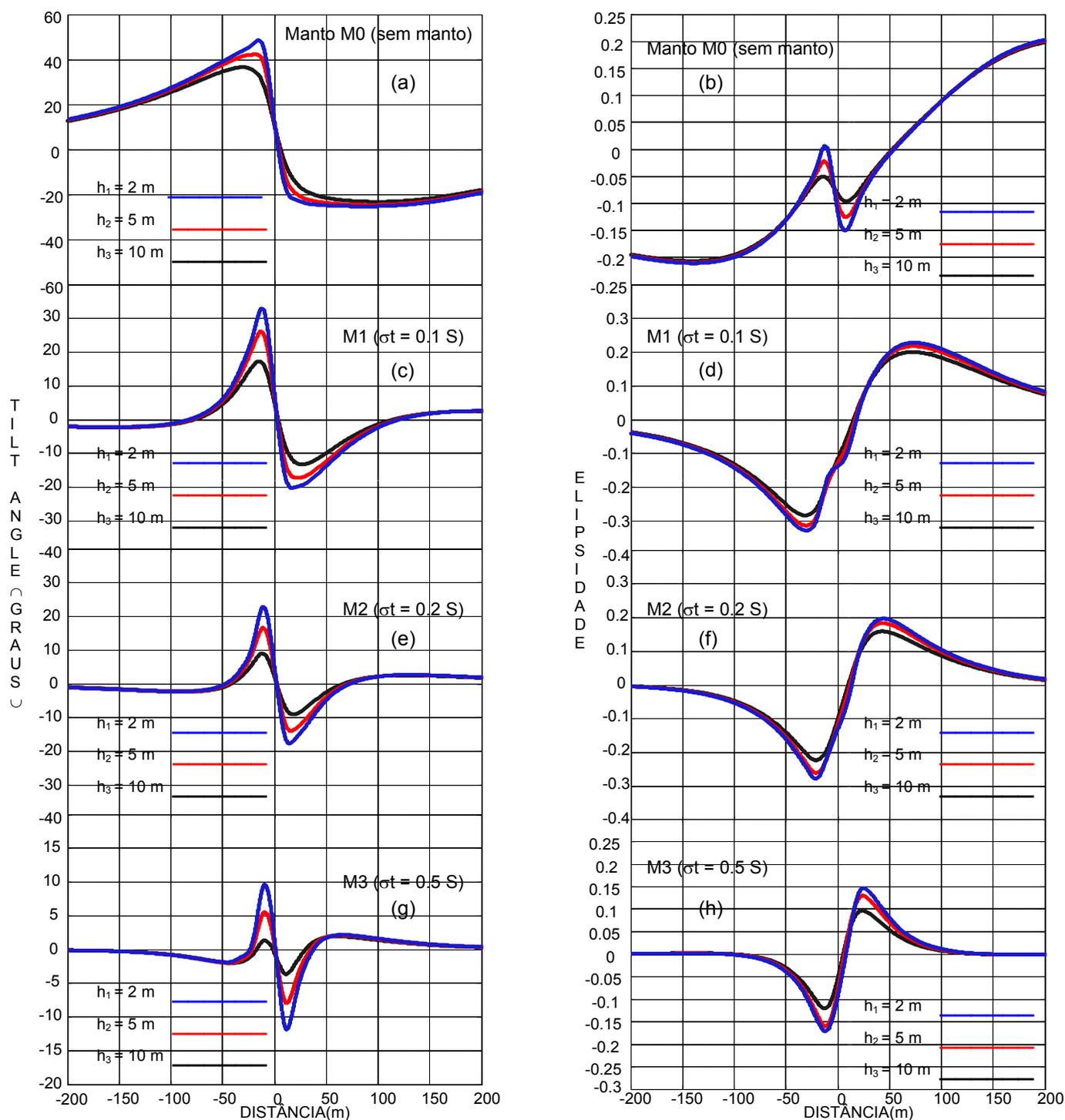


Fig 4.13 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da profundidade do corpo $C3(\sigma t = 5 \text{ S})$ com inclinação $\theta = 45^\circ$

5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MANTO GALVÂNICO

Os efeitos do manto de intemperismo nas anomalias VLF são analisados em relação à ausência do manto. Para esta análise são utilizados valores pico-a-pico por serem considerados os mais apropriados (*Parasnis, 1971*) os efeitos foram estudados variando-se os parâmetros de resposta do manto e do corpo (Tabelas 4.1 e 4.2) para diferentes mergulhos ($\theta = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ e 30°) e diferentes profundidades do topo do corpo ($h_c = 2; 5$ e 10 m).

Com o objetivo de estudar os efeitos relativos ao mergulho do corpo utilizou-se o coeficiente de assimetria para análise dos resultados. O coeficiente de assimetria (CAS) foi definido como sendo a razão entre o valor absoluto do menor (ou igual) pico e o valor absoluto do maior (ou igual) pico. Os efeitos da profundidade do topo do condutor foram analisados com a utilização dos valores pico-a-pico dos perfis.

5.1 – ANÁLISE DA CONDUTÂNCIA DO MANTO

A figura 5.1 mostra a variação pico-a-pico das anomalias de *Tilt Angle* e *Elipsidade* com a condutância do manto para o corpo C1($\sigma = 1$ S) localizado a uma profundidade de 5 m e 10 m mergulhando com os ângulos de $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ e 30° .

Para as curvas *Tilt Angle* observa-se que estando o corpo nas inclinações de $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ e 30° a uma profundidade de 5 m e 10 m os valores pico-a-pico das anomalias diminuem com o aumento da condutância do manto (Figuras 5.1a e 5.1b).

Observa-se que na presença do manto de condutância de 0.2 S a variação pico-a-pico de *Tilt Angle* nas inclinações de 90° e 60° estão muito próximas (Figura 5.1a), já na figura 5.1b essa aproximação se dá nas inclinações de $60^\circ, 45^\circ$ e 30° com a presença dos mantos de condutância de 0.2 e 0.5 S.

Estando o corpo localizado a uma profundidade de 5 m e 10 m, os valores pico-a-pico da *Elipsidade* diminuem com o aumento da condutância do manto (Figuras 5.1c e 5.1d).

MANTO GALVÂNICO EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO MANTO

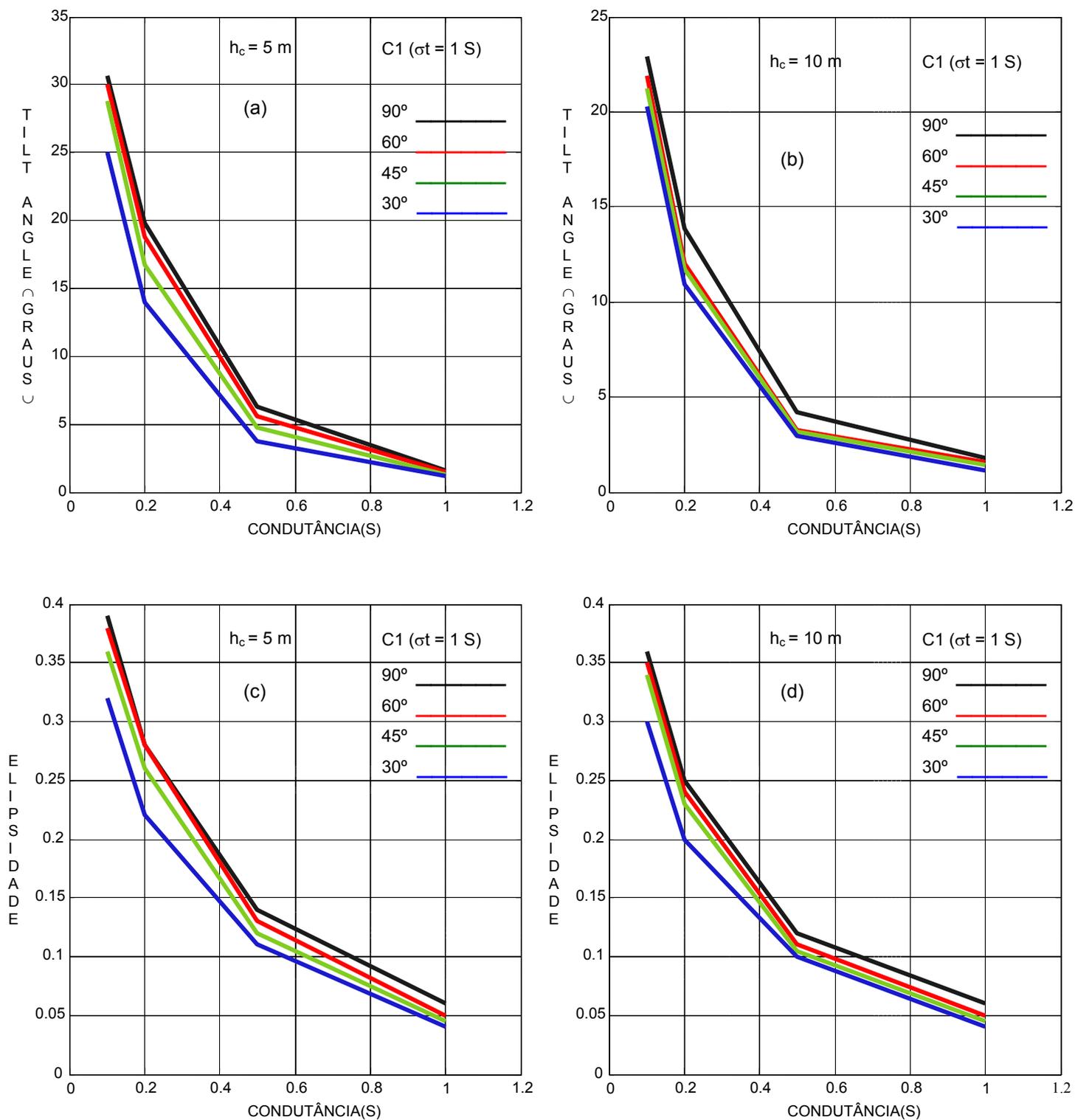


Fig 5.1- mudança das anomalias pico-a-pico com a variação da condutância do manto para o corpo $C1(\sigma = 1\text{ S})$, localizado nas profundidades de 5 m e 10 m

5.2 – EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO CORPO

As Figuras 5.2 e 5.3 mostram a variação pico-a-pico das anomalias de *Tilt Angle* e de *Elipsidade* com a variação da condutância dos corpos. Na presença dos mantos M0, M1, M2 e M3, à medida que se aumenta a condutância do corpo, aumenta as anomalias do *Tilt Angle*, já no manto M4 esse aumento é mais suave (Figuras 5.2a , b, c e d). À medida que diminuimos o mergulho do corpo este crescimento das anomalias torna-se mais lento.

Os valores pico-a-pico de *Elipsidade* (Figura 5.3) aumenta à medida que aumento à condutância do corpo, observa-se que na presença dos mantos M3 e M4 os valores de *Elipsidade* pico-a-pico dos corpos são menores, em relação ao M0 (sem manto) .

5.3 EFEITOS DO MERGULHO DO CORPO

A Figura 5.4 mostra a variação do coeficiente de assimetria com o mergulho do condutor, calculado para perfis de *Tilt Angle* e de *Elipsidade*. Observa-se que para uma profundidade particular o coeficiente de assimetria aumenta a medida em que aumentamos o mergulho do condutor (Figura 5.4).

Para os valores do coeficiente de assimetria calculados nos perfis de *Tilt Angle*, observou-se a uma profundidade 10 m que o valor do coeficiente é o menor valor na presença do manto M3 (Figura 5.4b).

Para os valores do coeficiente de assimetria calculados nos perfis de *Elipsidade*, observa-se também que o manto e a profundidade têm o efeito de diminuir o valor do coeficiente de assimetria (Figura 5.4d).

MANTO GALVÂNICO EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO CORPO

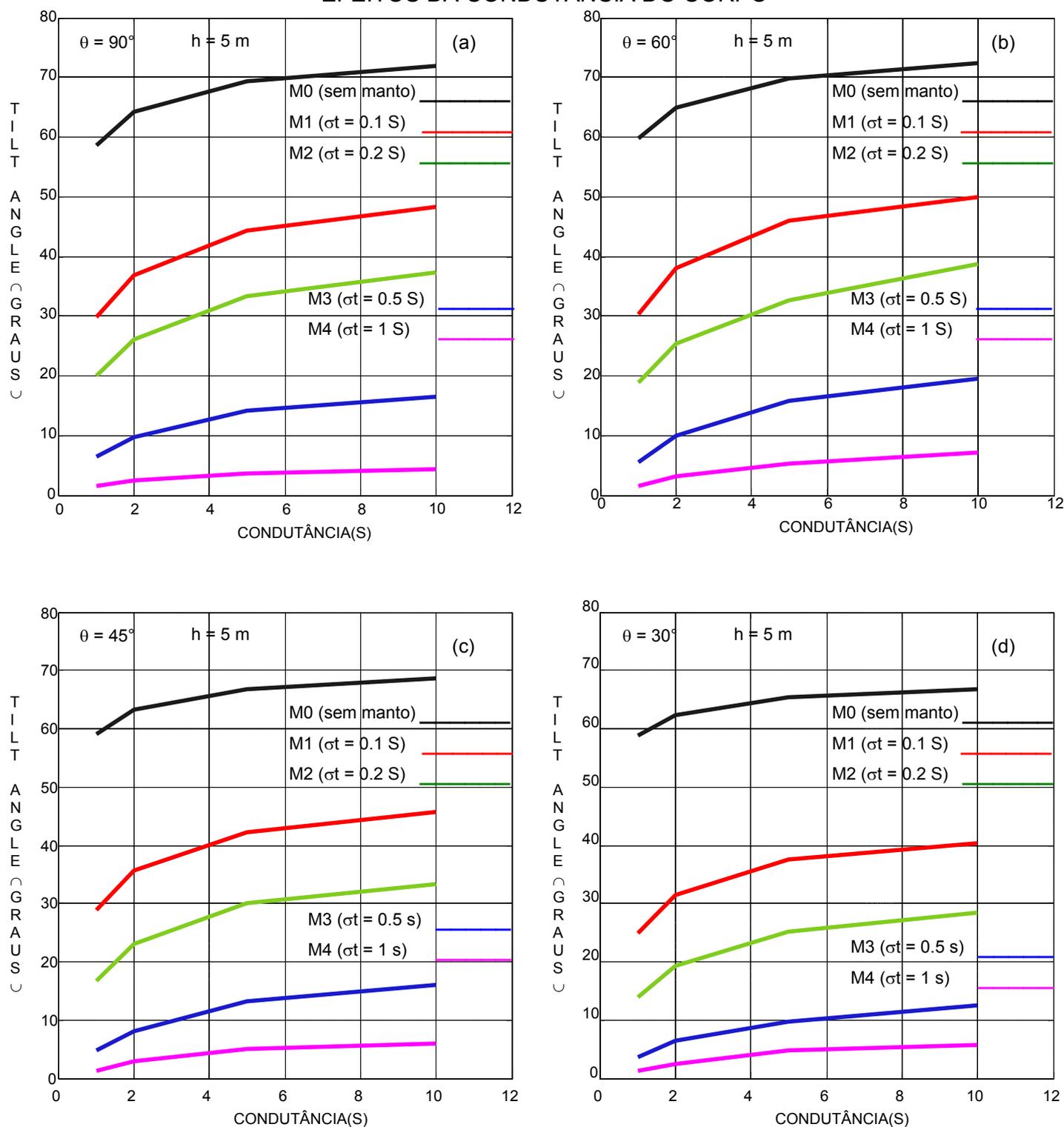


Fig 5.2 – Variação dos valores pico-a-pico de Tilt Angle com a condutância do corpo a uma profundidade de 5 m para $\theta = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ e 30° , na presença dos mantos M0(sem manto), M1, M2, M3 e M4

MANTO GALVÂNICO EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO CORPO

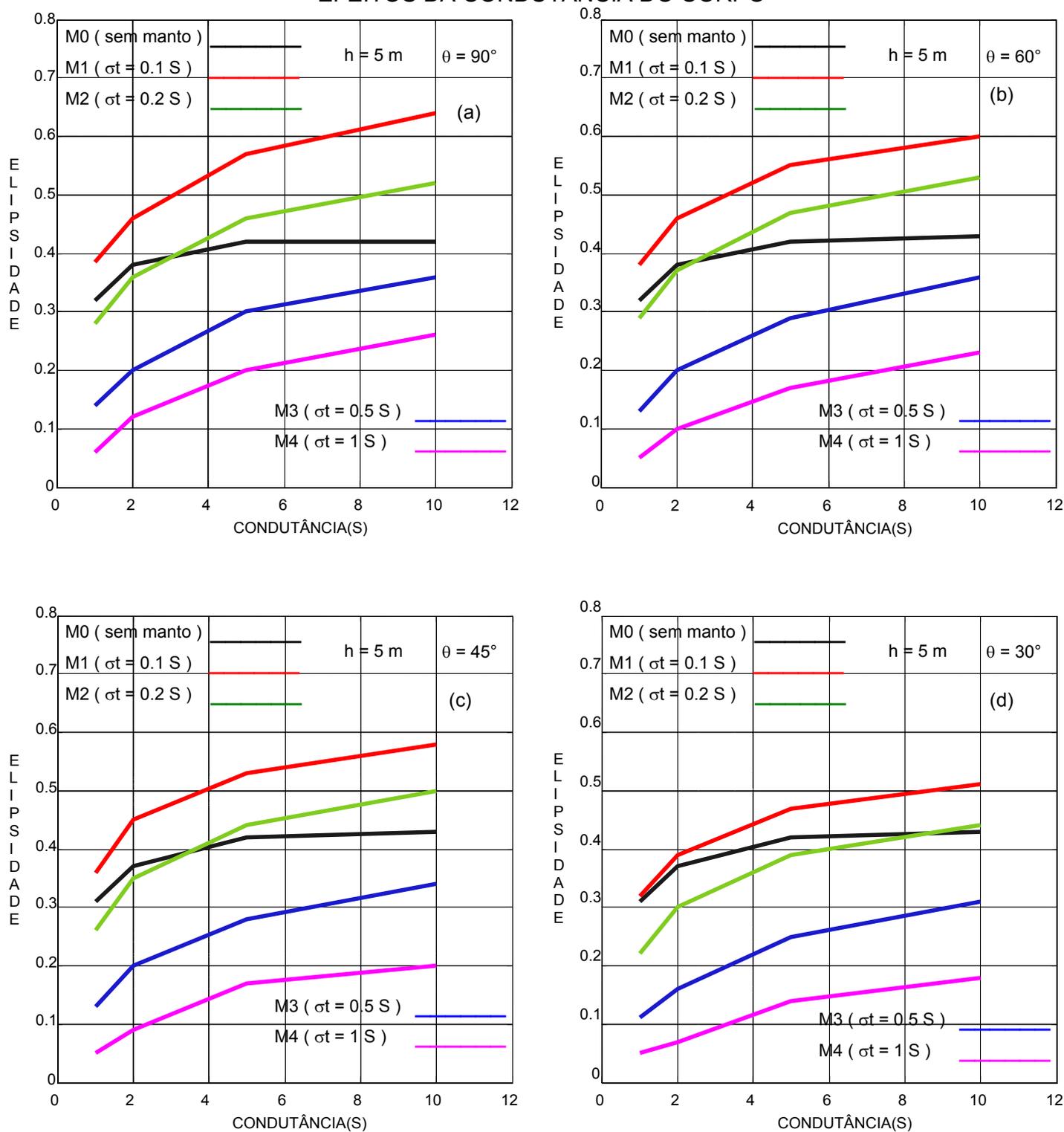


Fig 5.3 – Variação dos valores pico-a-pico de Elipsidade com a condutância do corpo a uma profundidade de 5 m para $\theta = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ e 30° , na presença dos mantos M0(sem manto), M1, M2, M3 e M4

MANTO GALVÂNICO

EFEITOS DO MERGULHO DO CORPO

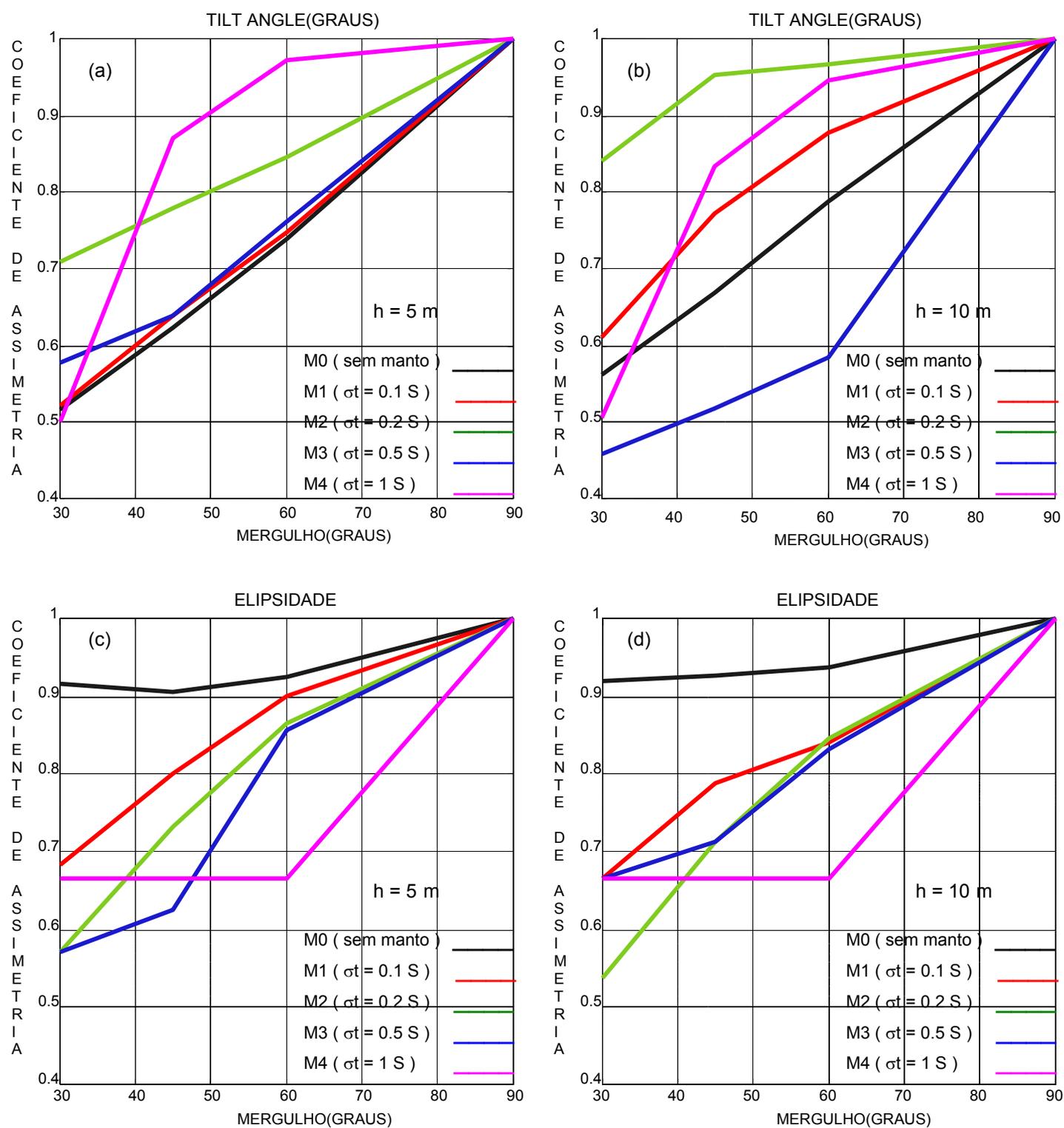


Fig 5.4- Variação do coeficiente de assimetria com o mergulho do corpo C1($\sigma = 1$ S)

5.4 – EFEITOS DA PROFUNDIDADE

As Figuras 5.5 e 5.6 mostram como a variação da profundidade do topo do condutor afeta os valores pico-a-pico das anomalias. Como era esperado, para todos os ângulos de mergulho o aumento da profundidade do topo do condutor tem o efeito de diminuir o valor das anomalias tanto de *Tilt Angle* quanto de *Elipsidade*.

Para o *Tilt Angle*, verifica-se que os valores pico-a-pico dos condutores com os mantos M1, M2, M3 e M4 são bem menores quando comparados ao manto M0 (Figura 5.5).

Para a *Elipsidade*, observa-se que na diminuição do mergulho, as respostas obtidas sem manto começam a diminuir em relação àquela tomada na presença do manto M1. Este efeito foi verificado em toda faixa de profundidade trabalhada. A diminuição do mergulho do condutor causa também um decaimento mais suave nas respostas E.M. do condutor à medida que o corpo torna-se mais profundo (Figura 5.6).

5.5 – GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS

Através de diagramas de *Argand* (Figuras 5.7 a 5.14) resumiu-se grande parte dos efeitos referidos anteriormente, onde os valores pico-a-pico de *Tilt Angle* e de *Elipsidade* são plotados para vários parâmetros de resposta e profundidade do corpo. Para confecção de cada diagrama também foram mantidos fixos o mergulho do corpo e o parâmetro de resposta do manto.

Estando o corpo na posição vertical (Figuras 5.7 e 5.8) a presença do manto fazem com que as anomalias sofram uma rotação de fase no sentido anti-horário à medida que crescem o parâmetro de resposta do manto, (observe que o ângulo de rotação é maior quanto maior for o parâmetro de resposta do corpo).

Estando o corpo com os ângulos de mergulho de 60°, 45° e 30°, observaram-se os mesmos efeitos verificados com o corpo na posição vertical, porém com a diminuição do ângulo, nota-se uma atenuação das anomalias. Esta atenuação é mais evidenciada para os corpos menos condutivos (Figuras 5.9 a 5.14).

MANTO GALVÂNICO EFEITOS DA PROFUNDIDADE

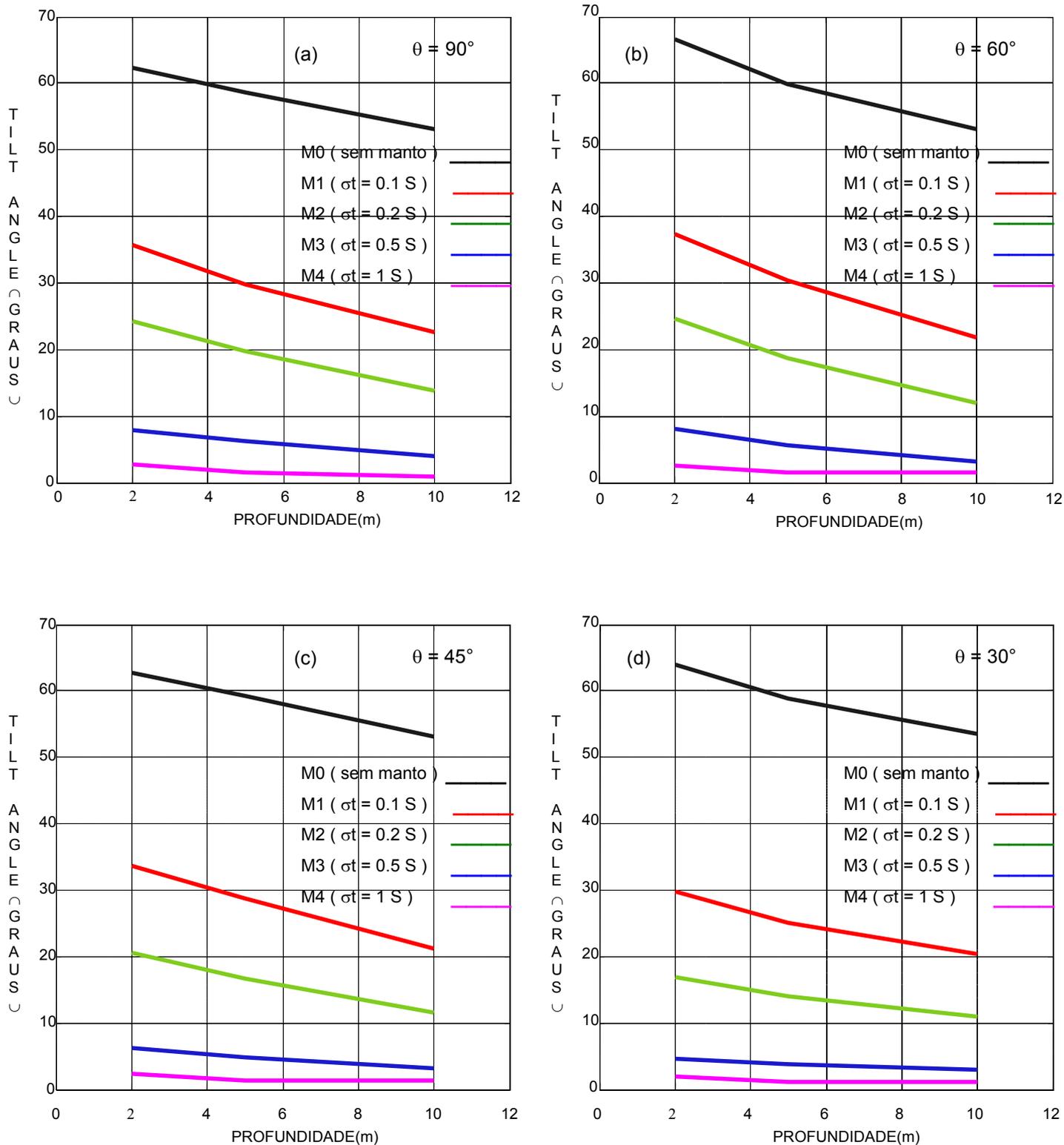


Fig 5.5 – Variação dos valores pico-a-pico de Tilt Angle com a profundidade do topo do corpo C1($\sigma = 1 S$)

MANTO GALVÂNICO EFEITOS DA PROFUNDIDADE

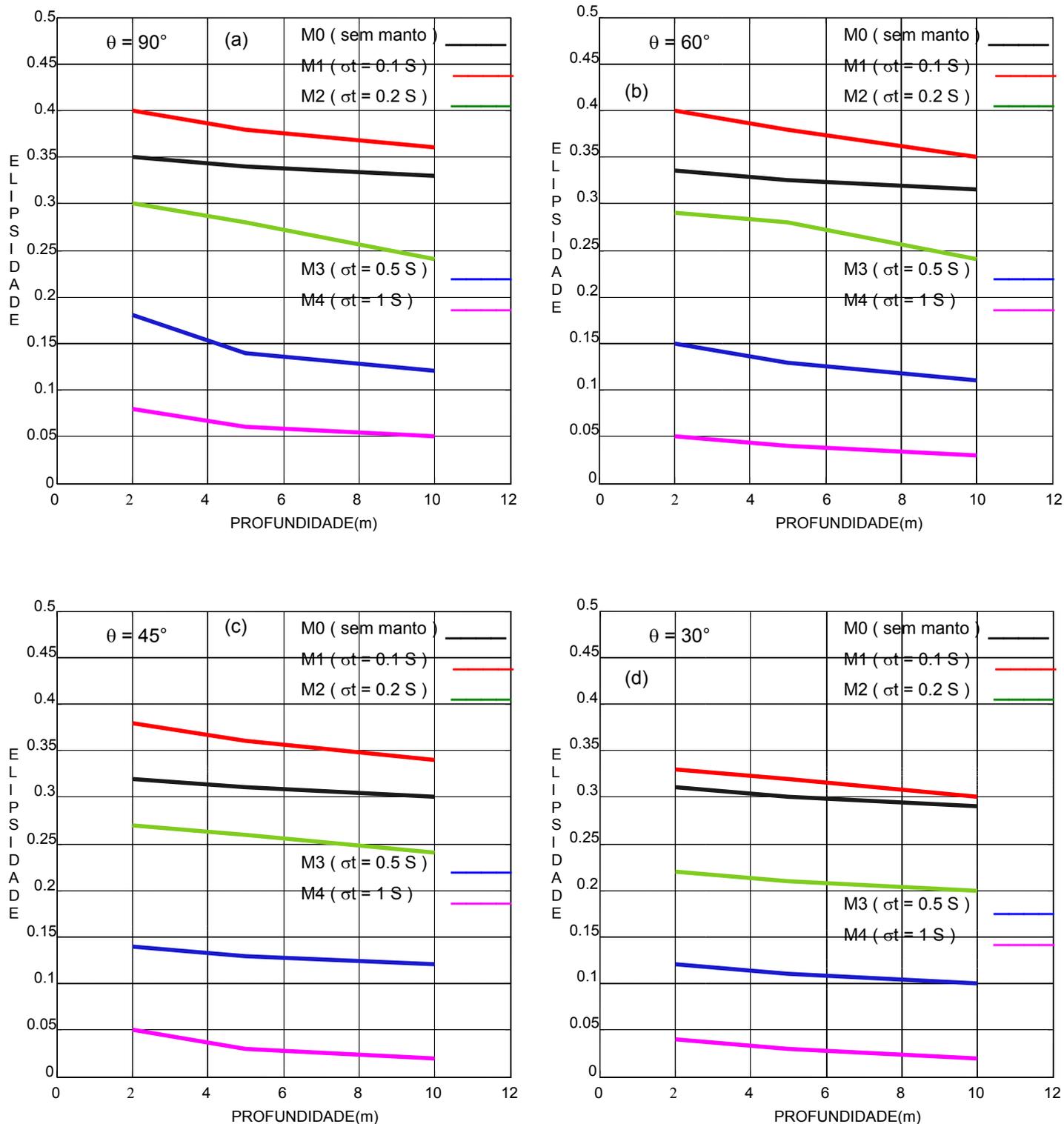


Fig 5.6 – Variação dos valores pico-a-pico de Elipsidade com a profundidade do topo do corpo C1($\sigma = 1 S$)

MANTO GALVÂNICO
GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS, $\theta = 90^\circ$

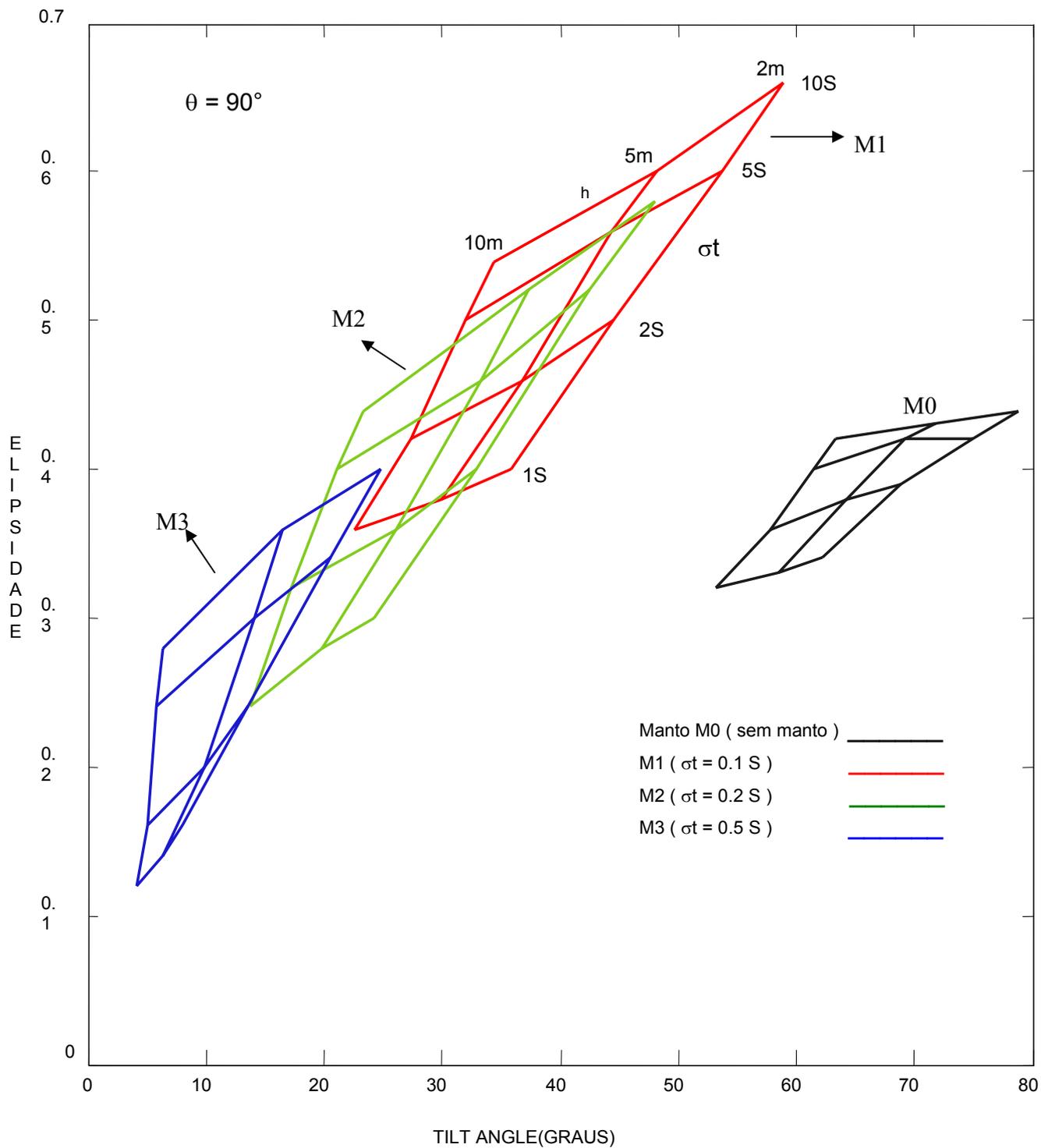


Fig 5.7 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 90^\circ$

MANTO GALVÂNICO
GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS, $\theta = 60^\circ$

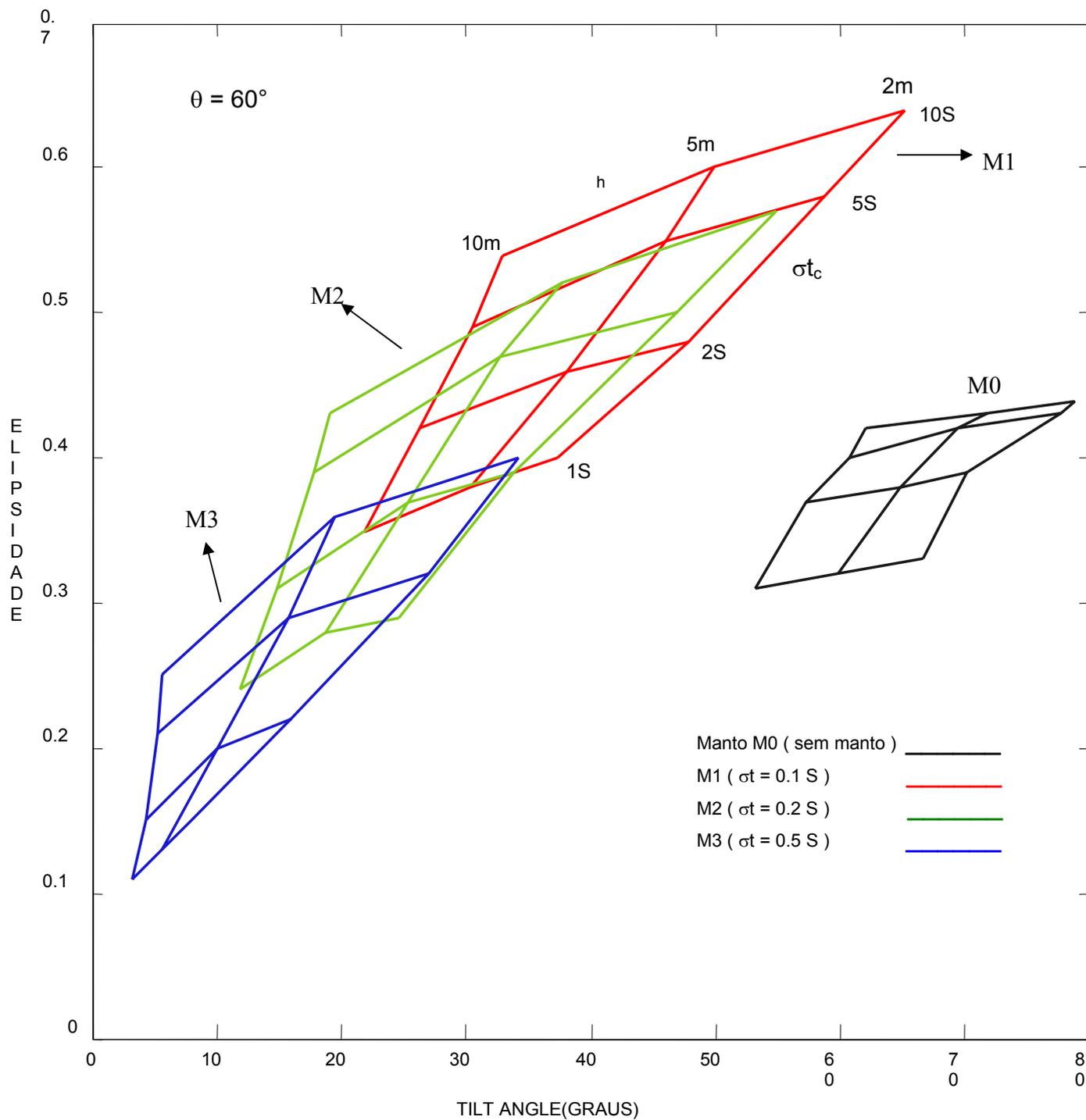


Fig 5.8 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 60^\circ$

MANTO GALVÂNICO
GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS, $\theta = 45^\circ$

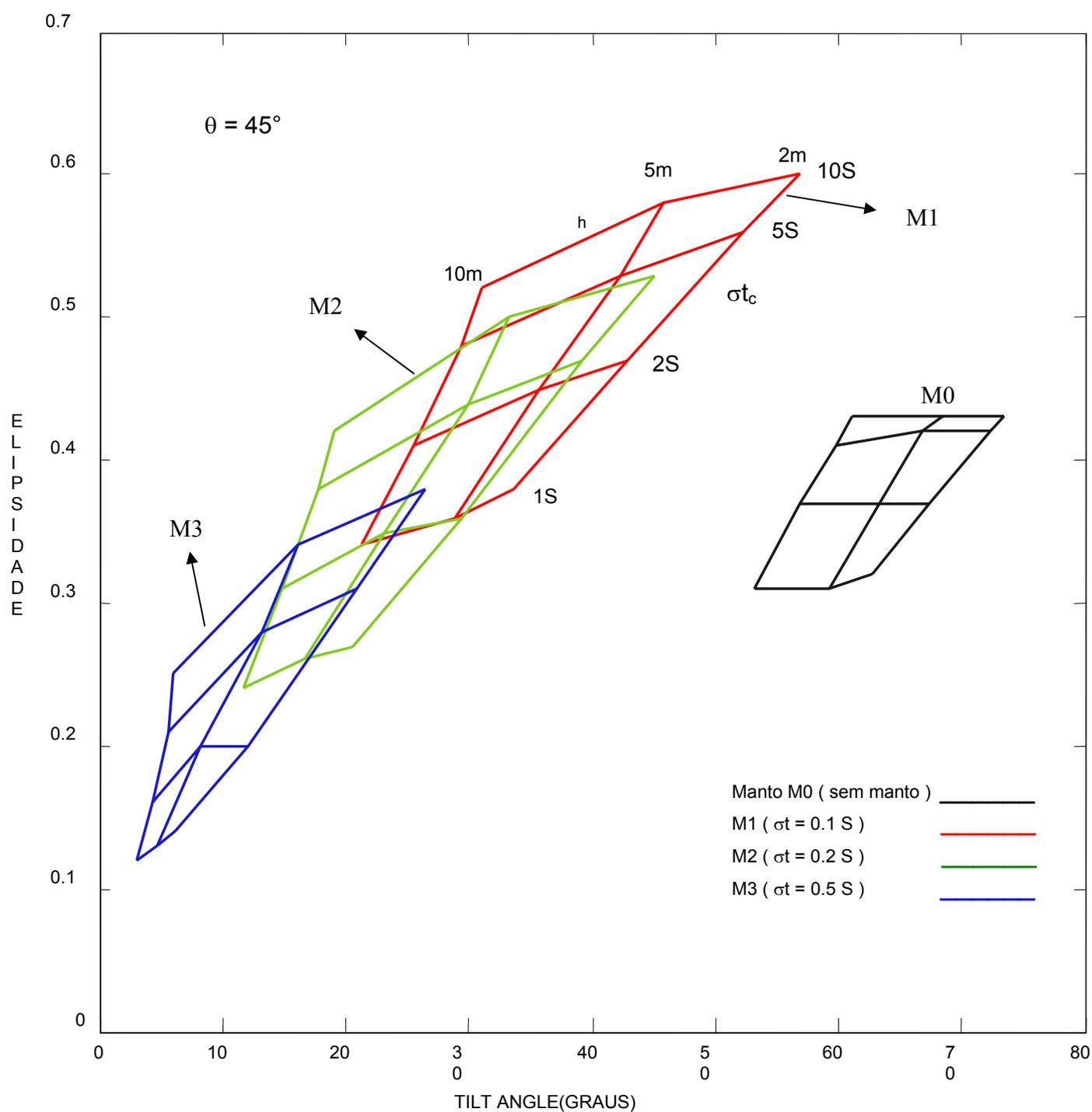


Fig 5.9 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 45^\circ$

MANTO GALVÂNICO
GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS, $\theta = 30^\circ$

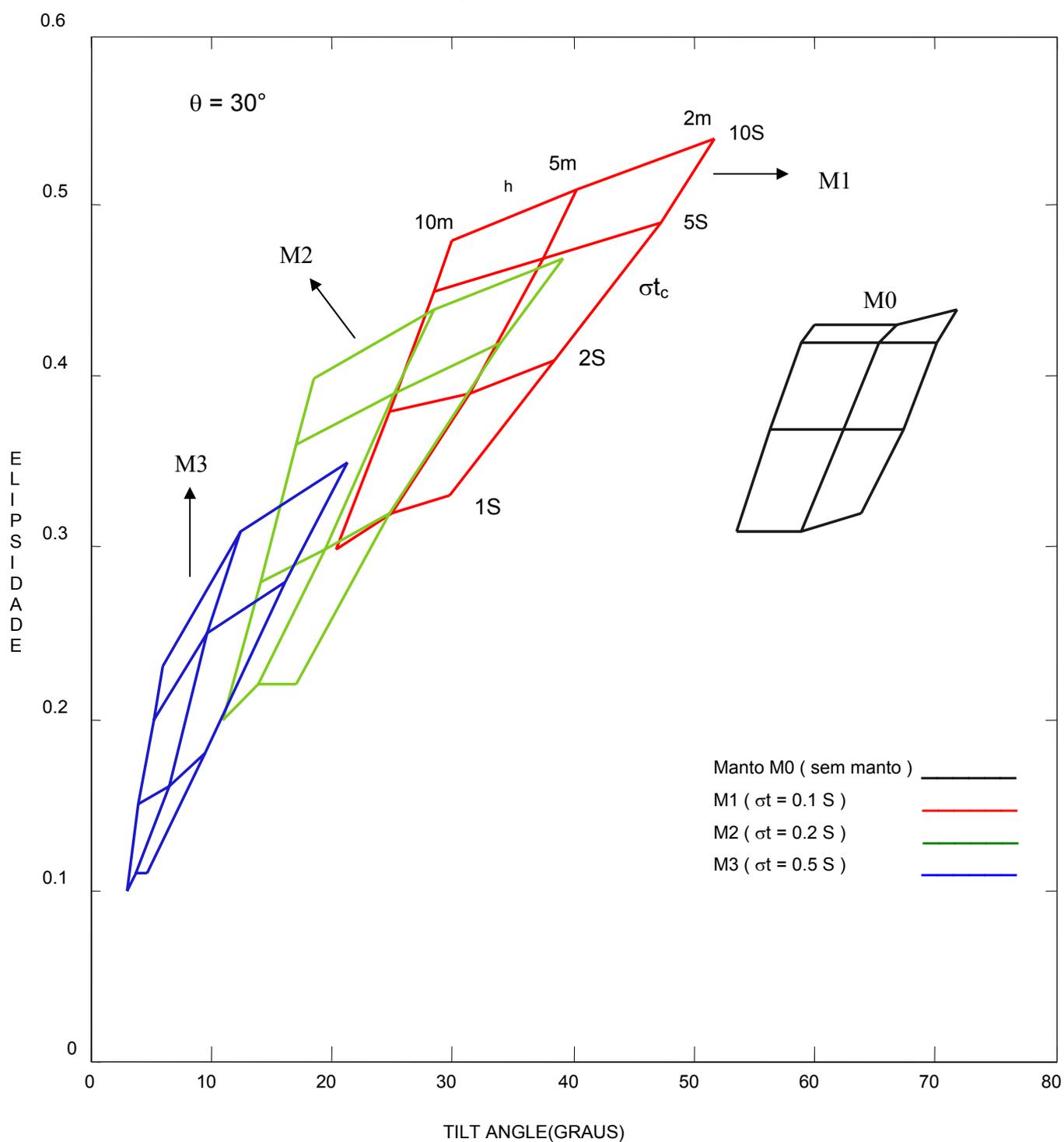


Fig 5.10 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 30^\circ$

6 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO MANTO INDUTIVO:

Similar ao capítulo 4, onde foram discutidos efeitos de manto galvânico, iremos agora descrever nesse capítulo os efeitos do manto indutivo sobre anomalias VLF de corpos tabulares (semi-plano) inclinados. No caso de manto indutivo não ocorre o contato galvânico entre o manto e o corpo.

A apresentação dos resultados será realizada primeiramente com os efeitos de manto (seção 6.1) onde são mostrados perfis de *Tilt Angle* e de *Elipsidade* ilustrando os efeitos da condutância dos mantos M0(sem manto), M1($\sigma t=0.1S$), M2($\sigma t=0.2S$), M3($\sigma t=0.5S$) e M4($\sigma t=1S$) sobre as respostas VLF dos corpos C1($\sigma t=1S$), C2($\sigma t=2S$), C3($\sigma t=5S$) e C4($\sigma t=10S$) a uma profundidade de 20 m para mergulhos de 90°, 60°, 45° e 30°. Em segundo plano serão apresentados os efeitos da condutância dos condutores C1, C2, C3 e C4 (seção 6.2). Os efeitos são mostrados para os ângulos de mergulho ($\theta = 90^\circ$ e 45°), estando os corpos a uma profundidade de 20 m na presença dos mantos M0, M1, M2 e M4.

Na seção 6.3 apresentam-se os efeitos do mergulho do corpo sobre anomalias de *Tilt Angle* e de *Elipsidade*. Para este experimento utilizou-se os corpos C1($\sigma t = 1 S$) e C3($\sigma t = 5 S$), o qual foi colocado na profundidade de 20 m com mergulho $\theta = 90^\circ$, 60°, 45° e 30° na presença dos mantos M0, M1, M2 e M3.

Na seção 6.4 apresentam-se os efeitos da profundidade sobre anomalias de *Tilt Angle* e de *Elipsidade*, as quais foram obtidas variando-se a profundidade do topo do condutor C1 e C3 ($h_c = 15; 20$ e 25 m) mergulhando com os ângulos $\theta = 90^\circ$ e 45° na presença dos mantos M0, M1, M2 e M4.

6.1 – EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO MANTO INDUTIVO:

As figuras 6.1 a 6.4 mostram os efeitos de condutância do manto sobre respostas dos corpos C1($\sigma t=1S$), C2($\sigma t=2S$), C3($\sigma t=5S$) e C4($\sigma t=10S$) a uma profundidade de 20 m e diferentes mergulhos, na presença dos mantos M0(sem manto), M1($\sigma t=0.1S$), M2($\sigma t=0.2S$), M3($\sigma t=0.5S$) e M4($\sigma t=1S$).

Nas respostas de *Tilt Angle* e de *Elipsidade*, verifica-se que estando o corpo nas diversas inclinações (Figuras 6.1 a 6.4) as anomalias diminuem com o aumento da condutância dos mantos, M1 a M4.

Observou-se que o *Tilt Angle* dos mantos M3 e M4 são praticamente iguais (Figuras 6.1 a 6.4). Entretanto os efeitos dos mantos são mais drásticos nos perfis de *Elipsidade*. Os picos menores nas partes central dos perfis desaparecem na presença do manto e espaçamento entre os picos se estreitam, isso significa que a profundidade dos corpos será interpretado como mais raso.

6.2 – EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO CORPO

As figuras 6.5 e 6.6 ilustram perfis de *Tilt Angle* e de *Elipsidade* mostrando a variação das anomalias com a condutância dos corpos C1, C2, C3 e C4. Os efeitos são mostrados para os ângulos de mergulho 90° e 45°, estando os corpos a uma profundidade de 20 m na presença dos mantos M0, M1, M2 e M4.

Para essas situações, verificou-se que o aumento da condutância do corpo causa um crescimento no valor das anomalias de *Tilt Angle* e da *Elipsidade* (Figuras 6.5 e 6.6). Entretanto observou-se que é bastante difícil fazer a distinção entre os perfis de *Tilt Angle* para os corpos mais condutivos. Nota-se que os perfis de *Tilt Angle* para os corpos C3 e C4 são praticamente iguais (Figuras 6.5 e 6.6).

Nos perfis de *Elipsidade* relacionado ao manto M1 (Figura 6.5d), e com os corpos na posição vertical, observou-se um aumento suave nos perfis em relação ao manto M0 (Figura 6.5b). Com o aumento da condutância do manto M4 (Figura 6.5h) os perfis dos corpos C3 e C4 ficam bastante difíceis de ser identificados separadamente, além do mais se nota que o corpo C1 possui a menor resposta pico-a-pico (Figura 6.6h).

Ao colocarmos os corpos mergulhados com o ângulo 45° e abaixo do manto M2 (manto indutivo), observa-se que os picos à direita tendem a ficar igual para os corpos mais condutivos, enquanto que os picos à esquerda tendem a diferenciar os corpos de condutividade distintos (Figura 6.6f), já no manto M4 observa-se que os picos à direita e à esquerda dos corpos mais condutivos são praticamente iguais (Figura 6.6h)

MANTO INDUTIVO

EFEITO DE CONDUTÂNCIA DO MANTO, $\theta = 90^\circ$

Manto M0 (sem manto) _____ Manto M1 ($\sigma = 0.1 \text{ S}$) _____ Manto M2 ($\sigma = 0.2 \text{ S}$) _____
 Manto M3 ($\sigma = 0.5 \text{ S}$) _____ Manto M4 ($\sigma = 1 \text{ S}$) _____, $D = 20 \text{ m}$

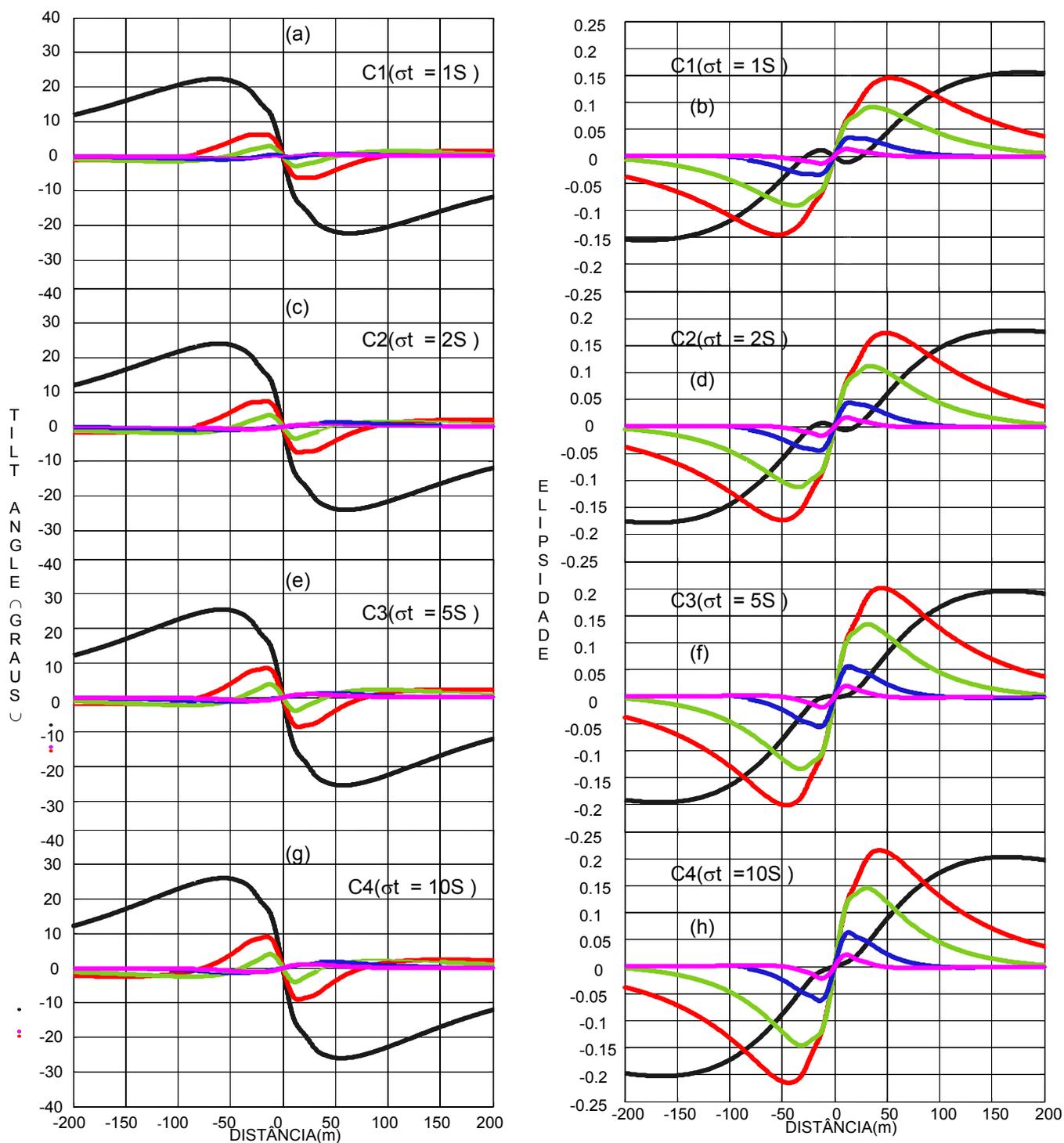


Fig 6.1 - Mudança da resposta do Tilt Angle e da Elipsidade com a variação da Condutância do Manto

MANTO INDUTIVO

EFEITO DE CONDUTÂNCIA DO MANTO, $\theta = 60^\circ$

Manto M0 (sem manto) _____ Manto M1 ($\sigma t = 0.1 S$) _____ Manto M2 ($\sigma t = 0.2 S$) _____
 Manto M3 ($\sigma t = 0.5 S$) _____ Manto M4 ($\sigma t = 1 S$) _____, $D = 20 m$

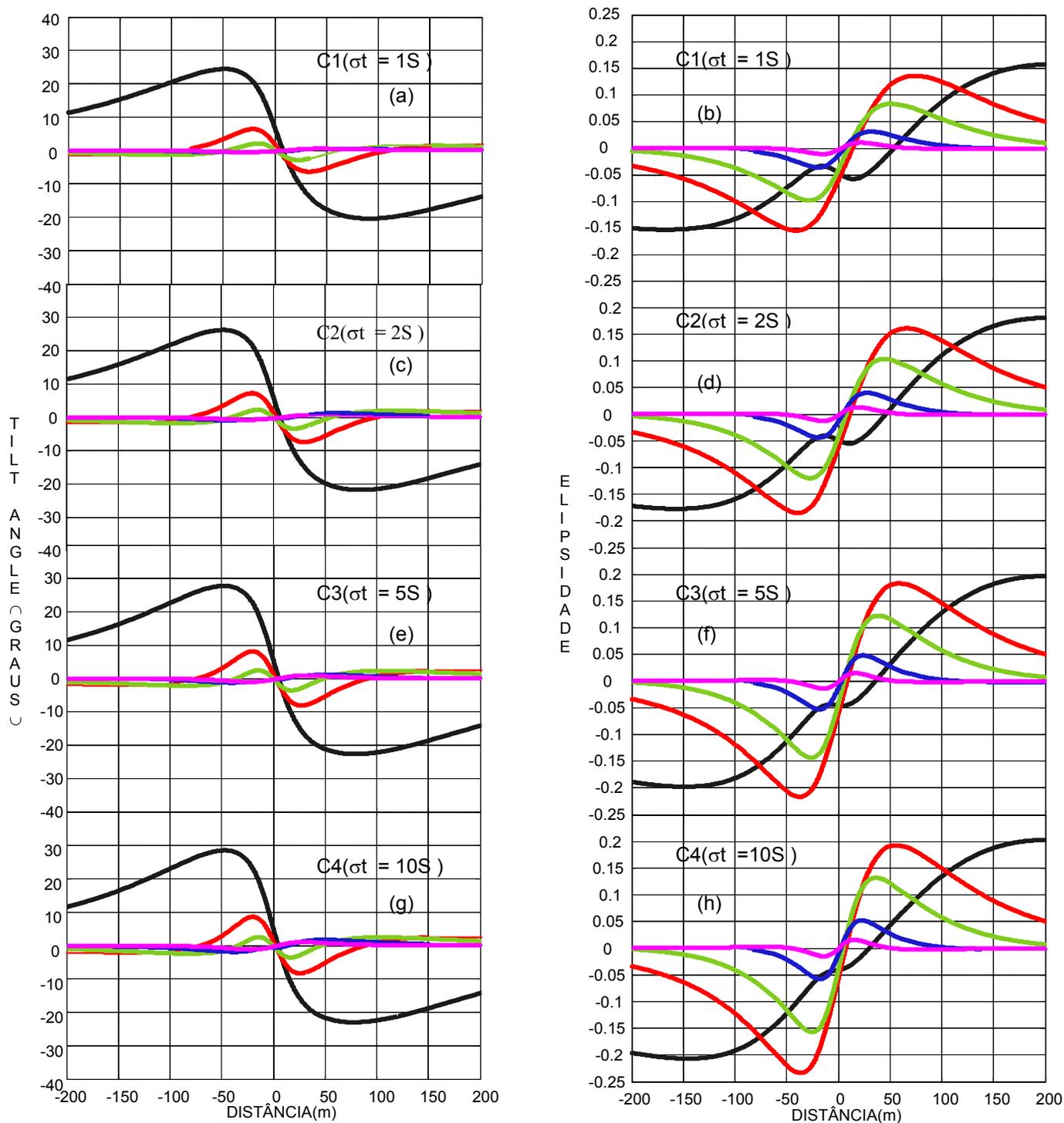


Fig 6.2 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da Condutância do Manto

MANTO INDUTIVO

EFEITO DE CONDUTÂNCIA DO MANTO, $\theta = 45^\circ$

Manto M0 (sem manto) _____ Manto M1 ($\sigma = 0.1 \text{ S}$) _____ Manto M2 ($\sigma = 0.2 \text{ S}$) _____
 Manto M3 ($\sigma = 0.5 \text{ S}$) _____ Manto M4 ($\sigma = 1 \text{ S}$) _____, $D = 20 \text{ m}$

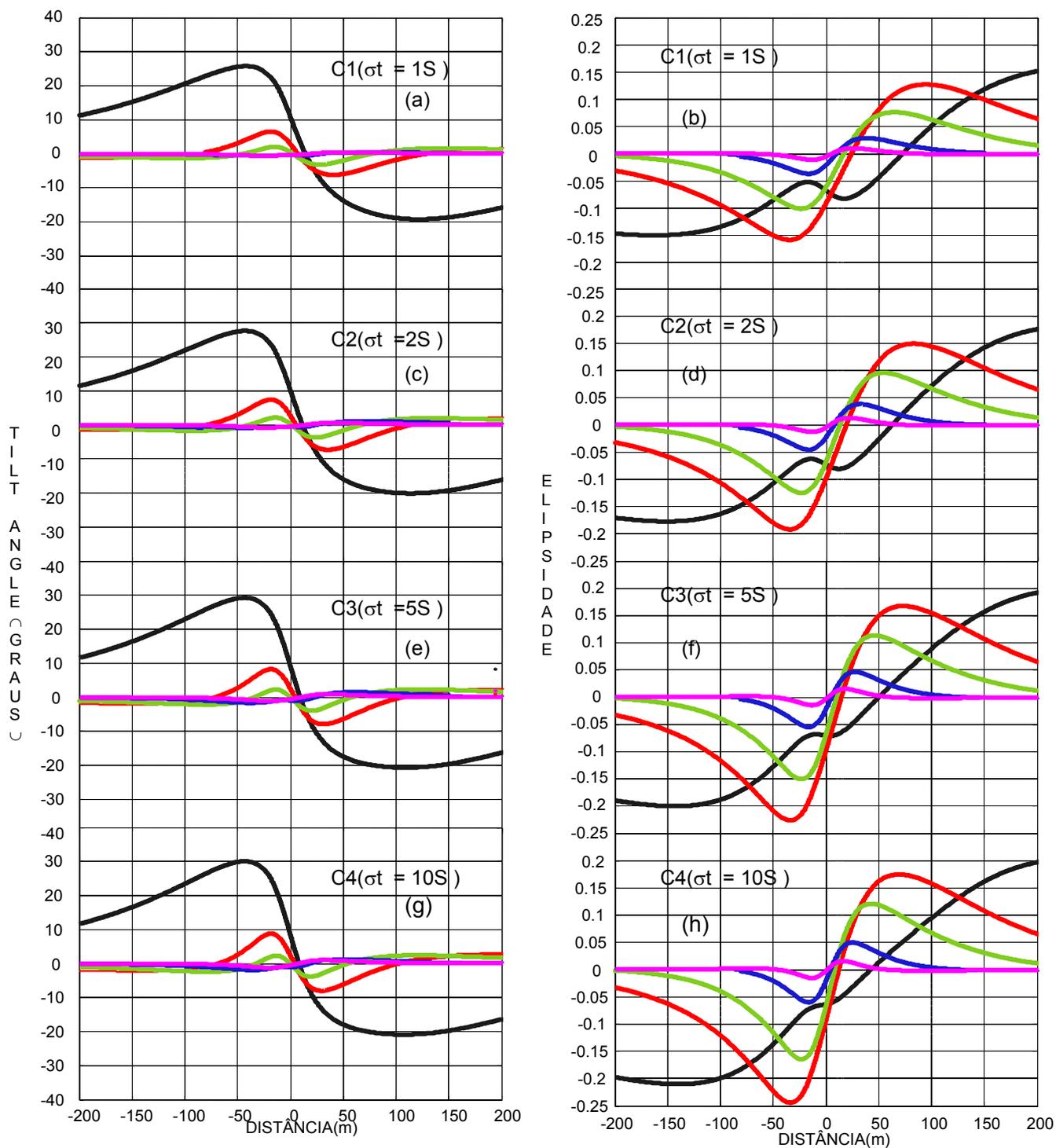


Fig 6.3 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da Condutância do Manto

MANTO INDUTIVO

EFEITO DE CONDUTÂNCIA DO MANTO, $\theta = 30^\circ$

Manto M0 (sem manto) _____ Manto M1 ($\sigma = 0.1 \text{ S}$) _____ Manto M2 ($\sigma = 0.2 \text{ S}$) _____
 Manto M3 ($\sigma = 0.5 \text{ S}$) _____ Manto M4 ($\sigma = 1 \text{ S}$) _____, $D = 20 \text{ m}$

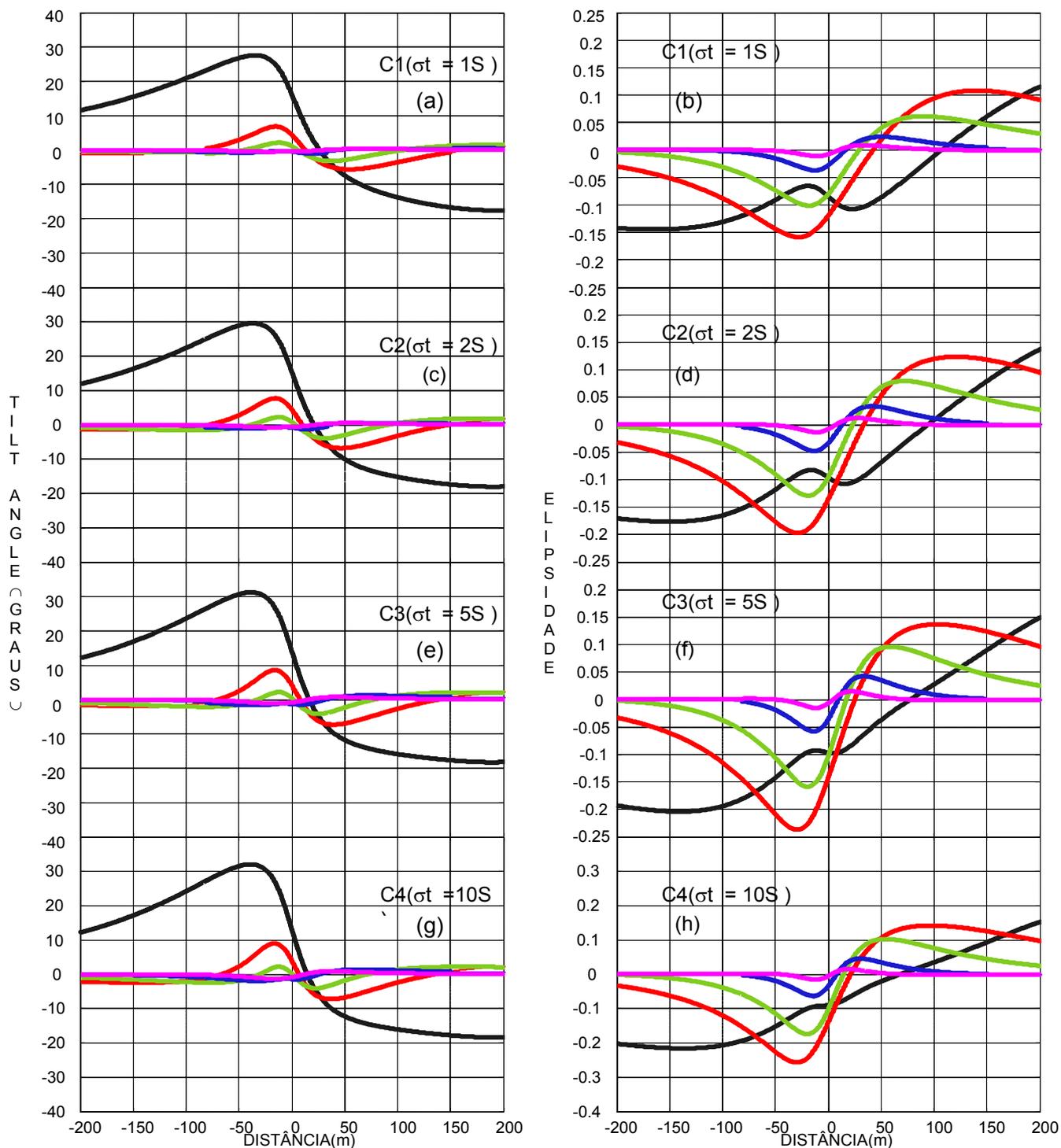


Fig 6.4 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da Condutância do Manto

MANTO INDUTIVO

EFEITO DE CONDUTÂNCIA DO CORPO, $\theta = 90^\circ$

Corpo C1 ($\sigma = 1 \text{ S}$) _____ Corpo C2 ($\sigma = 2 \text{ S}$) _____ Corpo C3 ($\sigma = 5 \text{ S}$) _____
 Corpo C4 ($\sigma = 10 \text{ S}$) _____, $D = 20 \text{ m}$

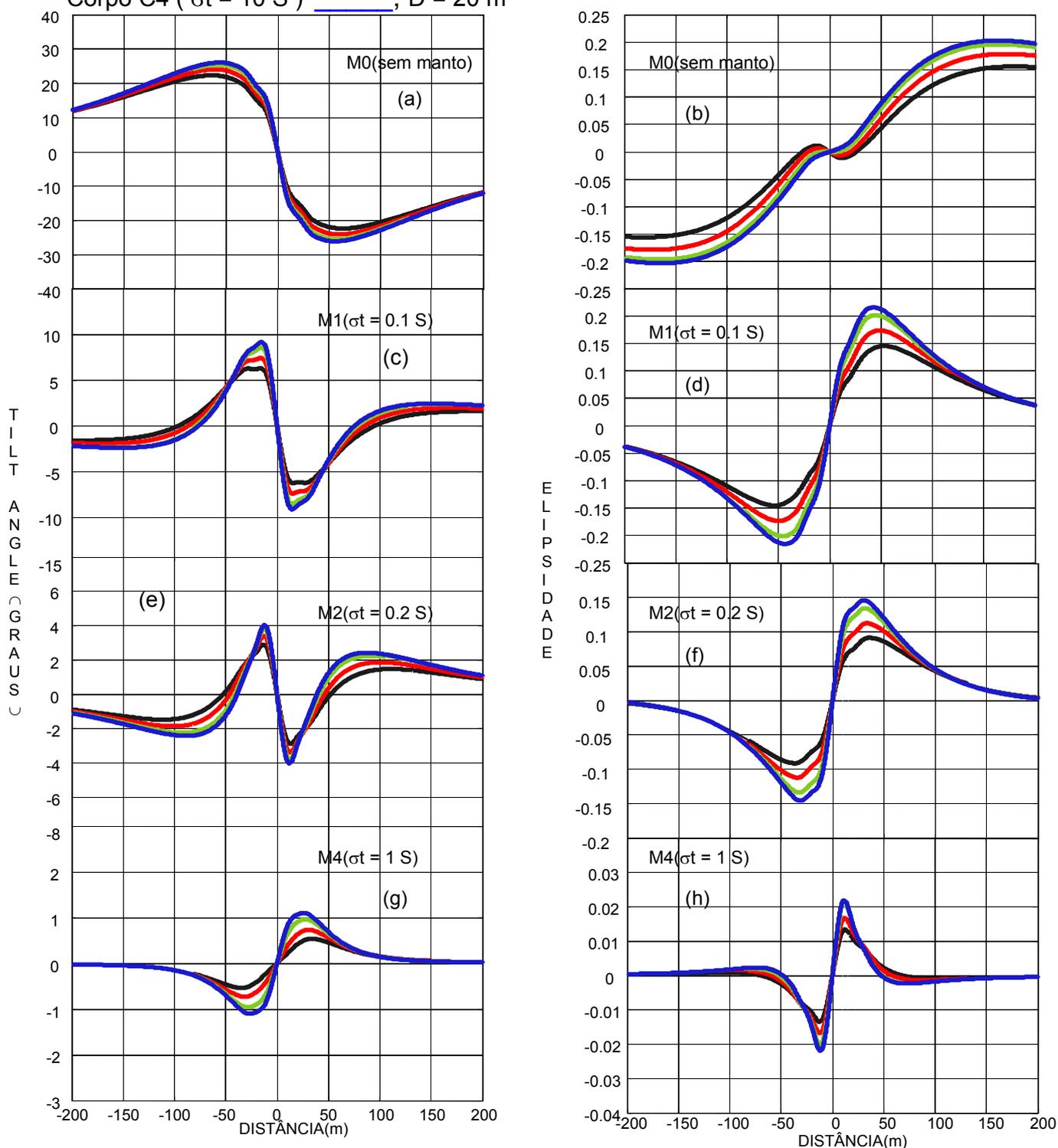


Fig 6.5 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da condutância do Corpo

MANTO INDUTIVO

EFEITO DE CONDUTÂNCIA DO CORPO, $\theta = 45^\circ$

Corpo C1 ($\sigma = 1 \text{ S}$) _____ Corpo C2 ($\sigma = 2 \text{ S}$) _____ Corpo C3 ($\sigma = 5 \text{ S}$) _____
 Corpo C4 ($\sigma = 10 \text{ S}$) _____, $D = 20 \text{ m}$

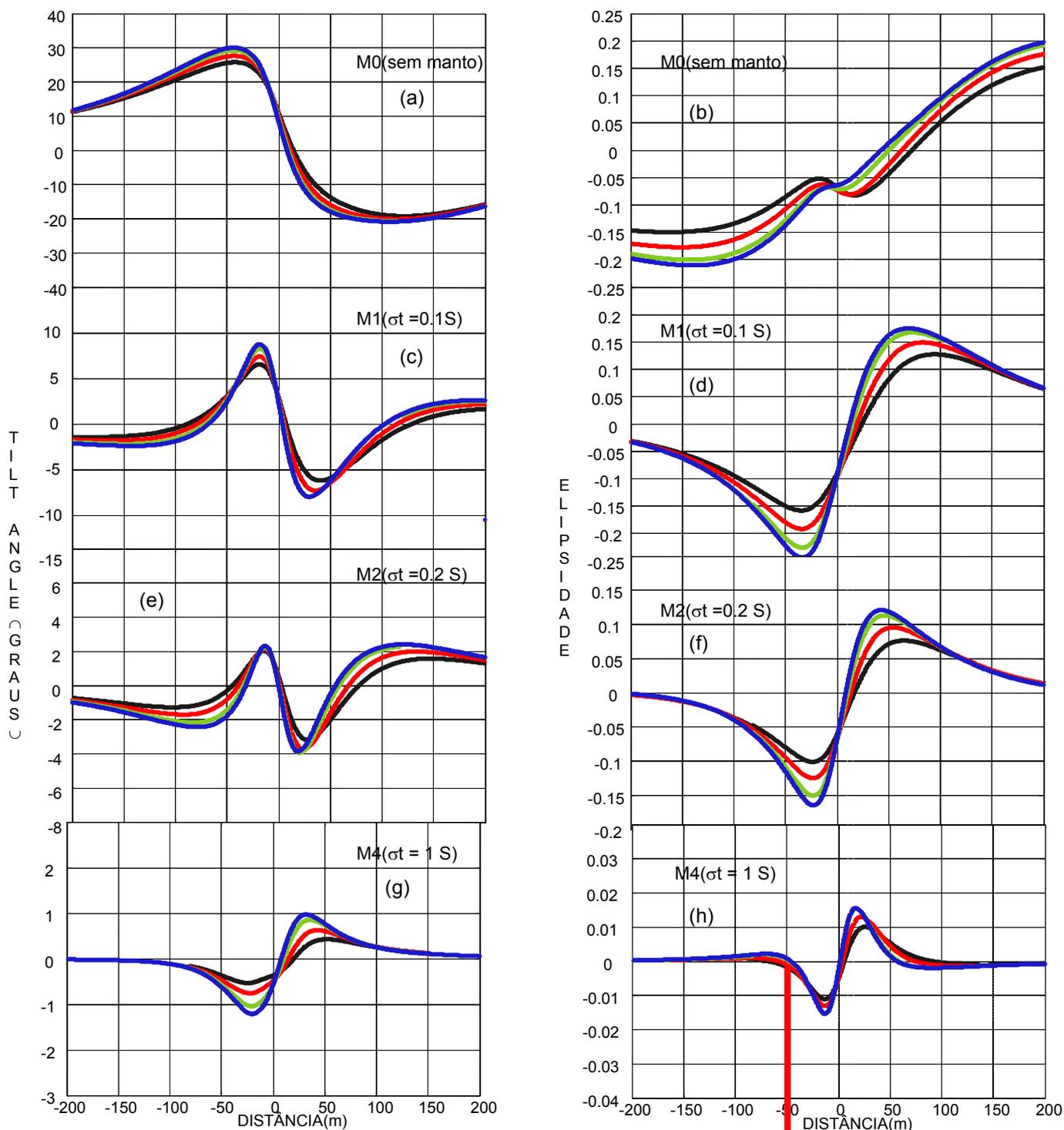


Fig 6.6 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da condutância do Corpo

6.3 – EFEITOS DO MERGULHO

As figuras 6.7 e 6.8 ilustram os efeitos causados pelo mergulho do condutor. Para este experimento utilizaram-se os corpos C1($\sigma = 1$ S) e C3($\sigma = 5$ S), os quais foram colocados na profundidade de 20 m com mergulhos de 90°, 60°, 45° e 30° na presença dos mantos M0, M1, M2 e M3.

Na ausência do manto e estando o corpo localizado a uma profundidade de 20 m (Figuras 6.7a, b e 6.8a, b), o maior efeito causado pelo mergulho do condutor é a assimetria nos perfis tanto de *Tilt Angle* quanto da *Elipsidade*.

Observa-se nas figuras 6.7d,f e h e 6.8d,f e h, que o maior pico das anomalias é dado pelo lado esquerdo do mergulho do corpo.

A medida em que diminuimos o mergulho do condutor para os mantos M1, M2 e M3, o pico à esquerda e à direita diminui tanto para os perfis de *Tilt Angle* quanto para os perfis de *Elipsidade* (figuras 6.7 a 6.8).

Entretanto observou-se que é bastante difícil fazer a distinção entre os perfis (à esquerda) de *Tilt Angle* na presença dos mantos M1 e M2 (Figuras 6.7c, e & 6.8c, e). Nos perfis de *Elipsidade*, nota-se que os picos à direita do mergulho diminui à medida que o manto torna-se mais condutivo para os corpos C1($\sigma = 1$ S) e C3($\sigma = 5$ S) localizado na profundidade de 20 m (Figuras 6.7d, f, h e 6.8d, f, h).

6.4 – EFEITOS DA PROFUNDIDADE

As figuras 6.9 a 6.12 mostram perfis variando-se a profundidade do topo do condutor sem manto (M0) e com os mantos M1 ($\sigma = 0.1$ S), M2 ($\sigma = 0.2$ S) e M4 ($\sigma = 1$ S) presentes. Foi utilizado nestes experimentos o corpo C1 ($\sigma = 1$ S) e C3($\sigma = 5$ S) mergulhando com os ângulos de 90° e 45°.

Para os corpos com mergulhos 90° e 45° e sem manto, o efeito da variação da altura do topo do condutor é de reduzir as respostas tanto de *Tilt Angle* quanto de *Elipsidade* (Figuras 6.9a, b; 6.10a, b; 6.11a, b e 6.12a, b). O formato das anomalias é

notadamente modificado, pois os picos afastam-se do cross-over, tornando-se mais achatados à medida que o corpo fica mais profundo.

Observa-se que o ângulo de cada perfil no ponto de *Cross-Over* é bastante reduzido para corpos mais profundos. Um fato a ser observado é que os picos de anomalias de *Tilt Angle* ocorrem mais distante do ponto de cross-over quando comparado aos de *Elipsidade*.

Na presença do manto de intemperismo a amplitude das anomalias de *Elipsidade* aumenta enquanto as anomalias de *Tilt Angle* apresentam uma pequena atenuação em relação àquelas tomadas sem manto, a uma mesma profundidade, deixando a impressão de que o corpo condutor está a uma profundidade mais rasa do que a verdadeira.

MANTO INDUTIVO
EFEITOS DO MERGULHO, C1($\sigma = 1 \text{ S}$) e D = 20 m

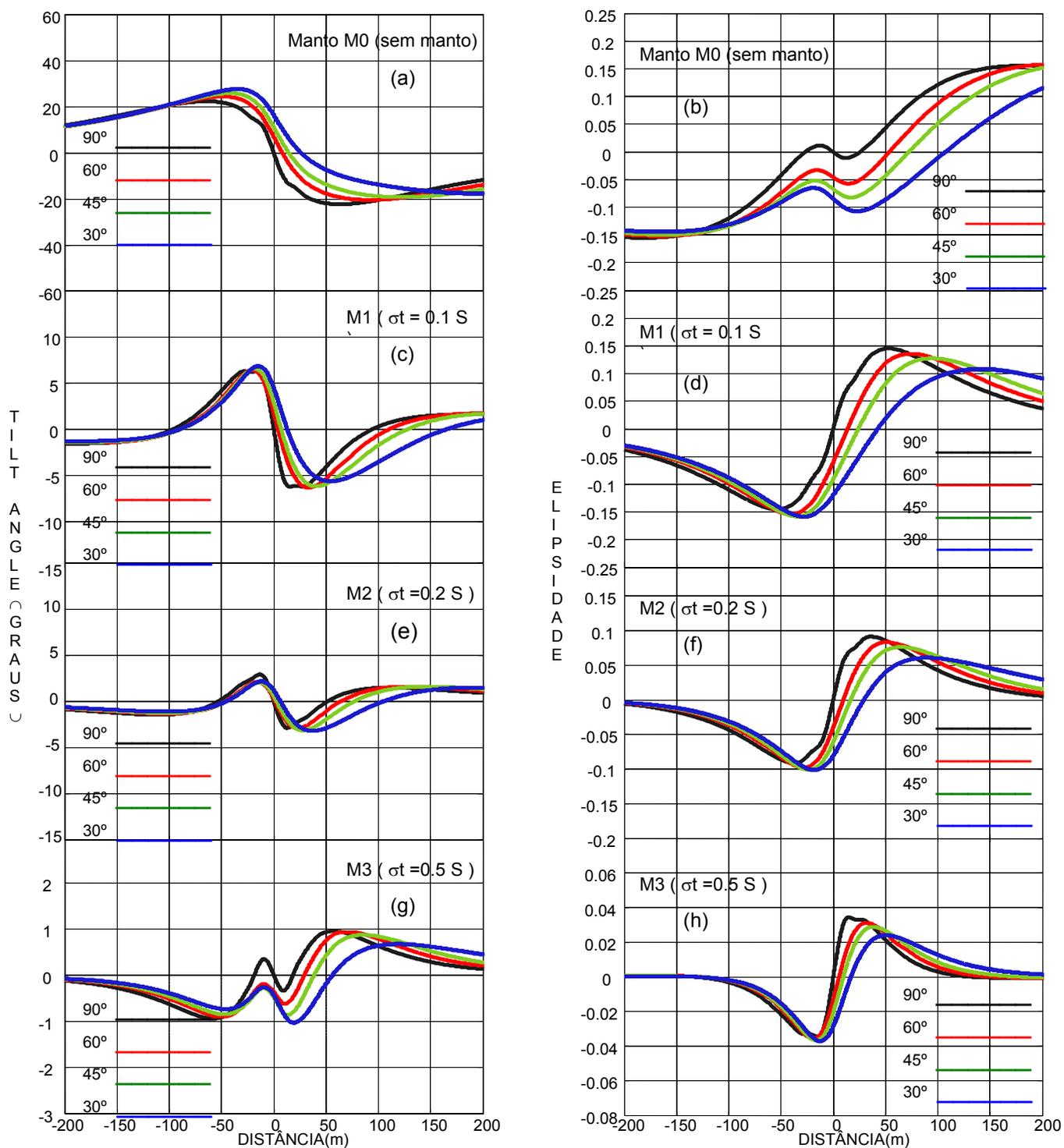


Fig 6.7 - Mudança das anomalias do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação do mergulho para o Corpo C1($\sigma = 1 \text{ S}$) localizado a uma profundidade de 20 m

MANTO INDUTIVO
EFEITOS DO MERGULHO, C3($\sigma = 5 \text{ S}$) e D = 20 m

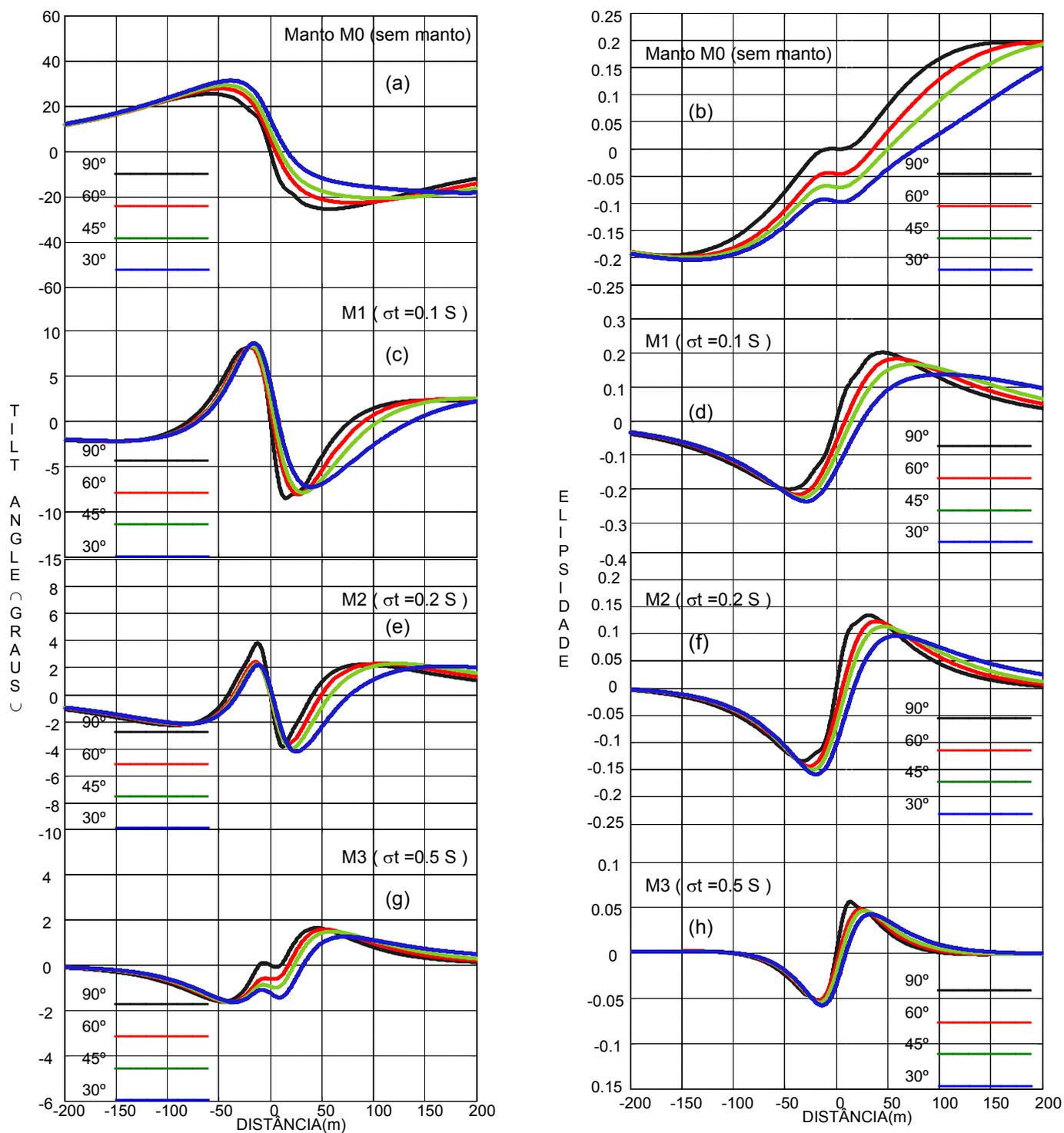


Fig 6.8 - Mudança das anomalias do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação do mergulho para o Corpo C3($\sigma = 5 \text{ S}$) localizado a uma profundidade de 20 m

MANTO INDUTIVO
EFEITO DA PROFUNDIDADE DO CORPO, $C1(\sigma t = 1 \text{ S})$ e $\theta = 90^\circ$

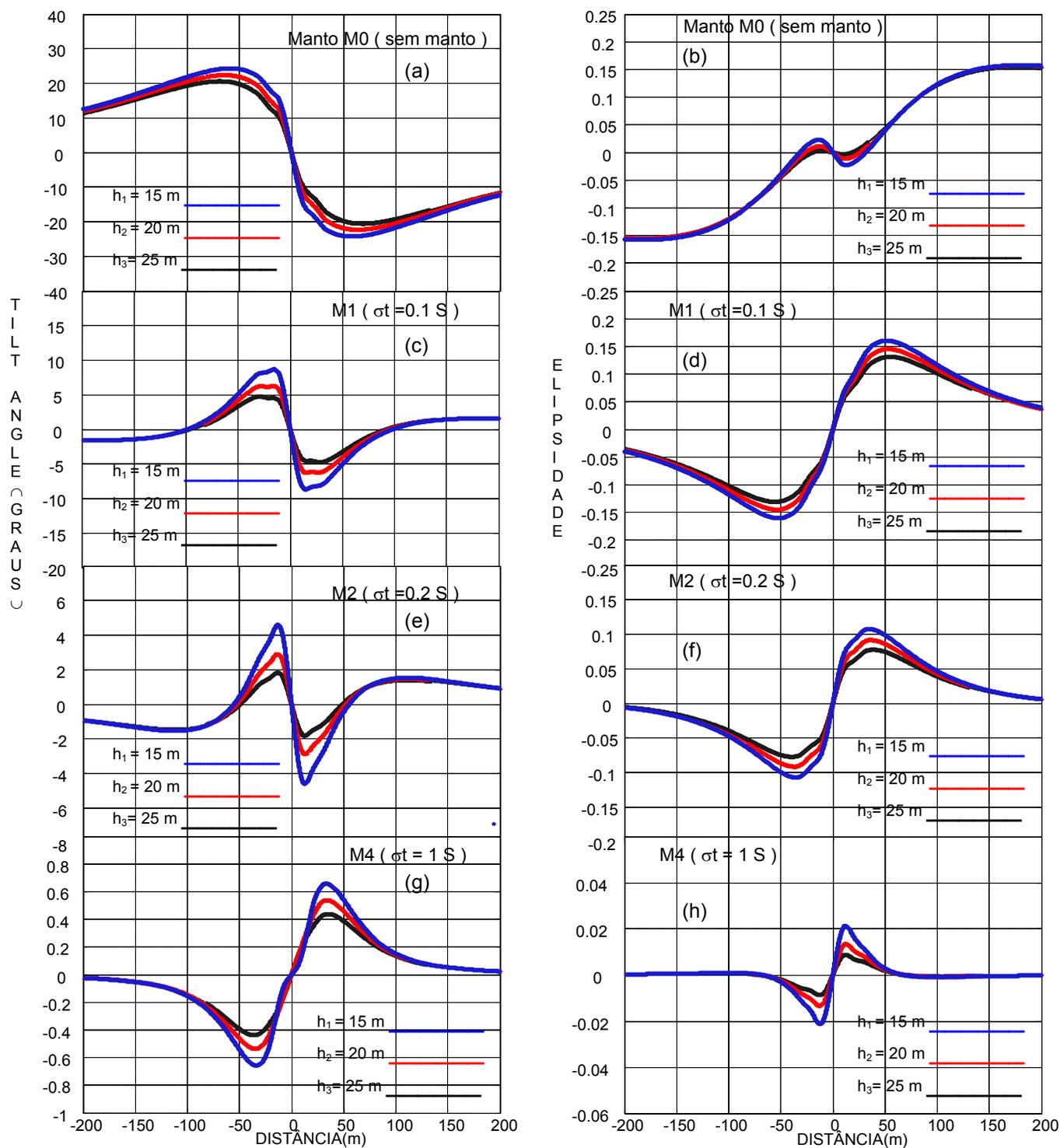


Fig 6.9 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da profundidade do corpo $C1(\sigma t = 1 \text{ S})$ com inclinação $\theta = 90^\circ$

MANTO INDUTIVO
EFEITO DA PROFUNDIDADE DO CORPO, C3($\sigma t = 5 S$) e $\theta = 90^\circ$

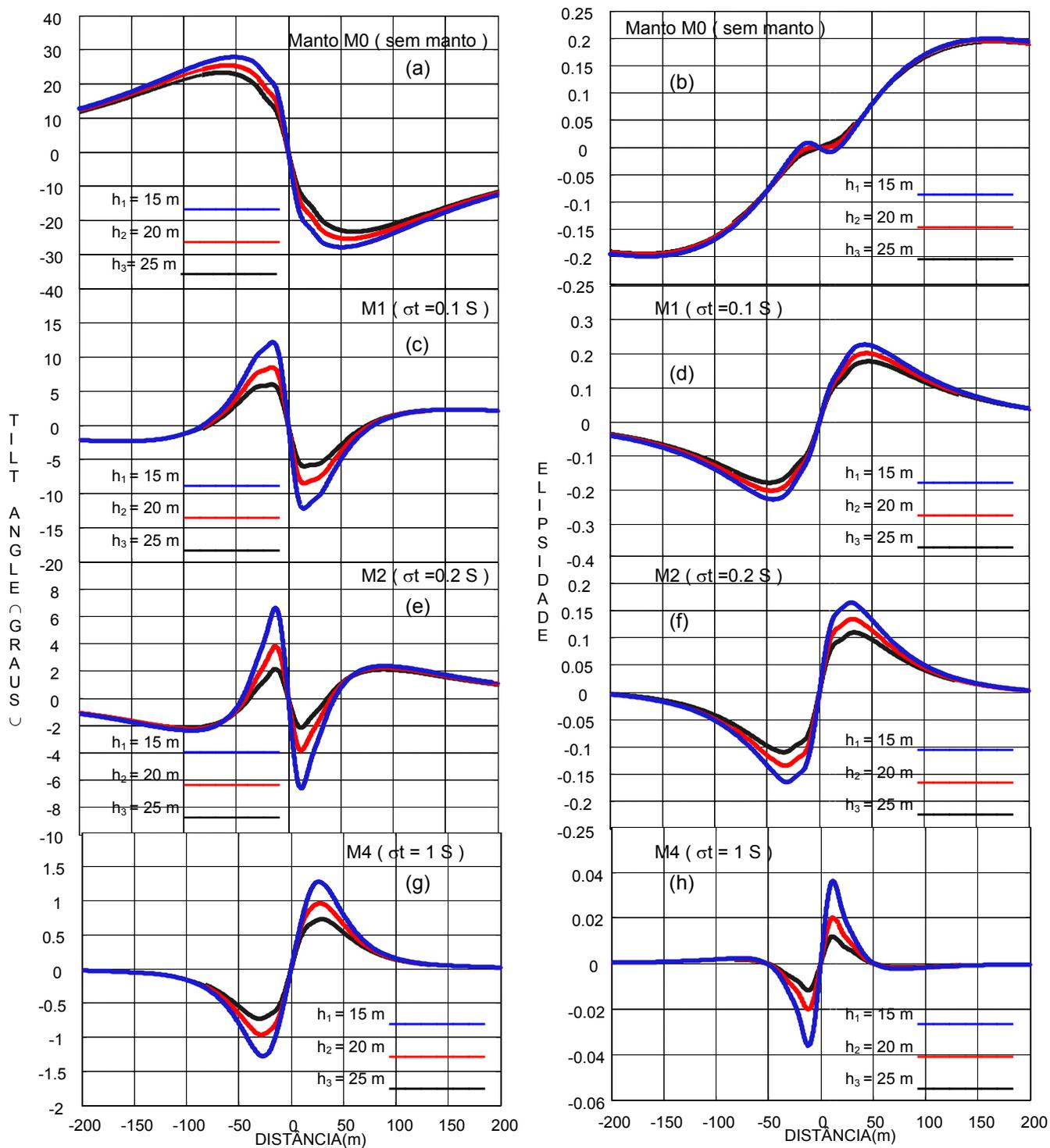


Fig 6.10 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da profundidade do corpo C3($\sigma t = 5 S$) com inclinação $\theta = 90^\circ$

MANTO INDUTIVO
EFEITO DA PROFUNDIDADE DO CORPO, $C1(\sigma t = 1 S)$ e $\theta = 45^\circ$

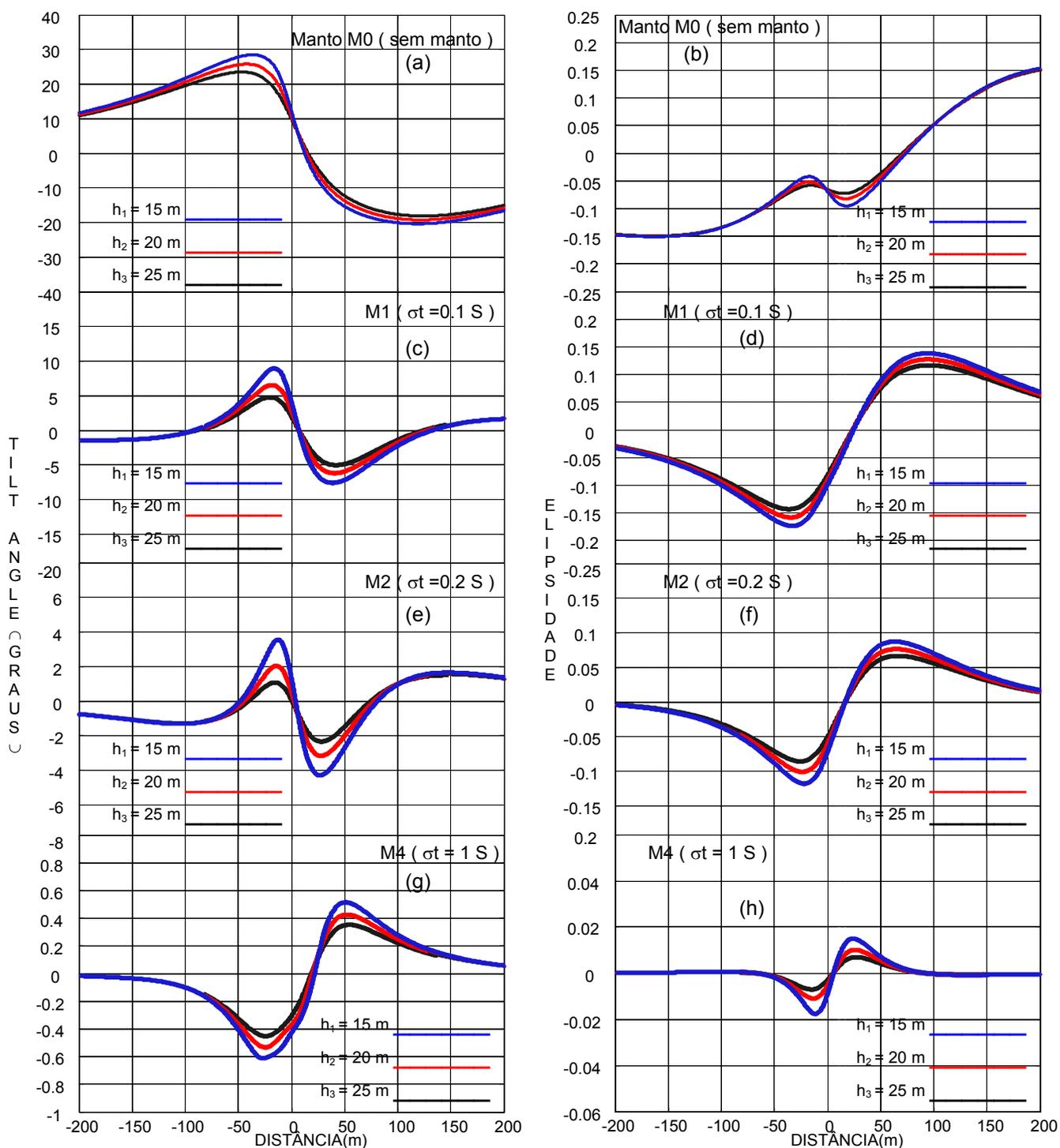


Fig 6.11 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da profundidade do corpo $C1(\sigma t = 1 S)$ com inclinação $\theta = 45^\circ$

MANTO INDUTIVO
EFEITO DA PROFUNDIDADE DO CORPO, C3($\sigma t = 5 S$) e $\theta = 45^\circ$

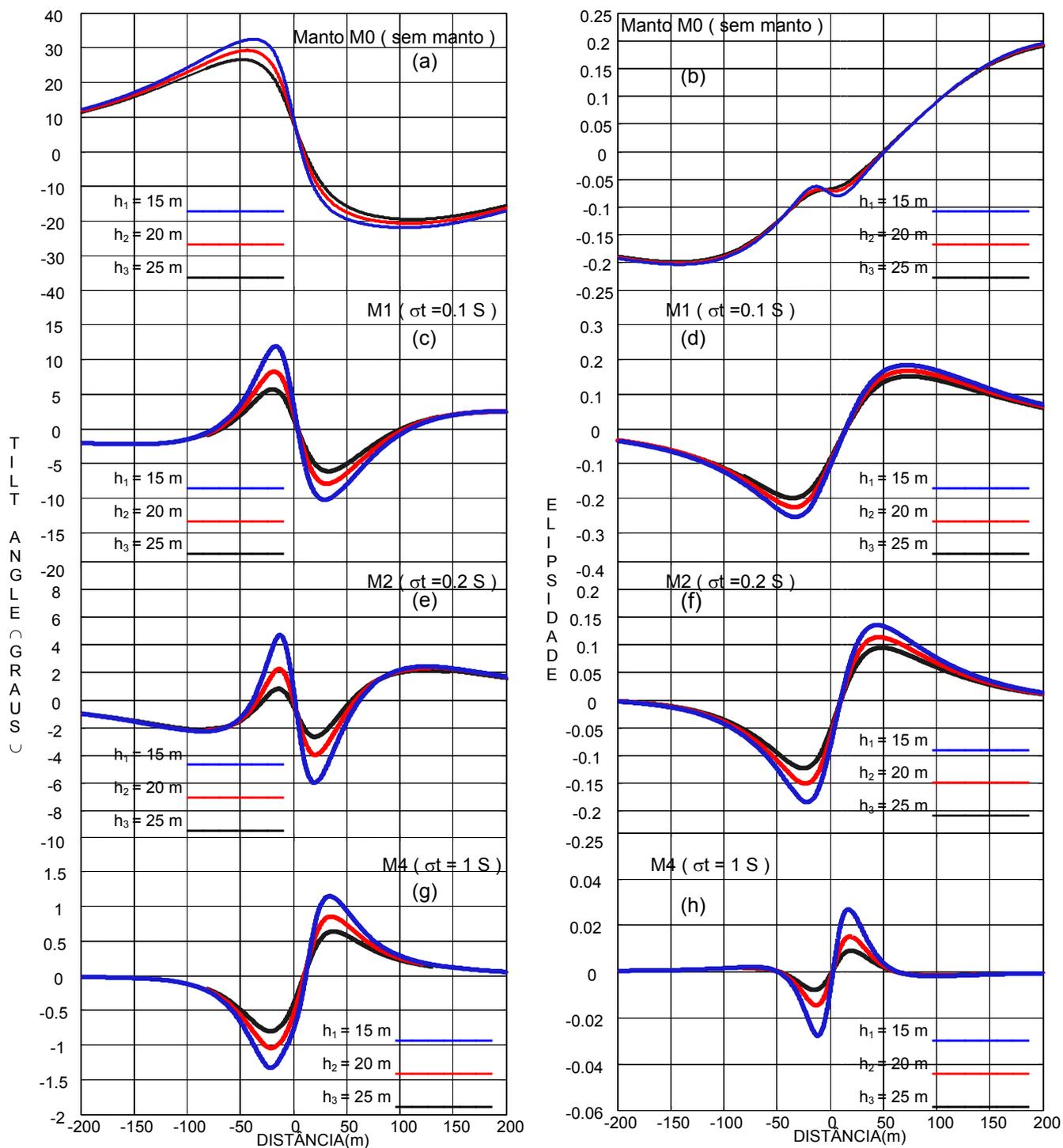


Fig 6.12 - Mudança da resposta do *Tilt Angle* e da *Elipsidade* com a variação da profundidade do corpo C3($\sigma t = 5 S$) com inclinação $\theta = 45^\circ$

7 – ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MANTO INDUTIVO

Os efeitos do manto de intemperismo nas anomalias VLF são analisados em relação à ausência do manto. Para esta análise são utilizados valores pico-a-pico por serem considerados os mais apropriados (*Parasnis*, 1971). Os efeitos foram estudados variando-se os parâmetros de resposta do manto e do corpo (Tabelas 4.1 e 4.2) para diferentes mergulhos ($\theta = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ e 30°) e diferentes profundidades do topo do condutor ($h_c = 15; 20$ e 25 m).

Com o objetivo de estudar os efeitos relativos ao mergulho do condutor utilizou-se o coeficiente de assimetria para análise dos resultados. Os efeitos da profundidade do topo do condutor foram analisados com a utilização dos valores pico-a-pico dos perfis.

7.1 – ANÁLISE DA CONDUTÂNCIA DO MANTO

A figura 7.1 mostra a variação pico-a-pico das anomalias de *Tilt Angle* e *Elipsidade* com a condutância do manto para o corpo C1($\sigma_t = 1$ S) localizado a uma profundidade de 15 m e 20 m mergulhando com os ângulos de $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ e 30° .

Para as curvas *Tilt Angle* observa-se que estando o corpo nas inclinações de $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ e 30° a uma profundidade de 15 e 20 m os valores pico-a-pico das anomalias diminuem com o aumento da condutância do manto (Figuras 7.1a e 7.1b).

Observa-se que na presença do manto de condutância de 0.2 S a variação pico-a-pico de *Tilt Angle* nas inclinações de $60^\circ, 45^\circ$ e 30° estão muito próximas e no manto de condutância 0.5 S essa aproximação se dar com as inclinações de $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ e 30° (Figura 7.1a), já na presença do manto de condutância de 0.2 S (figura 7.1b) essa aproximação se dá nas inclinações de $60^\circ, 45^\circ$ e 30° , observando que os pico-a-pico de *Tilt Angle* das inclinações de 60° e 45° são os menores em relação às inclinações de 90° e 30° .

Estando o corpo localizado uma profundidade de 15 e 20 m, os valores pico-a-pico da *Elipsidade* diminuem com o aumento da condutância do manto (Figuras 7.1c e 7.1d). Observa-se que na presença do manto de condutância de 0.2 S a variação pico-a-pico de *Tilt Angle* nas inclinações de $90^\circ, 60^\circ$ e 45° estão muito próximas (Figura 7.1d)

MANTO INDUTIVO EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO MANTO

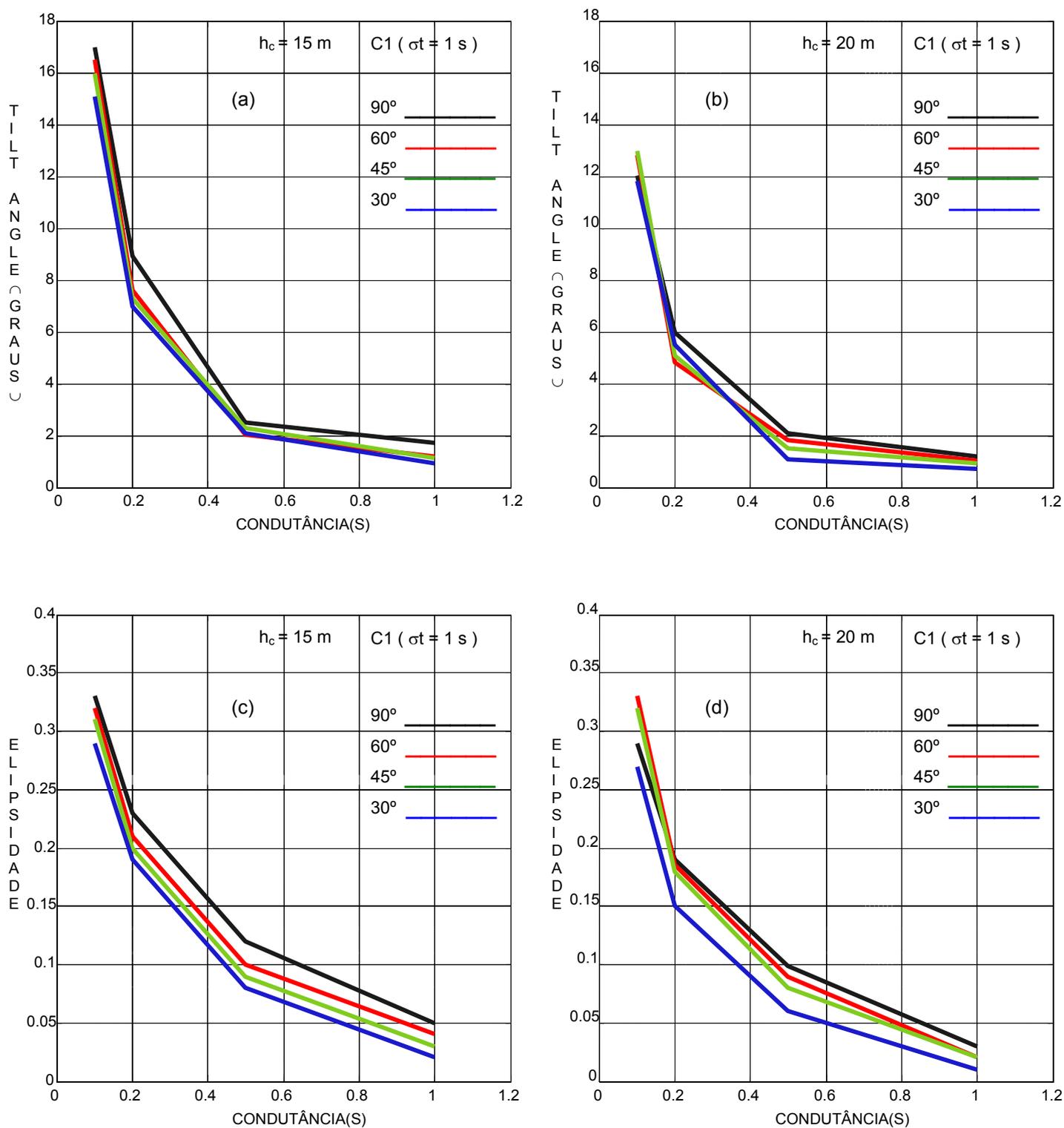


Fig 7.1 - mudança das anomalias pico-a-pico com a variação da condutância do manto para o corpo $C1$ ($\sigma = 1$ S), localizado nas profundidades de 15 m e 20 m

7.2 – EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO CORPO

As Figuras 7.2 e 7.3 mostram a variação pico-a-pico das anomalias de *Tilt Angle* e de *Elipsidade* com a variação da condutância dos corpos. Na presença dos mantos M0 e M1, à medida que se aumenta a condutância do corpo, aumenta as anomalias do *Tilt Angle*, já no manto M2, M3 e M4 esse aumento é mais suave (Figuras 7.2a , b, c e d). À medida que diminuimos o mergulho do corpo este crescimento das anomalias torna-se mais lento.

Os valores pico-a-pico de *Elipsidade* (Figura 7.3) aumenta à medida que aumento à condutância do corpo, observa-se que na presença dos mantos M2, M3 e M4 os valores de *Elipsidade* pico-a-pico dos corpos são menores, em relação ao M0 (Figuras 7.3a , b, c e d).

Observa-se que a partir do corpo de condutância igual a 5 s a *Elipsidade* na presença do manto M1 passa a ser maior de todas (Figura 7.3a).

7.3 EFEITOS DO MERGULHO DO CORPO

A Figura 7.4 mostra a variação do coeficiente de assimetria com o mergulho do condutor, calculado para perfis de *Tilt Angle* e de *Elipsidade*. Observa-se que para uma profundidade particular o coeficiente de assimetria aumenta a medida em que aumentamos o mergulho do condutor (Figura 7.4).

Para os valores do coeficiente de assimetria calculados nos perfis de *Tilt Angle*, observou-se a uma profundidade 15 m que o valor do coeficiente é o menor valor na presença do manto M3 (Figura 7.4a).

Para os valores do coeficiente de assimetria calculados nos perfis de *Elipsidade*, observa-se também que o manto tem o efeito de diminuir o valor do coeficiente de assimetria (Figura 7.4c).

MANTO INDUTIVO EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO CORPO

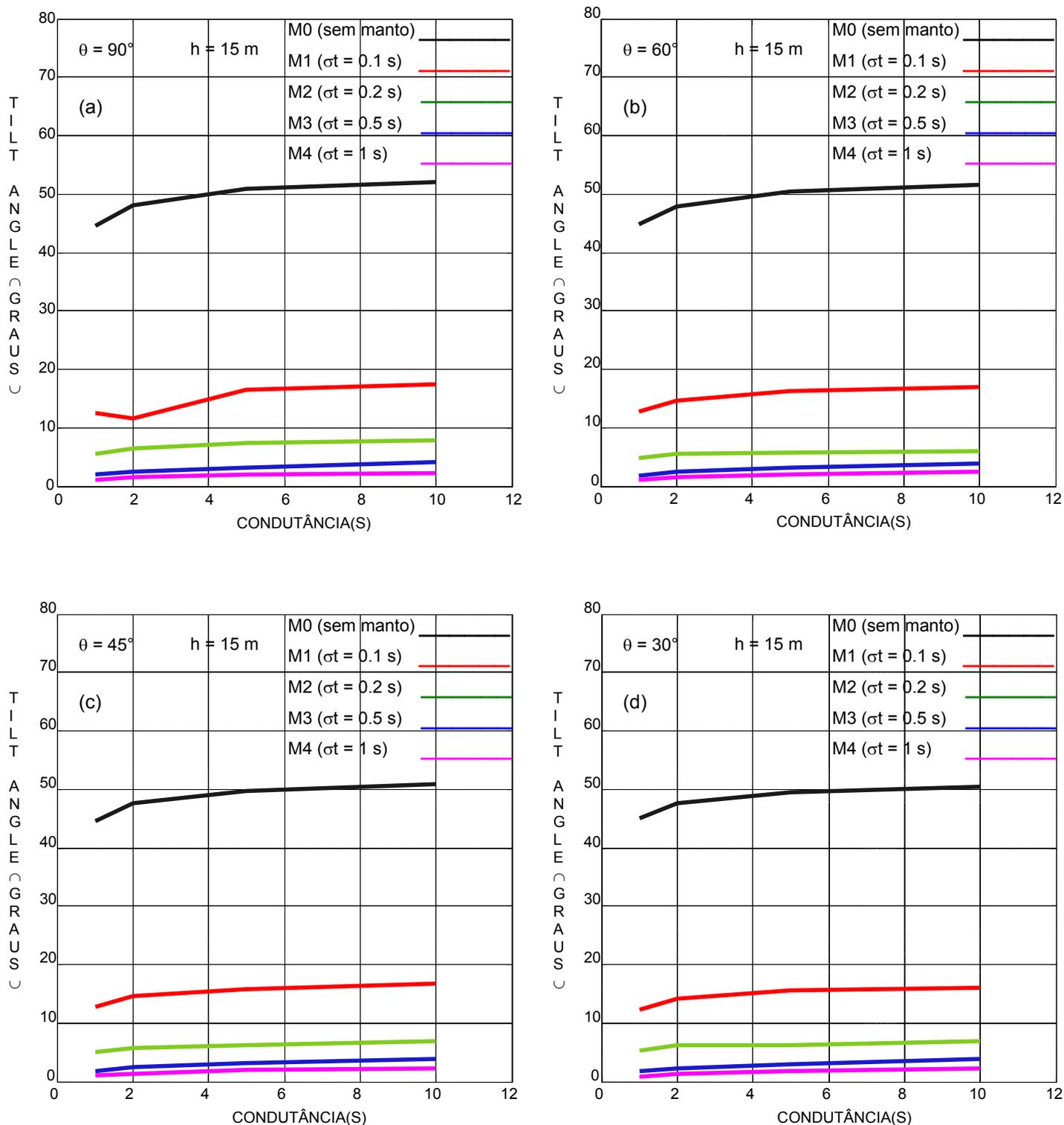


Fig 7.2 – Variação dos valores pico-a-pico de *Tilt Angle* com o parâmetro de resposta do corpo a uma profundidade de 15 m

MANTO INDUTIVO EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO CORPO

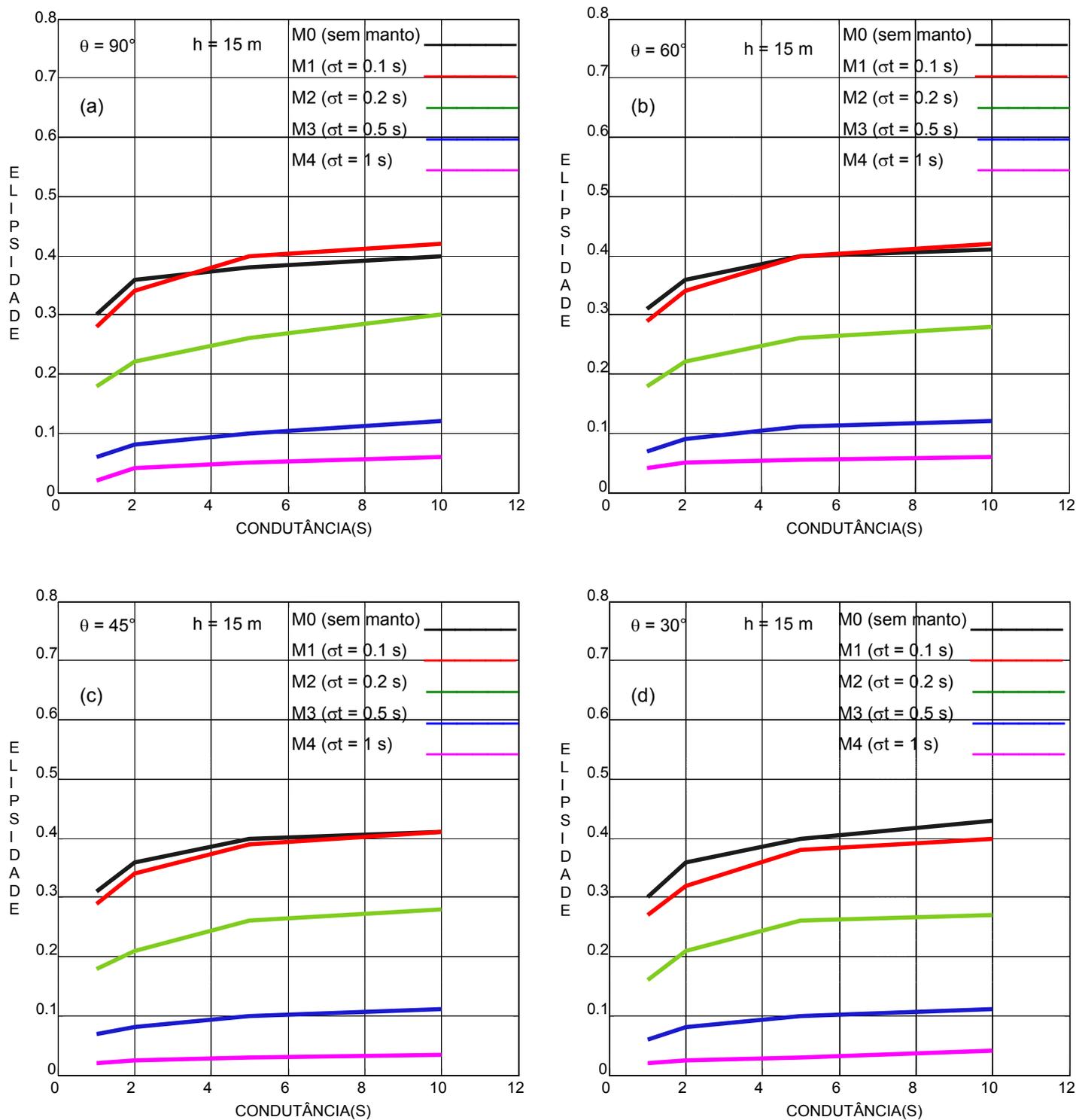


Fig 7.3 – Variação dos valores pico-a-pico de *Elipsidade* com o parâmetro de resposta do corpo a uma profundidade de 15 m

MANTO INDUTIVO

EFEITOS DO MERGULHO DO CORPO

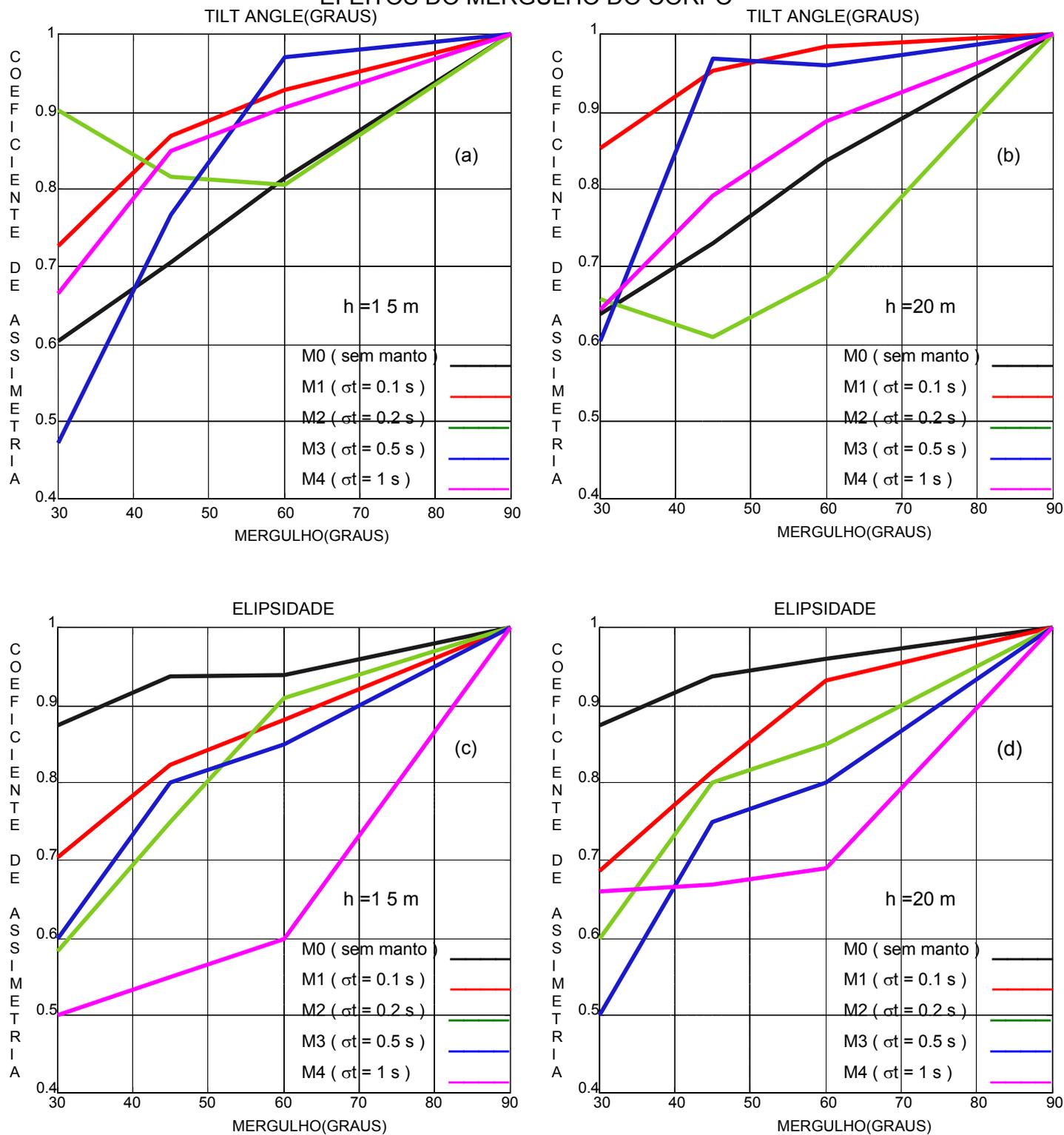


Fig 7.4 – Variação do coeficiente de assimetria com o mergulho do corpo C1($\sigma = 1$ S)

7.4 – EFEITOS DA PROFUNDIDADE

As Figuras 7.5 e 7.6 mostram como a variação da profundidade do topo do condutor afeta os valores pico-a-pico das anomalias. Como era esperado, para todos os ângulos de mergulho o aumento da profundidade do topo do condutor tem o efeito de diminuir o valor das anomalias tanto de *Tilt Angle* quanto de *Elipsidade*.

Para o *Tilt Angle*, verifica-se que os valores pico-a-pico dos condutores com os mantos M1, M2, M3 e M4 são bem menores quando comparados ao manto M0 (Figura 5.5).

Para a *Elipsidade*, observa-se que na diminuição do mergulho, as respostas obtidas sem manto começam a diminuir em relação àquela tomada na presença do manto M1. Este efeito foi verificado em toda faixa de profundidade trabalhada. A diminuição do mergulho do condutor causa também um decaimento mais suave nas respostas E.M. do condutor à medida que o corpo torna-se mais profundo (Figura 7.6).

7.5 – GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS

Através de diagramas de Argand (Figuras 7.7 a 7.14) resumiu-se grande parte dos efeitos referidos anteriormente, onde os valores pico-a-pico de *Tilt Angle* e de *Elipsidade* são plotados para vários parâmetros de resposta e profundidade do corpo. Para confecção de cada diagrama também foram mantidos fixos o mergulho do corpo e o parâmetro de resposta do manto.

Estando o corpo na posição vertical (Figuras 7.7 e 7.8) a presença do manto fazem com que as anomalias sofram uma rotação de fase no sentido anti-horário à medida que cresce o parâmetro de resposta do manto, (observe que o ângulo de rotação é maior quanto maior for o parâmetro de resposta do corpo).

Estando o corpo mergulhado com os ângulos de 60°, 45° e 30°, observaram-se os mesmos efeitos verificados com o corpo na posição vertical, porém com a diminuição do mergulho, nota-se uma atenuação das anomalias. Esta atenuação é mais evidenciada para os corpos menos condutivos (Figuras 7.9 a 7.14).

MANTO INDUTIVO EFEITOS DA PROFUNDIDADE

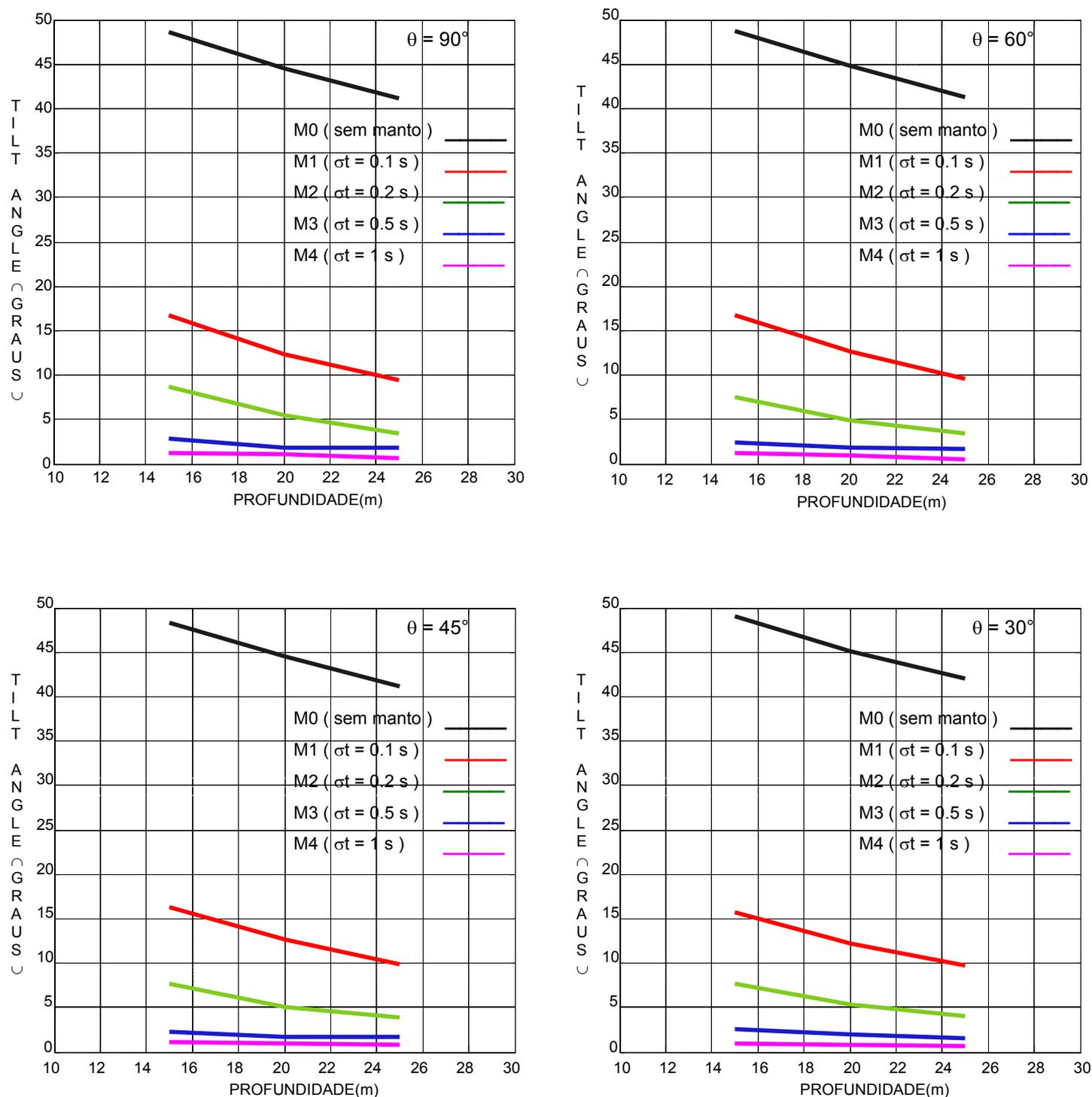


Fig 7.5 – Variação dos valores pico-a-pico de *Tilt Angle* com a profundidade do topo do corpo C1($\sigma t = 1$ S)

MANTO INDUTIVO EFEITOS DA PROFUNDIDADE

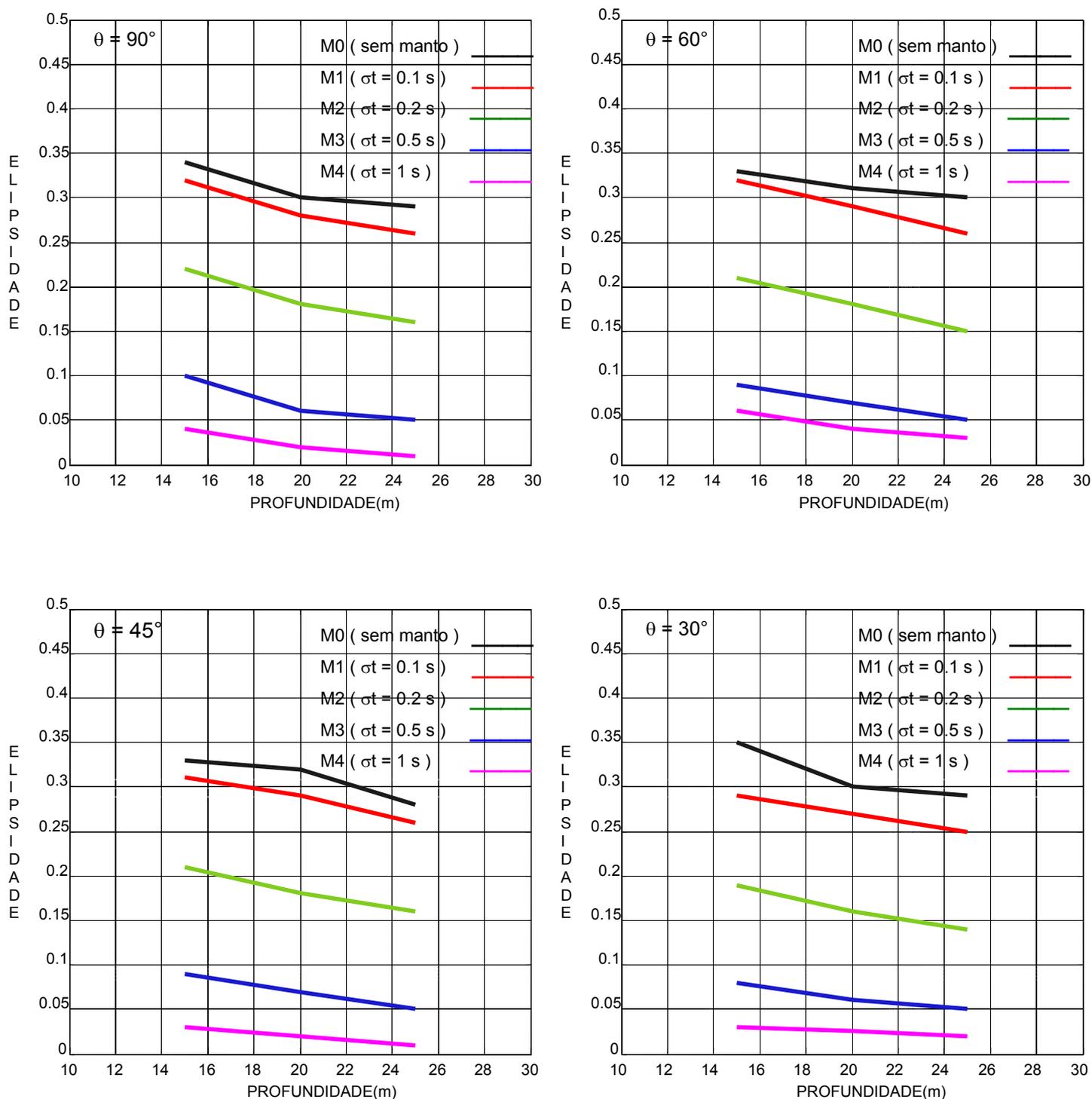


Fig 7.6 – Variação dos valores pico-a-pico de *Tilt Angle* com a profundidade do topo do corpo C1($\sigma t = 1$ S)

MANTO INDUTIVO
GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS, $\theta = 90^\circ$

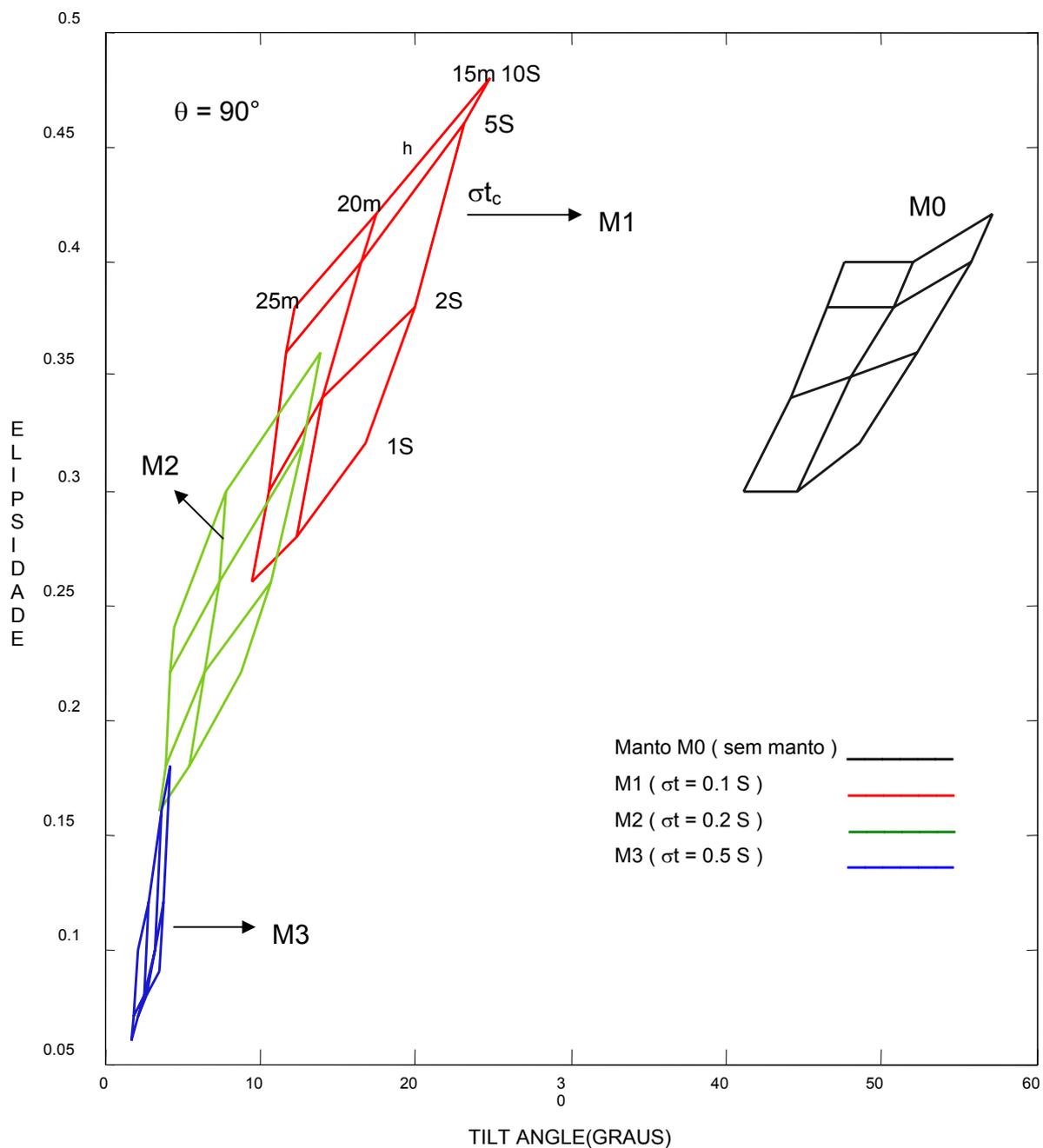


Fig 7.7 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 90^\circ$

MANTO INDUTIVO
GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS, $\theta = 60^\circ$

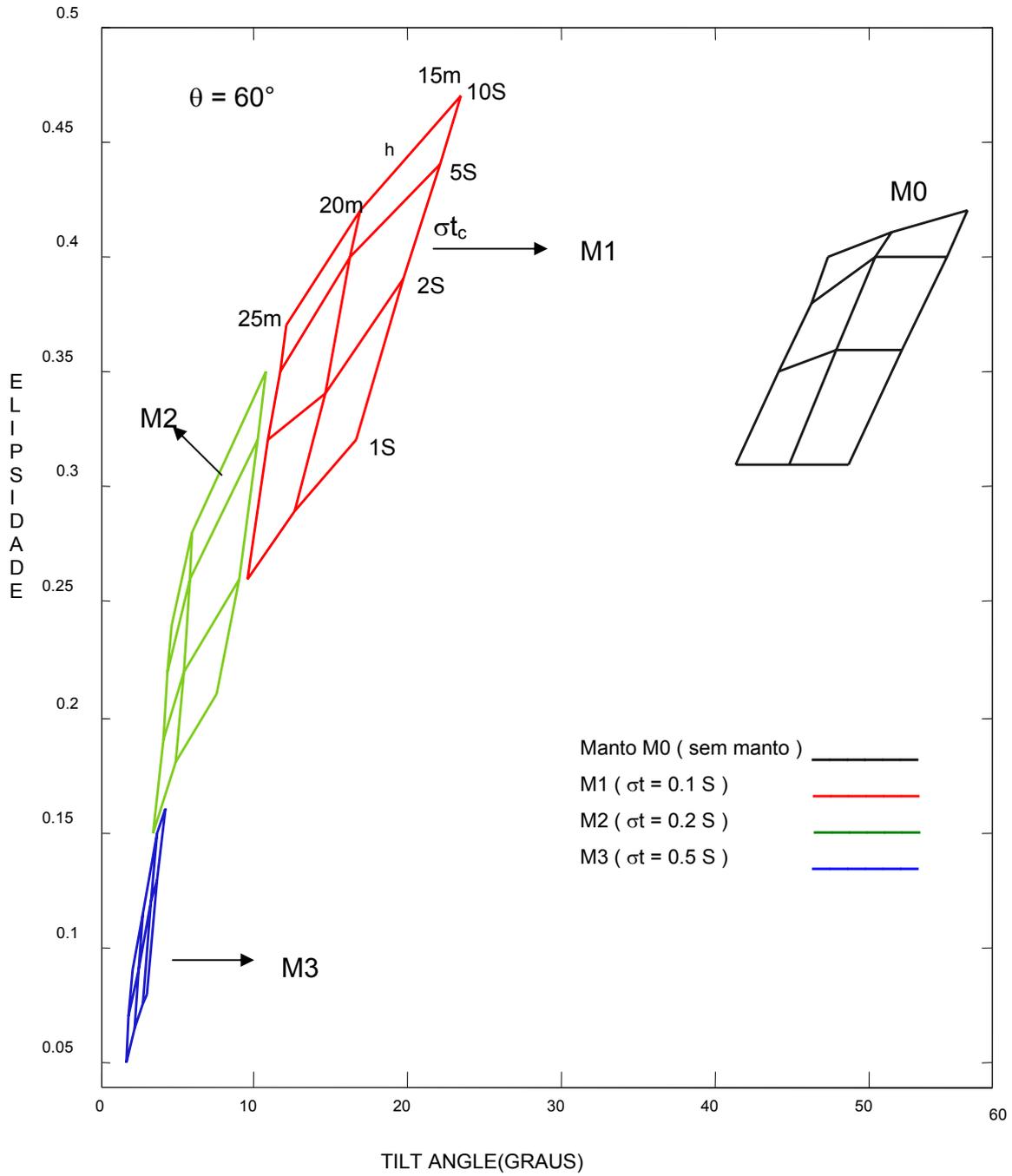


Fig 7.8 - Diagrama de Argand construido com valores pico-a-pico para $\theta = 60^\circ$

MANTO INDUTIVO
GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS, $\theta = 45^\circ$

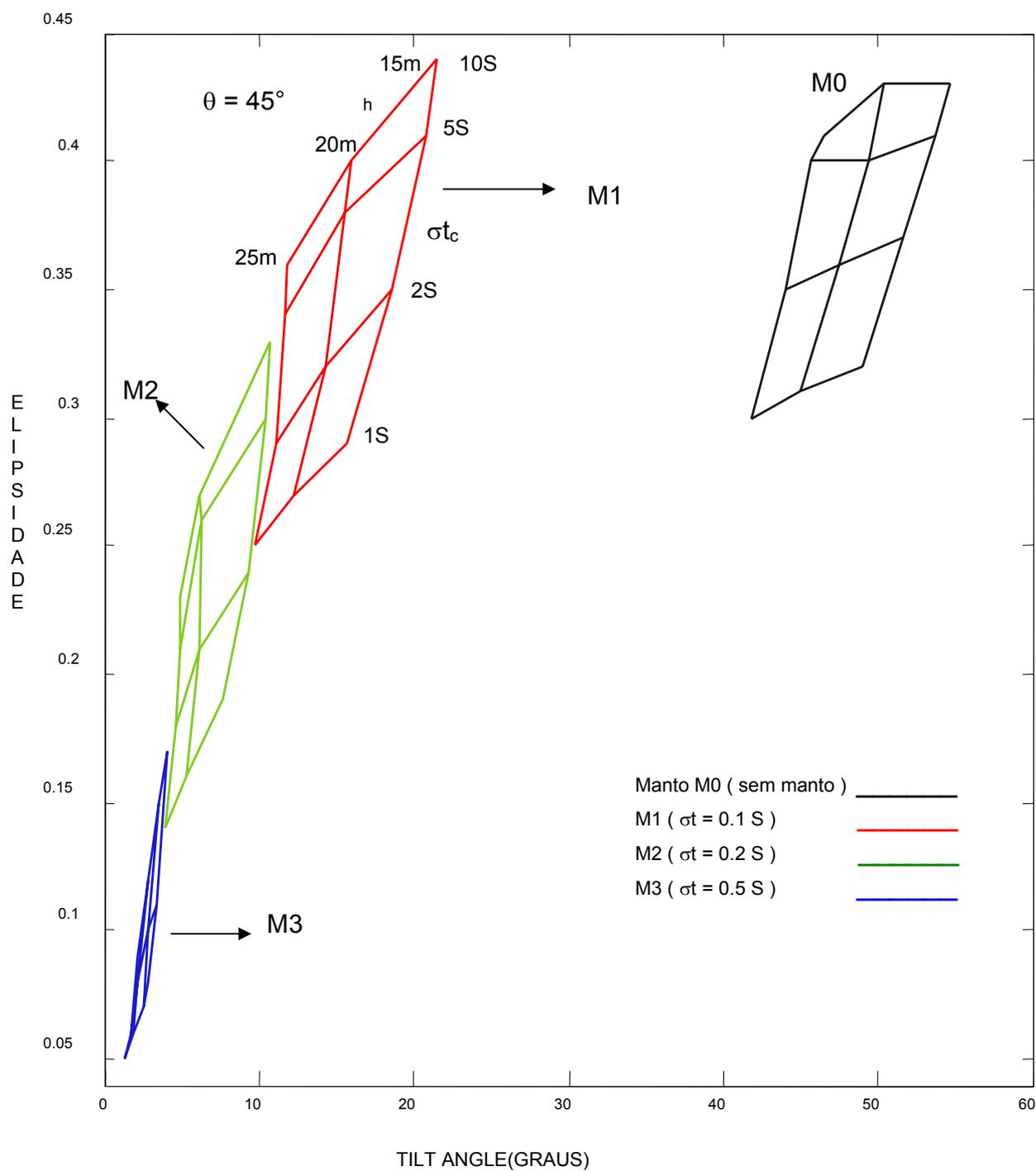


Fig 7.9 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 45^\circ$

MANTO INDUTIVO
GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS, $\theta = 30^\circ$

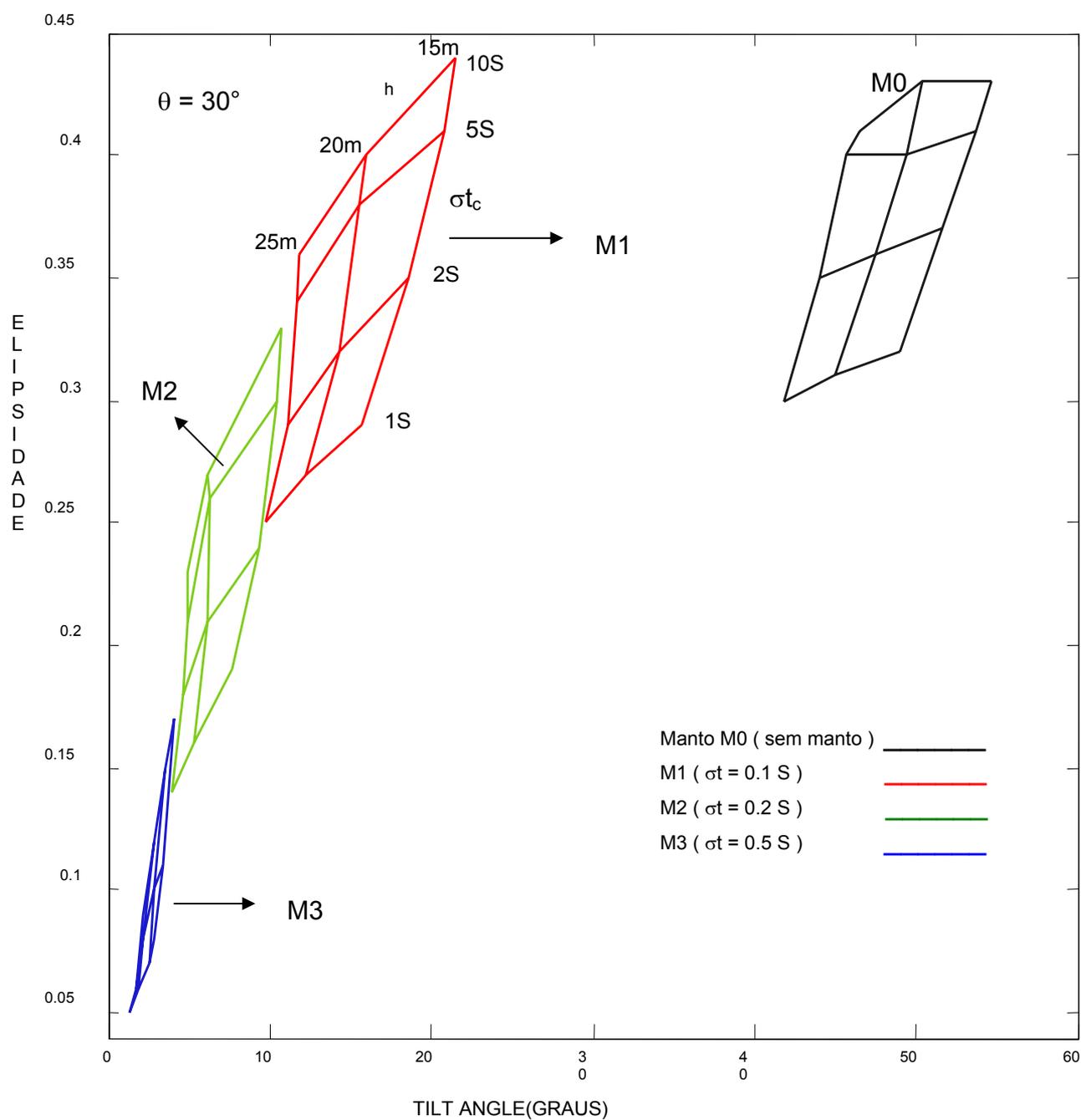


Fig 7.10 - Diagrama de Argand construido com valores pico-a-pico para $\theta = 30^\circ$

8 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após a efetivação dos experimentos onde se analisou anomalias associadas a corpos do tipo semi-plano para vários mergulhos em contato ou não com o manto de intemperismo (manto Galvânico e manto Indutivo), observou-se os seguintes efeitos:

1) Em ambas situações geométrica de manto Galvânico e Indutivo, na faixa de condutância $\sigma t = 0.1 \text{ S}$, ocorre um aumento nas anomalias de *Elipsidade*, e uma atenuação de *Tilt Angle*.

Esse efeito pode ser explicado, pois quando um corpo fica em contato galvânico com o manto, ocorre o fenômeno de acanalamento, havendo desta forma uma maior concentração de corrente e a anomalia aumenta com a mudança de fase anti-horária. Quando o campo primário atravessa o manto, sofre uma rotação e atenuação de, respectivamente, $(180/\delta)$ e $(1/e\delta)$ do seu valor igual para cada metro de espessura do manto. Onde δ é a profundidade pelicular do campo magnético em um condutor, a qual é dada por $\delta = 503,3 (1/f\sigma)^{1/2}$, considerando-se $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$. O mesmo ocorre com o campo secundário ao atravessar o manto antes de chegar ao receptor. No caso do método VLF são assumidas condições quasistática ($\epsilon = \epsilon_0$) e, conseqüentemente, as correntes de deslocamentos são desprezadas em relação as correntes de condução.

2) Na presença dos mantos de altos valores de condutância, isto é, $\sigma t = 0.2\text{S}$; 0.5S e 1 S , observou-se, para ambos os mantos uma atenuação nas anomalias de *Tilt Angle* e de *Elipsidade*. Isto acontece devido o fato de que agora, estando o manto mais condutivo, ocorre uma maior atenuação de campo primário antes de chegar ao corpo, bem como também do campo secundário antes de chegar ao receptor. Neste momento o fenômeno de acanalamento de corrente já não é tão forte como foi no caso do manto menos condutivo; e isto faz com que haja uma atenuação nas respostas.

Tendo em vista o exposto acima, fica bastante claro que a interpretação feita para um condutor, sendo desprezado um manto de apreciável parâmetro de resposta, conduz a sérios erros. Pelos diagramas de *Argand* pode ser verificado que, nestes casos, a condutância obtida para o corpo é menor que a real, devida a rotação anti-

horária. Enquanto que a profundidade é interpretada menor (ou mais rasa) devido a maior aproximação ou estreitamento da distância entre picos positivos e negativos (normalmente usados para determinação de profundidade do topo do corpo). Foi verificado também que o efeito do manto é mais evidenciado nos perfis de *Elipsidade*, principalmente para corpos mais profundos. Além disso, haverá também erros significativos referentes ao mergulho do corpo, pois se observou que aumentando a condutância do manto faz aumentar o coeficiente de assimetria.

Recomenda-se para melhor compreensão dos efeitos do manto os seguintes estudos:

- i) Como a distinção entre a condutividade e a profundidade do corpo é normalmente difícil, é interessante efetuar medidas em diferentes frequências para ajudar na interpretação;
- ii) Realizar simulações com a eGs para estudar efeitos de heterogeneidade no Manto de várias condutâncias em contato ou não com o corpo, entre outras;
- iii) Considerar a encaixante levemente condutiva e o manto não uniforme e;
- iv) Finalmente, recomendam-se testes para verificação dos resultados obtidos em relação aos diagramas obtidos nos dados de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARONGO, J. O. 1987. Geophysical detection of mineral conductors in tropical terrains with target conductors partly embedded in the conductive overburden: **Geophysical Prospecting**, 35: 365-589.
- COGGON, J.H. 1971. Eletromagnetic and electrical modeling by the finite element method. **Geophysics**, 36: 132-155
- CONEY, D.P. 1977. Model studies of the VLF-EM method of geophysical prospecting. **Geoexploration**, 15: 19-35
- FARIAS, V. J. C. 1996. **Aplicação dos métodos eletromagnéticos VLF e HLEM na prospecção hidrogeológica no Município de São Domingos do Araguaia – PA**. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. (Dissertação de Mestrado).
- FRASER, D.C. 1969. Contouring of VLF-EM data. **Geophysics**, 34: 958-967
- GRANT, F. S. & WEST, G. F. 1965. **Interpretation Theory in Applied Geophysics**. New York, Mc Graw Hill book. 584p.
- JOSHI, M. S., GUPTA, O. P.; NEGI, J. G. 1984. Scale-model response of a thin vertical conductor below a conductive, inductive or laterally inhomogeneous overburden layer: **Geophysics**, 49: 2159-2165.
- KAIKKONEN, P. 1979. Numerical VLF Modeling. Geophysical Prospecting. **Geoexploration**, 27(04): 815-834
- KAIKKONEN, P. 1980. Numerical VLF, VLF and AMT Profiles over some Complicated Models. Acta Univ. Oul. A 91. **Phys**, 16: 34

- LAJOIE, J. J. & WEST, G. F. 1977. Short note – two selected field examples of EM Anomalies in a conductive environment: **Geophysics**, 42: 655-660.
- LOWRIE, W. & WEST, G. F. 1965. The effects of a conducting overburden on eletromagnetic prospecting measurements. **Geophysics**, 30: 624-632.
- NERES, R. L. & VERMA, O.P. 1989. Anomalias eletromagnéticas de um corpo tabular em contato e sem contato com o manto de intemperismo: modelamento analógico: In: Cong. Int. Soc. Bras. de Geofísica, 1., Rio de Janeiro. **Anais ...**, RJ, SBGf. v.2, p. 682-687.
- OLM, M. C. 1981. **Eletromagnetic scale model study of the dual frequency differencing technique**: Colorado School of mines, 291p. (M. Sc. Thesis).
- OLSSON, O. 1978. Scattering of eletromagnetic waves by a perfectly conducting half plane below a stratified overburden. **Radio Science**, 13: 391-147.
- OLSSON, O. 1980. VLF anomalies form a perfectly conduction half plane below an Overburden. **Geophysical Prospecting**, 31: 171-191
- OLSSON, O. 1983. Computing VLF Response over Half-Plane end Wedge Models. **Geophysical Prospecting**, 29: 415-434.
- PAAL, G. 1965. Ore prospecting based on VLF-radio signals. **Geoexploration**, 3: 139-147.
- PAAL, G. 1968. Very low frequency measurements in Northern Sweden. **Geoexploration**, 6: 141-149.
- PALACKY, G. J. 1975, Interpretation of INPUT AEM measurements in areas of Conduitive overburden: **Geophysics**, 40, 490-502.

- PALACKY, G. J. & SENA, F. O. 1979. Conductor identification in tropical terrains – case Histores from the Itapicuru greenstone belt, Bahia, Brasil: **Geophysics**, 44: 1941-1962.
- PALACKY, G. J. & KADEKARU, K. 1979. Effect of tropical weathering on electrical and Electromagnetic measurements: **Geophysics**, 44: 69-88
- PARASNIS, D. S. 1971. Analysis of some multifrequency, multiseperation electromagnetic surveys; **Geophysical. Prospecting**, 19: 163-179
- PATERSON, N. & RONKA, V. 1971. “Five Years of Suveying With the VLF-EM Method”. In: Annual International Meeting, Toronto, Society of Exploration Geophysicists, 9: 7-26.
- PEREIRA, G. L. 2005. **Estruturação e ampliação da eGs (electrical GEOPHYSICS suíte)**. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. (Dissertação de Mestrado).
- PODDAR, M. 1982. Very Low-Frequency Electromagnetic Response of a Perfectly Conducting Half-Plane in a Layered Half-Space. **Geophysics**, 47: 1059-1067.
- QUEIROZ, J. C. B. & VERMA, O. P. 1987. Resposta eletromagnética de um corpo vertical sob manto de intemperismo em multifrequência, multiseparação obtidos no laboratório com diferentes sistemas de bobinas. **Revista Bras. de Geociências**, 5: 19-28.
- RIJO, L. 1977. **Modeling of Eletric and Eletromagnetic Data**. University Of Utah. (Ph.D Thesis).
- SAYDAM, A.S. 1981. Very low-frequency eletromagnetic interpretation using tilt-angle And elipcity measurements. **Geophysics**, 46(11): 1594-1605.

- SILVA, E. M. S. 2000. **Retirada dos efeitos de heterogeneidade no manto de intemperismo o pelo método de diferenças de freqüências**. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. (Dissertação de Mestrado).
- SILVA, L. M. & VERMA, O. P. 1986. Efeitos do manto de intemperismo sobre Anomalias eletromagnéticas (HLEM) geradas por corpos tabulares inclinados. **Revista Bras. de Geociências**, 16: 285-239.
- SILVA, R. C. A. & VERMA, O. P. 1997. Anomalias eletromagnéticas de corpos inclinados em contato com o manto: In: Cong. Int. Soc. Bras. de Geofísica, 5., **Resumos expandidos**: 2: 810-813.
- SILVA, R. E. C. 2005. **Interfaces gráficas de entrada e saída de dados da eGs (electrical GEOPHYSICS suíte)**. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. (Dissertação de Mestrado).
- SINHA, A. K. 1984. Interpretation of Ground VLF-EM Data in Terms of Vertical Conductor Models, submitted for publication in **Geoexploration**.
- SINHA, A. K. 1990. Interpretation of Ground VLF-EM Data in Terms of Inclined Sheet-Like Conductor Models. **Pageoph**, 132 (4): 733-755
- SMITH, B. D. & WARD, S. H. 1974. On the computation of polarization Ellipse Parameters. **Geophysics**, 39 (6): 867-869.
- STRATTON, J. A. 1941. **Eletromagnetic theory**. New York, McGraw-Hill.
- TELFORD, W. M. et. Al. 1976. **Applied Geophysics**. Cambridge, Cambridge University Press. 860 p.
- VERMA, O. P. 1981. Eletromagnetic response of fold models in a uniform field. **Geophysical Prospecting**, 29: 451-461.

- VILLEGAS-GARCIA, C. J. & WEST, G. F. 1983. Transformation of electromagnetic anomalies brought about by a conducting host rock. **Geophysics**, 40(3): 473-489.
- VOZOFF, K. 1971. the Effect of Overburden on Vertical Component Anomalies in AFMAG and VLF Exploration: a computer study. **Geophysics**, 36: 53-57.
- WAIT, J. R. 1970. **Electromagnetic waves in stratified media**, 2. ed.: New York, Pergamon Press.
- WATT, A. D. 1967. VLF radio engineering; New York, Pergamon Press.