

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

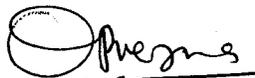
EFEITOS DO MANTO DE INTEMPERISMO SOBRE
ANOMALIAS “VLF” DOS CORPOS TABULARES INCLINADOS

TESE APRESENTADA POR
EDILBERTO OLIVEIRA ROZAL

COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

Data de Aprovação : 16/03/1997

COMITÊ DE TESE:



Dr. Om Prakash Verma (Orientador)



Dr. Luiz Rijo



Dr. Olivar Antonio Lima de Lima

BELÉM

1997

ROZAL, Edilberto Oliveira. Efeitos do manto de intemperismo sobre anomalias (VLF) gerados por corpos tabulares inclinados. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1997. 101p.

Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1996.

1. MANTO. 2. INTEMPERISMO. 3. ANOMALIAS. 4. CORPOS TABULARES. 5. MODELAMENTO ANALÓGICO. 6. FREQUÊNCIAS. 7. BOBINAS. I. Título.

**À meus Pais, e aos meus irmãos,
motivos de tudo que sou.**

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Dr. Om Prakash Verma pela credibilidade e orientação assumidas nesta tese.

Aos Drs. Luis Rijo e Olivar Lima pela contribuição e sugestões.

Ao convênio UFPa / PETROBRAS / FADESP pelo suporte financeiro a este programa de Pós-graduação.

A UFPa e ao corpo docente, técnico e administrativo do Departamento de Geofísica da UFPa por terem propiciado os meios para a realização deste trabalho.

Aos colegas pela ajuda, apoio e companheirismo que citarei em ordem alfabética: Alberto Leandro, Álvaro Prestes, Antônio Cândido, Carlos Pereira, Geovani Lamarão, José Geraldo Alves e Roberto César.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	1
ABSTRACT	3
1 - INTRODUÇÃO	4
2 - O MÉTODO VLF	7
2.1 MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS	7
2.2 PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES	8
2.3 CAMPO DEVIDO A UMA ANTENA VLF	11
2.4 POLARIZAÇÃO ELÍPTICA	14
2.5 PARÂMETROS MEDIDOS	18
2.6 METODOLOGIA DE CAMPO	18
2.7 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MÉTODO VLF	23
2.8 INTERPRETAÇÃO NO MÉTODO VLF	24
3 - MODELAMENTO ANALÓGICO	29
3.1 TÉCNICAS DE SE OBTER RESPOSTAS E.M.	29
3.2 MODELAMENTO ANALÓGICO	30
3.2.1 Teoria de Similitude	30
3.2.2 Simulação do Modelo Geológico.....	32
3.2.2.1 Parâmetros do Modelo Geoeletromagnético	32
3.2.2.2 Materiais Utilizados	34
3.2.3 Conjunto de Modelagem VLF	35
3.2.3.1 Sistema de Disposição do Modelo	35
3.2.3.2 Sistema de Transmissão	39

3.2.3.2.1 Geração do Campo Uniforme	39
3.2.3.2.2 Bobina de Helmholtz	40
3.2.3.3 Sistema de Recepção	43
3.2.3.4 Calibração e Procedimento Experimental	44
3.2.3.5 Ocorrência de Erros	45
4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
4.1 EFEITOS DO MANTO	54
4.2 EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR	54
4.3 EFEITOS DO MERGULHO	55
4.4 EFEITOS DA PROFUNDIDADE	56
5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	77
5.1 EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO MANTO	77
5.2 EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR	78
5.3 EFEITOS DO MERGULHO DO CONDUTOR	79
5.4 - EFEITOS DA PROFUNDIDADE	79
5.5 GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS	80
6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

RESUMO

A utilização dos métodos indutivos de propagação E.M. na exploração mineral em regiões tropicais, apresenta grandes dificuldades devido a presença de uma camada superficial condutiva (manto de intemperismo) comumente encontrada nestas regiões. Na região Amazônica, o manto apresenta-se bastante desenvolvido e condutivo, e em regiões semi-áridas, pode-se formar uma fina crosta superficial de sal. Em consequência disto, a interpretação dos dados E.M. obtidos para modelos que não consideram uma cobertura condutiva levam a erros consideráveis.

Objetivando-se estudar os efeitos do manto sobre anomalias VLF devidas a corpos tabulares inclinados em contato com o manto (manto ohmico), foi realizada uma série de experimentos através do modelamento analógico, considerando-se diferentes parâmetros de resposta para o manto e o corpo.

O manto de intemperismo foi simulado por soluções de cloreto de amônia (NH_4Cl) dispostas horizontalmente e o corpo condutor por chapas de grafite colocadas em posições inclinadas verticalmente. Utilizou-se quatro corpos condutores e três mantos com diferentes espessuras e condutividades, simulando, desta forma, diversas situações geológicas.

Os resultados são dados por simples situações dos corpos localizados em um meio não condutor (ar), onde os parâmetros variados são: profundidade do topo, condutividade e mergulho do corpo. Os efeitos da condutividade da cobertura são amplamente ilustrados e avaliados.

Para a análise dos resultados, foi plotado um conjunto de curvas considerando-se os 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.

Estando ou não o manto presente, observou-se, tanto para o tilt angle quanto para a elipsidade, o efeito do aumento da profundidade é o de reduzir a magnitude pico-a-pico e a forma do pico da anomalia, fazendo com que este afaste-se do ponto de "cross-over". Para um condutor de mesma espessura, o aumento da condutividade causa um ligeiro aumento nas anomalias de tilt angle, e uma atenuação nas anomalias de elipsidade.

O efeito geral na variação do mergulho do condutor é o de causar uma assimetria nos perfis de tilt angle e de elipsidade.

O aumento da condutância do manto de intemperismo causa um acréscimo nas anomalias de elipsidade e uma ligeira diminuição nas anomalias de tilt angle; porém, a partir de um certo

valor de condutância do manto (mantos mais condutivos) tanto as anomalias de tilt angle quanto as anomalias de elipsidade começam a atenuar . Há rotação de fase no sentido anti-horário, sendo mais intensa para grandes valores de número de indução do corpo.

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

ABSTRACT

Application of electromagnetic methods for mineral exploration in tropical regions is complicated due to a presence of a conducting overburden encountered in these regions. In the Amazon region, overburden is well developed and conductive; while in semi-arid regions there may be a fine layer containing salts. Consequently, considerable error is introduced in the interpretation of EM data if the presence of the conducting overburden is ignored.

In order to study the overburden effects, on VLF anomalies due inclined tabular bodies in contact with the former (Ohmic - overburden) , a number of analog model experiments were conducted for varying response parameters of the overburden and the ore body. Overburden is simulated by an ammonium chloride solution (NH_4Cl) and the ore body by inclined graphite sheets of different thicknesses. Three overburdens of varying conductance were used to simulate diverse geological situations.

Both, tilt-angle and elipsity anomalies decrease in amplitude with the increase in depth of the ore body and the position of the peak in the profile is removed further away from the cross-over irrespective of the presence of the overburden or not. There is some increase and tilt-angle anomaly profiles. Elipticity anomaly increases with the increase in the conductance of the overburden while tilt-angle anomaly decreases a little bit. However, at higher overburden conductances both of them are attenuated. Phase angle are rotated anti-clockwise with the overburden. This rotation is more intense at higher induction number of the conductor.

In the presence of the ohmic-overburden and at moderate values of their conductance, the conductor appears (i) at lower depth than the real, due to the increase in the anomaly amplitude, and ii) less conducting due to the anti-clockwise rotation of the Argand diagram.

1 - INTRODUÇÃO

Os métodos eletromagnéticos têm sido bastante utilizados na prospecção de corpos condutores, como sulfetos, grafites, zonas de falhamento, etc. Na prospecção de sulfetos maciços, o método E.M. através de suas diversas técnicas de aplicação, reúne vantagens decisivas sobre os outros métodos de prospecção geofísica. A Figura 1.1 mostra o modelo geológico mais simples de um depósito de sulfetos maciço.

A interpretação dos dados E.M. é realizada considerando-se perfis ou diagramas de Argand obtidos através de modelamento reduzido ou matemático.

Na maioria dos modelos, um dos efeitos prejudiciais ao bom desempenho do método E.M. consiste nas correntes secundárias nas camadas superficiais e nas rochas encaixantes de boa condutividade, como por exemplo as argilas, as quais podem blindar parcialmente ou totalmente o campo primário dos condutores mais profundos. Estes condutores, propósito da prospecção, produzem anomalias muito fracas, de difícil interpretação podendo, desta forma, não serem detectadas.

O manto de intemperismo, embora se apresente muitas vezes condutivo, é considerado altamente resistivo. Nas regiões tropicais e subtropicais, principalmente na Amazônia o manto apresenta-se bastante espesso e condutivo. Por mais de 30 anos, através dos modelos analíticos, numéricos e analógicos estudos tem sido realizados para avaliar o efeito de uma camada de manto em prospecção indutiva E.M.

Através do modelamento reduzido, foi realizada uma série de experimentos objetivando a investigação dos efeitos do manto sobre anomalias devido a corpos inclinados do tipo semi-plano. Considerou-se vários parâmetros de resposta para o manto e diferentes parâmetros de resposta para o corpo tais como; mergulhos, profundidade, etc. Dentre os trabalhos para estudar os efeitos do manto de intemperismo destacamos:

LOWRIE & WEST (1965), utilizando o sistema HLEM para um condutor tabular vertical, observou que os valores interpretados de profundidade e condutância do corpo são maiores quando interpretadas baseando-se em diagramas convencionais.

NEGI (1967), utilizando soluções analíticas, constatou maior resposta E.M. do condutor na presença do manto moderadamente condutivo, em contato ôhmico com o condutor.

PARASNIS (1971) e LAJOIE & WEST (1977) baseados em levantamentos E.M. para o sistema HLEM em diversas frequências e separações transmissor-receptor também observam discrepâncias sistemáticas pela presença do manto de intemperismo.

LAJOIE & WEST (1977) trabalhando com multi-frequência no campo encontraram que, para o manto em contato, os mesmos efeitos eram observados com o aumento de frequência, entretanto a rotação era primeiro no sentido anti-horário e, aumentando-se mais a frequência, revertia o sentido da rotação.

SILVA & VERMA (1986) estudaram os efeitos do manto sobre semi-planos em várias inclinações com o sistema HLEM. Neste trabalho foi observado o aparecimento de um pico extra na quadratura no caso de semi-planos com pequenas inclinações, na presença do manto em adição aos outros efeitos observados anteriormente.

O objetivo deste trabalho é avaliar as modificações E.M. devido a camada do manto de intemperismo, assim como estudar seus efeitos sobre anomalias E.M. de corpos tabulares inclinados, em contato ohmico com o manto. Os resultados dos experimentos realizados através do modelamento analógico, nos conduzem a um melhor entendimento da interação entre o corpo e o manto. Este estudo foi realizado simulando-se o método VLF.

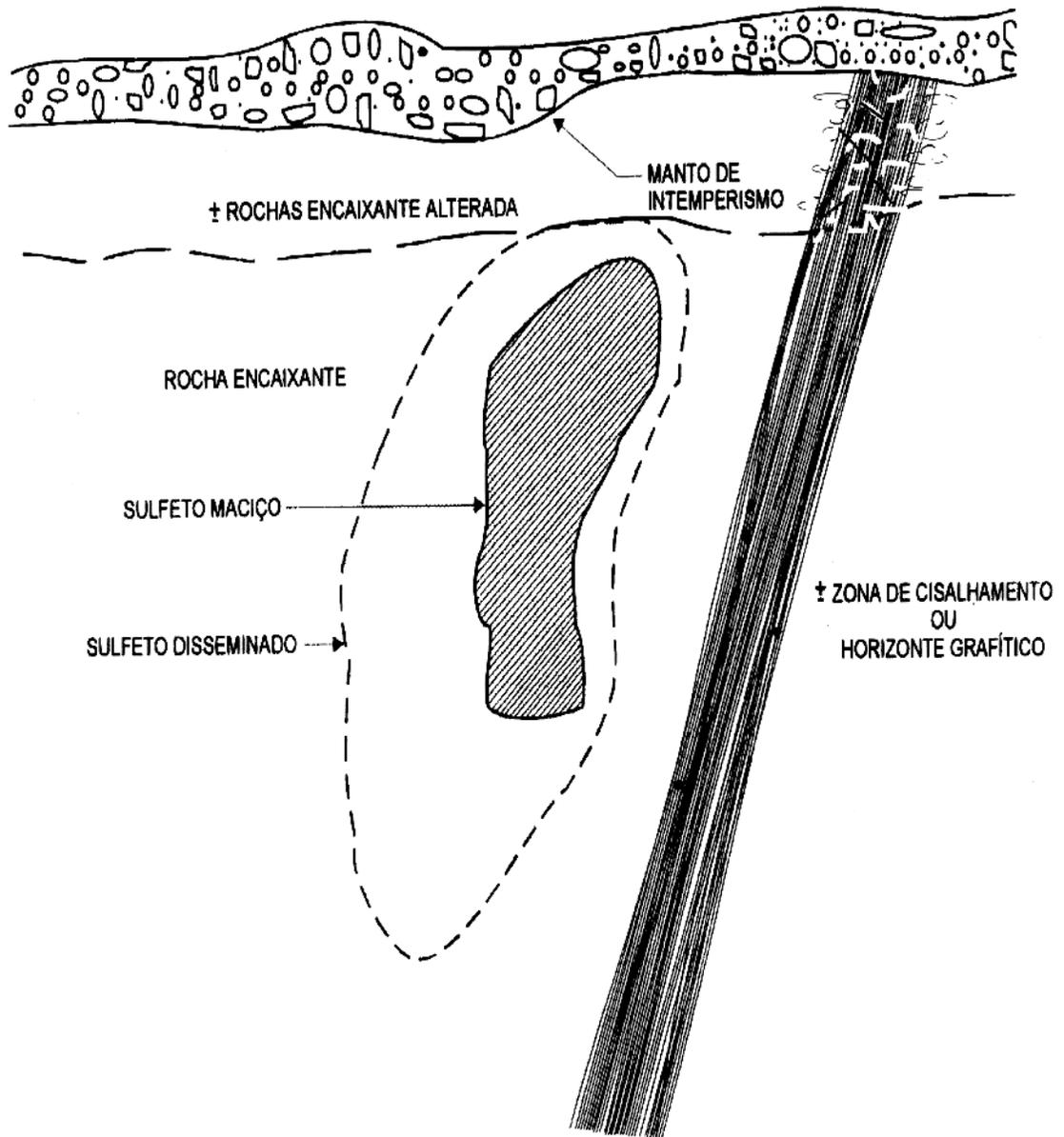


Figura 1.1 - Representação esquemática do ambiente geológico geral encontrado na prospecção de depósitos de sulfeto maciço.

2 - O MÉTODO VLF

2.1 MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

Os métodos E.M. 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 VLF.

Na maioria das aplicações os métodos eletromagnéticos aparecem como métodos indutivos, os quais ocorrem quando o campo primário é gerado através de bobina transmissora. Quando o campo é gerado através de corrente injetada por eletrodos em contato ôhmico com o terreno, eles são chamados métodos E.M. condutivos. Estes tem sido pouco utilizados na prática.

Uma das vantagens dos métodos indutivos é que eles favorecem o uso de sistemas aéreos, os quais são geralmente utilizados 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.

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 ser fixa ou móvel. No primeiro caso, pode-se citar como exemplo o método TURAM no qual é utilizado como fonte uma espira, em geral retangular, disposta na superfície do terreno. O próprio método VLF, que faz uso de campos gerados por antenas especialmente construídas para comunicação de submarinos, também recai nesta categoria. Para respostas de anomalias VLF em modelamento utiliza-se o par de Helmholtz para a geração de um campo uniforme (VERMA, 1981).

2.2 PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES

O método VLF é do tipo passivo, utiliza sinais eletromagnéticos originados por transmissores fixos de rádio militares distribuídos no globo terrestre (Figura 2.1) e de comunicações. Opera com frequência de 15 a 25 kHz e um alto poder de radiação (Tabela 2.1). As frequências VLF se comparadas com a faixa de 60-5000 Hz utilizada pelos métodos convencionais de prospecção, é uma faixa muito alta. A baixa atenuação sofrida pelas ondas para grandes distâncias possibilita a utilização dos transmissores VLF como fonte.

O transmissor consiste de uma 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 da antena (pequeno loop equivalente a um dipolo magnético). O campo primário assim originado pode ser considerado uniforme (ondas planas) para grandes distâncias do transmissor (Figura 2.2), permanecendo assim caso se mantenham estáveis as condições geológicas do meio onde se propaga.

Estes sinais se propagam principalmente entre a ionosfera e 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.

A aplicação deste método na exploração mineral começou por volta de 1960. Em 1964, o primeiro instrumento VLF foi confeccionado (GEONICS LTD. 1964), e medidas de componentes magnéticas do campo em regiões mineralizadas tem sido descritos por PAAL (1965, 1968). Desde então o método tem-se tornado extensivamente utilizado como instrumento na prospecção mineral e mapeamento geológico, especialmente no Canadá e Escandinávia. O método tem provado ser eficiente na localização de estruturas de acentuada condutividade, por exemplo: mineralização, condutores em veios e zona de fratura.

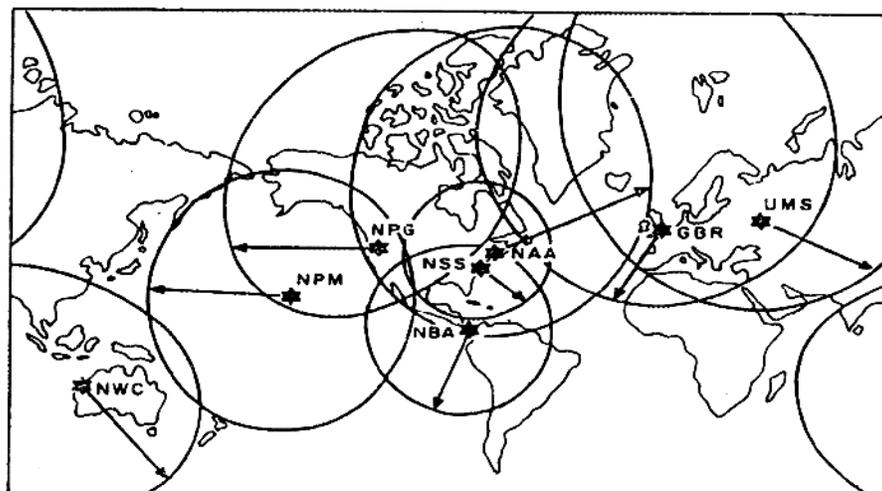


Figura. 2.1 - Cobertura mostrando as mais importantes estações militares, outras estações existem para realizar as operações (Operating Manual - SCOPAS SE-81)



Figura 2.2 - Componente Magnética do campo Eletromagnético no plano à 90° da antena vertical (TILSLEY, 1976).

Tabela 2.1: Relação dos transmissores mais potentes

Estação	Localização	Poder de Radiação (Kw)
U.S.A		
NAA	Cutler, Maine, U.S.A 67W17 44N39	1000
NKL	Jim Creek, Wash., U.S.A. 48N12 121W55	300
NSS	Annapolis, Md. U.S.A.	100
NAU	Porto Rico 67W11 18N23	100
WWVL	Boulder, Colo. U.S.A.	40
NPM	Iualuaki, Hawai 21N25 158W09	300
EUROPA		
GBR	Rugby GBR 01W11 52N22	500
UMS	Moscow U.S.S.R. 37E18 55N49	1000
JXZ	Helgeland, Noruega 13E01 66N25	350
FUO	Bordeaux, França 00W48 44W65	500
UFT	Sainte Assise, Paris França	61
PXX	Malabar, Java Indonésia	162
AUSTRÁLIA		
NWC	North West Cape, Austrália 21S49 114E10	1000
AMÉRICA DO SUL		
LPZ	Marte grande, Buenos Aires Argentina	72

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 à várias distâncias do transmissor. Desta forma, torna-se bastante interessante saber a intensidade do campo em função da distância do transmissor, assim como também sua variação com o tempo.

Assuma inicialmente que a fonte transmissora seja um monopolo 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 (WATT, 1967).

$$E_z = \frac{n_0 I_0 h}{2\pi} \times \left(\frac{i\beta}{r} + \frac{1}{r^2} - \frac{i}{\beta r^3} \right) \times e^{-i\beta r} \cdot e^{i\omega t}, \quad (\text{V/m}) \quad (2.1)$$

e

$$H_\phi = \frac{I_0 h}{2\pi} \times \left(\frac{i\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \times e^{-i\beta r} \cdot e^{i\omega t}, \quad (\text{A/m}) \quad (2.2)$$

onde: $I_0 e^{i\omega t}$ 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)

$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ (henry por metro)

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ (farad por metro)

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

$$\beta = 2 \pi \lambda^{-1}, \quad (2.3)$$

onde λ é o comprimento de onda no espaço livre.

Nas equações (2.1) e (2.2) 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 a 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 (2.1) e (2.2), chegamos a concluir que a potência total fluindo através da superfície esférica é dada por:

$$P = \frac{4\pi}{3} n_0 \left(\frac{I_0 h}{\lambda} \right)^2, \quad (2.4)$$

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 (2.4) nos permite reescrever as equações (2.1) e (2.2) com formulações mais úteis as quais nos permite calcular a potência de um transmissor VLF que são:

$$E_z = 9,5 \frac{\sqrt{P}}{r}, \quad (2.5)$$

$$H_\phi = \frac{E_z}{n_0}, \quad (2.6)$$

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. A unidade mais utilizada na engenharia são E em milivolts por metro, P em quilowatts, e r em quilômetros. Assim:

$$E_z (mV/m) = 300 \frac{\sqrt{P(kw)}}{r(km)}, \quad (2.7)$$

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

$$\begin{aligned} E_z [db, 1mV/m] &= 20 \log \left(\frac{E_z (mV/m)}{1mV/m} \right) \\ &= -20 \log r [km], \end{aligned} \quad (2.8)$$

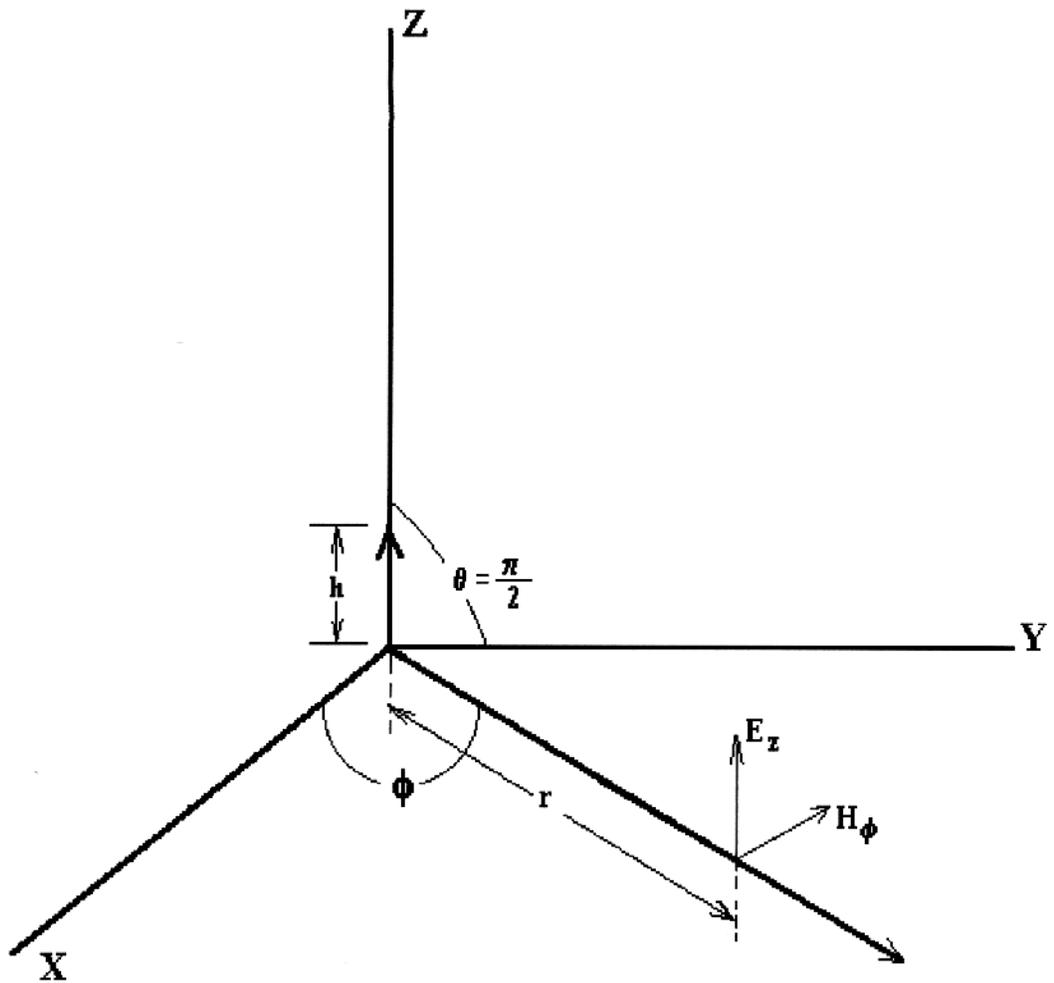


Figura 2.3: Esquema indicando os campos devido a um monopolo de corrente

2.4 POLARIZAÇÃO ELÍPTICA

Medidas do campo secundário são normalmente feitas em VLF pela comparação dos sinais na direção vertical e horizontal (Figura 2.4). Desde que o campo primário seja aproximadamente horizontal, obtém-se as medidas da intensidade do campo secundário; pode-se também determinar, aproximadamente, a fase do campo secundário em relação ao primário.

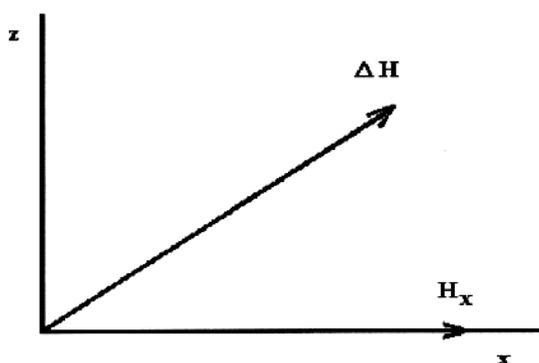


Figura 2.4 - Relações entre os campos primário e secundário

Para entender como estas medidas são realizadas, faz-se necessário conhecer os parâmetros da elipse de polarização (Figura 2.5).

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

$$\frac{X^2}{H_x^2} + \frac{Z^2}{H_z^2} - 2 \frac{XZ \cos \phi}{H_x H_z} = \text{sen}^2 \phi, \quad (2.9)$$

onde a nomenclatura é ilustrada na Figura 2.5. O ângulo ϕ é a diferença de fase entre os campos vertical e horizontal, isto é:

$$\phi = \phi_z - \phi_x$$

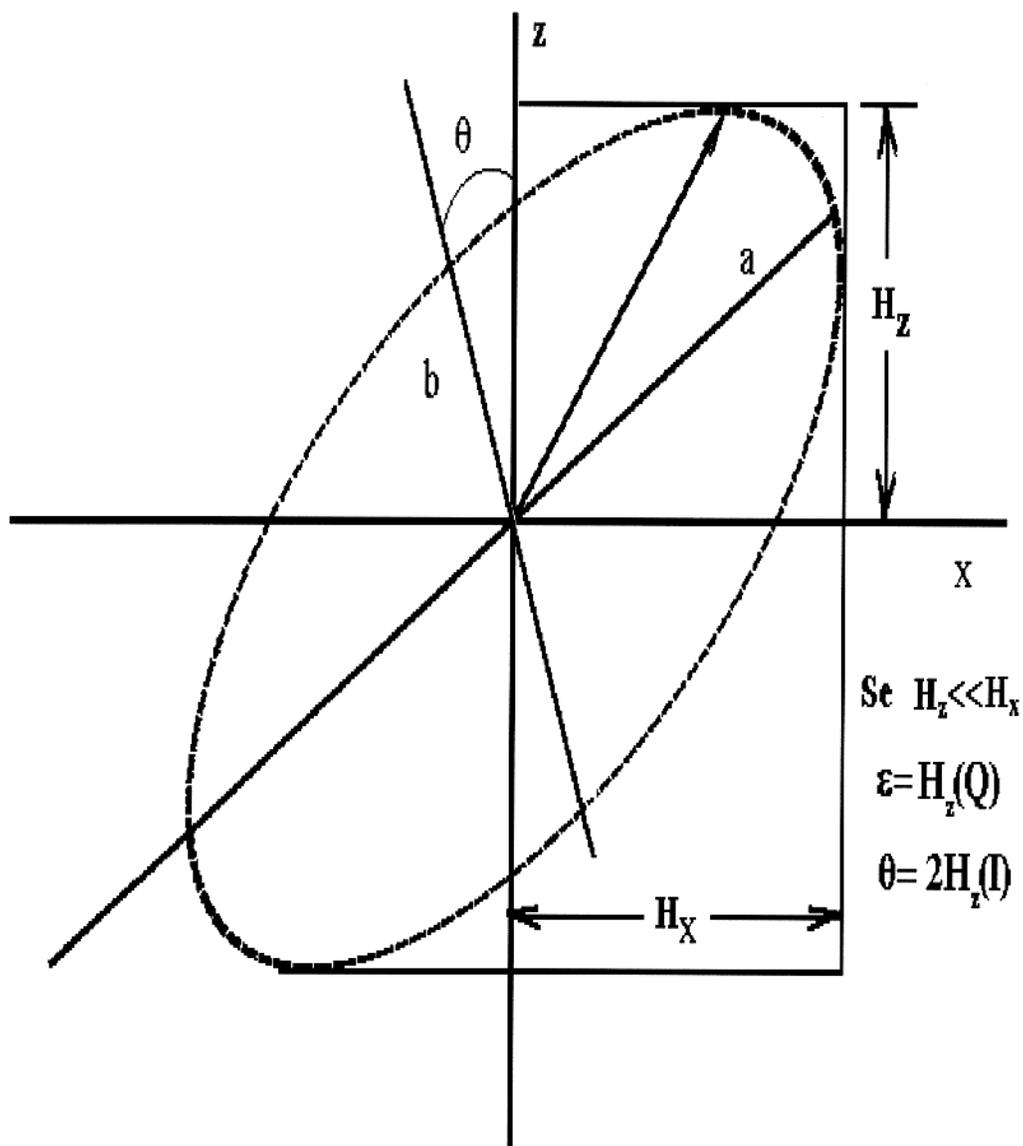


Figura 2.5 - Elipse de polarização

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:

$$\operatorname{tg}(2\theta) = \frac{2\left(\frac{H_z}{H_x}\right) \cos \phi}{1 - \left(\frac{H_z}{H_x}\right)^2}, \quad (2.10)$$

A razão entre os eixos maior e menor (b/a) (Figura 2.5) 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:

$$\varepsilon = \frac{b}{a} = \frac{H_z H_x \operatorname{sen} \phi}{\left| H_z e^{i\phi} \operatorname{sen} \theta + H_x \cos \theta \right|^2}, \quad (2.11)$$

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

$$H_z(I) = \frac{H_z}{H_x} \cos \phi, \quad (2.12)$$

e

$$H_z(Q) = \frac{H_z}{H_x} \operatorname{sen} \phi, \quad (2.13)$$

obtem-se:

$$\operatorname{tg}(2\theta) = 2 H_z(I) \frac{1}{1 - \left(\frac{H_z}{H_x}\right)^2}, \quad (2.14)$$

e

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

ou

$$\varepsilon = \frac{b}{a} = H_z(Q) \frac{1}{\left(H_z(I) \sin\theta + \cos\theta \right)^2 + \left(H_z(Q) \sin\theta \right)^2}, \quad (2.15)$$

As equações (2.14) e (2.15) 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 (2.14) reduz-se a:

$$\text{tg}(2\theta) = 2 H_z(I), \quad (2.16)$$

Esta equação indica que a tangente da inclinação (e 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 $\left(\frac{H_z}{H_x} \right)_o = 0,5$.

A elipsidade pode ser escrita como:

$$\varepsilon = H_z(Q), \quad (2.17)$$

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)).

2.5 PARÂMETROS MEDIDOS

Durante os trabalhos de campo com o VLF, as linhas de caminhamentos são aproximadamente paralelas ao campo magnético incidente. Na presença de inhomogeneidades de condutividade na terra, os campos secundários são gerados pela indução de correntes neste corpo condutivo que por sua vez gera um campo magnético secundário. O campo resultante é elipticamente polarizado e este é composto pela combinação dos campos primário e secundário (Figura 2.5). Tilt angle (θ) é o ângulo formado pelo eixo maior da elipse com a horizontal, o qual é dado em graus. Comumente a razão do eixo menor com o eixo maior é chamado de elipsidade (ϵ). Tilt angle e elipsidade são relacionados com as componentes horizontal (H_x) e vertical (H_z) do campo magnético (observe as equações (2.14 e 2.15)). Além do Geonics EM 16, existem outros instrumentos 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 16 R, 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, etc. A (Tabela 2.2) mostra alguns receptores VLF juntamente com as quantidades medidas.

2.6 METODOLOGIA DE CAMPO

Pelo fato de normalmente utilizar transmissores fixos o método VLF possui aqui parâmetros bastante simplificados. Consistem quase sempre de um rádio receptor dotado de uma grande sensibilidade, onde vem acoplado um inclinômetro. Ao depender do modelo pode ou não apresentar fortes medidas de intensidade de campo primário.

Os receptores são aparelhos constituídos por um sistema de duas bobinas ortogonais (Figura 2.6). 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 com ele desvantagens:

- i) Perdas de sinais durante o contato elétrico;
- ii) Distorções no campo primário devido a efeitos culturais.

Além do EM16-Geonics podemos também mencionar um outro receptor VLF que foi fabricado pela SCINTREX, o receptor VLF SCOPAS modelo SE-81. A operação deste instrumento é bastante simples, não existindo alto grau de conhecimento do operador, pois com o aparelho funcionando devidamente, a seleção do transmissor é o primeiro passo no trabalho de campo. O mapa de cobertura das estações (Figura 2.1) auxilia na escolha de um campo suficientemente forte na área investigada. A obtenção do sinal máximo dá-se com a bobina receptora orientada no plano horizontal. O levantamento é realizado normalmente em linhas paralelas à componente magnética do campo primário utilizado.

No trabalho de campo é necessário o cheque periódico 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, menor durante o verão.

A operação varia de acordo com a característica medida, porém sem apresentar dificuldades para qualquer uma.

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 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 o detalhe 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 em quadratura, etc...

Tabela 2.2 : Receptores VLF colocados em ordem cronológica aproximada

Instrumento	Quantidade Medida	Referência de Fase
Geonics EM16	T, E	H_y
Geonics EM18	H_z (I, Q)	H_y
Crone Radem	T, $ H_y $	H_y
Geonics EM 16R	E_x (I, Q)	E_z
Barring Radiophase	H_x (I, Q) H_y (I, Q) H_z (I, Q)	E_z
Barring E-Phase	E_x (Q)	H_y
Herz Totem 2A	H_z (Q), $ H_y $	H_y
Scintrex VLF 3	H_z (I, Q)	H_y
Scintrex VLF 4	H_z (I, Q) E_x (I, Q)	H_y
Scopas SE-81	T, E H_z (I, Q)	H_y
Phoenix VLF 2	T, E	H_y
ABEM Wadi	H_z (I, Q)	H_y
BRGM VLF 2	T, E E_x (I, Q)	H_y
EDA Omni Plus	T, H_z (I, Q), $ H $ E_x (I, Q)	H_y

Onde as quantidades medidas possuem os seguintes significados:

H_x - campo magnético horizontal normal ao campo magnético primário

H_y - na direção do campo magnético primário

H_z - campo magnético vertical

E_x, E_y - componentes do campo elétrico horizontal

E_x - ao longo da direção radial do transmissor

E_z - componente do campo elétrico vertical

T - tilt angle, definido na Figura 2.5

E - elipsidade, definida na Figura 2.5

I - componente em fase

Q - componente em quadratura

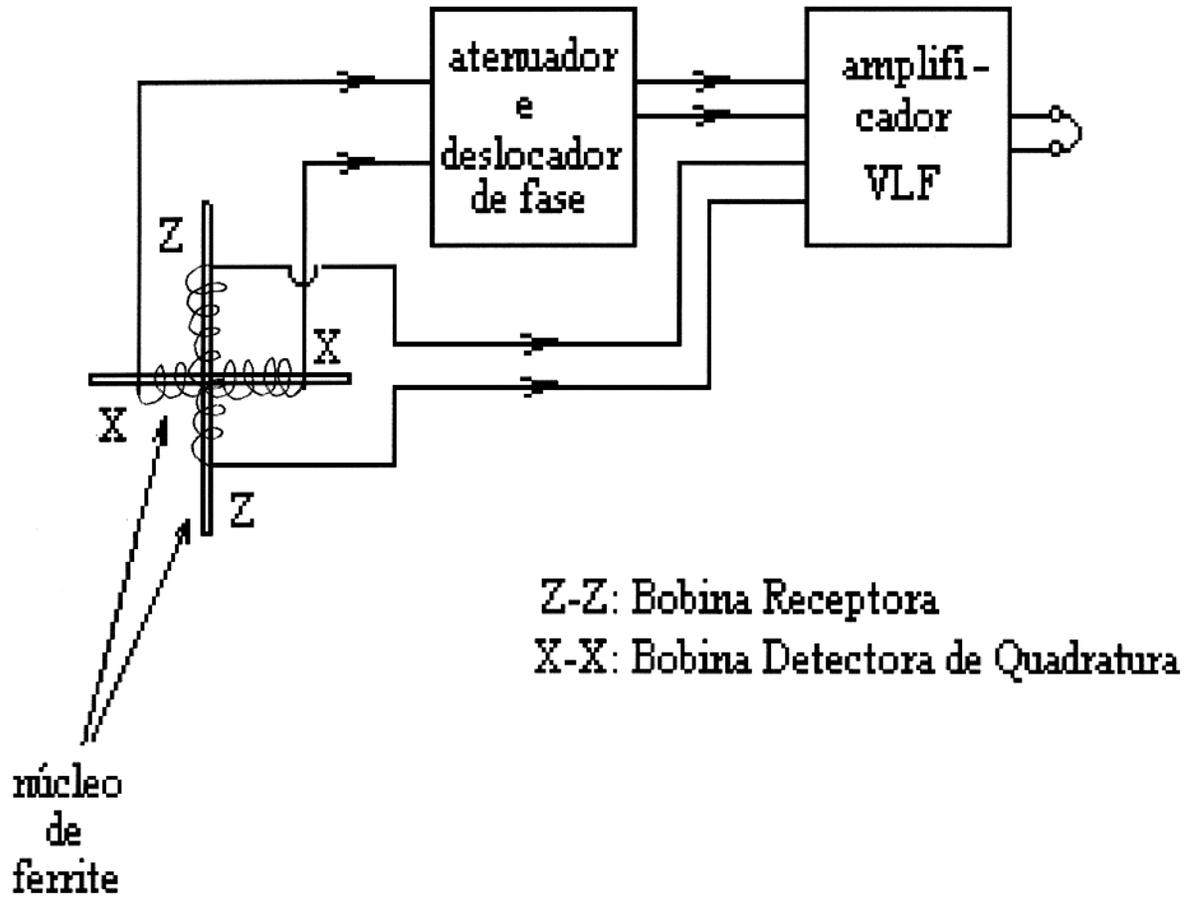


Figura 2.6 - Esquema do receptor VLF-EM (TELFORD et al., 1976).

2.7 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MÉTODO VLF

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

relacionados aos equipamentos utilizados:

- I) Aparelhos portáteis, leves, com leituras claras e rápidas, operado por uma só pessoa.
- II) Pelo fato de não utilizar transmissor, os gastos são reduzidos.
- III) Utilizam-se baterias comuns, pois a potência é baixa.
- IV) Por utilizar transmissor fixo, possui direção de campo constante e amplitude de sinal uniforme na área de investigação.
- V) A utilização de altas frequências (15 - 25 KHZ) realçam feições superficiais como cobertura e água subterrânea.

Relacionadas as feições geológicas, podemos citar as seguintes vantagens:

- I) Pode atingir boas profundidades em áreas onde não existem rochas muito condutivas.
- II) 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,
- III) Pode ser utilizada em áreas de topografia acidentada, embora seja necessário um tratamento semi-quantitativo para corrigir as distorções dos perfis em terrenos condutivos,
- IV) Zonas de granitos fraturados são favorecidas na prospecção de águas subterrâneas com o método VLF.

Apesar de todas essas vantagens, o método apresenta algumas restrições, todas elas de caráter geológico,

- I) Algumas áreas podem ser prejudicadas pela limitação da escolha do transmissor fixo, não podendo ser detectado condutores com "strikes" entre 45° e 105° , ou seja, não se pode fazer a orientação do transmissor de acordo com a estrutura geológica.
- II) Áreas do tipo vulcano sedimentares, zonas fraturadas de gnaisses e granitos restringem sensivelmente o uso do método VLF, pois estas áreas apresentam condutores com direções bastante variadas.
- III) O método tem dificuldades em reconhecer anomalias de condutividade e de profundidade, porém medidas com diferentes frequências podem auxiliar na distinção

IV) Terrenos condutivos limitam extremamente a profundidade de penetração durante a prospecção, devido as altas frequências empregadas no método.

2.8 INTERPRETAÇÃO NO MÉTODO VLF

Para a interpretação qualitativa deve-se levar em conta que todos os sistemas do método empregam um campo primário que é aproximadamente horizontal. Então, sendo a componente VLF primária a horizontal, as condutividades locais adicionarão componentes verticais e conseqüentemente teremos, localmente, um campo total inclinado.

Deve-se 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 (chegando até a desaparecer), muito embora o campo magnético permaneça horizontal.

A depender da metodologia de trabalho tem-se informações diferentes. No caso de medidas do ângulo de inclinação, os seus perfis darão consideráveis informações sobre o condutor. Neste caso o cross-over localiza o topo do condutor, a declividade do cross-over indica a sua profundidade, enquanto que a assimetria do perfil indica o mergulho do condutor. Um típico par de perfis de tilt angle e elipsidade são mostrados na Figura 2.7 a qual ilustra as quantidades medidas nos perfis e são utilizadas na interpretação. 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. A distinção entre a condutividade e a profundidade do corpo é normalmente difícil, e portanto medidas em diferentes frequências pode ajudar na interpretação.

No método VLF foram realizados vários estudos sobre os efeitos da topografia, rocha encaixante, bem como também do manto de intemperismo com respeito a anomalias devido a corpos inclinados do tipo semi-plano. Foi realizado uma série de investigações através do modelamento reduzido considerando-se diferentes parâmetros de resposta, mergulhos e profundidade para o corpo. Cita-se abaixo um resumo de alguns trabalhos realizados.

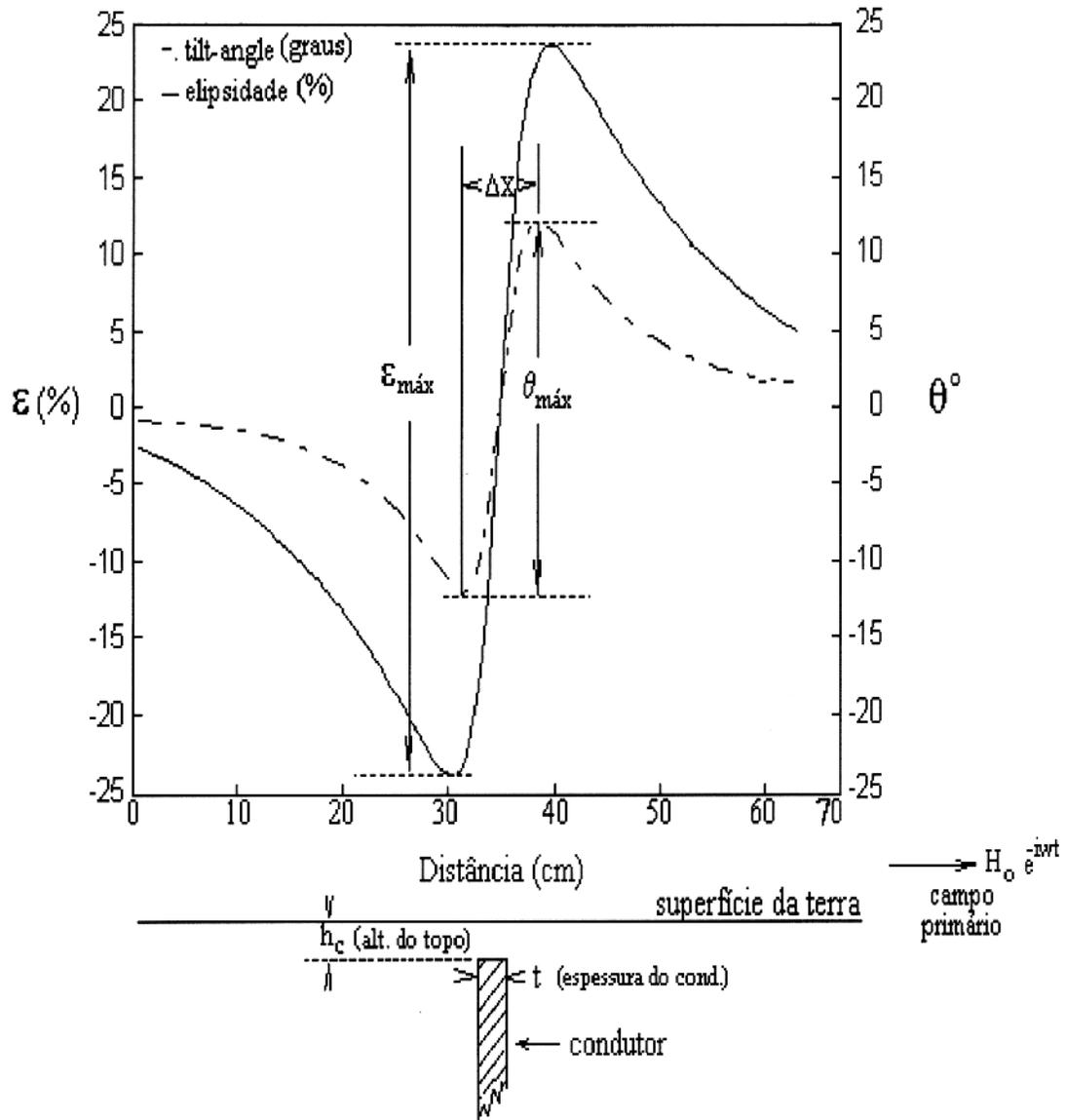


Figura 2.7 - Perfis típicos de tilt angle e elipsidade sobre um corpo condutor vertical

1) Efeitos da topografia:

Vários trabalhos tem sido escritos tratando de efeitos da topografia em sondagens VLF. Tendo em vista a complexidade das respostas, dependendo da resistividade do local, a melhor aproximação é simplesmente proteger a polaridade normal das anomalias que são detectadas, pois quando estas estão localizadas próximas a vales profundos possuem polaridades invertidas. Uma outra fonte de ruído encontrada nas respostas VLF são causadas pela utilização de altas frequências.

WITTLES (1969) sugeriu que um esboço da topografia ao longo da linha de sondagem pode ser útil, onde estes esboços são diretamente comparados com dados VLF. As anomalias que não são obviamente relacionadas as características topográficas do terreno são selecionadas para investigações mais detalhadas. Naturalmente que os locais onde existem corpos condutivos são associados com a topografia e esses casos na maioria das vezes são analisados de forma bastante simples. O segundo método proposto por Wittles para remover o efeito da topografia foi o de calcular e plotar a primeira derivada dos valores obtidos nos perfis da componente real.

FRASER (1969) fez uso de um método de filtragem para solucionar o problema de ruídos causados pela alta frequência utilizada no método VLF. O emprego de um filtro passa-baixa remove a influência de anomalias de grande frequência ou muito pequeno comprimento de onda (estas causadas pela topografia ou por algumas feições geológicas normalmente insignificantes em pesquisa de rotina) e melhora sensivelmente a resolução e o reconhecimento das anomalias. Os ruídos não contornáveis são transformados em dados com pouco ruído e contornáveis, obtendo desta forma valores de contorno para a confecção de um mapa de contorno com dados filtrados. É uma técnica simples de filtragem e perfis com diferenciação do ângulo de inclinação que pode ser aplicada eventualmente no campo ou no laboratório para rápida correlação e interpretação geológica.

MALIK et al. (1985) estudaram o ruído topográfico em dados E.M. VLF. Neste trabalho, fez-se o estudo do efeito da inclinação da superfície da terra nas medidas eletromagnéticas em modelamento, os quais foram verificados em dados de campo. Inclinações acima de 30° foram simuladas com condutores planos variando o mergulho de 30° a 90° . Neste trabalho, simples relações lineares foram estabelecidas entre as inclinações do terreno e a amplitude da componente real do campo E.M. resultante devido ao corpo condutor. A utilização desta simples correção foi demonstrada em dois exemplos de campo.

2) Efeitos da Encaixante e do manto de intemperismo

CONEY (1977) estudou a interpretação de medidas VLF em prospecção Geofísica.

Detalhes construcionais são descritos por simples aparelhos do método VLF, baseados em princípios EM-16. Resultados são dados por simples situações de condutores localizados em um meio não condutor (ar), onde os parâmetros variados são: profundidade do topo, condutividade e mergulho do corpo. Os efeitos da condutividade da cobertura são também ilustrados, onde vários aspectos de interpretação são descritos.

Neste trabalho conclui-se que para ambas as componentes real e em quadratura o efeito de aumento da profundidade é o de reduzir a magnitude pico-a-pico e a forma do pico da anomalia, fazendo com que este pico afaste-se do ponto de cross-over. Para um condutor de mesma espessura, o aumento da condutividade causa um ligeiro aumento nos valores da componente real, e uma diminuição no valor da componente em quadratura.

O efeito geral na variação do mergulho do condutor é o de causar uma assimetria nas componentes real e em quadratura do perfil. Na presença do manto de intemperismo foi verificado que ocorre uma inversão de polaridade entre as componentes real e em quadratura, sendo que as anomalias pico-a-pico da componente real ficam bastante reduzidas.

Neste trabalho verificou-se também que a razão entre a componente real e a componente em quadratura não é uma quantidade confiável para indicar a condutividade do corpo, pois esta pode ser drasticamente modificada na presença da cobertura condutiva.

KAIKKONEN (1979) publicou os resultados da sua pesquisa pela técnica do elemento finito. 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 (H_z/H_x) 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

OLSSON (1980) através do método da solução teórica verificou a resposta VLF de anomalias causadas por um semi-plano perfeitamente condutor para diferentes condições de manto e ângulo de mergulho.

Neste trabalho computou-se anomalias VLF para diferentes condutividades e espessura de cobertura e também para diferentes ângulos de mergulho do corpo tipo semi-plano. Foi verificado que as curvas de anomalia mostram uma conduta razoavelmente complicada, concluiu-se que isto

ocorre principalmente devido a 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 fixando-se todos estes parâmetros citados anteriormente e variando-se a freqüência em um intervalo de 15 a 25 KHZ não evidencia-se um efeito significativo em toda a resposta VLF do condutor.

Estes estudos também revelam que é possível obter-se uma estimativa quantitativa do produto condutividade-espessura e condutividade vertical da chapa condutora através de diagramas característicos. Na presença da cobertura condutiva, a resposta do ângulo de inclinação é invariável relativa ao caso de ausência da cobertura. No caso da resposta da elipsidade, esta pode ser um pouco atenuada dependendo da profundidade e do contraste de condutividade entre a cobertura e a rocha encaixante.

3 - MODELAMENTO ANALÓGICO

3.1 TÉCNICAS DE SE OBTER RESPOSTAS E.M.

A interpretação de dados eletromagnéticos de campo conta com o auxílio de resultados obtidos com soluções analíticas, soluções numéricas e modelamento analógico. Todas essas técnicas são úteis porém todas tem limitações.

O conhecimento da resposta E.M. para certos modelos idealizados de possíveis condutores geológicos tem servido de base para a interpretação de muitos levantamentos de prospecção E.M. Em muitos casos a resposta teórica tem sido obtida por medidas de laboratórios. Entretanto a resposta de modelos de forma regular como esfera, cilindro e placa infinita, é obtida de maneira mais simples em um tratamento matemático que através de modelagem em laboratório. No caso de modelos mais realísticos de geologia complexa, a solução analítica é quase impossível. Assim, eles são altamente simplificados como por exemplo a fina folha semi-infinita (semi-plano), as soluções tem sido obtidas somente para problemas especiais, isto é, considerando o corpo de condutividade infinita.

Na interpretação geofísica de dados de campo é necessário o conhecimento de anomalias causadas por estruturas específicas. Feições tais como irregularidades topográficas, variações irregulares na condutividade e manto de intemperismo podem ser facilmente modelados numericamente. O cálculo de tais anomalias para os métodos elétricos e eletromagnéticos é mais facilmente realizado por meio de técnicas de aproximação numérica por causa das limitações de soluções analíticas e dificuldades na representação dessas feições no modelamento em laboratório.

Os três tipos básicos de modelamento de simples interpretação são unidimensional (camada), bi-dimensional e tri-dimensional. Pode-se tornar os modelos mais complexos incluindo mais camadas, no caso uni-dimensional e corpos múltiplos no caso bi e tri-dimensional. As soluções para os modelos em camadas podem ser analíticas, consistindo de integrais que são facilmente avaliadas numericamente. Para os modelos bi e tri-dimensionais a avaliação da resposta é mais fácil requerendo soluções numérica que se tornaram possíveis somente na última década com o advento de grandes computadores.

Entre as várias técnicas de modelamento digital para simular a resposta de corpos bi e tri-dimensionais na terra temos: diferença finita (JONES & PRICE, 1971), elemento finito

(COGGON, 1971; RIJO, 1977), análise “network” (SWIFT, 1971), equação integral (PARRY & WARD, 1971; HOHMANN, 1971) e métodos híbridos (LEE et al., 1985, a,b).

Embora o modelamento numérico nos condicione solucionar problemas extremamente laboriosos, como o estudo de anomalias causadas por estruturas específicas. Este apresenta certas limitações, pois devido as numerosas possibilidades de erros teóricos e em programação; é necessário que resultados obtidos por diferentes métodos sejam comparados, antes que uma solução numérica possa ser considerada válida.

3.2 MODELAMENTO ANALÓGICO

A técnica de modelos em escala reduzida é muito utilizada para estudar a resposta E.M. de depósitos minerais para auxiliar na interpretação de anomalias; a utilização desta técnica é impulsionada também devido a complexidade em alguns casos das soluções analíticas e acesso de tempo em computação na modelagem digital.

Os experimentos utilizando modelamento analógico podem ser feitos através do princípio de similitude, onde este estabelece que o sistema real e de laboratório em diferentes escalas são eletromagneticamente equivalentes se ambos satisfizerem as mesmas equações físicas. Esta teoria tem sido apresentada por vários autores, como: SINCLAIR (1948), GRANT & WEST (1965), FRISCHKNECHT (1971) entre outros.

3.2.1 Teoria de Similitude

As condições para que um sistema modelo reproduza um dado sistema eletromagnético surge da linearidade das equações diferenciais de Maxwell.

Considere um ponto $P(x_R, y_R, z_R)$ um ponto qualquer do sistema em escala real e $P(x_M, y_M, z_M)$ um ponto do sistema modelo, tal que os sistemas estejam relacionados da seguinte forma:

$$x_R = n x_M, y_R = n y_M \text{ e } z_R = n z_M, \quad (3.1)$$

onde n é o fator linear de escala.

A unidade de comprimento a ser utilizada deverá ser a mesma. Além das distâncias lineares, faz-se a necessidade de relacionar também \vec{E} , \vec{H} e t de ambos os sistemas:

$$\vec{E}_r(x_R, y_R, z_R, t_R) = a \vec{E}_M(x_M, y_M, z_M, t_M), \quad (3.2)$$

$$\vec{H}_r(x_R, y_R, z_R, t_R) = b \vec{H}_M(x_M, y_M, z_M, t_M), \quad (3.3)$$

$$K = \left(\frac{t_R}{t_M} \right) = \left(\frac{f_M}{f_R} \right), \quad (3.4)$$

onde: a, b e k são fatores de escala para as intensidades do campo elétrico, magnético e tempo respectivamente.

Partindo-se agora da equação de difusão em baixas frequências, desprezando a corrente de deslocamento e adaptando-a para os casos de campo e laboratório, respectivamente, verificar-se-à como se relacionam as equações de onda para os dois sistemas (GRANT & WEST, 1965):

$$\nabla_r^2 \begin{pmatrix} \vec{E}_r \\ \vec{H}_r \end{pmatrix} = i \mu_r \sigma_r \omega_r \begin{pmatrix} \vec{E}_r \\ \vec{H}_r \end{pmatrix}, \quad (3.5)$$

De um modo análogo tem-se:

$$\nabla_M^2 \begin{pmatrix} \vec{E}_M \\ \vec{H}_M \end{pmatrix} = i \mu_M \sigma_M \omega_M \begin{pmatrix} \vec{E}_M \\ \vec{H}_M \end{pmatrix}, \quad (3.6)$$

e como:

$$\nabla_r^2 = \frac{1}{n^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x_M^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_M^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_M^2} \right). \quad (3.7)$$

Logo:

$$\nabla_r^2 = \frac{1}{n^2} \nabla_M^2, \quad (3.8)$$

Substituindo (3.8) em (3.5) e considerando que $\vec{E}_r = a \vec{E}_M$ e $\vec{H}_r = b \vec{H}_M$, tem-se:

$$\frac{1}{n^2} \nabla_M^2 \begin{pmatrix} a \vec{E}_M \\ b \vec{H}_M \end{pmatrix} = i \mu_r \sigma_r \omega_r \begin{pmatrix} a \vec{E}_M \\ b \vec{H}_M \end{pmatrix}, \quad (3.9)$$

Comparando (3.9) com (3.6) obtém-se:

$$\mu_M \sigma_M \omega_M = n^2 \mu_r \sigma_r \omega_r. \quad (3.10)$$

Como n pode ser expresso por:

$$n = \frac{L_R}{L_M},$$

onde L_R = dimensão linear característica do sistema real;

L_M = correspondente a L_R no sistema modelo.

Logo podemos escrever:

$$\mu_M \sigma_M \omega_M L_M^2 = \mu_R \sigma_R \omega_R L_R^2. \quad (3.11)$$

O primeiro e segundo membro da equação (3.11) são conhecidos como números de indução (ou parâmetro de resposta) do sistema modelo (α_M) e do sistema real (α_R).

Qualquer sistema real pode ser modelado em laboratório, bastando para isso, conseguir a igualdade dos números de indução.

A disponibilidade dos materiais para tais simulações são difíceis de ser obtidas comercialmente. Este agravante é facilmente superado uma vez que se pode alterar indiscriminadamente a frequência, a condutividade e a dimensão linear do modelo, lembrando que seja mantida a igualdade dos números de indução.

3.2.2 Simulação do modelo geológico

As condições de prospecção pelo método VLF para corpos de sulfetos na presença do manto de intemperismo são simuladas em escala reduzida por um fator de 380 vezes da escala real de acordo com a teoria de similitude. Neste trabalho a geometria do corpo de sulfetos é considerada como semi-plano inclinado em contato ôhmico com o manto de intemperismo. Enquanto que o manto é considerado como uma camada horizontal condutiva.

3.2.2.1 Parâmetros do modelo geoeletromagnético

A condutividade elétrica de minerais e rochas varia dentro de um intervalo bastante amplo. Em trabalhos de prospecção ela é normalmente tomada com valores entre 10^{-5} e 10^4 S/m.

A quantidade e o modo de distribuição de minerais condutivos (por exemplo, grafita, pirrotita, pirita, calcopirita e galena) e uma série de outros fatores explicam a variação da condutividade nos depósitos minerais.

PARASNIS (1956), analisando uma grande quantidade de amostras de diferentes mineralizações encontrou, para as mesmas, condutividades compreendidas entre 10^{-3} e 10^4 S/m. LOWRIE & WEST (1965) revendo os resultados de Parasnís e acrescentando alguns outros, apresentou a seguinte faixa de condutividade: 10^{-1} e 10^4 S/m. Já BOSSCHART (1961), para depósitos de sulfetos maciços encontrou condutividades da ordem de 10^{-3} e 10^1 S/m.

Em modelamento é mais vantajoso considerar-se a condutância obtida para diferentes ocorrências minerais. Isto porque a condutividade medidas em laboratório é normalmente diferente daquela verificada "in situ" ("bulk conductivity"), pois a amostra tem várias de suas características modificadas ao ser retirada do ambiente em que se encontrava e pode não ser representativa do depósito como um todo. Soma-se ao que foi dito, a impossibilidade da separação do parâmetro condutância salvo em levantamento multifrequências, mesmo assim dentro de certos limites.

Para o manto de intemperismo das regiões brasileiras (à exceção da amazônica), a condutância varia entre 0,1 e 1,0 S. Na Austrália, os valores de σt chegam a atingir até 10 S em virtude da existência de uma crosta centimétrica de sal que, nos terrenos brasileiros, quando ocorre, parece ter extensão bastante reduzida (PALACKY & KADEKARU, 1978).

No método VLF, a frequência de operação varia no intervalo de 15 kHz a 25 kHz, portanto a frequência em escala real terá que obedecer este intervalo.

Considerando-se as restrições feitas acima e os valores mais significativos para condutâncias do corpo e do manto, foram adotados os seguintes parâmetros de resposta para o corpo α_c e para o manto α_m já que, de uma maneira geral, esses parâmetros são bastante representativos de situações geológicas reais:

$$\alpha_c = 1,60 \text{ à } 32,27$$

e

$$\alpha_m = 0,0; 0,11; 0,25 \text{ e } 0,40$$

O caso $\alpha_m = 0,0$ implica na inexistência do manto mas se trata de um caso necessário na presente investigação para permitir comparação com os demais (com o manto presente).

3.2.2.2 Materiais utilizados

Uma das limitações encontradas em modelamento reduzido diz respeito a pequenas variedades de materiais comercialmente disponíveis para que a simulação possa ser, toda ela, realizada com reduções adequadas dos parâmetros. Para contornar essa limitação empregam-se frequências que permitam, em face à condutância dos materiais disponíveis para os modelos, a obtenção dos parâmetros de resposta pretendidos. Neste trabalho, o fator geométrico de redução varia em torno de 380 e a frequência no laboratório foi de 70 kHz.

a) Manto

Três mantos de intemperismo com valores de número de indução $\alpha_m = 0,11; 0,25$ e $0,40$ foram simulados, utilizando-se uma solução de cloreto de amônia (NH_4Cl). A espessura das soluções (t_m) foi mantida em $0,15$ m.

Para manter a maior estabilidade possível dos valores de condutividade das soluções foi necessário um controle da temperatura no interior do laboratório, mantendo-a em torno de 25°C . O monitoramento da condutividade das soluções foi feito diariamente através de um condutivímetro modelo BM-31 fabricado pela Digimed instrumentação analítica Ltda.

Na Tabela 3.1 são dados os valores encontrados para condutividades, condutâncias e número de indução dos mantos utilizados nos experimentos, onde o manto M_0 constitui o ar-livre (sem manto).

b) Corpo

Para simular o corpo foram utilizadas chapas de grafite que possuem dimensões de $0,40 \times 0,60$ m, e de condutividade estimada em $0,5 \times 10^5$ S/m e espessura $t_e = (1,0; 2,0; 5,0$ e $10) \times 10^{-3}$ metros. Estes valores, em face a escala utilizada, garantem as condições anteriormente citados para que os modelos pudessem se comportar como semi-planos. Os valores de condutância utilizados no laboratório foram de 48; 96; 240 e 480 S.

Os valores de condutância correspondentes a estes valores no campo são 0,589; 1,1; 2,76 e 5,52 S/m. Estes valores foram obtidos para um fator de escala de 380 e para uma frequência real de 15 KHz .

Na Tabela 3.2 são dados os valores encontrados para condutividades condutâncias e número de indução dos corpos utilizados nos experimentos.

3.2.3 Conjunto de Modelagem VLF

O conjunto experimental consiste de: Sistema de disposição do modelo, do sistema de transmissão e o de recepção.

3.2.3.1 Sistema de Disposição do Modelo

Na disposição do modelo desenvolvido, foi utilizado uma estrutura de madeira com 0,69m de altura, 1,80m de comprimento e 1,46m de largura. A altura de 0,7m foram colocados dois trilhos horizontais, onde neles desloca-se um carrinho de acrílico que contém a bobina receptora e também o primeiro pré-amplificador. No centro deste foi fixado em uma posição simétrica um tarugo cilíndrico, também de acrílico, neste foi colocada a bobina receptora. O carrinho é movido por um motor passo-a-passo com 1,5W de potência. Para o funcionamento do motor foi construído um circuito eletrônico o qual controla a velocidade do mesmo através de um potenciômetro.

Preso ao carrinho é colocada uma célula ótica na posição central da bobina R_x , a qual é ligada a um circuito amplificador o qual por sua vez está acoplado ao analisador de circuitos. Ao lado de um dos trilhos é colocada uma régua de acrílico contendo 67 dentes espaçados de um centímetro cada um. Acionado o motor, o carrinho entra em movimento e em cada dente transposto a célula ótica emite um sinal que permite portanto posicionar o perfil através do marcador de eventos do analisador de circuitos.

Sobre a estrutura de madeira é colocado o tanque de fibra de vidro o qual contém a solução representando o manto. O tanque possui 0,25 m de altura, 2,0 m de comprimento e 1,0 m de largura.

O condutor é encrustado em um suporte de acrílico medindo 60×40 cm que tem uma amarração na parte inferior, o suporte é ajustável às duas hastes de acrílico que estão presas no fundo do tanque. Estas hastes possuem quatro furos cada uma, os quais estão colocados simetricamente ao plano da bobina receptora. Cada furo corresponde uma altura do topo do condutor a bobina R_x . Este suporte pode ser ajustado a qualquer ângulo. A posição central do modelo correspondente ao dente 34 podendo as medidas serem efetuadas em ambos os lados do condutor. Colocou-se uma trave de madeira a qual foi presa a estrutura de madeira (mesa) e no centro desta foi preso um fio rígido de nylon o qual está atrelado a parte superior do suporte do condutor. Este fio possui três pinos colocados de forma minuciosa os quais correspondem aos mergulhos de 30° , 45° e 60° . A chapa na posição vertical (mergulho de 90°) foi calibrada através de um esquadro. Na Figura 3.1 é mostrado um croqui da situação modelada.

3.2.3.2 Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão para a geração do campo uniforme é composto por uma bobina transmissora (bobina de Helmholtz) alimentada pelo oscilador interno do Analisador de circuitos, e um amplificador de potência. Na Figura 3.2 apresenta-se o bloco diagrama dos sistemas de transmissão e de recepção.

Foi utilizado o oscilador interno do analisador de circuitos (NETWORK ANALIZER modelo HP 8751A) como fonte de sinal, o qual permitiu trabalhar com frequências que vão de 5 Hz a 500 MHz, com resolução de 1 MHz. O oscilador funciona na faixa de potência que varia de -50 a +15 dBm com resolução de 0,1 dB. A impedância de saída é de $50\ \Omega$.

O sinal obtido do oscilador foi amplificado antes de fornecer corrente a bobina de Helmholtz. Por este motivo, foi utilizado o amplificador modelo 467A da Hewlett-Packard (USA), o qual fornece -20V a 20V dc com uma potência de 10W. As distorções até 1kHz são inferiores a 0,01%. A impedância de entrada é de $50\ \Omega$ em paralelo com 100pF e a de saída de 5 m Ω em série com 1 μ H.

O campo primário uniforme foi gerado passando corrente a uma pré-determinada frequência em um par de bobinas de arranjo Helmholtz. O par de Helmholtz foi construído na forma geométrica octogonal com diâmetro médio de 177 cm e portanto o espaçamento entre cada

bobina é de 88,5 cm. Cada bobina contém três espiras de fio 16 S.W.G esmaltado, com resistência de 0,125 Ω , auto indutância de 1,22 μH e frequência de sintonia igual a 500 kHz. O sistema foi rigidamente fixado para evitar possíveis distorções no campo devido a vibrações.

Tabela 3.1 - Parâmetros de resposta do manto

Manto	Condutividade (S/m) (σ_m)	Condutância (S) ($\sigma_m t_m$)	Número de indução ($\omega_m \mu_m \sigma_m t_m^2$)
M ₀	0,0	0,0	0,0
M ₁	8,6	1,29	0,11
M ₂	20,04	3,01	0,25
M ₃	32,17	4,83	0,40

onde: $t_m = 0.15$ m, $\omega_m = 2 \times \pi \times 70 \times 10^3$ rad/seg e $\mu_m = 4 \times \pi \times 10^{-7}$ H/m.

Tabela 3.2 - Parâmetros de resposta do corpo

Condutor	Espessura (10^{-3} m) (t_c)	Condutância (s) ($\sigma_c t_c$)	Número de indução ($\omega_c \mu_c \sigma_c t_c^2$)
C ₁	1,0	48	0,03
C ₂	2,0	96	0,11
C ₃	5,0	240	0,66
C ₄	10,0	480	2,65

onde: $\omega_c = 2 \times \pi \times 70 \times 10^3$ rad/seg e $\mu_c = 4 \times \pi \times 10^{-7}$ H/m.

3.2.3.2.1 Geração do Campo Uniforme

A geração de campo uniforme é importante nas modelagens analógicas geofísicas como no método VLF . Neste método, as respostas do corpo-alvo colocado no campo uniforme são analisados para simular diferentes situações geológicas, a não uniformidade do campo primário ao qual o corpo-alvo está sendo submetido gera uma fonte de erros por falta de aproximação das condições realísticas.

O campo uniforme pode ser obtido experimentalmente em Modelagem analógica por meio de vários arranjos físicos, dos quais destacam-se: uma bobina solenóide (BASTOS, 1989), um e dois planos de corrente (DOSSO, 1966 a,b), entre o arranjo de quatro fios (EDWARD, 1980), a antena vertical distante (KRAUS, 1978), e também, o par de bobinas de Helmholtz (CONEY, 1977).

No solenóide a região de campo uniforme é bastante considerável e eficiente, porém a bobina precisa ter um grande comprimento comparado a seu raio para que se consiga este campo, isto se resume em um problema, pois esta relação dificulta no trabalho de realizar medidas nos modelos dentro do solenóide, assim descarta-se a possibilidade de trabalhar com este arranjo.

O plano de corrente pode ser construído a partir de longos fios de correntes perpendiculares posicionados lado a lado e situados no mesmo plano, este sistema é bastante prático em termos de experimentos de laboratório, porém o volume de campo uniforme é muito pequeno para a colocação de corpos-alvo no laboratório, pois necessitaríamos de um plano com comprimento lateral muito grande comparado com as dimensões do corpo-alvo.

Através do arranjo feito com dois planos paralelos e coaxiais de correntes ocorre a obtenção de um campo mais forte que no caso de um plano só, podendo ser utilizado no laboratório de modelagem devido a sua praticidade e construção, porém existe um outro arranjo que em termos de volume de campo uniforme supera este arranjo que é o sistema conhecido como par de Helmholtz.

Este sistema consiste de duas bobinas idênticas de mesmo raio, centralizadas axialmente e separada por uma distância igual a metade do raio. Este arranjo possui um papel importante nos experimentos científicos, pois são amplamente utilizados para produzir um campo magnético relativamente uniforme numa região do espaço entre as bobinas. Dentre todos os arranjos citados anteriormente, o par de Helmholtz é o mais prático para se trabalhar em laboratório, o campo na

direção perpendicular ao eixo do arranjo pode ser desprezado, e o campo na direção axial pode oferecer um volume de uniformidade bastante apreciável. Devido a estas vantagens escolheu-se este arranjo para simular o campo uniforme.

Durante as explorações VLF, as linhas de caminhamentos são aproximadamente paralelas ao campo magnético incidente. Sendo assim, para que haja uma perfeita simulação destes caminhamentos em laboratório; torna-se necessário que o campo uniforme gerado pelo par de Helmholtz seja dado na direção perpendicular ao "strike" do corpo alvo. Por convenção, adotou-se neste trabalho a notação H_x para a componente do campo magnético primário dado nesta direção. É importante dizer que as componentes de campo primário dadas nas direções horizontal (H_y) e vertical (H_z) é assumida como nula.

3.2.3.2 Bobina de Helmholtz

Duas bobinas circulares idênticas colocadas a uma distância igual ao raio da bobina geram um campo uniforme no centro do sistema (REITZ et al., 1982). O dispositivo de Helmholtz está mostrado na Figura 3.3.

O campo gerado em qualquer ponto ao longo do eixo deste sistema é dado pela seguinte equação:

$$B_{\text{total}} = \left(\frac{2}{(5)^{\frac{1}{2}}} \right)^3 \frac{\mu_0 i N}{R}, \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.12)$$

onde: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

i = corrente (A)

N = Número de espiras

R = raio da bobina (m)

Como foi dito anteriormente, para a realização dos experimentos foi construído um par de bobinas de Helmholtz para a obtenção do campo magnético uniforme horizontal. Este sistema foi

construído na forma geométrica octogonal tendo um diâmetro médio de 177 cm e portanto o espaçamento entre cada bobina é de 88,5 cm, a espessura de cada “carretel” é de 3 cm . O suporte (“carretel” octogonal) no qual as espiras foram enroladas foi construído com madeira onde seus lados foram fixados uns aos outros nos seus vértices com o auxílio de cravos de madeira e cola. É importante dizer que para a confecção deste sistema não houve a utilização de materiais ferromagnéticos.

Cada bobina contém três espiras de fio 16 S.W.G esmaltado, com resistência de 0,125 Ω , auto indutância de 1,22 μH e frequência de sintonia igual a 500 kHz. O sistema foi rigidamente fixado para evitar possíveis distorções no campo devido a vibrações.

O teste de uniformidade do campo gerado pelo par de Helmholtz foi feito de duas formas; primeiramente comparou-se o valor teórico equação (3.15) com experimental procedendo da seguinte maneira:

Primeiramente colocou-se uma pequena bobina no centro do sistema de Helmholtz. Esta foi conectada a unidade receptora (NETWORK ANALYSER HP-8751A) e também a um resistor de 1 Ω . Energizando-se o sistema através do conjunto fonte gerador de sinal (HP-8751A) e amplificador de potência (HP-467A) a uma frequência de 105 Khz com uma corrente igual a 0,9 amp rms, conseguiu-se medir uma voltagem de 1,85 volts pico-a-pico sobre o resistor através do osciloscópio. Combinando-se as equações (3.13 e 3.14) abaixo:

$$v = |v| \text{sen}(\omega t + \phi), \quad (3.13)$$

e

$$B = \int v dt, \quad (3.14)$$

onde:

v = voltagem (Volts)

ω = $2 \times \pi \times f$ (rad/seg)

t = tempo (s)

B = indução magnética (W/m^2)

Chega-se a concluir que o módulo da indução magnética é dada por:

$$|B| = \frac{|v|}{2\pi f}, \quad (3.15)$$

Assim, utilizando-se a equação (3.15) com uma frequência igual a 105 kHz calcula-se uma indução magnética no valor de 28,0415 mGauss. Utilizando-se a equação (3.12), e levando-se em conta os mesmos dados citados, calculou-se uma indução magnética no valor de 27,4324 mGauss. Com isto conclui-se que o erro entre o valor teórico e prático no ponto central é de apenas 2,2 %.

O segundo teste de uniformidade, considerado como o mais importante para o propósito dos experimentos foi a medição da intensidade do campo horizontal em vários pontos entre as bobinas, para isso usou-se uma pequena bobina que foi conectada a unidade receptora (NETWORK ANALYSER HP-8751A). Energizando-se o sistema através do conjunto fonte gerador de sinal (HP-8751A) e amplificador de potência (HP-467A), tirou-se os perfis em inúmeras direções paralelas ao eixo do par de Helmholtz, tomando-se como valor de referência H_{x_0} , que é o campo horizontal medido no centro geométrico do sistema e calculou-se o desvio de uniformidade de vários pontos medidos em relação a esta referência encontrando um campo de intensidade constante dentro de um desvio de 3% em um raio de 30 cm do eixo e com comprimento de 75 cm. A Figura 3.4 mostra o mapa de contorno do desvio percentual do campo na direção axial do sistema (H_x) em relação do campo medido no centro do sistema (H_{x_0}). Observe que as distâncias foram normalizadas pelo valor do raio das bobinas, $r = 0.885$ m.

CHAVES NETO (1996) calculou o campo gerado pelas bobinas de Helmholtz que possuem forma geométrica circular. A Figura 3.5 mostra o mapa de contorno do desvio percentual de H_x em relação a H_{x_0} , computado para bobinas circulares de Helmholtz.

Comparando-se as Figuras 3.4 e 3.5, pode-se dizer que os resultados experimentais da bobina octogonal e o da simulação computacional apresentam-se bastante semelhantes. A diferença entre os dois resultados pode ser explicada devido as seguintes fontes:

- i) As geometrias do sistema físico da bobina octogonal utilizada neste trabalho e a circular são diferentes, logo possuem propriedades diferentes como, por exemplo, a distância da separação entre as bobinas;
- ii) Os cantos do octógono;
- iii) A bobina do receptor de medida experimental tem volume considerável, enquanto que na computação os valores são pontuais.

3.2.3.3 Sistema de Recepção

O sistema de recepção é composto de uma bobina receptora (R_x), de dois pré-amplificadores de sinal, um atenuador e o analisador de sinais (NETWORK ANALIZER HP 8751A).

A bobina receptora tem um diâmetro externo de 0,025m sendo que o diâmetro da parte interna foi de 0,013m, o qual é considerado como um exagero em face do fator de escala utilizado no experimento. Foi construída em um suporte de acrílico com 600 espiras de fio esmaltado de cobre com bitola nº 40 S.W.G.. Possui resistência igual a 43Ω e uma auto indutância de 2,2 mH. Esta bobina foi blindada por uma malha de fios esmaltados cuja função é eliminar o efeito eletrostático.

Foram utilizados no experimento dois pré-amplificadores: O primeiro pré-amplificador foi contruído com o objetivo de amplificar o sinal captado pela bobina receptora e para baixar a impedância de saída do sinal, onde o ganho deste amplificador é 10. O segundo pré-amplificador, possui ganho unitário, funciona apenas como casador de impedância.

Foi utilizado também um atenuador, o qual condicionou a diminuição dos sinais oriundos dos pré-amplificadores.

O manuseio do analisador de sinais consiste primeiramente em escolher através de um menu os dados de operação desejados no trabalho pelo pesquisador, tal como: potência, frequência, o canal a ser utilizado bem como um dos recursos matemáticos sumarizados em softs disponíveis na unidade de processamento. Após colocar todos os aparelhos que compõem o sistema em perfeito funcionamento escolhendo estes parâmetros, introduz-se um disquete na unidade de gravação do analisador e com a manipulação dos vários recursos citados anteriormente; grava-se os vetores correspondentes a magnitude, componente imaginária e em-fase da resposta do condutor. Nesta operação são gerados arquivos com extensão ED1, que posteriormente são tratados através de softs em MATLAB gerando-se curvas de tilt angle e elipsidade. Com a execução de vários programas constrói-se as curvas necessárias a análise dos dados.

3.2.3.4 Calibração e Procedimento Experimental

a) Calibração

As quantidades medidas durante os experimentos são a magnitude, componente imaginária e real do campo magnético vertical (H_z^s) relativo ao campo magnético horizontal no centro do sistema de bobinas de Helmholtz ($H^p x_0$). Baseado no fato de que a componente vertical do campo magnético uniforme (campo primário) gerado pelo par de Helmholtz H_z^p ser nula, não há necessidade de se fazer o cancelamento deste campo nas medidas de (H_z^s). Com isto, todo o sinal captado pela bobina receptora é devido a resposta do corpo-alvo. Os sinais de referência utilizados nos experimentos foram calibrados para as componentes real e imaginária em relação a e.m.f. induzida (Hx_0) na bobina receptora colocada verticalmente no centro do sistema de Helmholtz na ausência do modelo.

Após a colocação do modelo no sistema foram coletados perfis das componentes imaginária, real e magnitude. É importante dizer que o sinal de referência foi monitorado continuamente em intervalos de aproximadamente 45 minutos durante as medições.

b) Procedimento Experimental

Os perfis foram tomados para cada combinação de um corpo (vertical ou inclinado) do tipo semi-plano e um manto de intemperismo, sendo que foram utilizados quatro corpos e três mantos diferentes, cujas características encontram-se nas Tabelas 3.1 e 3.2. Para cada conjunto corpo-manto, foram realizadas medidas utilizando a bobina receptora na posição horizontal (medindo H_z), caminhando transversalmente ao corpo. A interação entre o corpo e o manto foi realizada colocando-se o modelo em diferentes profundidades (h_c). Estas profundidades foram medidas desde o topo do corpo até a linha que passa pelo centro da bobina receptora. Neste trabalho foram utilizadas as profundidades de 0,03; 0,045; 0,06 e 0,075 metros. O corpo foi ainda disposto segundo os seguintes ângulos de mergulho θ : 90° , 60° , 45° e 30° .

Neste trabalho, o halo de disseminação de sulfetos foi considerado pouco desenvolvido e a condutividade representativa da rocha encaixante muito baixa, podendo ser simulada pelo ar. Para

que as condições de modelamento fossem satisfeitas foi admitido a inexistência de materiais ferromagnéticos no conjunto de modelamento.

3.2.3.5 Ocorrência de Erros

Enquanto que os métodos analíticos podem obter resultados exatos, no caso de modelamentos realizados em laboratórios a precisão dos resultados é limitada. As seguintes fontes de erros foram consideradas na elaboração deste trabalho.

a) Erros na simulação

Para o fator de escala utilizada, o tamanho da bobina receptora superou em muito aquele que deveria ser utilizado. Isto é, em vez de 0,025 m de diâmetro, as bobinas deveriam ter sido construídas com $0,75 \times 10^{-3}$ m que na prática é muito difícil de construir.

Entretanto, a utilização de bobinas não reduzidas adequadamente é uma prática comum em modelamento. Isto porque bobinas que possuem diâmetro muito pequeno, além da difícil construção, possuem pouca sensibilidade para captar o campo magnético.

Outra fonte de erro diz respeito ao valor obtido para o parâmetro de resposta do modelo ($\alpha = \omega\mu\sigma^2$). Sejam os seguintes erros máximos para os parâmetros envolvidos em α : $\mu = 0\%$ (com base no valor teórico), $f = \pm 10^{-3}\%$ (precisão do oscilador interno do analisador de circuitos NETWORK ANALIZER HP 8751A), $\sigma = \pm 1\%$ (estimado, considerando-se possíveis variações ocasionadas pela mudança de temperatura de trabalho) e $t = \pm 1\%$ (estimado). Estes valores são válidos para α_c e α_m .

b) Erros de posicionamento dos modelos e das bobinas

Os erros máximos das profundidades do corpo e das espessuras do manto foram estimadas em ± 1 mm que dá um erro de em $\pm 2\%$ e $\pm 1,5\%$, respectivamente. Para a distância entre as bobinas que constituem o par de Helmholtz, o erro gira em torno de $\pm 1,5$ mm ou $1,5\%$. A

precisão do ângulo de mergulho foi estimada em $\pm 1^{\circ}$, estes erros foram estimados em relação aos perfis medidos para 90° .

O erro relacionado ao posicionamento da bobina receptora no eixo do sistema de Helmholtz no momento da medição do sinal de referência (Hx_0) foi de 1 mm ou $\pm 2\%$.

Durante a fase de testes que antecederam a realização deste trabalho, verificou-se que os sistemas de energização e de recepção demoram cerca de 15 minutos, após ligados, para se tornarem bastante confiáveis, podendo então serem considerados estáveis dando uma repetibilidade ao longo do trabalho. O desempenho geral do conjunto foi satisfatório com repetibilidade dentro de 98.5 %.

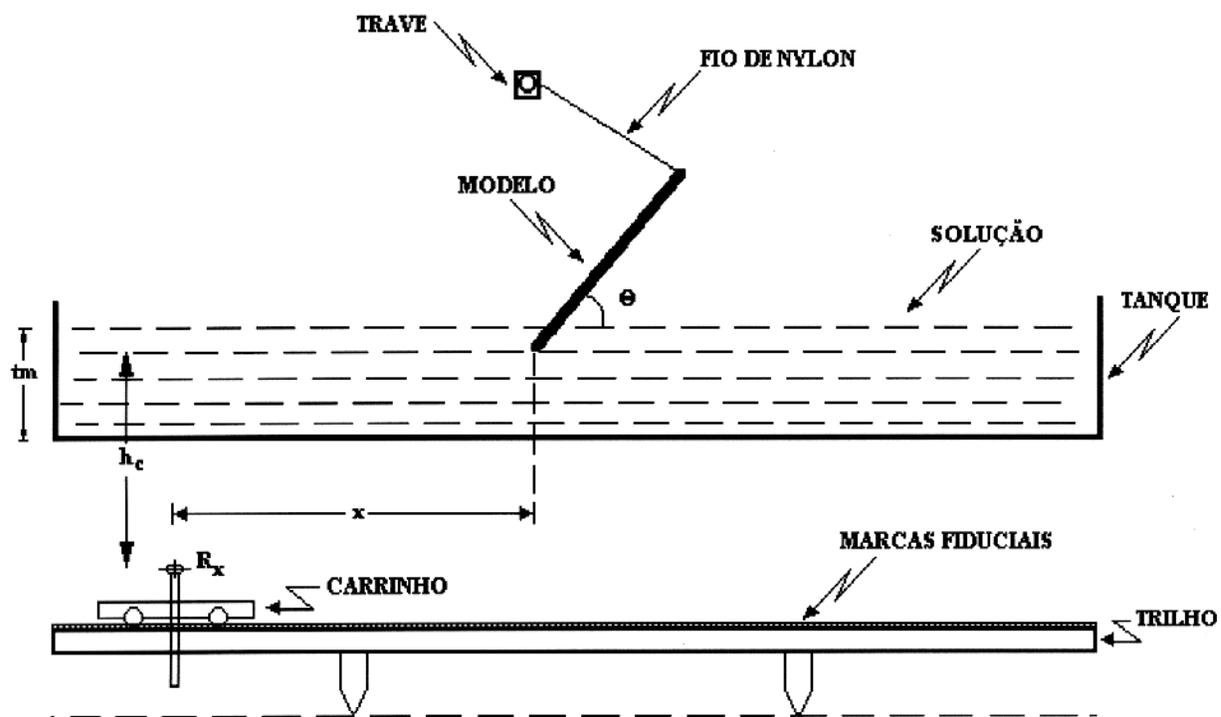


Figura 3.1 - Diagrama esquemático mostrando a posição do modelo, o manto de intemperismo e a bobina receptora

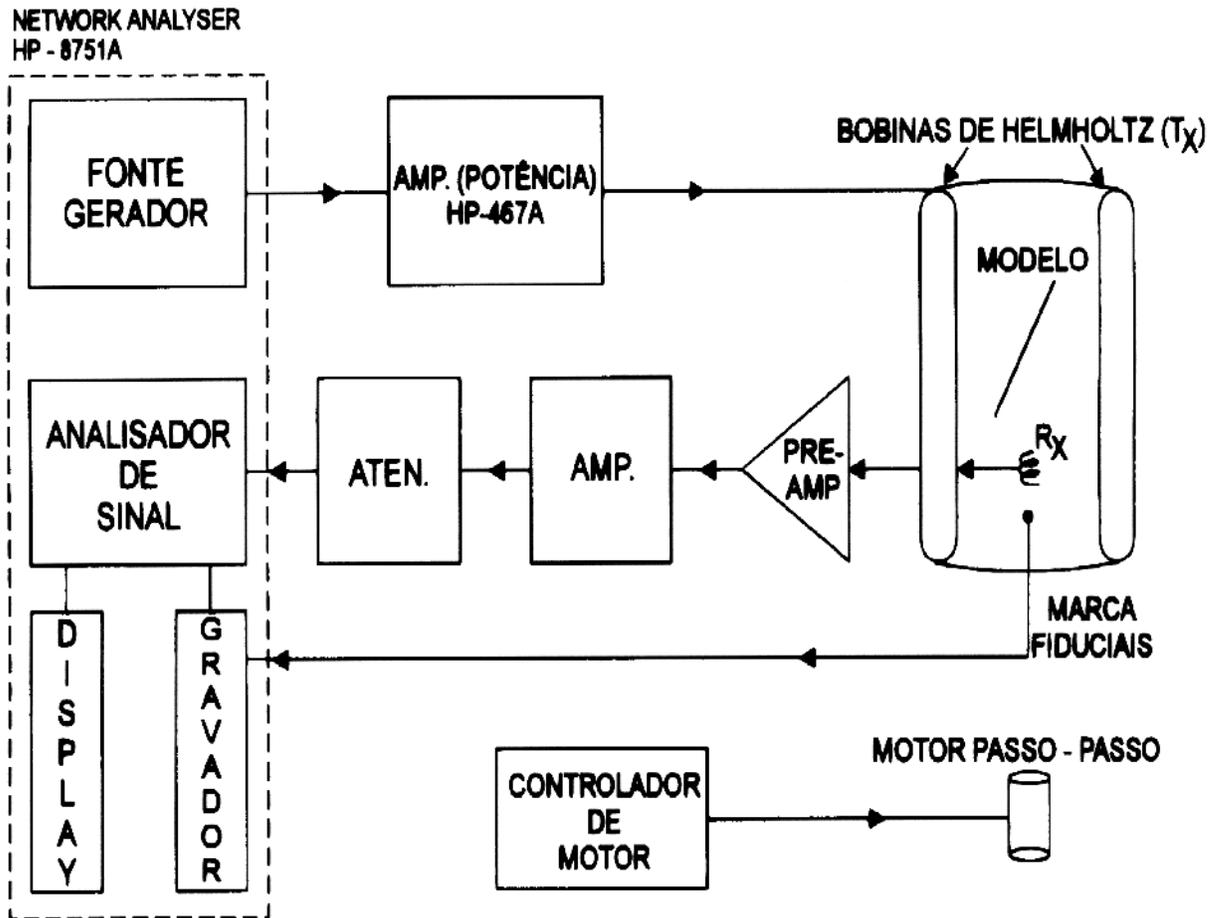


Figura 3.2 - Bloco diagrama dos sistemas de energização e recepção

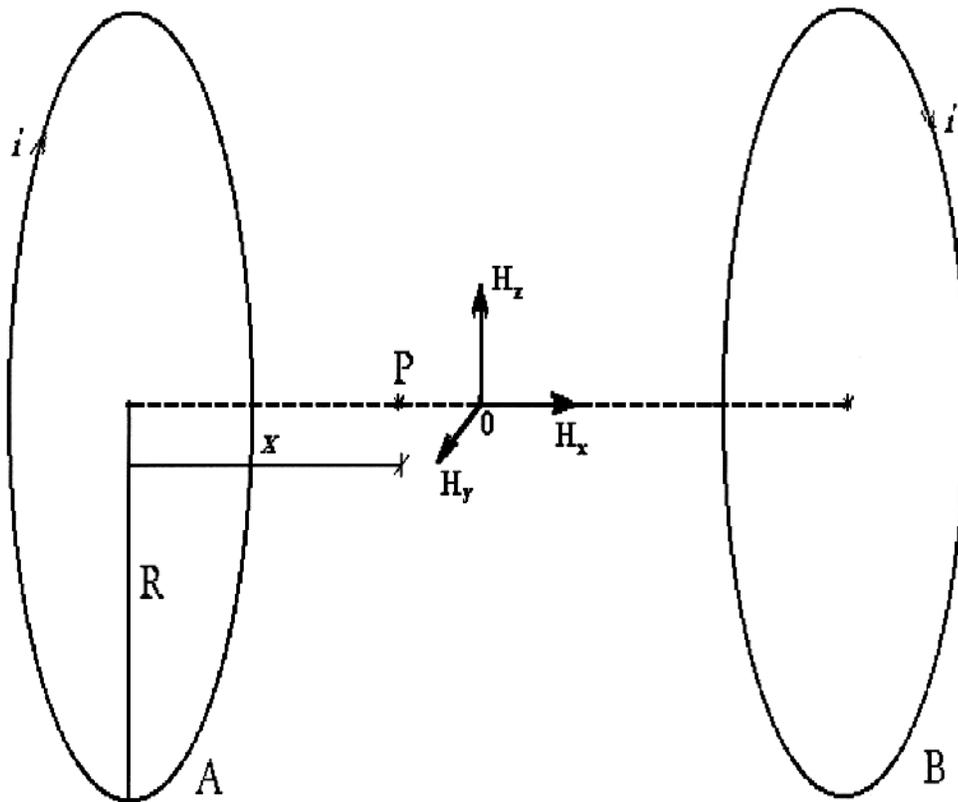


Figura 3.3 - Diagrama esquemático do dispositivo de Helmholtz

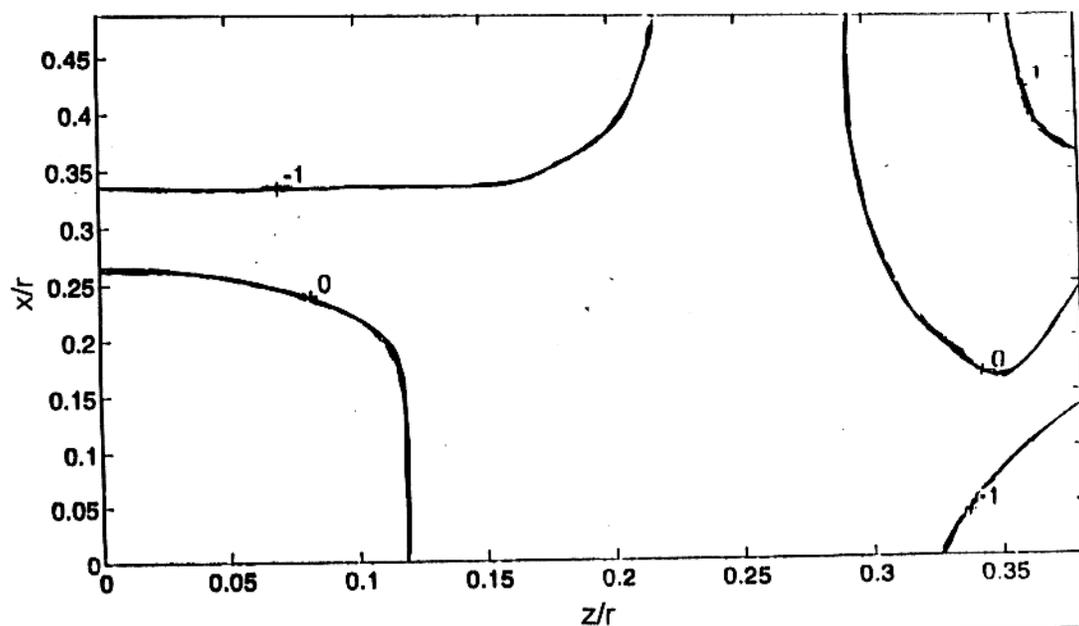


Figura 3.4 - Mapa de contorno de desvio do campo H_x (valores em percentagem) medido experimentalmente, utilizando o raio médio das bobinas ($r = 0,885$ m) como fator de normalização

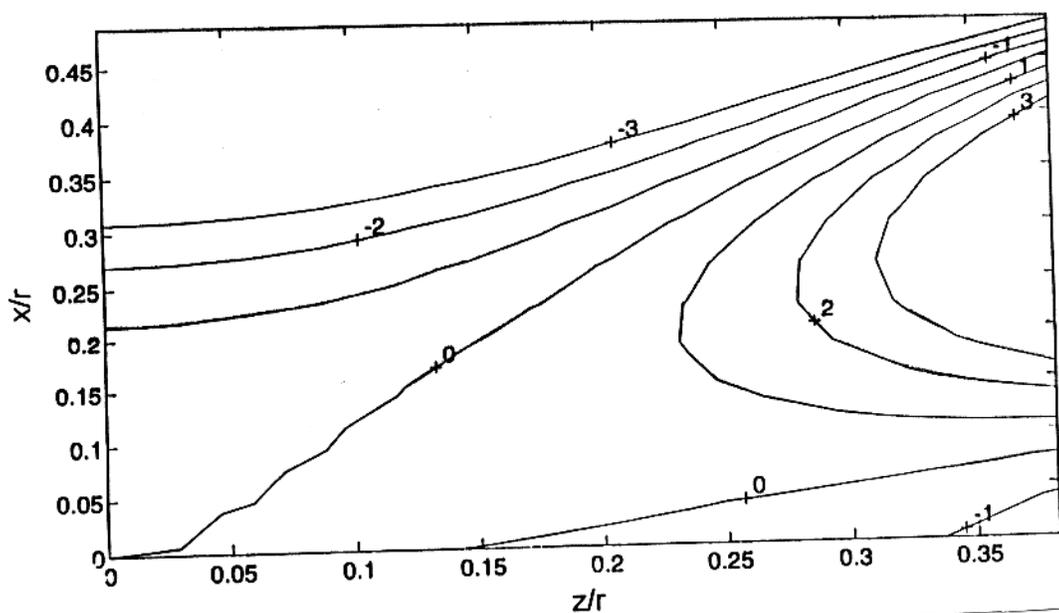


Figura 3.5- Mapa de contorno de desvio do campo H_x (valores em percentagem) medido com simulação computacional, utilizando o raio médio das bobinas ($r = 0.885$ m) como fator de normalização

4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

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

Como na unidade receptora do analisador de circuitos são captados os dados correspondentes as componentes real e imaginária da resposta do corpo, procedeu-se da seguinte forma para a obtenção dos perfis destes parâmetros:

- 1) Para a obtenção dos perfis da elipsidade, primeiramente gravou-se continuamente os valores da componente imaginária do campo secundário no analisador de circuitos. De posse destes dados, através de um soft em Matlab, calculou-se a razão destas medidas com a magnitude do campo primário registrado no eixo do sistema de Helmholtz. Esta razão foi multiplicada pelo fator 100, obtendo-se desta forma os dados de elipsidade em percentual.
- 2) Para a obtenção dos perfis de tilt-angle, inicialmente gravou-se continuamente os dados relativos ao ângulo de fase e da componente real do campo secundário registrado no analisador de circuitos. Através da equação (4.1) obteve-se os dados de tilt-angle em graus.

$$\alpha = \pm \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2 \left(\frac{H_z}{H_{x0}} \right) \cdot \cos \phi}{1 - \left(\frac{H_z}{H_{x0}} \right)^2} \right], \quad (4.1)$$

onde:

H_z é a componente vertical do campo secundário;

H_{x0} é a magnitude do campo primário no centro do sistema de Helmholtz.

ϕ é a fase vertical do campo secundário

Neste trabalho, convencionou-se chamar de lado a favor do mergulho à região, que a partir do topo do condutor, se estende na região do mergulho do mesmo, e de lado contrário ao 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 a favor e contrário ao mergulho que aqui são referidos como, respectivamente, pico-a-pico a favor e pico-a-pico contra.

Na aquisição dos dados os perfis foram registrados continuamente com a bobina receptora se deslocando no sentido transversal à direção do corpo. No total foram realizados cerca de 1200 perfis, alguns dos quais apenas para testes de propósitos diversos.

A apresentação dos resultados será realizada primeiramente com os efeitos do manto (seção 4.1) onde são mostrados perfis de tilt angle e de elipsidade ilustrando os efeitos da condutância dos mantos M_0 , M_1 , M_2 e M_3 sobre as respostas do corpo C_2 ($\alpha_c = 0,11$) a uma profundidade de 3,0 cm para os mergulhos de 30° , 45° , 60° e 90° .

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 C_1 , C_2 , C_3 e C_4 . Os efeitos são mostrados para vários ângulos de mergulho ($\theta = 30^\circ$, 45° , 60° e 90°), estando os corpos a uma profundidade de 3,0 cm na presença dos mantos M_0 , M_1 , M_2 e M_3 .

Na seção 4.3 apresenta-se os efeitos do mergulho do corpo sobre anomalias de tilt angle e de elipsidade. Para este experimento utilizou-se o corpo C_2 ($\alpha_c = 0,11$), o qual foi colocado nas profundidades de 3,0 cm e 7,5 cm com mergulhos $\theta = 30^\circ$, 45° , 60° e 90° na presença dos mantos M_0 , M_1 , M_2 e M_3 .

Na seção 4.4 apresenta-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 C_2 ($h_c = 3,0$, $4,5$, $6,0$ e $7,5$ cm) mergulhando com os ângulos $\theta = 30^\circ$, 45° , 60° e 90° na presença dos mantos M_0 , M_1 , M_2 e M_3 .

Tabela 4.1 - Parâmetros físicos dos modelos com tamanho $0.6\text{m} \times 0.4\text{m}$ utilizados nos experimentos

corpo	material	Espessura (10^{-3} m)	condutividade (10^5 S/m)	Condutância (S)	Número de indução $\alpha_c = \omega\mu\sigma_c t^2$
C ₁	grafite	1,0	0,48	48	0,03
C ₂	grafite	2,0	0,48	96	0,11
C ₃	grafite	5,0	0,48	240	0,66
C ₄	grafite	10,0	0,48	480	2,65

Tabela 4.2 - Parâmetros físicos dos mantos representados pelas soluções de NH_4Cl

Manto	espessura (m)	Condutividade σ_m (S/m)	Condutância $\sigma_m t_m$ (S)	Número de indução $\alpha_m = \omega\mu\sigma_m t^2$
M ₀ (sem manto)	-	0,0	0,0	0,0
M ₁	0,15	8,6	1,29	0,11
M ₂	0,15	20,04	3,01	0,25
M ₃	0,15	32,17	4,83	0,40

4.1 EFEITOS DO MANTO

As Figuras 4.2 à 4.3 mostram os efeitos da condutância do manto sobre respostas do corpo C_2 ($\alpha_c = 0,11$) a uma profundidade de 3,0 cm e diferentes mergulhos, na presença dos mantos M_0 , M_1 , M_2 e M_3 .

Nas respostas de tilt angle, verifica-se que estando o corpo na posição vertical (Figura 4.2.a) as anomalias diminuem com o aumento da condutância do manto, enquanto que para o corpo mergulhando com 60° (Figura 4.2.b) observa-se que o pico-contra aumenta quando o corpo está em contato com o manto M_1 e diminui quando o corpo está em contato com os mantos M_2 e M_3 . O pico a favor do mergulho sofre sucessivas atenuações de acordo com o aumento da condutância do manto.

Estando o corpo mergulhando com os ângulos de 45° e 30° , Os picos contra e a favor do mergulho aumentam quando o corpo está em contato com o manto M_1 e diminuem quando o corpo está em contato com os mantos M_2 e M_3 (Figuras 4.2.c e 4.2.d).

Para os perfis de elipsidade nota-se que para os corpos mergulhando com os ângulos de 30° , 45° , 60° e 90° estando em contato com os mantos M_1 e M_2 ocorrem acréscimos nas anomalias, porém quando o corpo encontra-se em contato com o manto M_3 ocorre uma atenuação das anomalias (Figuras 4.3.a, b, c e d).

4.2 EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR

As Figuras 4.4 à 4.11 ilustram perfis de tilt angle e de elipsidade mostrando a variação das anomalias com a condutância dos corpos C_1 , C_2 , C_3 e C_4 . Os efeitos são mostrados para vários ângulos de mergulho, estando os corpos a uma profundidade de 3,0 cm na presença dos mantos M_0 , M_1 , M_2 e M_3 .

Dentro da faixa de α_c trabalhada e para todas as inclinações do corpo e sem o manto, verifica-se que o aumento da condutância do corpo causa um crescimento no valor das anomalias de tilt angle e uma diminuição nas anomalias de elipsidade (Figuras 4.4.a e 4.5.a, 4.6.a, 4.7.a,

4.8.a, 4.9.a, 4.10.a e 4.11.a). Entretanto observou-se que a medida em que diminuimos o mergulho do condutor, torna-se bastante difícil fazer a distinção entre os perfis de tilt angle para os corpos mais condutivos. Nota-se que estando o corpo mergulhando com um ângulo de 30° e 45° os perfis de tilt angle para os corpos C_3 e C_4 são quase idênticos (Figuras 4.6.a e 4.7.a).

Na presença do manto, observou-se os mesmos efeitos verificados na sua ausência. Nos perfis de tilt angle para todos os ângulos de mergulho, nota-se que tanto o pico contra quanto o pico a favor do mergulho sofrem atenuação à medida que diminuimos o mergulho do condutor, sendo cada vez mais difícil diferir perfis de tilt angle dos corpos mais condutivos (Figura 4.4.b, c e d; 4.5.b, c e d; 4.6.b, c e d; 4.7.b, c e d).

Nos perfis de elipsidade, estando os corpos na posição vertical e em contato com o manto M_1 (Figura 4.8.b), observou-se os mesmos efeitos verificados sem manto. Com o aumento da condutividade do manto (mantos M_2 e M_3) (Figuras 4.8.c, d) os perfis dos corpos C_2 , C_3 e C_4 ficam bastante difíceis de ser identificados, além do mais nota-se que o corpo C_1 possui a menor resposta pico-a-pico (Figura 4.12).

Ao colocarmos o corpo mergulhado com os ângulos de 60° , 45° , 30° e em contato com os mantos mais condutivos (M_2 e M_3), observa-se que os picos contra o mergulho tendem a ficar iguais para os corpos mais condutivos enquanto que os picos a favor do mergulho diferenciam os corpos de condutividades distintas (Figuras 4.8.c e d; 4.9.c e d; 4.10.c e d; 4.11.c e d).

4.3 EFEITOS DO MERGULHO

As Figuras 4.12 à 4.15 ilustram os efeitos causados pelo mergulho do condutor. Para este experimento utilizou-se o corpo C_2 ($\alpha_c = 0,11$), o qual foi colocado nas profundidades de 3,0 cm e 7,5 cm com mergulhos de 30° , 45° , 60° e 90° na presença dos mantos M_0 (sem manto), M_1 , M_2 e M_3 .

Na ausência do manto e estando o corpo localizado a uma profundidade de 3.0 cm (Figuras 4.12.a e 4.14.a), o maior efeito causado pelo mergulho do condutor é a assimetria nos perfis tanto de tilt angle quanto da elipsidade, sendo que o maior pico das anomalias é dado para o

lado em que o corpo está mergulhando (lado a favor do mergulho). Observe que a assimetria é mais marcante nos perfis de tilt angle (Figura 4.12.a).

À medida em que diminuimos o mergulho do condutor, o pico contra o mergulho diminui tanto para os perfis de tilt angle quanto para os perfis de elipsidade, enquanto que o pico a favor aumenta para as inclinações 45° e 60° e diminui quando o corpo está inclinado de 30° nos perfis de tilt angle. Já nos perfis de elipsidade, observa-se que o pico a favor diminui quando o corpo está mergulhando com os ângulos de 30° e 45° , porém este cresce quando o corpo está mergulhando com um ângulo de 60° .

Para os corpos localizados a uma profundidade de 7,5 cm e sem manto (Figuras 4.13.a e 4.15.a), portanto mais profundos, tanto os perfis de tilt angle quanto os de elipsidade apresentam-se bastante assimétricos, sendo que os picos a favor e contra o mergulho encontram-se mais achatados quando comparados àqueles obtidos com o corpo a uma profundidade mais rasa.

Variando-se o mergulho do condutor na presença dos mantos M_1 e M_3 , verifica-se os mesmos efeitos observados nos perfis sem manto. Estando o corpo localizado a uma profundidade de 3,0 cm, nota-se que tanto os picos a favor quanto os picos contra o mergulho diminuem nos perfis de tilt angle. Porém estando o corpo localizado a uma profundidade de 7,5 cm os perfis apresentam-se sem modificações para os mantos M_1 e M_3 (Figuras 4.13.b e c). Nos perfis de elipsidade, nota-se que os picos contra e a favor do mergulho crescem à medida que o manto torna-se mais condutivo estando o corpo localizado nas profundidades de 3,0 e 7,5 cm (Figuras 4.14 e 4.15).

4.4 EFEITOS DA PROFUNDIDADE

As Figuras 4.16 à 4.19 mostram perfis obtidos variando-se a profundidade do topo do condutor sem manto (manto M_0) e com os mantos M_1 ($\alpha_m = 0.11$) e M_3 ($\alpha_m = 0.40$) presentes. Foi utilizado nestes experimentos o corpo C_2 ($\alpha_c = 0,11$) mergulhando com os ângulos de 30° , 45° , 60° e 90° .

Para o corpo na posição vertical 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 (Figura 4.16.a). Este

fato é fácil de compreender porque as interações em jogo são maiores quanto mais próximo estiver o corpo da bobina receptora. 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 outro fato a ser observado é que os picos de anomalias de tilt angle ocorrem mais distantes do ponto de cross-over quando comparados aos de elipsidade.

Estando o corpo mergulhando com os ângulos de 30° , 45° e 60° , observa-se nos perfis que os picos a favor do mergulho tendem a afastar-se mais do ponto de cross-over enquanto que os picos contra o mergulho estão se aproximando do ponto de cross-over à medida que diminuimos o mergulho do condutor (Figuras 4.17.a; 4.18.a; 4.19.a).

Na presença do manto de intemperismo a amplitude das anomalias de elipsidade aumentam 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. As Figuras 4.16.b, c; 4.17.b, c; 4.18.b, c e 4.19.b, c mostram perfis de tilt angle e de elipsidade na presença dos mantos M_1 e M_3 para os mergulhos de 90° , 60° , 45° e 30° .

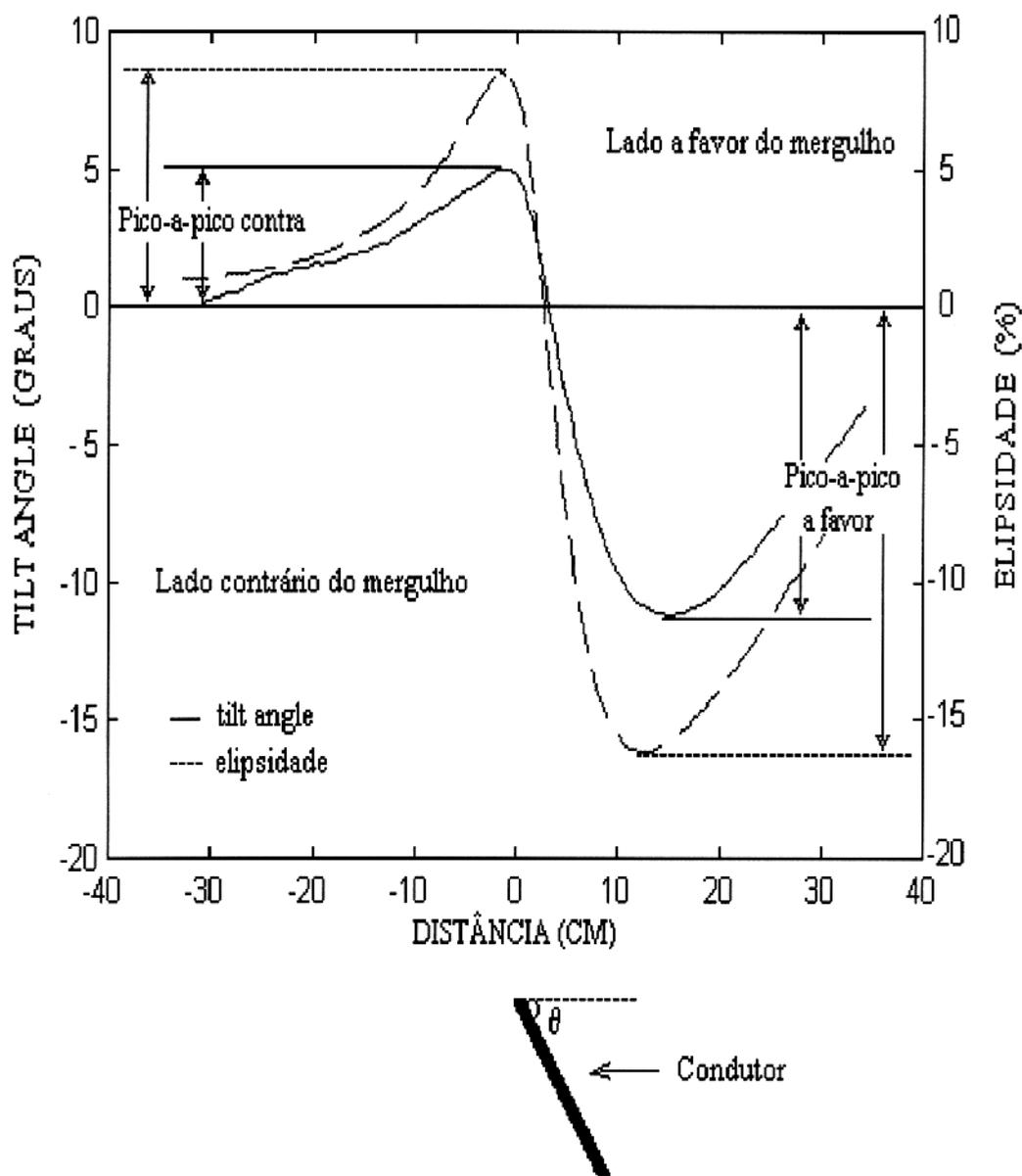


Figura 4.1 - Perfil típico de um semi-plano inclinado ($\theta = 60^\circ$, $\alpha_c = 0,11$, $\sigma_m = 0,0$ (sem manto)).

EFEITOS DO MANTO

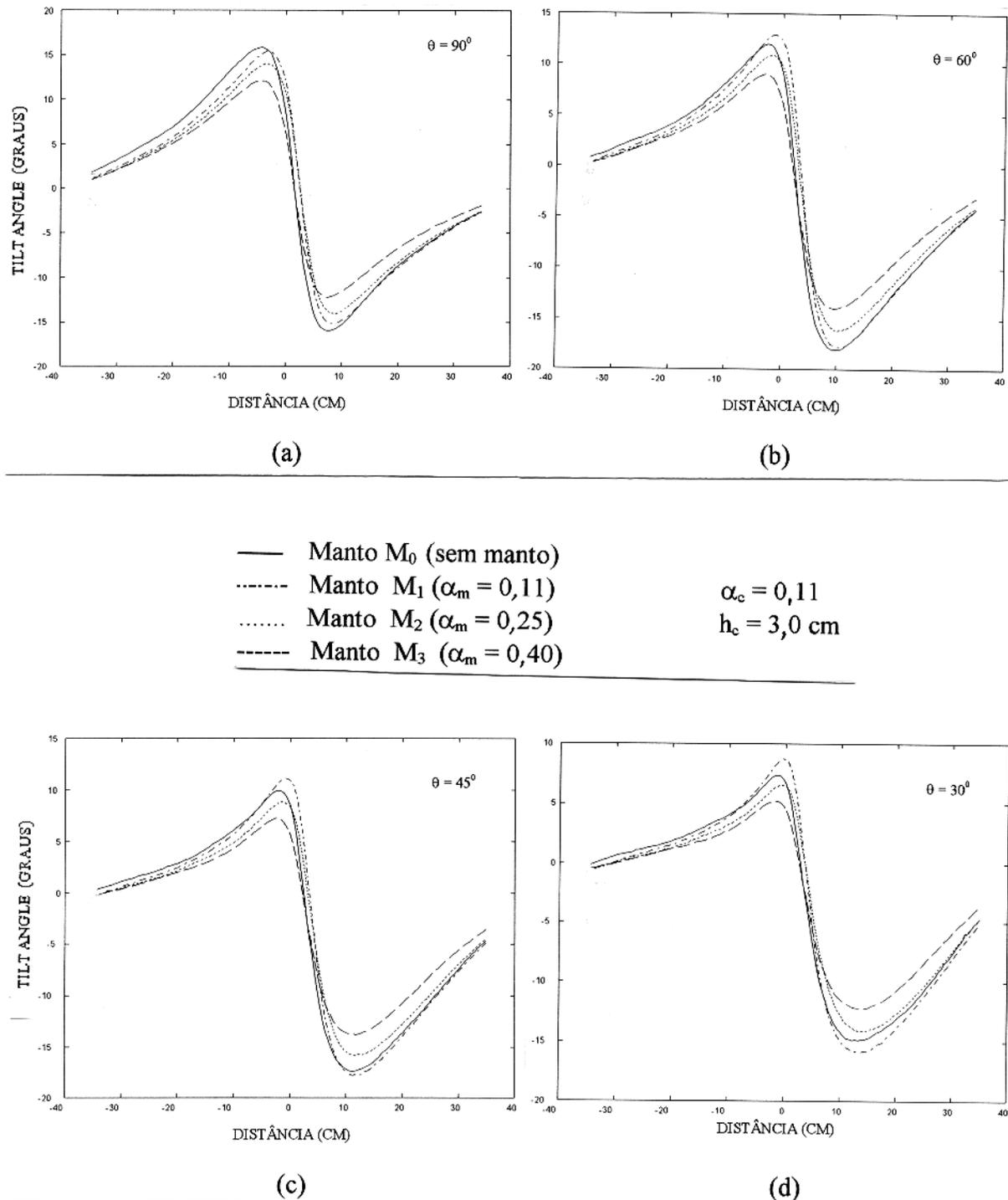


Figura 4.2 - Mudança da resposta de tilt angle com a variação da condutância do manto para o corpo C_2 localizado a uma profundidade de 3,0 cm: (a) $\theta = 90^\circ$; (b) $\theta = 60^\circ$; (c) $\theta = 45^\circ$; (d) $\theta = 30^\circ$.

EFEITOS DO MANTO

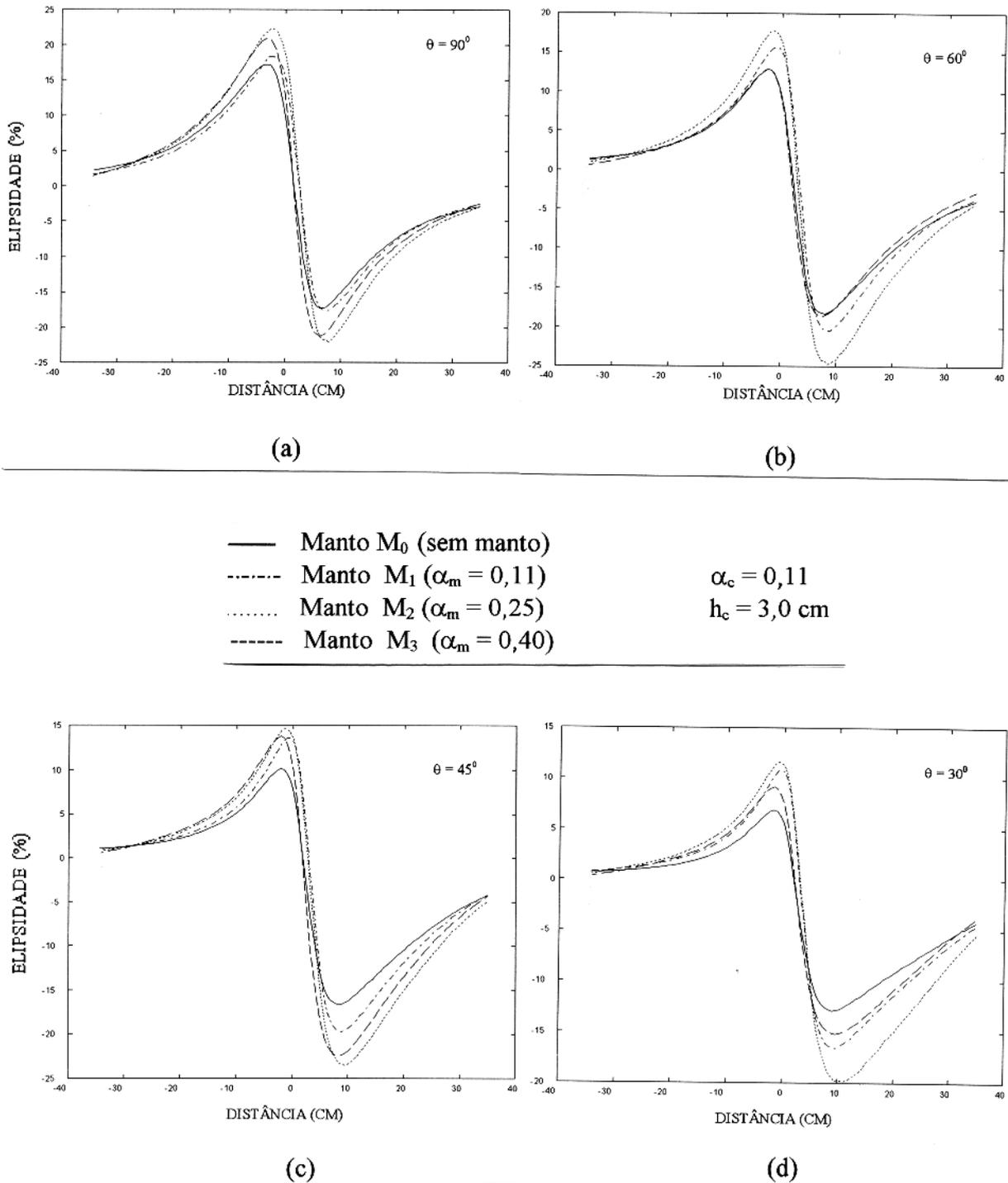
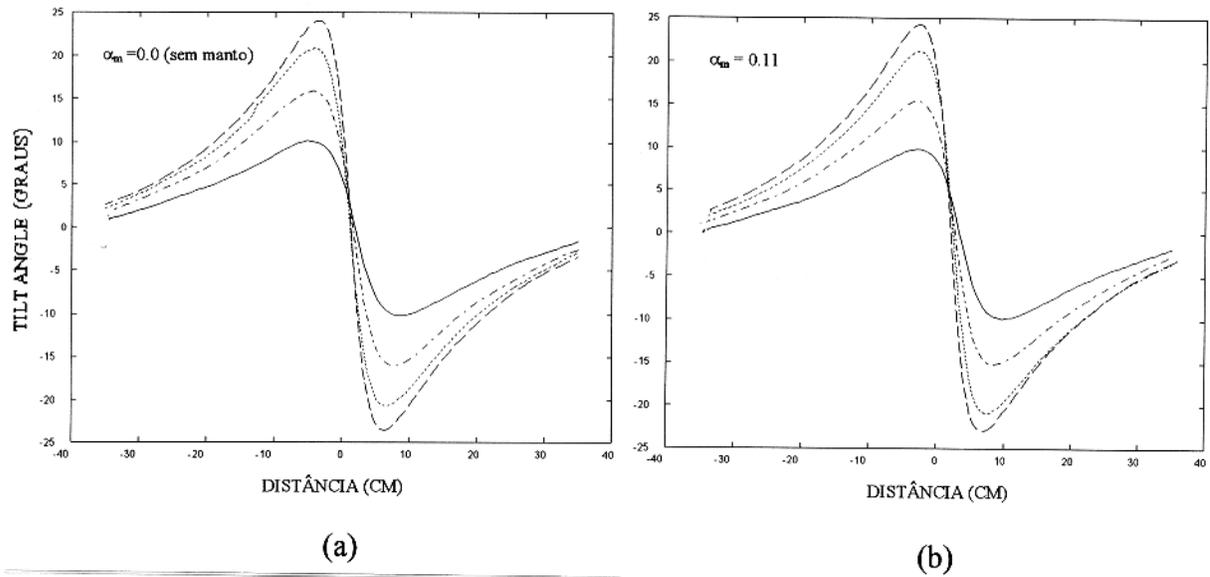


Figura 4.3 - Mudança da resposta de elipsidade com a variação da condutância do manto para o corpo C_2 localizado a uma profundidade de 3,0 cm: (a) $\theta = 90^\circ$; (b) $\theta = 60^\circ$; (c) $\theta = 45^\circ$; (d) $\theta = 30^\circ$.

EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR



— Corpo C₁ ($\alpha_c = 0,03$)
 - - - - - Corpo C₂ ($\alpha_c = 0,66$)
 Corpo C₃ ($\alpha_c = 0,11$)
 - - - - - Corpo C₄ ($\alpha_c = 2,65$)

$\theta = 90^0$
 $h_c = 3,0 \text{ cm}$

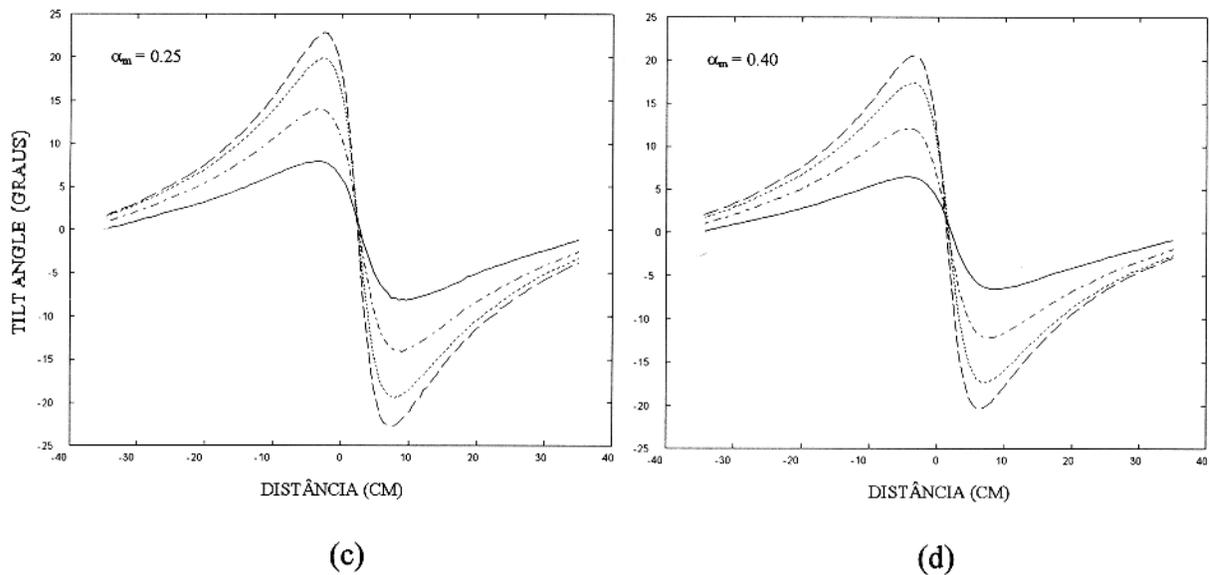


Figura 4.4 - Mudança das anomalias de tilt angle com o parâmetro de resposta do condutor para $\theta = 90^0$: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,25$; (d) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR

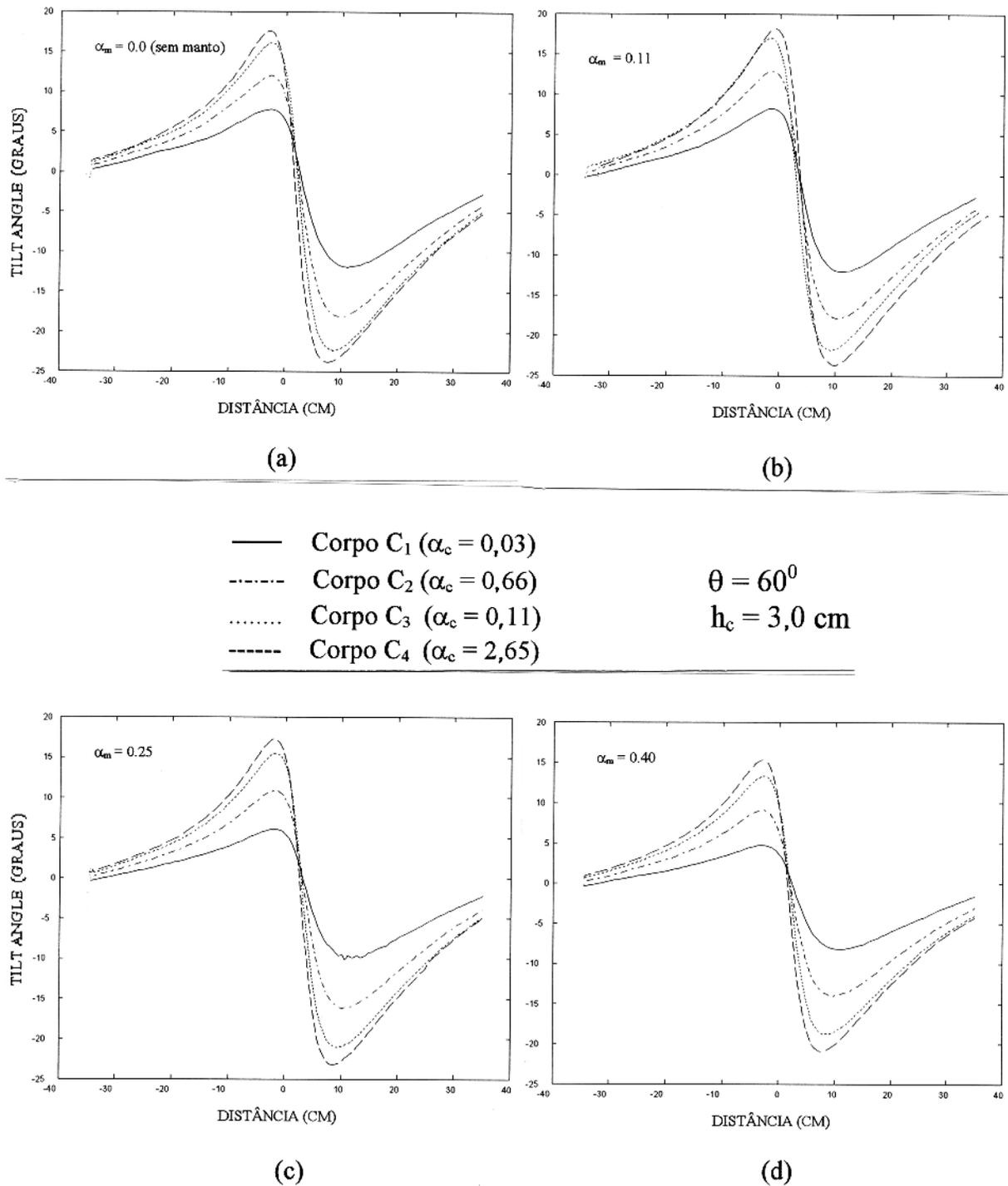


Figura 4.5 - Mudança das anomalias de tilt angle com o parâmetro de resposta do condutor para $\theta = 60^0$: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,25$; (d) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR

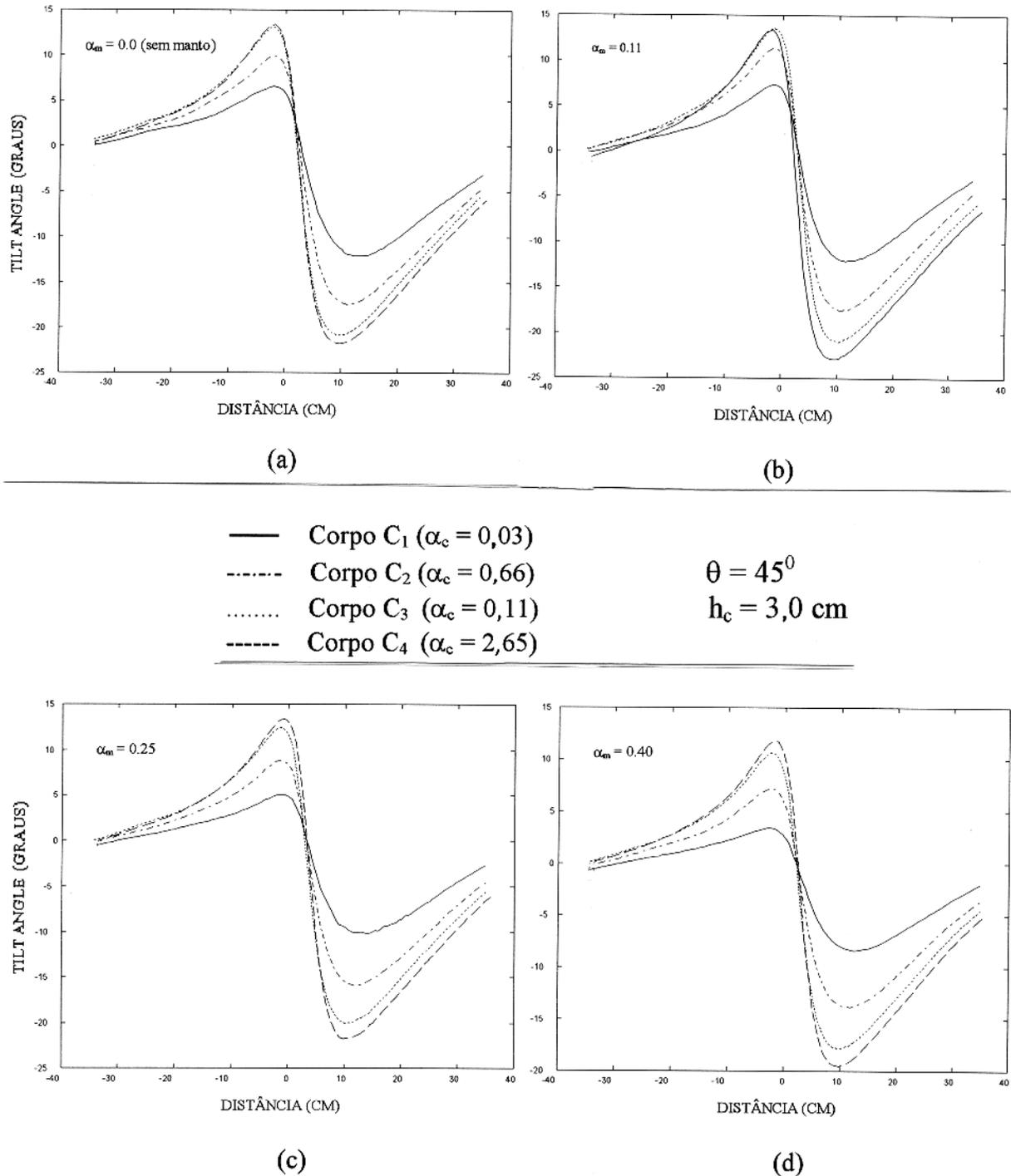


Figura 4.6 - Mudança das anomalias de tilt angle com o parâmetro de resposta do condutor para $\theta = 45^0$: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,25$; (d) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR

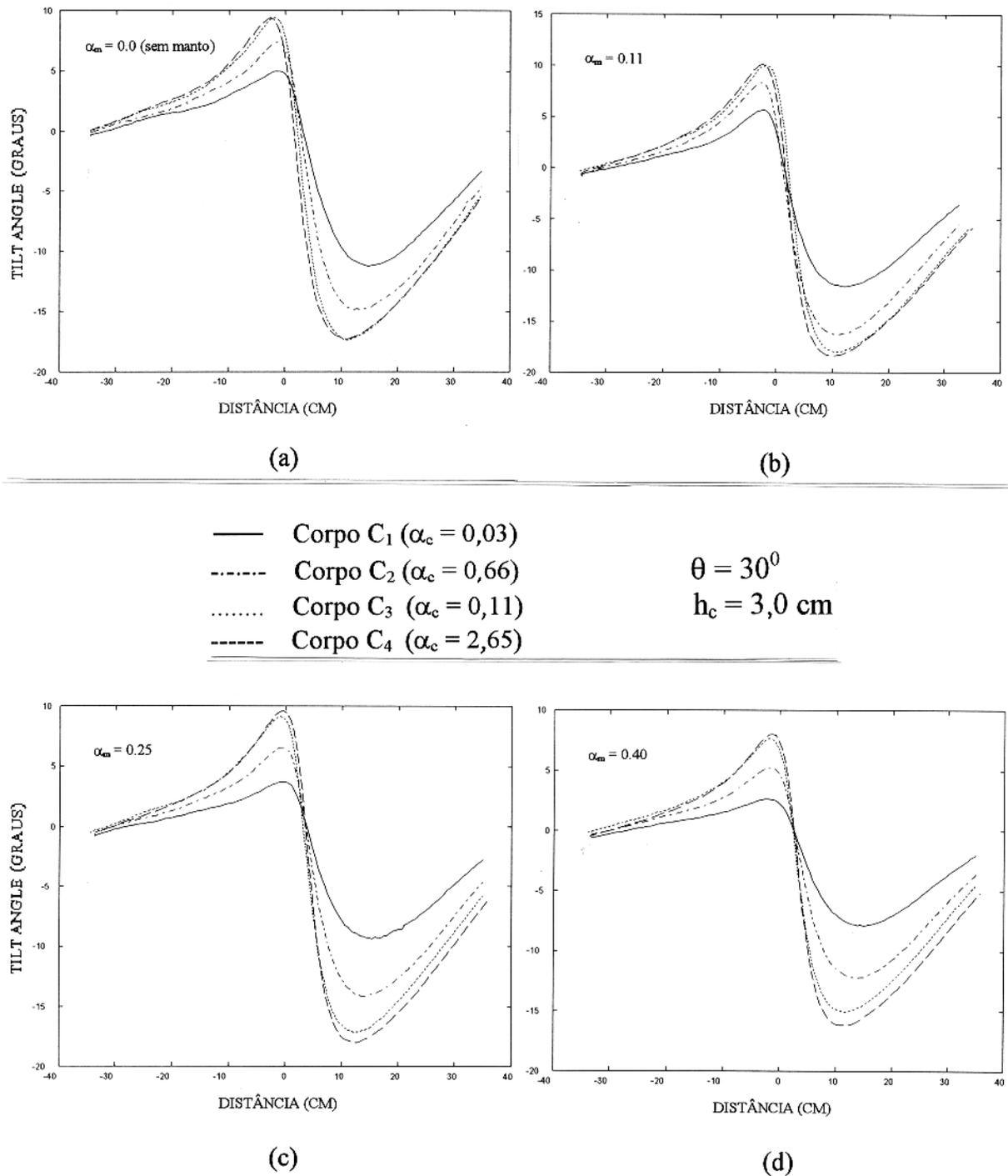
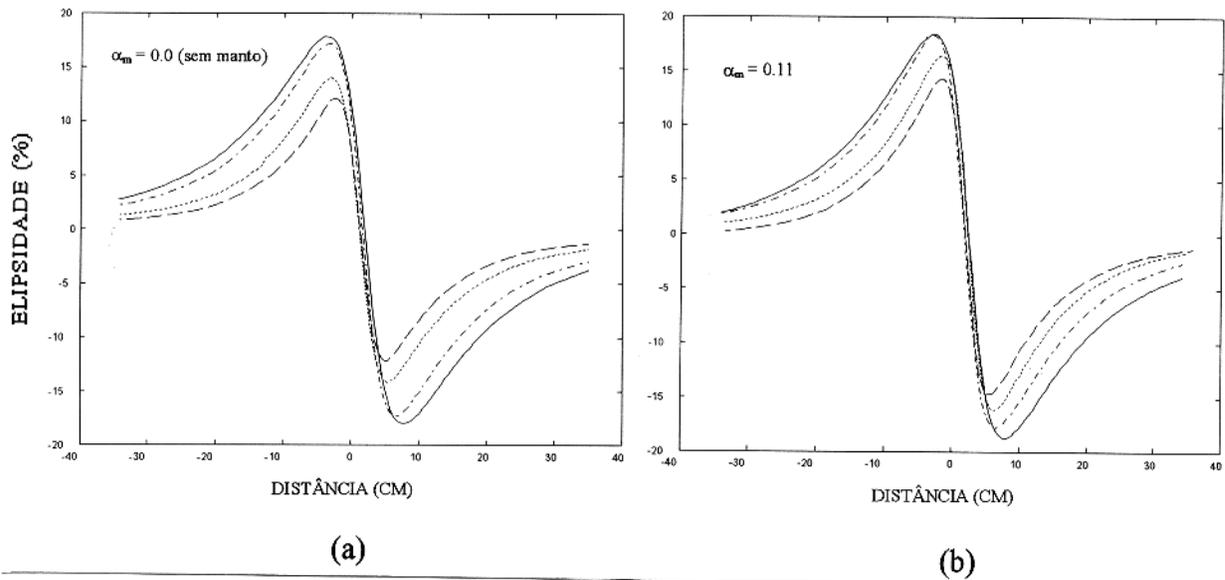


Figura 4.7 - Mudança das anomalias de tilt angle com o parâmetro de resposta do condutor para $\theta = 30^0$: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,25$; (d) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR



— Corpo C₁ ($\alpha_c = 0,03$)
 - - - - - Corpo C₂ ($\alpha_c = 0,66$)
 Corpo C₃ ($\alpha_c = 0,11$)
 - - - - - Corpo C₄ ($\alpha_c = 2,65$)

$\theta = 90^0$
 $h_c = 3,0$ cm

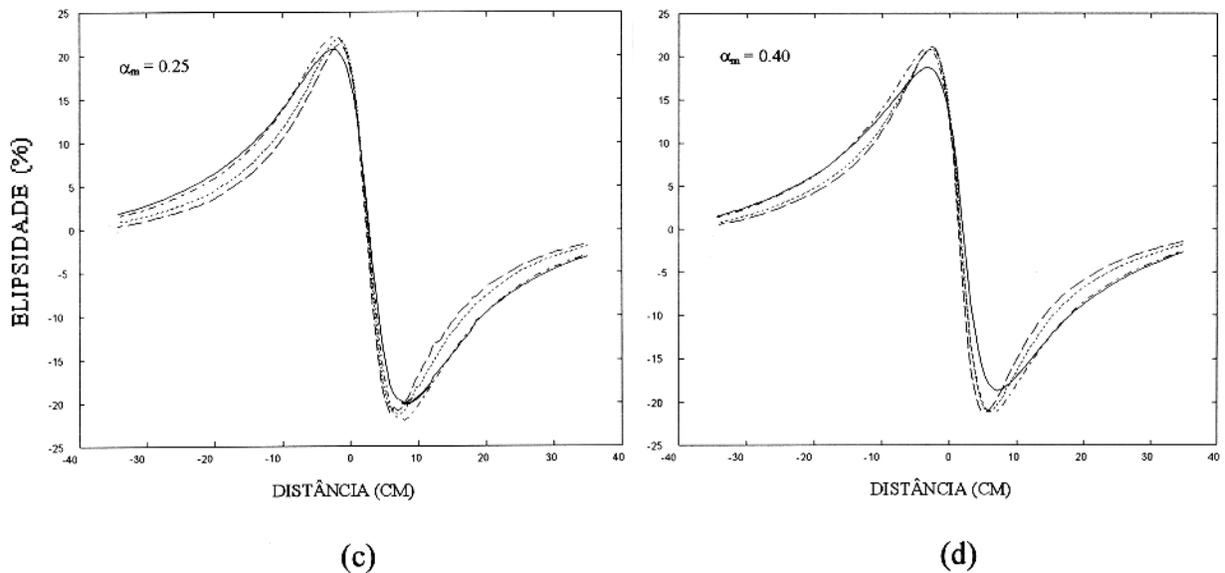


Figura 4.8 - Mudança das anomalias de elipsidade com o parâmetro de resposta do condutor para $\theta = 90^0$: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,25$; (d) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR

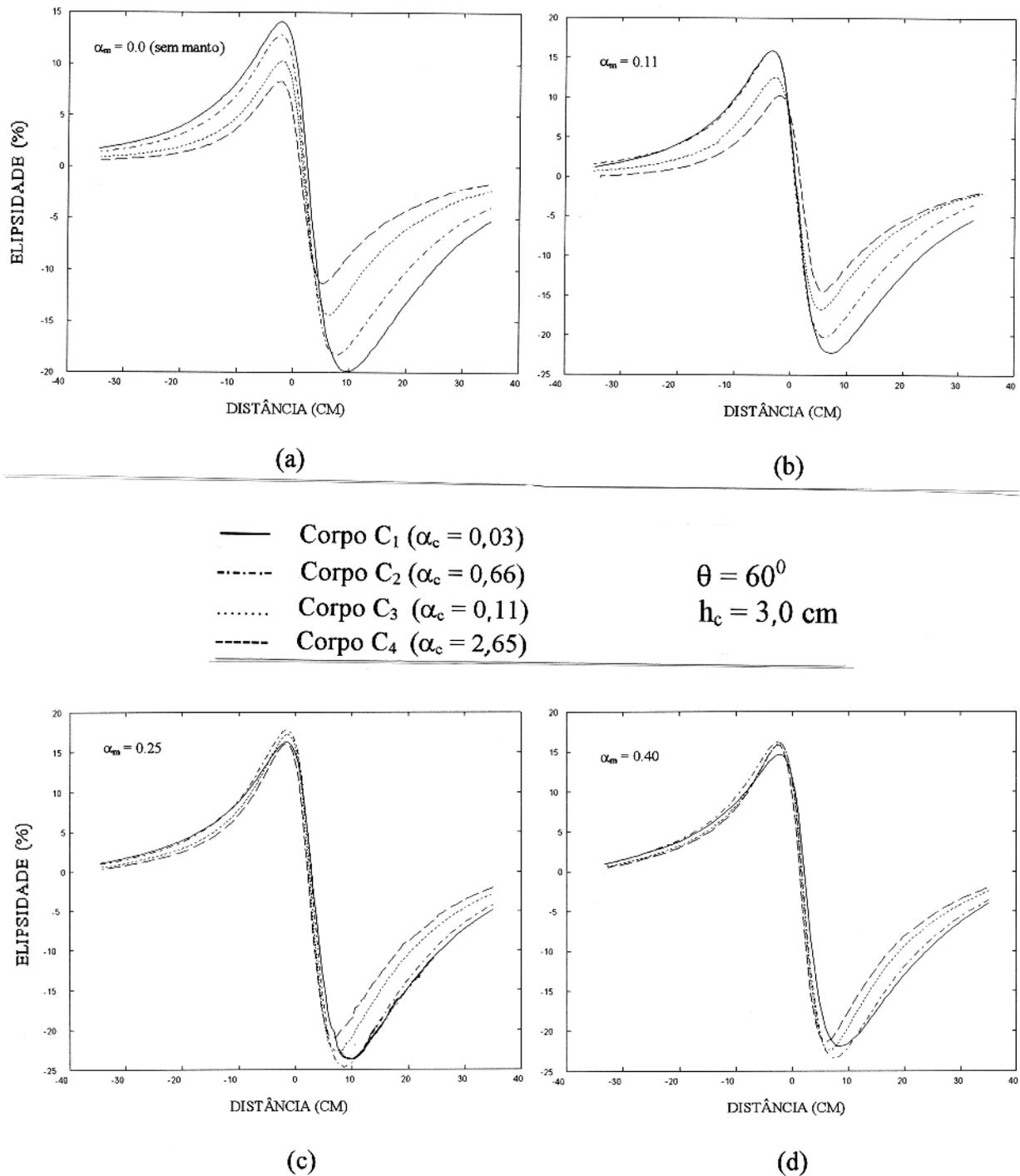
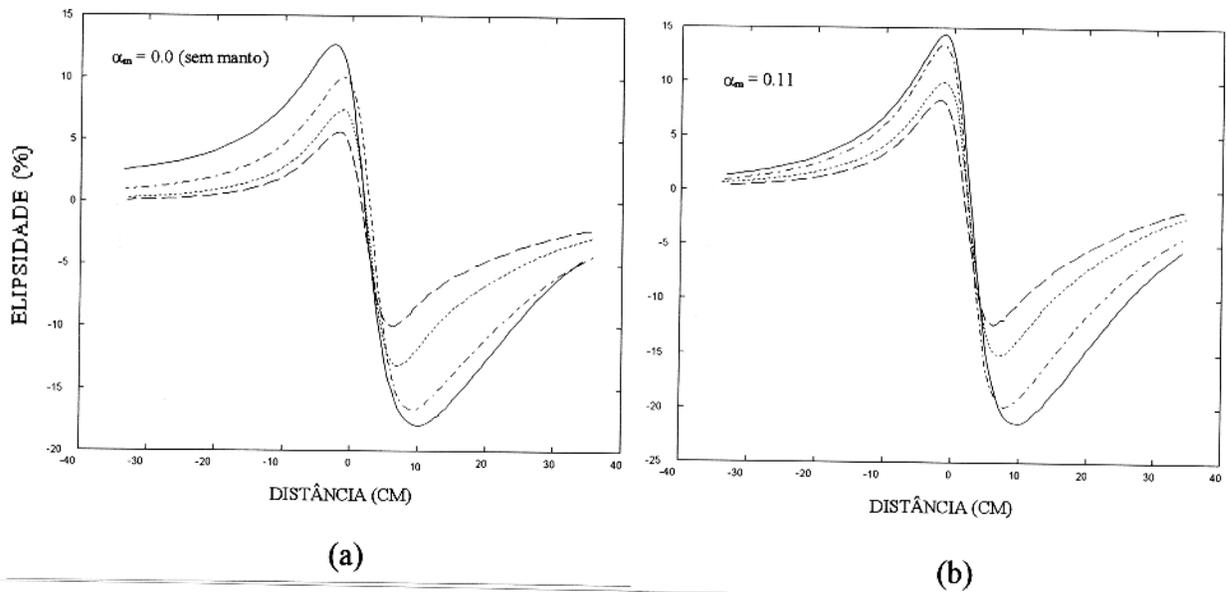


Figura 4.9 - Mudança das anomalias de elipsidade com o parâmetro de resposta do condutor para $\theta = 60^0$: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,25$; (d) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR



— Corpo C₁ ($\alpha_c = 0,03$)
 - - - - - Corpo C₂ ($\alpha_c = 0,66$)
 Corpo C₃ ($\alpha_c = 0,11$)
 - · - · - · - Corpo C₄ ($\alpha_c = 2,65$)

$\theta = 45^0$
 $h_c = 3,0 \text{ cm}$

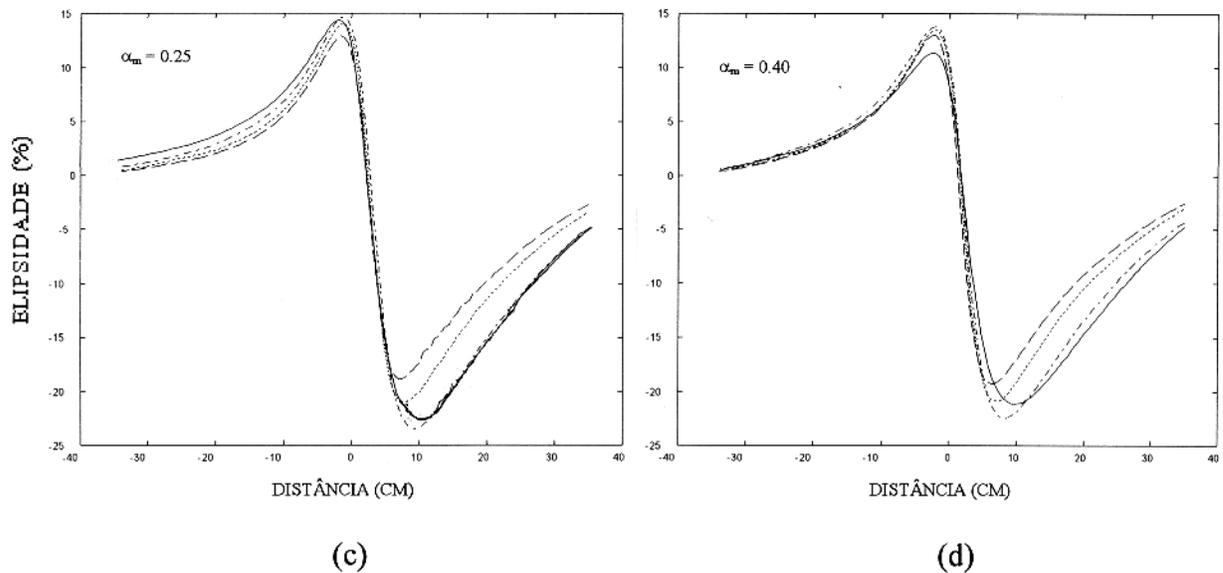


Figura 4.10 - Mudança das anomalias de elipsidade com o parâmetro de resposta do condutor para $\theta = 45^0$: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,25$; (d) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR

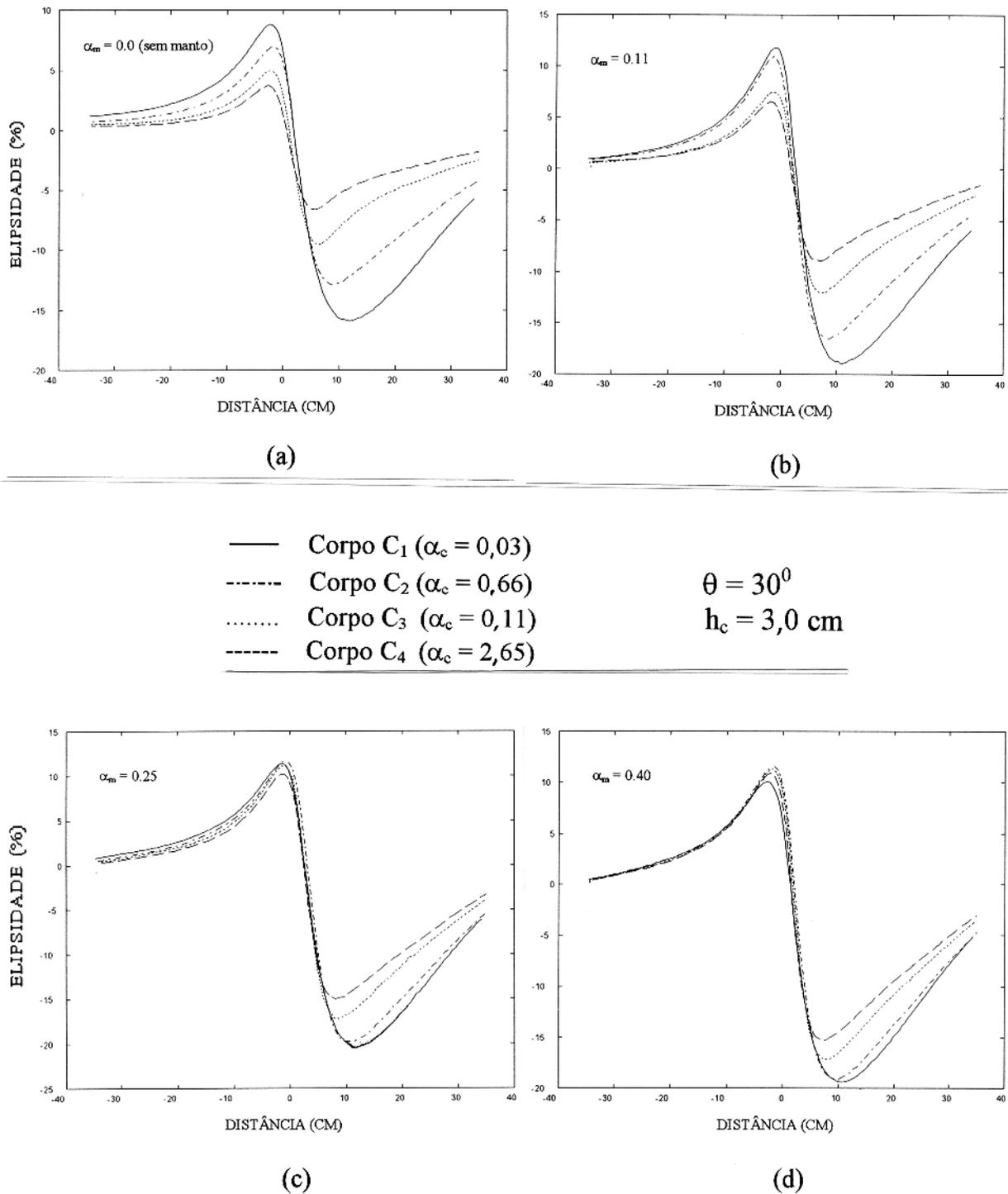


Figura 4.11 - Mudança das anomalias de elipsidade com o parâmetro de resposta do condutor para $\theta = 30^0$: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,25$; (d) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DO MERGULHO

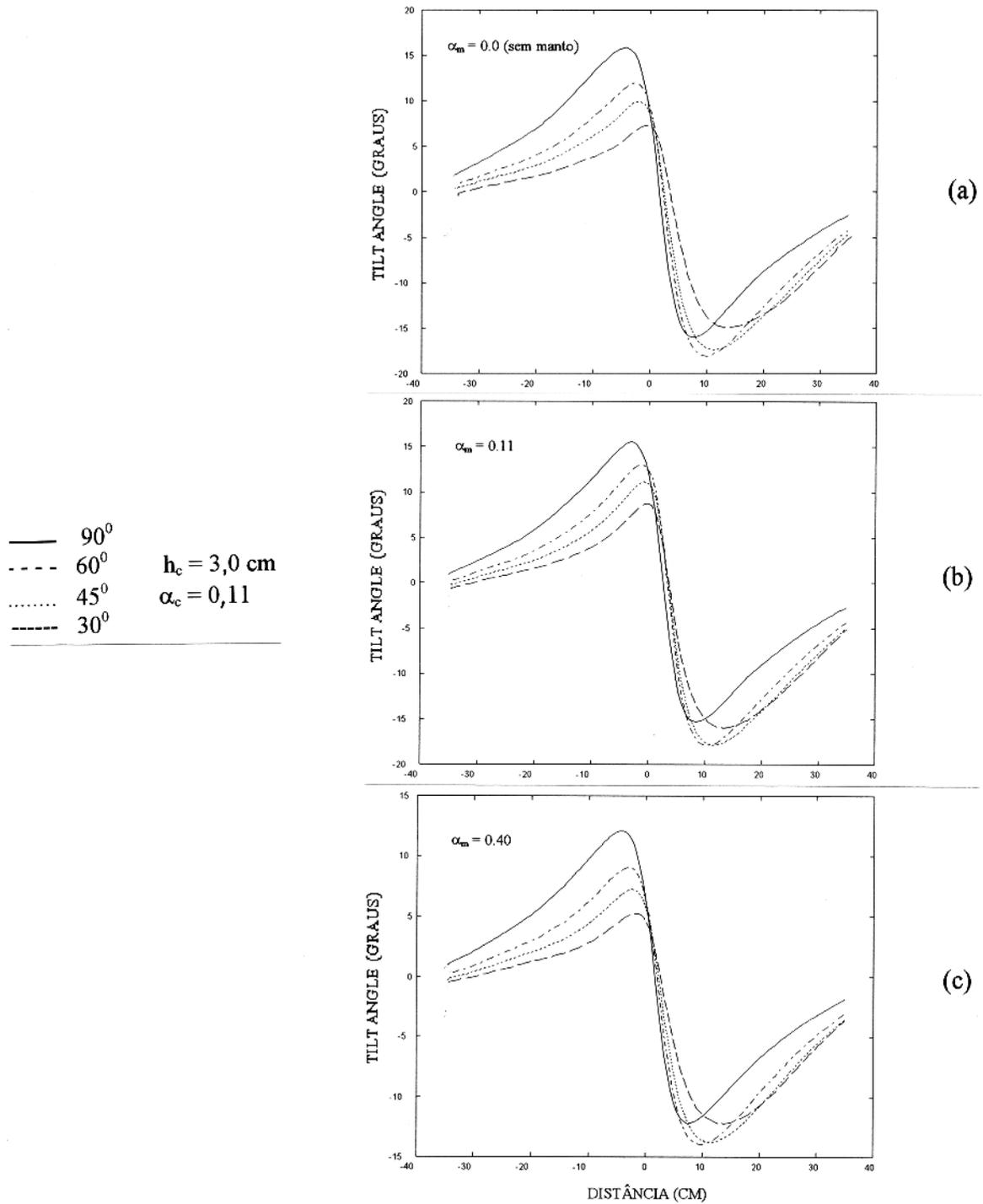


Figura 4.12 - Mudança das anomalias de tilt angle com a variação do mergulho para o corpo C_2 localizado a uma profundidade de 3,0 cm: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DO MERGULHO

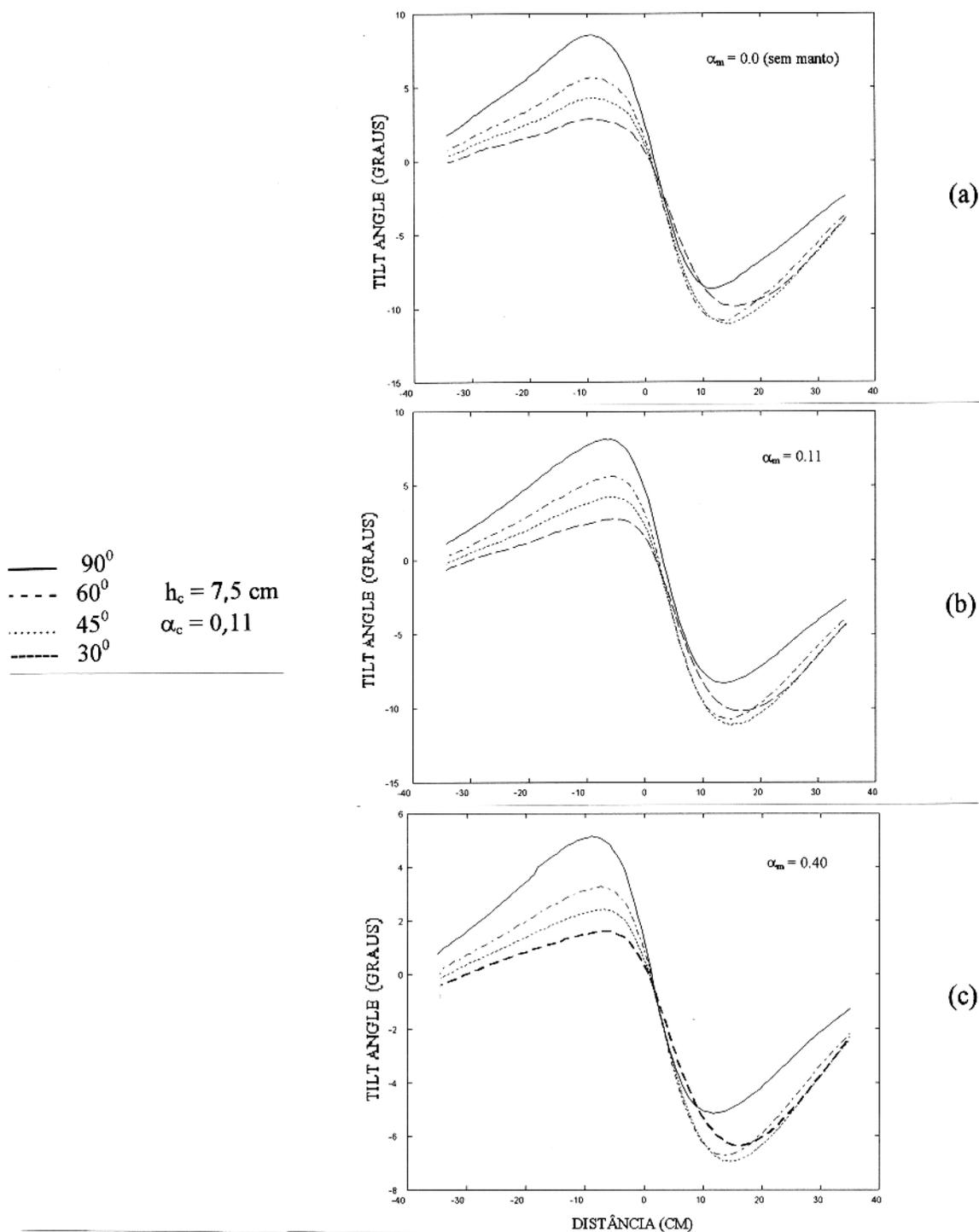


Figura 4.13 - Mudança das anomalias de tilt angle com a variação do mergulho para o corpo C_2 localizado a uma profundidade de 7,5 cm: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DO MERGULHO

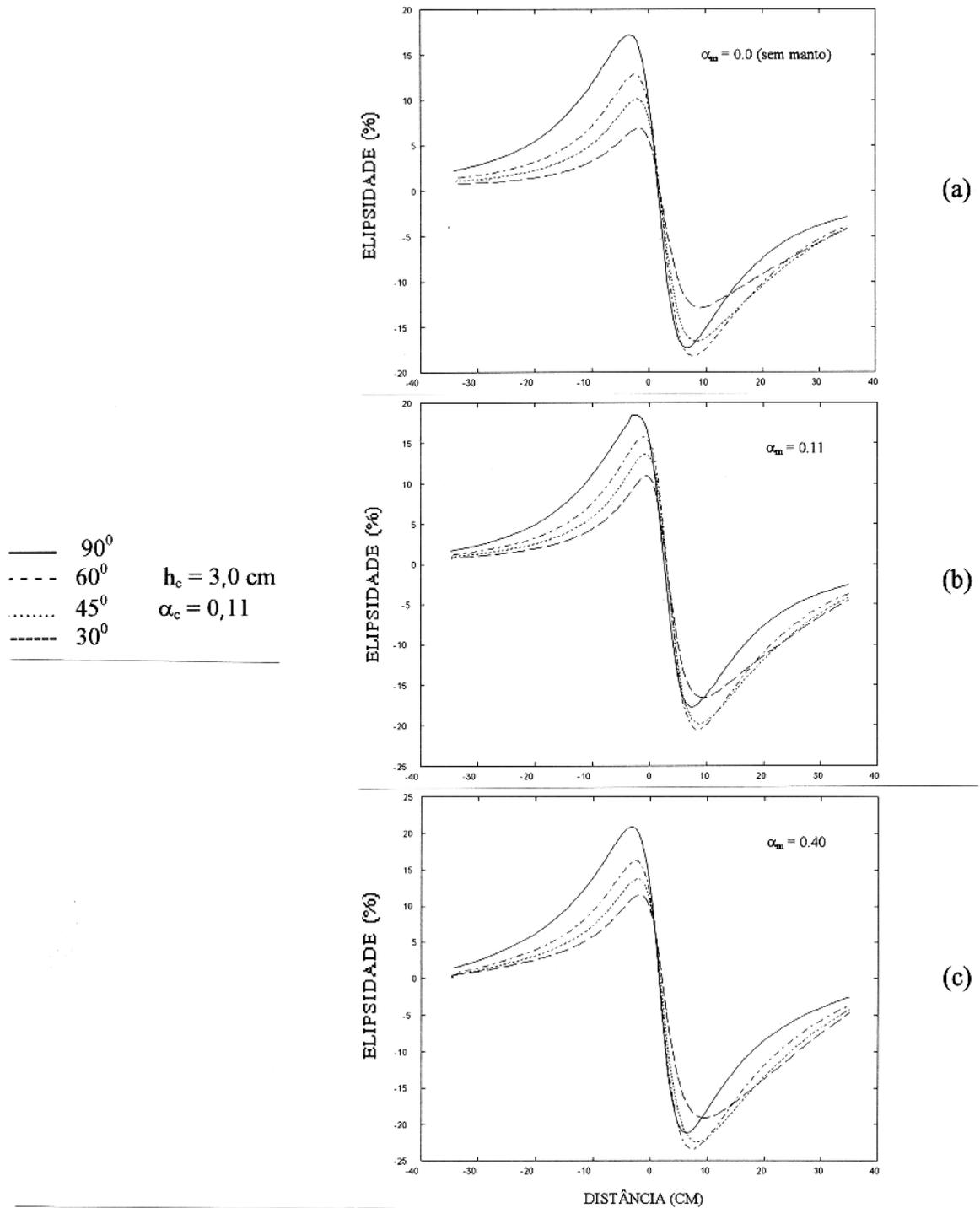


Figura 4.14 - Mudança das anomalias de elipsidade com a variação do mergulho para o corpo C_2 localizado a uma profundidade de 3,0 cm: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DO MERGULHO

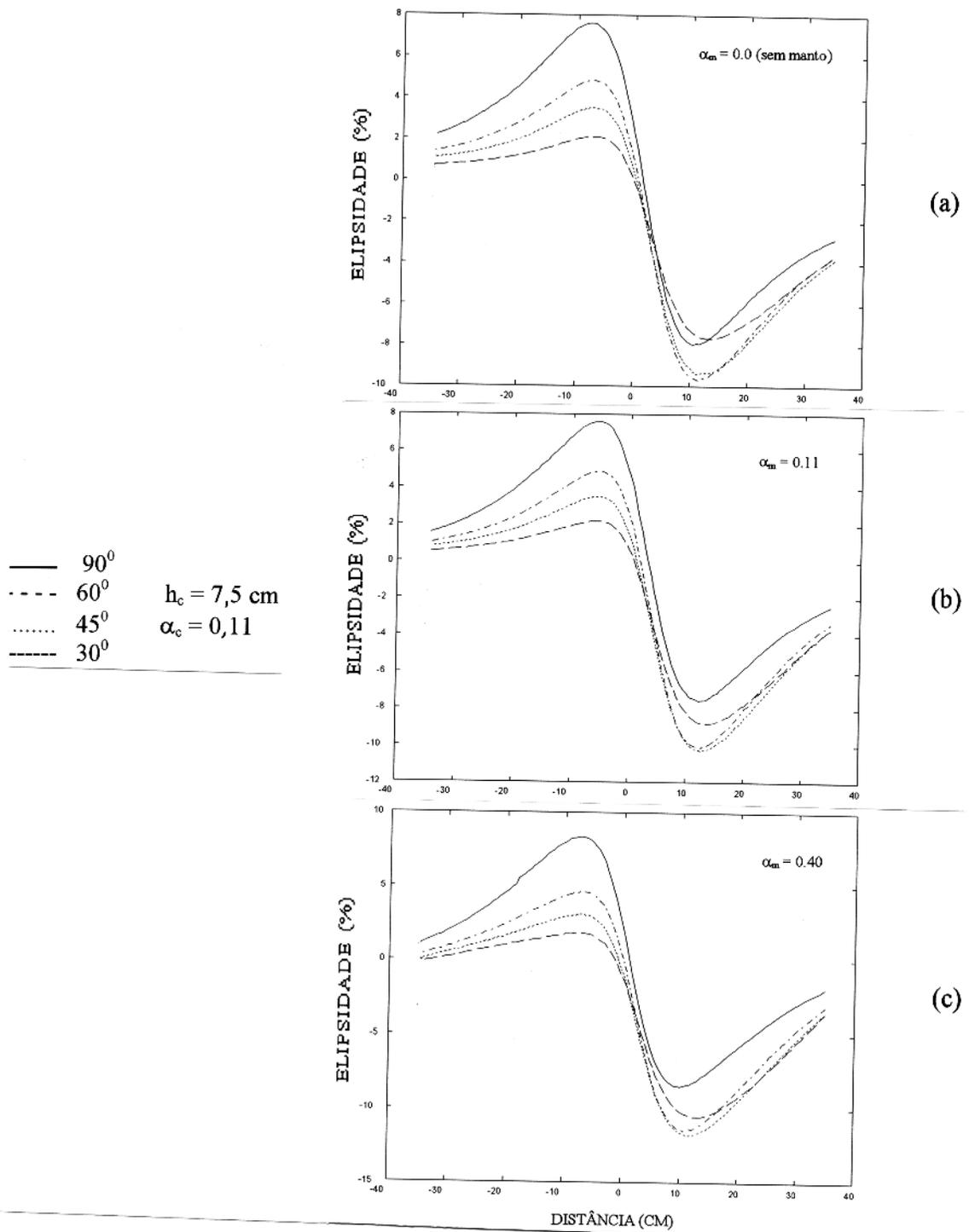


Figura 4.15 - Mudança das anomalias de elipsidade com a variação do mergulho para o corpo C_2 localizado a uma profundidade de 7,5 cm: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DA PROFUNDIDADE

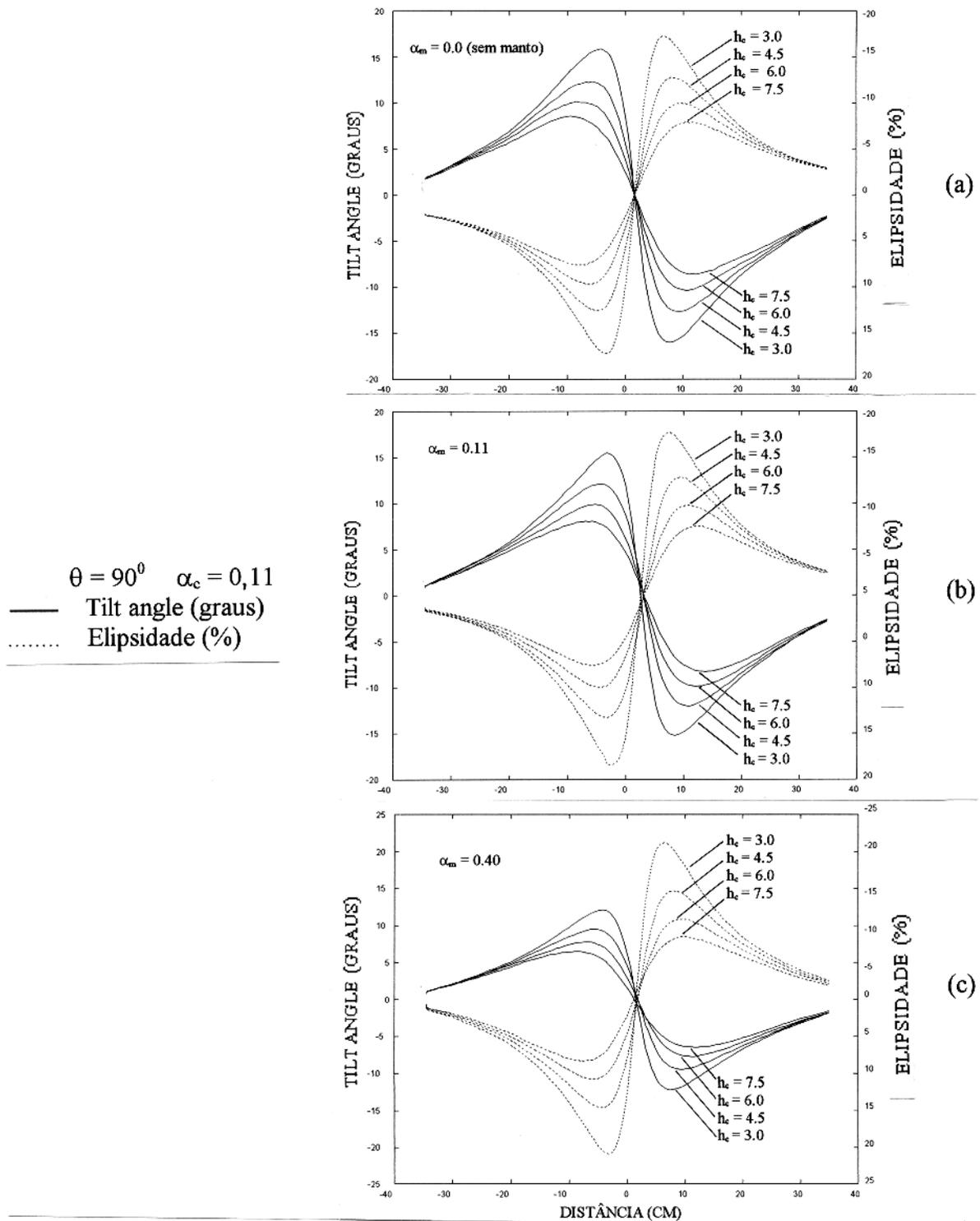


Figura 4.16 - Perfis de tilt angle e de elipsidade (invertido) mostrando o afastamento dos picos das anomalias do ponto do cross-over com o aumento da profundidade (cm) do topo do condutor com mergulho de 90^0 : (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DA PROFUNDIDADE

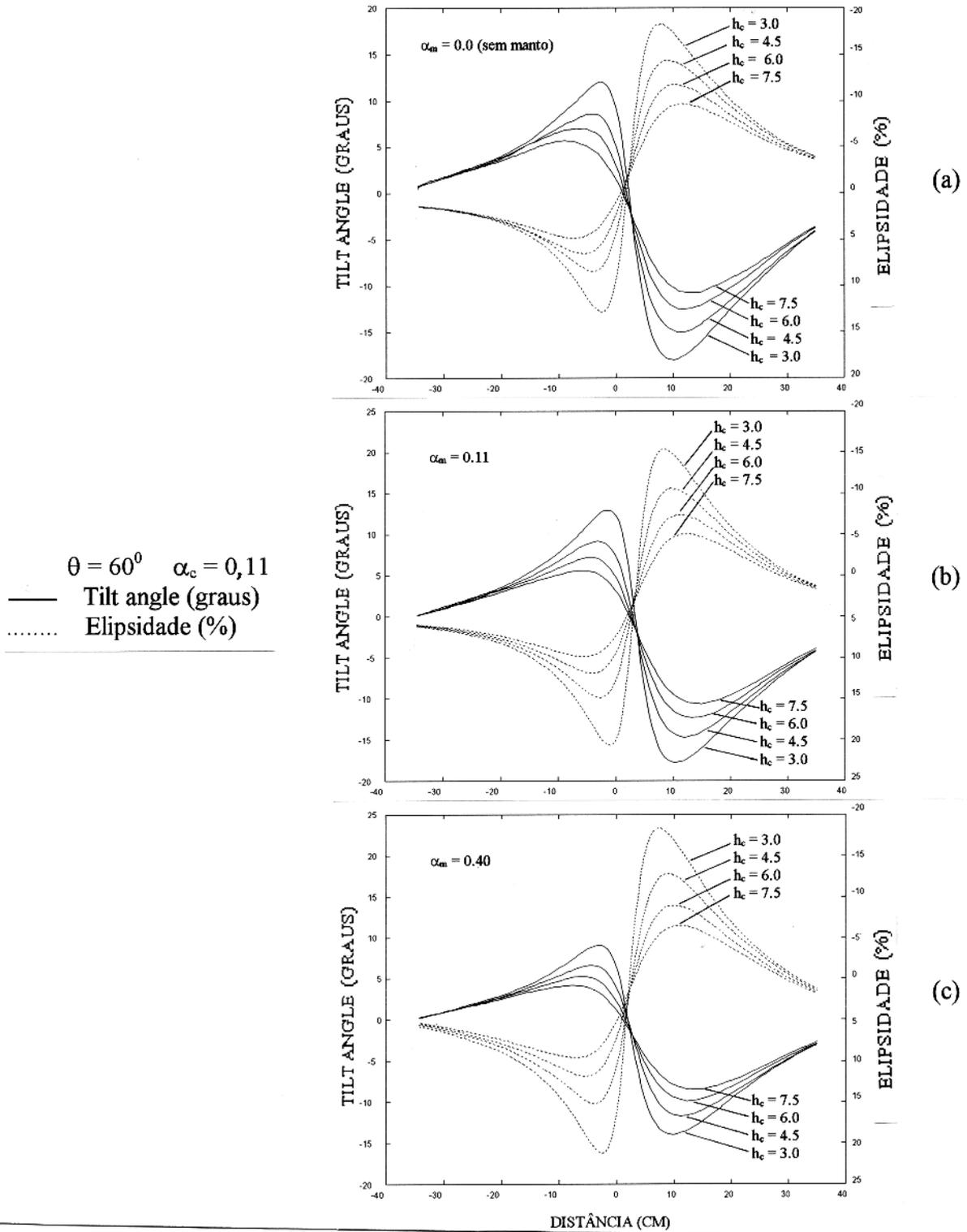


Figura 4.17 - Perfis de tilt angle e de elipsidade (invertido) mostrando o afastamento dos picos das anomalias do ponto do cross-over com o aumento da profundidade (cm) do topo do condutor com mergulho de 60° : (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DA PROFUNDIDADE

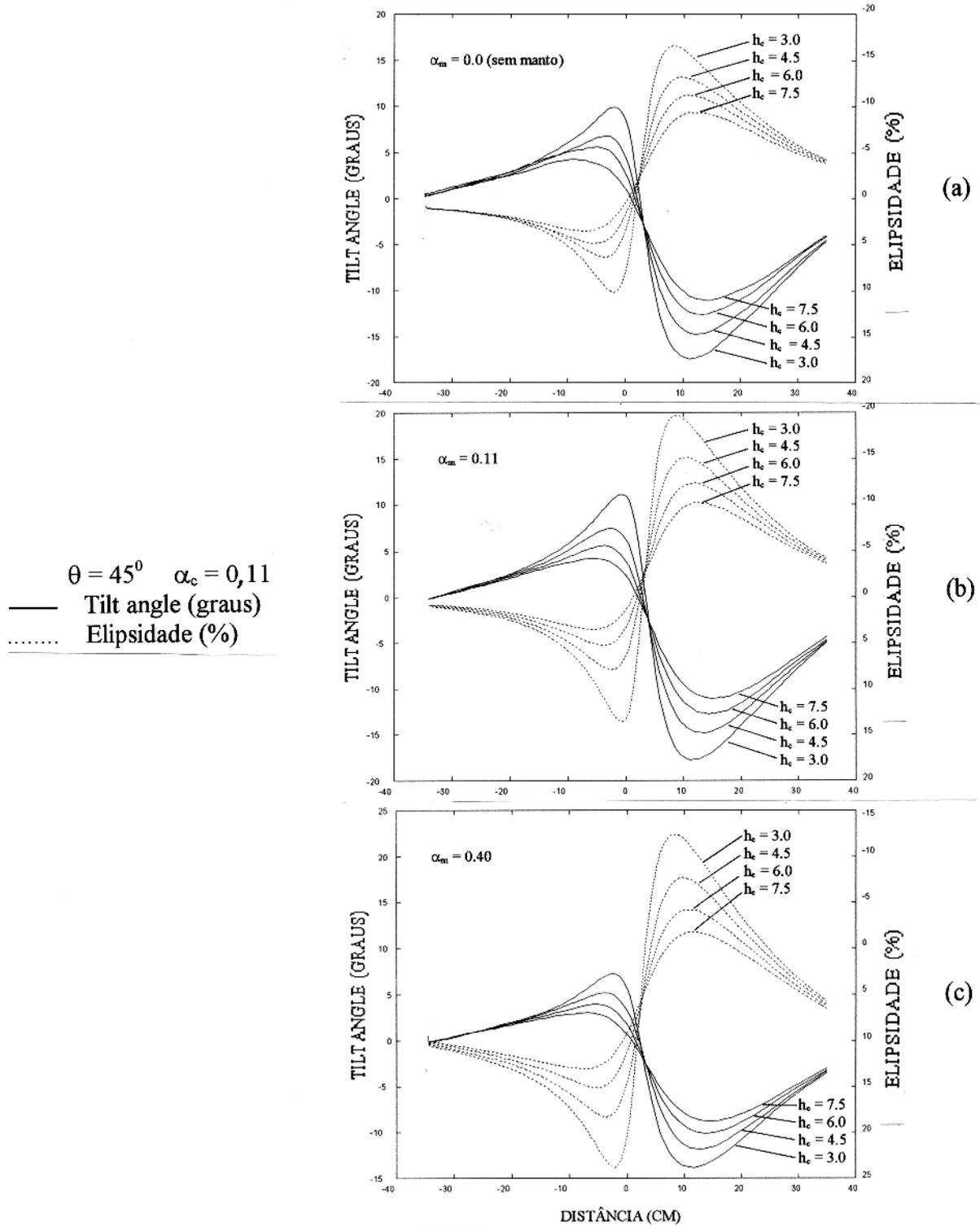


Figura 4.18 - Perfis de tilt angle e de elipsidade (invertido) mostrando o afastamento dos picos das anomalias do ponto do cross-over com o aumento da profundidade (cm) do topo do condutor com mergulho de 45° : (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,40$.

EFEITOS DA PROFUNDIDADE

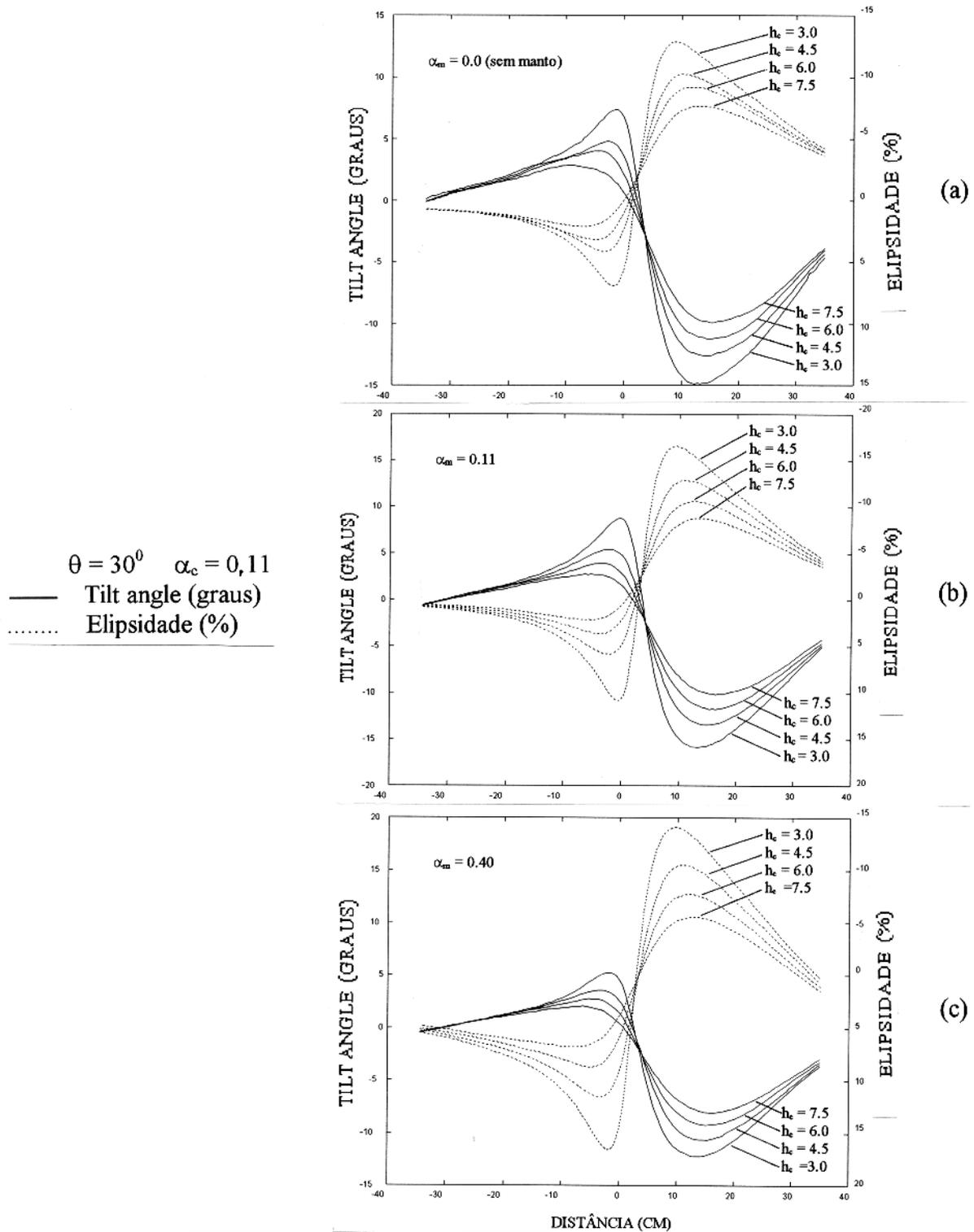


Figura 4.19 - Perfis de tilt angle e de elipsidade (invertido) mostrando o afastamento dos picos das anomalias do ponto do cross-over com o aumento da profundidade (cm) do topo do condutor com mergulho de 30° : (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,40$.

5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os efeitos do manto de intemperismo nas anomalias VLF são analisadas 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 respostas do manto e do corpo (Tabelas 4.1 e 4.2) para diferentes mergulhos ($\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ e 90°) e diferentes profundidades do topo do condutor ($h_c = 3,0, 4,5, 6,0$ e $7,5$ cm).

Com o objetivo de estudar os efeitos relativos ao mergulho do condutor utilizou-se o coeficiente de assimetria para as análises dos resultados. o coeficiente de assimetria (CAS) foi definido como sendo a razão entre o valor absoluto do pico contra o mergulho (PCM) e o valor absoluto do pico a favor do mergulho (PFM), isto é:

$$CAS = \frac{|PCM|}{|PFM|} \quad (5.1)$$

Os efeitos da profundidade do topo do condutor foram analisados com a utilização dos valores pico-a-pico dos perfis. Nas análises feitas com o coeficiente de assimetria, convencionou-se que o coeficiente será tão maior quanto mais próximo estiver do 0 (zero).

5.1 EFEITOS 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 C_2 localizado a uma profundidade de 3,0 cm e 7,5 cm mergulhando com os ângulos de $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ e 30° .

Para as curvas de tilt angle observa-se que estando o corpo na posição vertical e a uma profundidade de 3,0 cm os valores pico-a-pico das anomalias diminuem com o aumento da condutância do manto dentro de toda a faixa de σ_m trabalhada. Nas inclinações de $60^\circ, 45^\circ$ e 30° as anomalias pico-a-pico aumentam inicialmente na presença do manto que possui condutância de aproximadamente 1,3 S e diminuem após este valor de condutância do manto (Figura 5.1.a).

Estando o corpo a uma profundidade de 7,5 cm, nota-se que os valores pico-a-pico das anomalias são quase constantes na presença do manto de condutância igual a 1,3 S. Após este valor de condutância as anomalias começam a diminuir lentamente (Figura 5.1.b).

Estando o corpo localizado a uma profundidade de 3,0 cm, os valores pico-a-pico da elipsidade para todas as inclinações crescem mais rapidamente nos baixos valores de condutância do manto, mas com o aumento da condutância o crescimento da elipsidade torna-se cada vez mais lento (Figura 5.1.c). Este efeito é mais intensamente verificado quando o corpo está localizado a uma profundidade de 7,5 cm (Figura 5.1.d).

5.2 EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR

As Figuras 5.2 e 5.3 mostram a variação pico-a-pico das anomalias de tilt angle com a condutância dos corpos. Os valores pico-a-pico de tilt angle aumentam de forma abrupta para corpos com condutância até 100 S na presença dos mantos M_1 , M_2 , M_3 e também sem manto (manto M_0). Após este valor de condutância as anomalias continuam a crescer; só que de forma mais suave. Ao passar por valores de condutância iguais a 230 S as anomalias continuam aumentando, porém de uma forma mais suave ainda. À medida que diminuimos o mergulho do corpo este crescimento das anomalias torna-se mais lento. Observe que no intervalo de 230 S a 400 S as respostas pico-a-pico sem o manto são quase as mesmas quando o corpo está mergulhando com um ângulo de 30° (Figura 5.2.d).

Os valores pico-a-pico de elipsidade (Figuras 5.3) diminuem mais lentamente com o aumento da condutância do corpo quando o manto está presente, onde os valores são maiores que aqueles obtidos na ausência do manto. Observa-se também que para os mantos M_2 e M_3 tem-se um acréscimo nas anomalias para corpos com condutâncias menores que 100 S. Após este valor ocorre uma diminuição nas respostas até o limite de condutância trabalhada.

Observe que os corpos com condutância maior que 300 S possuem respostas pico-a-pico praticamente iguais na presença dos mantos M_2 e M_3 quando estão mergulhando com os ângulos de 60° e 45° (Figuras 5.3.b e 5.3.c), enquanto que fica bastante difícil fazer a distinção de corpos com condutância no intervalo de 130 S a 320 S quando inclinados de 30° (Figura 5.3.d).

5.3 EFEITOS DO MERGULHO DO CONDUTOR

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram a variação do coeficiente de assimetria com o mergulho do condutor calculados para perfis de tilt angle e de elipsidade. Observa-se que para uma profundidade particular o coeficiente de assimetria aumenta à medida em que diminuimos o mergulho do condutor.

Para os valores do coeficiente de assimetria calculados nos perfis de tilt angle (Figura 5.4.a, b e c), observa-se que a uma profundidade particular o valor do coeficiente é tão maior quanto maior for a condutividade do manto (Figuras 5.6 e 5.7) e é na maior profundidade ($h_c = 7,5$) (Figura 5.7.c) que o coeficiente atinge seu maior valor.

Para os valores do coeficiente de assimetria calculados nos perfis de elipsidade (Figura 5.5.a, b e c), observa-se também que o manto tem o efeito de aumentar o valor do coeficiente de assimetria e este coeficiente cresce a uma razão direta com a condutividade do manto bem como também com a profundidade do topo do condutor. Observe que o coeficiente atinge o seu maior valor na profundidade de 7,5 cm (Figura 5.5.c).

5.4 EFEITOS DA PROFUNDIDADE

As Figuras 5.6 e 5.7 mostram como a variação da profundidade do topo do condutor afetam 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 (Figuras 5.6.a, b e c), verifica-se que os valores pico-a-pico da resposta E.M. do condutor com e sem manto caminham próximas uma da outra quando o corpo está mergulhado com um ângulo de 90° (Figura 5.6.a). Com a diminuição do mergulho, nota-se que as respostas obtidas sem manto começam a diminuir em relação àquelas tomadas na presença dos mantos M_1 , M_2 e M_3 . Este efeito foi verificado em toda a faixa de profundidade trabalhada, sendo mais evidenciada para o corpo mais raso. Observa-se também que a diminuição do mergulho tem o efeito de tornar menor a diferença entre as respostas E.M. da maior e menor profundidade,

tornando a atenuação das anomalias mais suaves com o aumento da profundidade (Figuras 5.6.b e c).

Para a elipsidade (Figuras 5.7.a, b e c), observa-se que as respostas na presença dos mantos M_1 , M_2 e M_3 são maiores para todas as profundidades quando comparadas àquelas tomadas sem manto. 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.

5.5 GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS

Através de diagramas de Argand (Figuras 5.8 à 5.15) 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 a confecção de cada diagrama também foram mantidos fixos o mergulho do corpo e o parâmetro de resposta do manto. Os ábacos foram obtidos levando-se em conta a calibração sobre o manto considerado.

Estando o corpo na posição vertical (Figuras 5.8 e 5.9) a presença do manto faz com que as anomalias sofram uma rotação de fase no sentido anti-horário à medida que crescem o parâmetro da resposta do manto (observe que o ângulo de rotação é maior quanto maior for o parâmetro de resposta do corpo). Observa-se também que as anomalias crescem para os mantos M_1 ($\alpha_m = 0,11$) e M_2 ($\alpha_m = 0,25$); porém estando o corpo em contato com o manto M_3 ($\alpha_m = 0,4$) ocorre uma ligeira diminuição das anomalias.

A Figura 5.9 mostra a superposição dos efeitos referentes aos mantos M_1 , M_2 e M_3 , bem como também dos dados coletados sem manto.

Estando o corpo mergulhando com os ângulos de 60° , 45° e 30° , observou-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 (Figura 5.10 à 5.15).

EFEITOS DA CONDUTÂNCIA DO MANTO

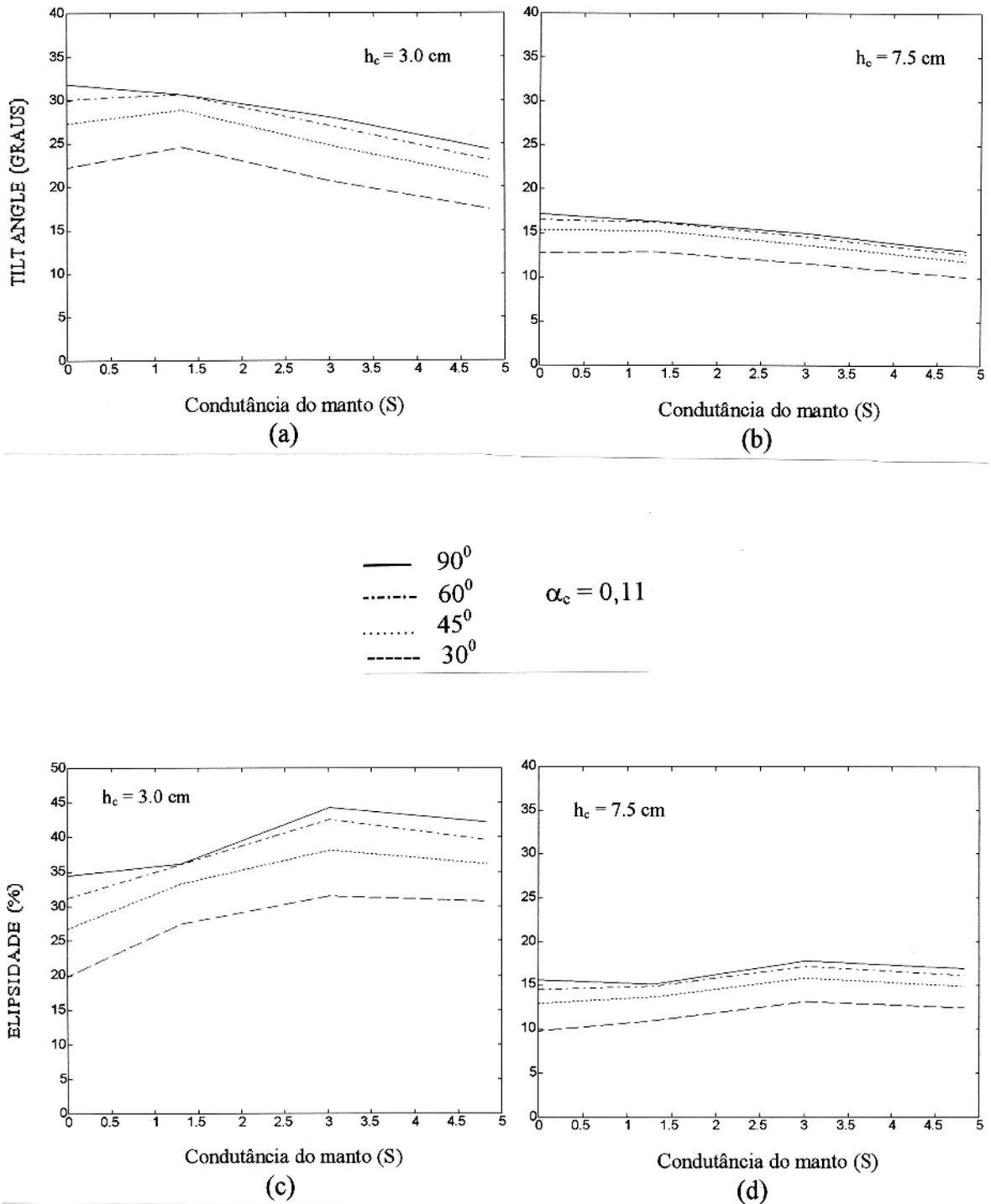
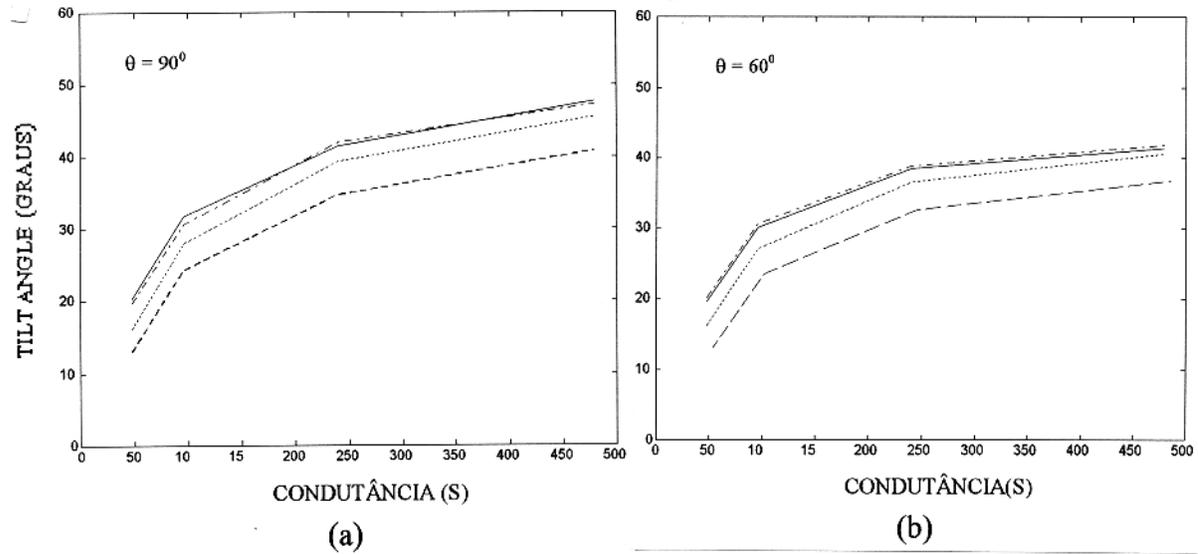


Figura 5.1 - Mudança das anomalias pico-a-pico com a variação da condutância do manto para o corpo C_2 ($\alpha_c = 0,11$), localizado nas profundidades de 3,0 e 7,5 cm: (a) e (b) tilt angle; (c) e (d) elipsidade.

EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR



— Manto M_0 (sem manto)
 - - - Manto M_1 ($\alpha_m = 0.11$)
 Manto M_2 ($\alpha_m = 0.25$)
 - · - Manto M_3 ($\alpha_m = 0.40$)

$h_c = 3,0 \text{ cm}$

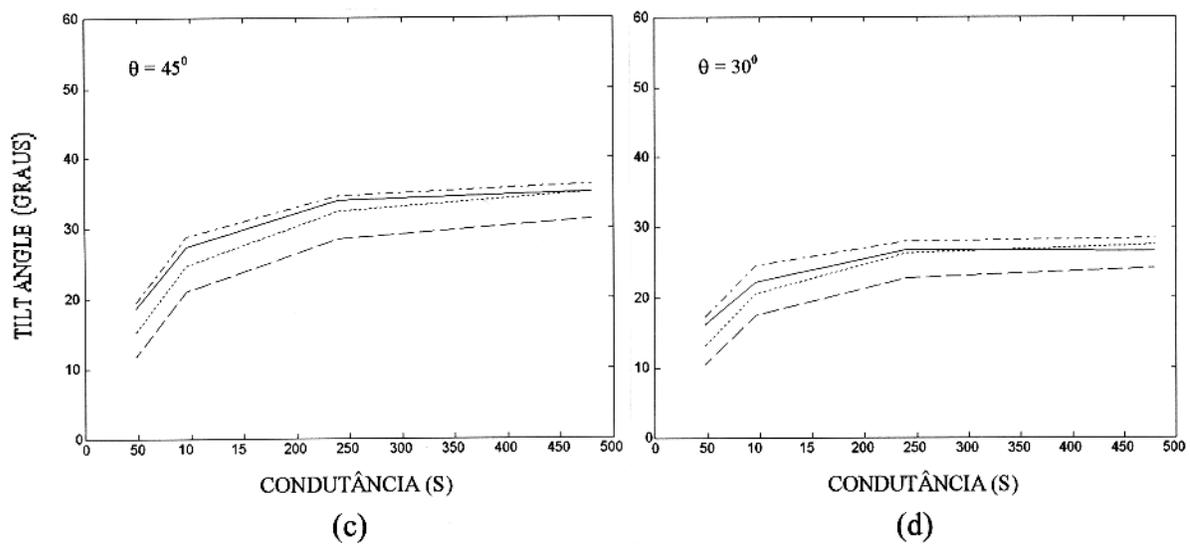
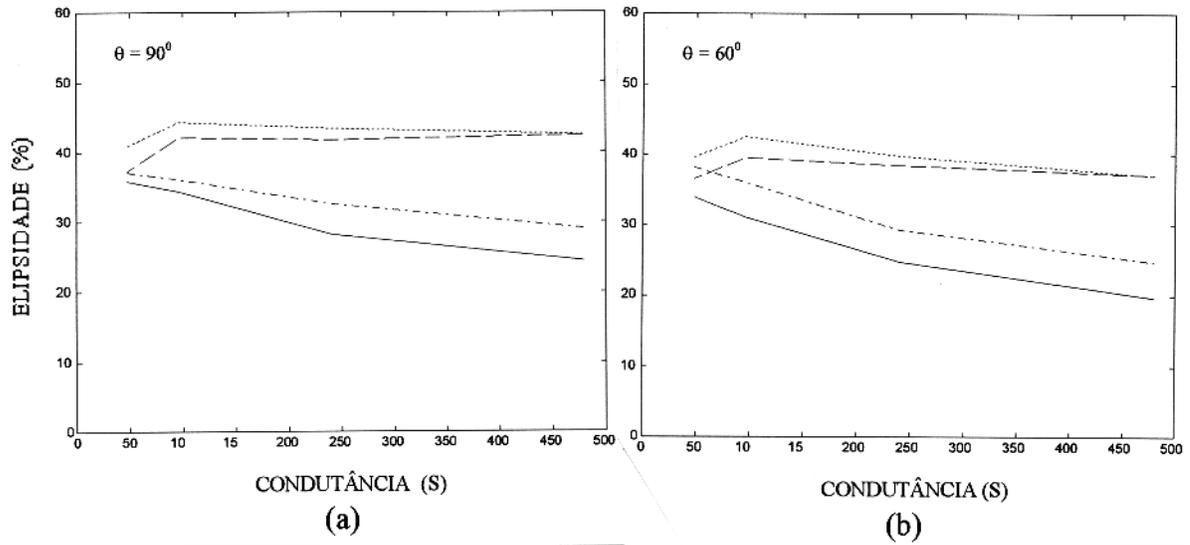


Figura 5.2 - Variação dos valores pico-a-pico de tilt angle com o parâmetro de resposta do condutor: (a) $\theta = 90^\circ$; (b) $\theta = 60^\circ$; (c) $\theta = 45^\circ$; (d) $\theta = 30^\circ$.

EFEITOS DO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CONDUTOR



— Manto M_0 (sem manto)
 Manto M_1 ($\alpha_m = 0.11$)
 Manto M_2 ($\alpha_m = 0.25$)
 -.-.- Manto M_3 ($\alpha_m = 0.40$)

$h_c = 3,0$ cm

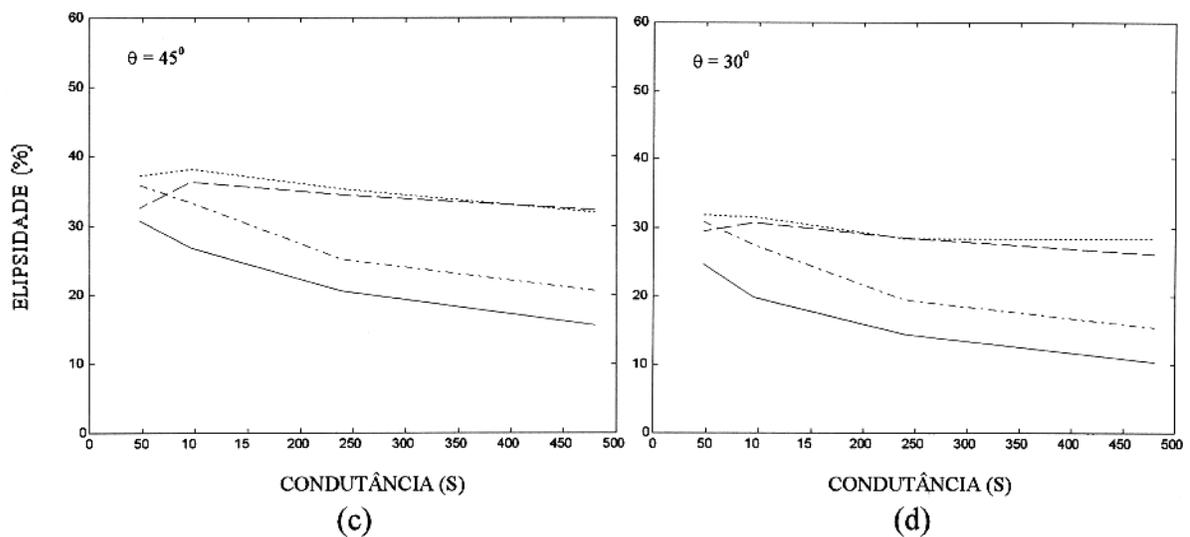


Figura 5.3 - Variação dos valores pico-a-pico de elipsidade com o parâmetro de resposta do condutor: (a) $\theta = 90^\circ$; (b) $\theta = 60^\circ$; (c) $\theta = 45^\circ$; (d) $\theta = 30^\circ$.

EFEITOS DO MERGULHO DO CONDUTOR

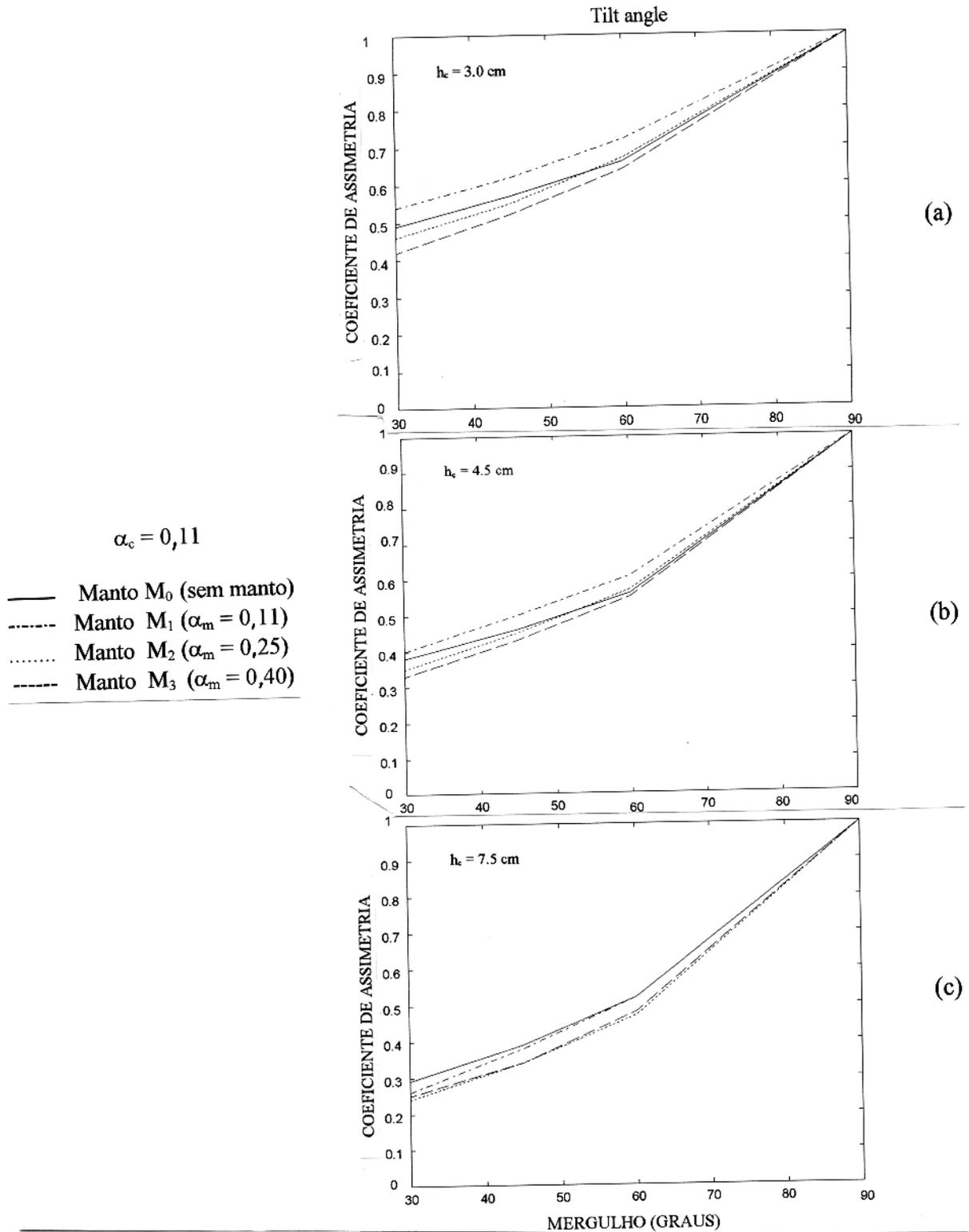


Figura 5.4 - Variação do coeficiente de assimetria com o mergulho do condutor C_2 ($\alpha_c = 0,11$) para: (a) $h_c = 3,0$ cm; (b) $h_c = 4,5$ cm; (c) $h_c = 7,5$ cm.

EFEITOS DO MERGULHO DO CONDUTOR

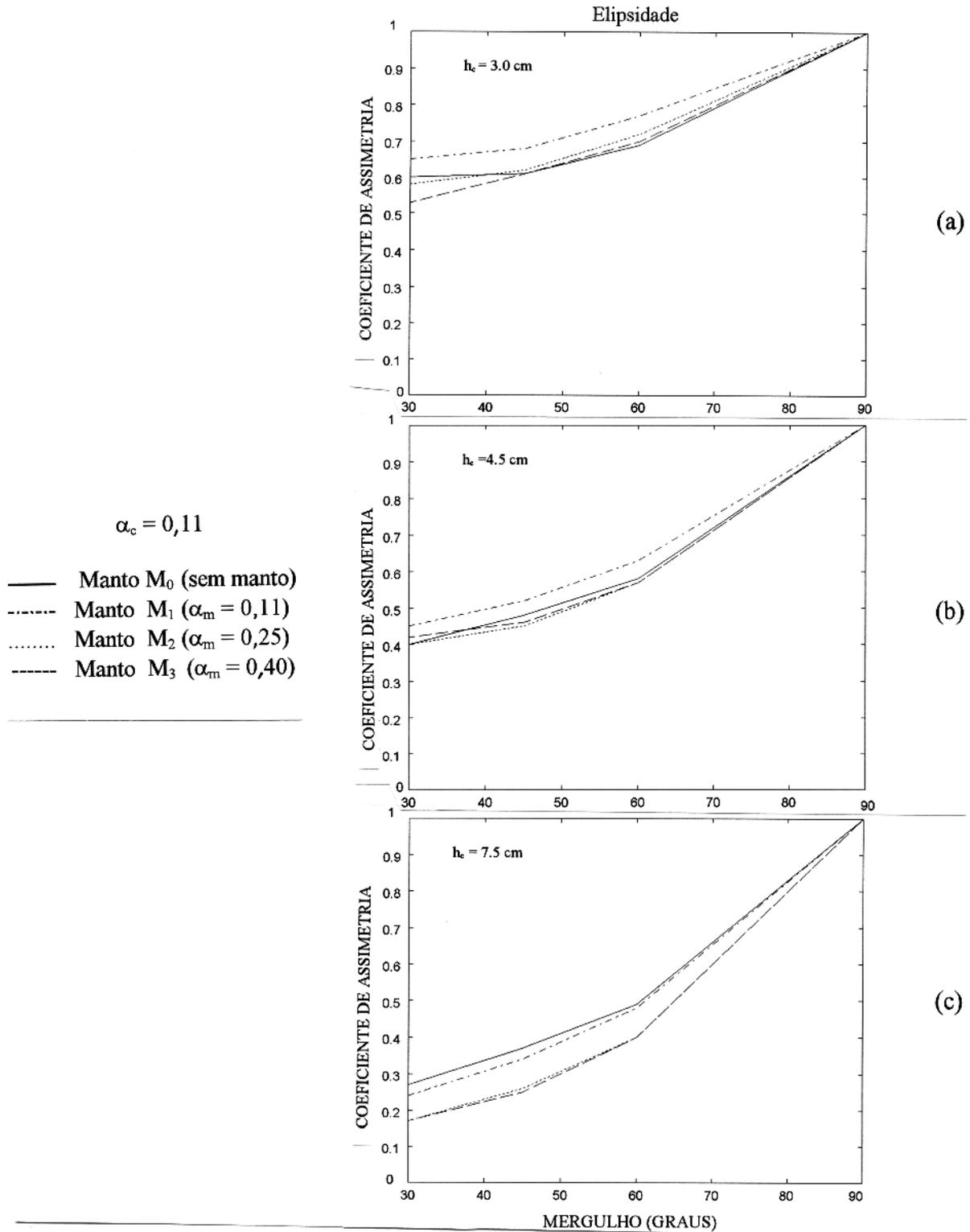


Figura 5.5 - Variação do coeficiente de assimetria com o mergulho do condutor C_2 ($\alpha_c = 0,11$) para: (a) $h_c = 3,0 \text{ cm}$; (b) $h_c = 4,5 \text{ cm}$; (c) $h_c = 7,5 \text{ cm}$.

EFEITOS DA PROFUNDIDADE

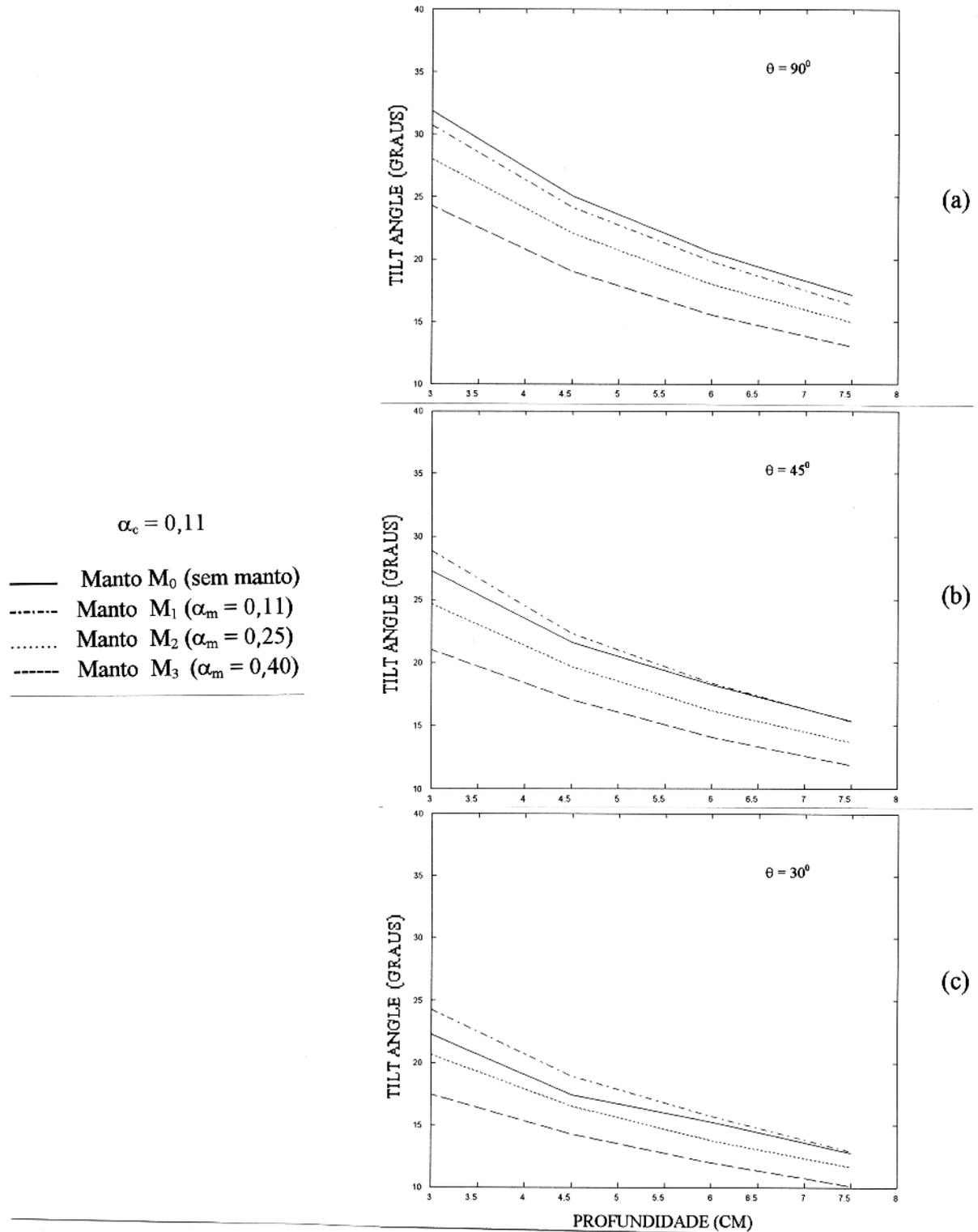


Figura 5.6 - Variação dos valores pico-a-pico de tilt angle com a profundidade do topo do condutor para: (a) $\theta = 90^\circ$; (b) $\theta = 45^\circ$; (c) $\theta = 30^\circ$.

EFEITOS DA PROFUNDIDADE

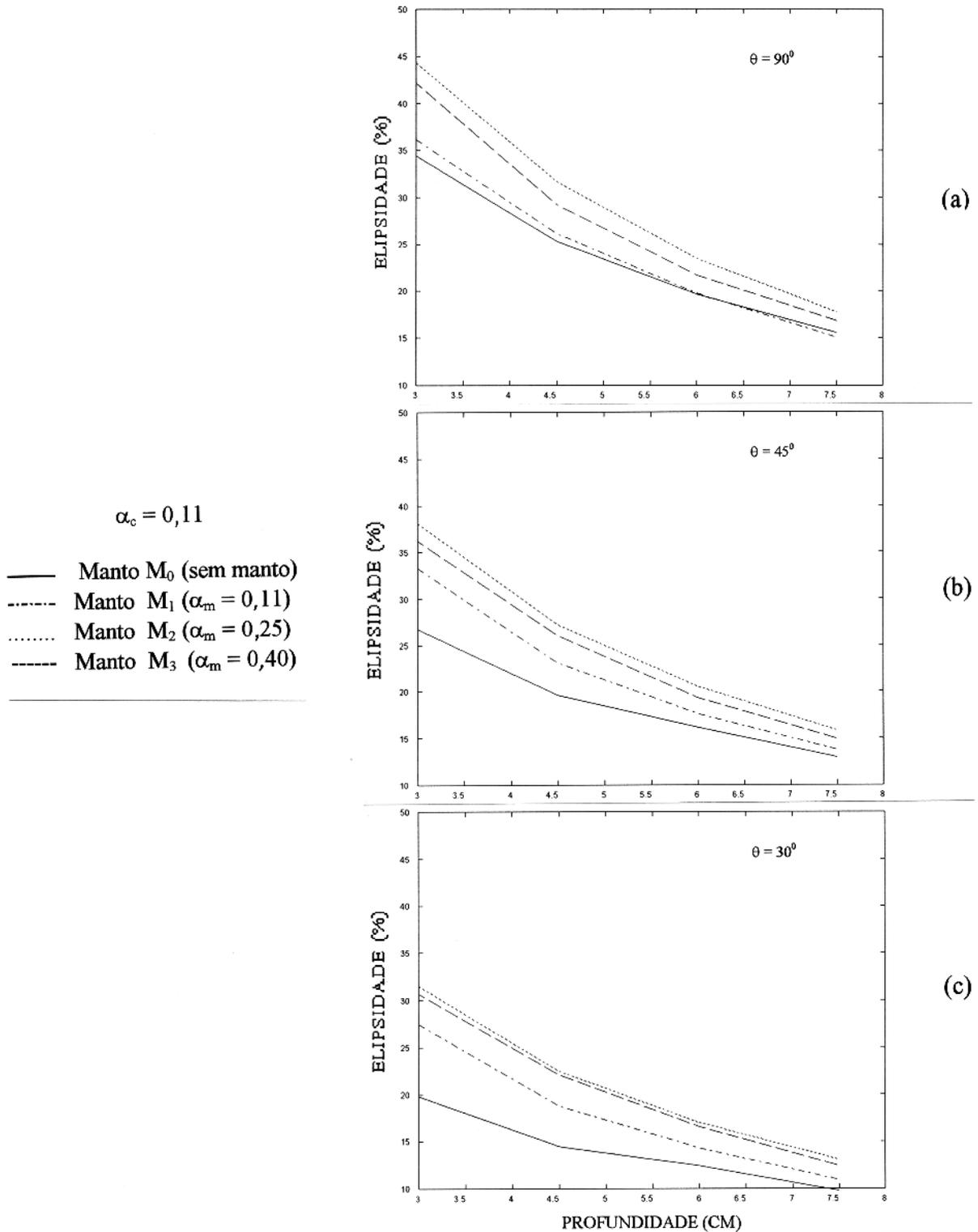


Figura 5.7 - Variação dos valores pico-a-pico de elipsidade com a profundidade do topo do condutor para: (a) $\theta = 90^\circ$; (b) $\theta = 45^\circ$; (c) $\theta = 30^\circ$.

GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS

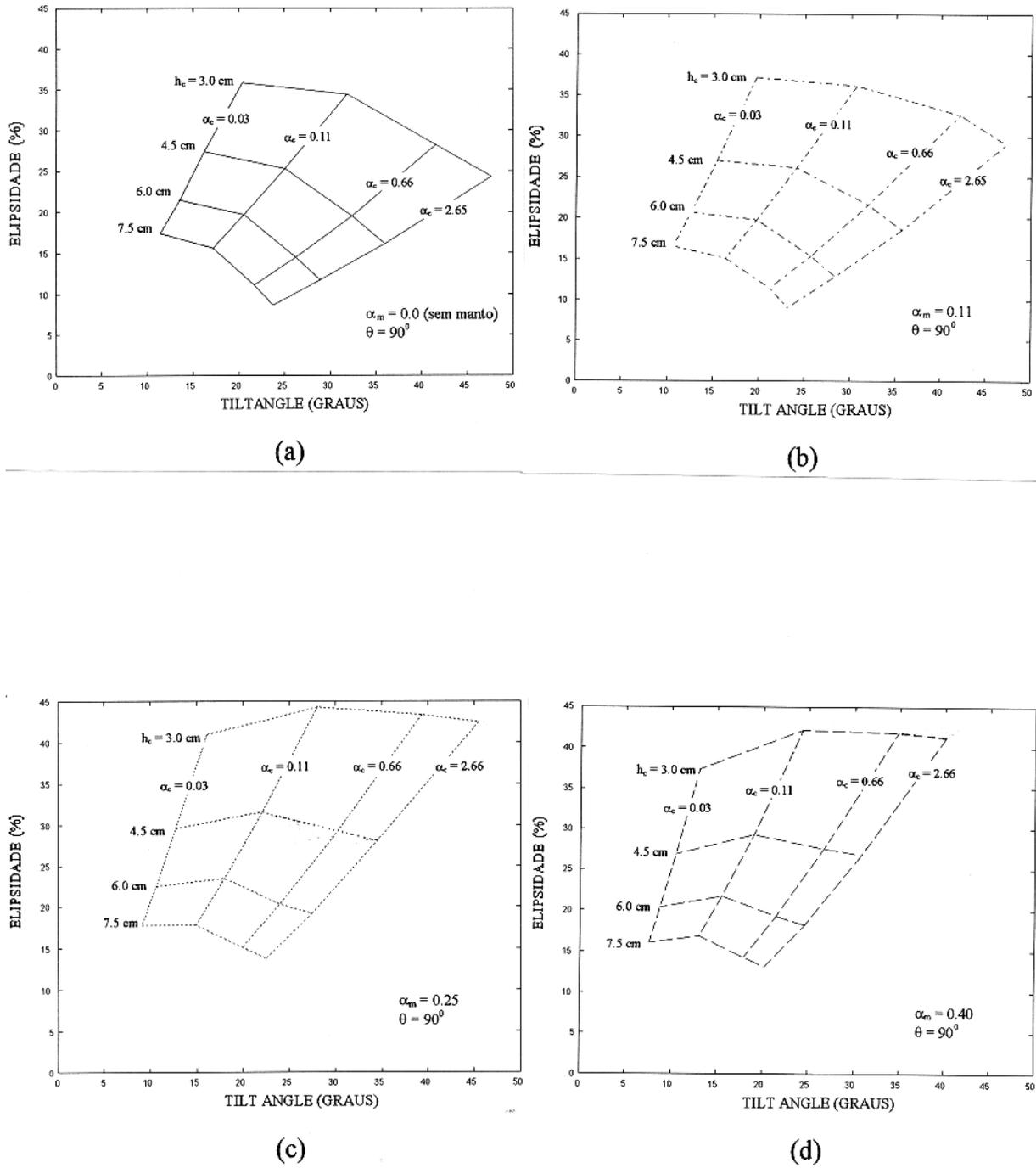


Figura 5.8 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 90^\circ$: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,25$; (d) $\alpha_m = 0,40$.

GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS

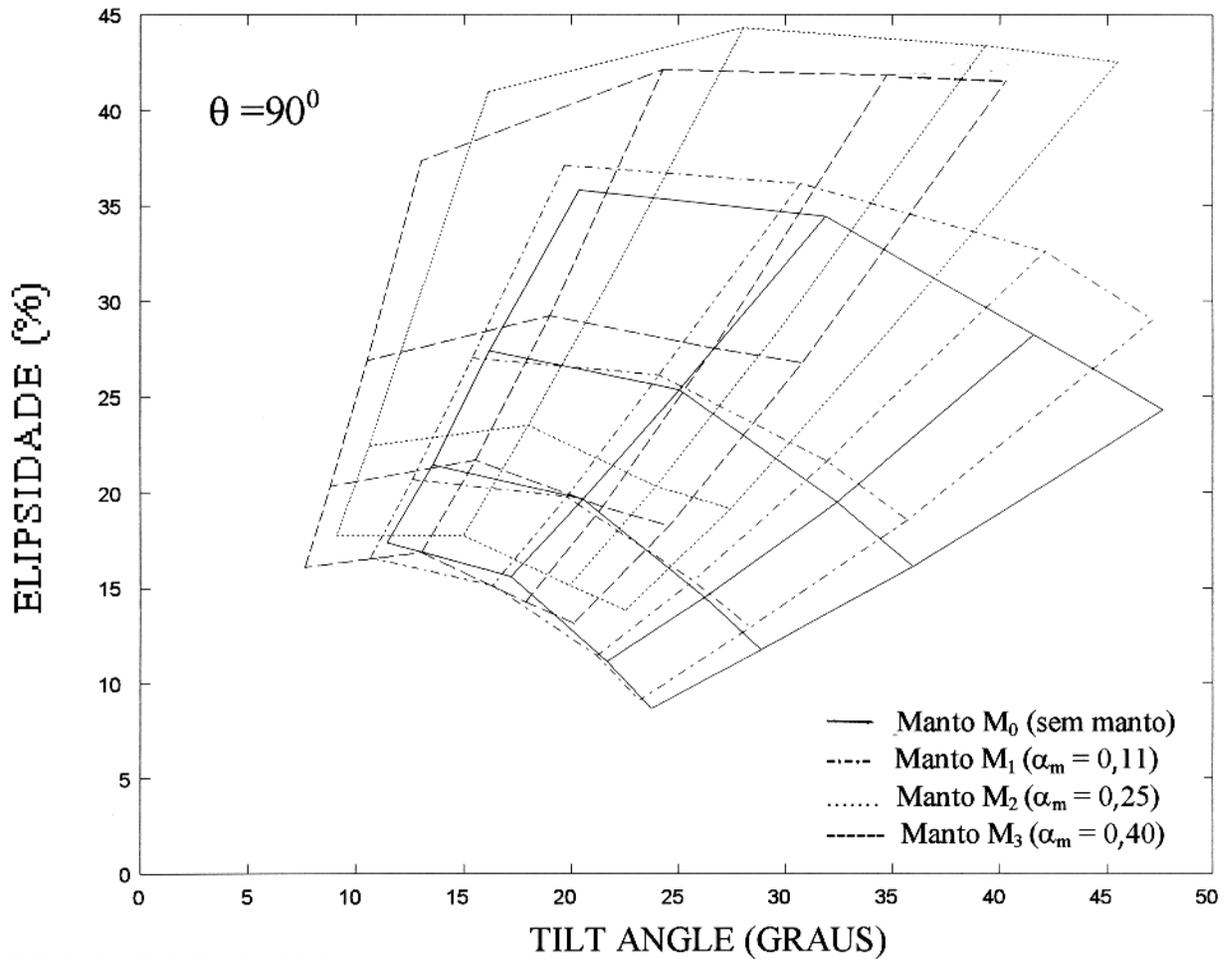


Figura 5.9 - Rotação anti-horária do diagrama de Argand devido a presença do manto para $\theta = 90^0$.

GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS

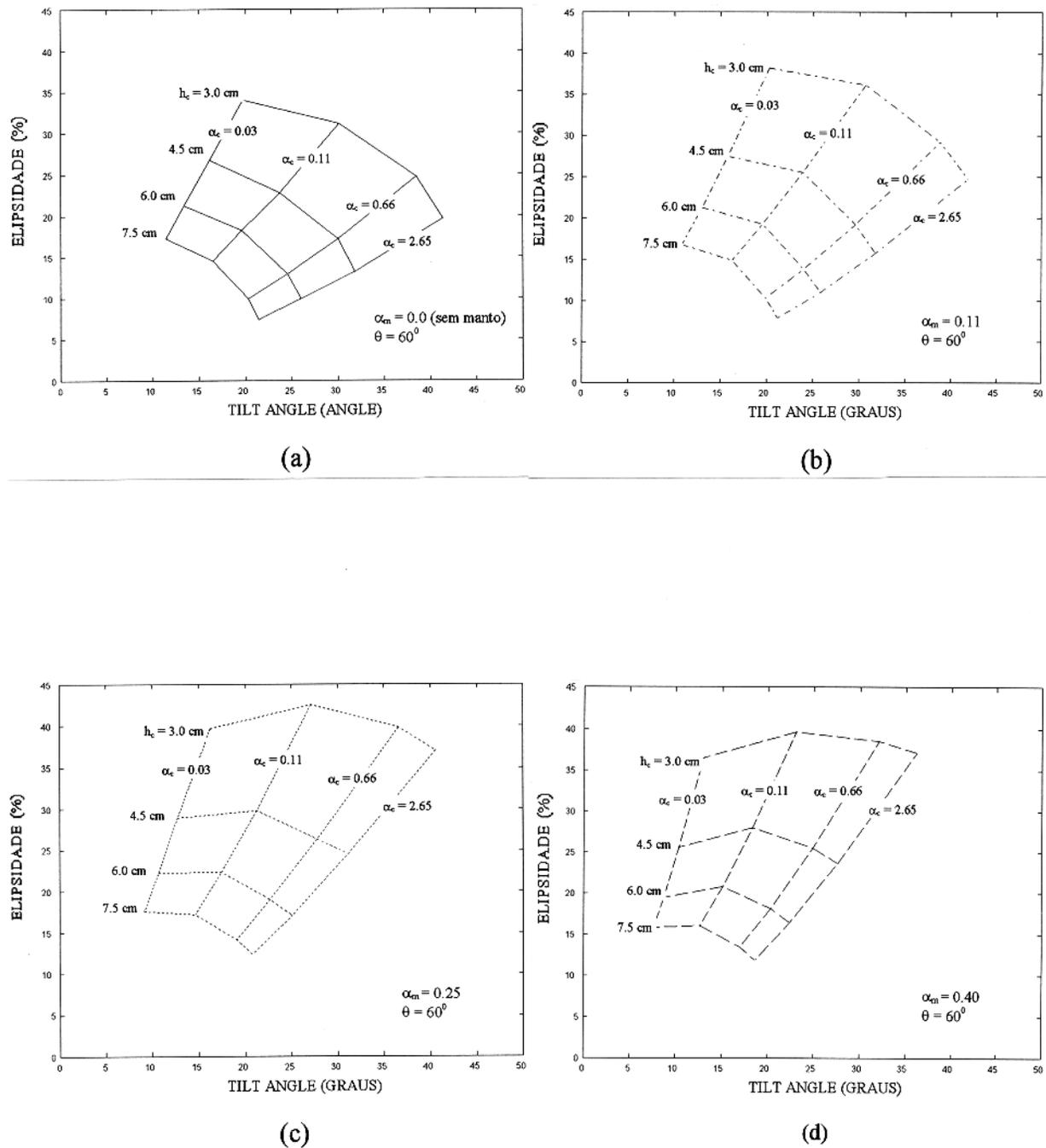


Figura 5.10 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 60^\circ$: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,25$; (d) $\alpha_m = 0,40$.

GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS

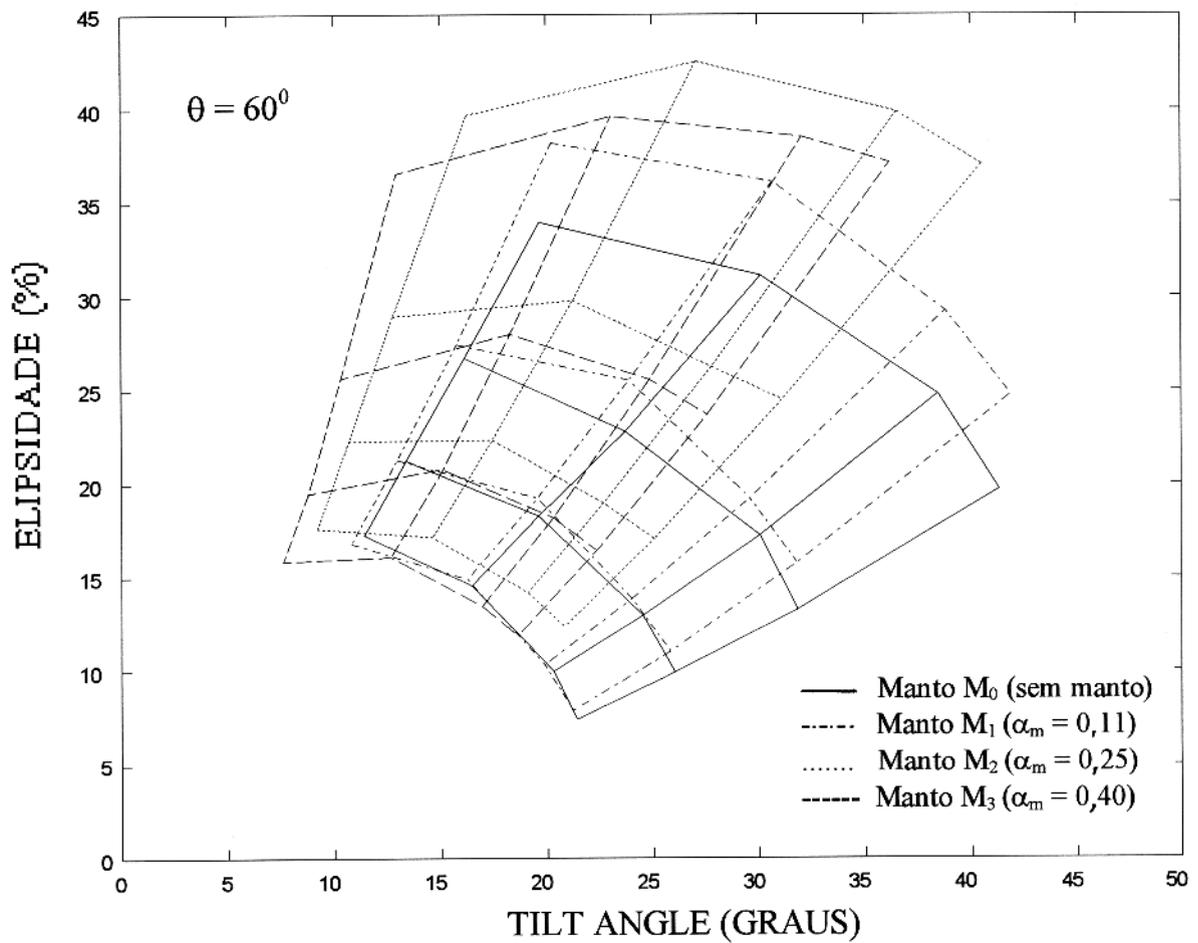


Figura 5.11 - Rotação anti-horária do diagrama de Argand devido a presença do manto para $\theta = 60^\circ$.

GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS

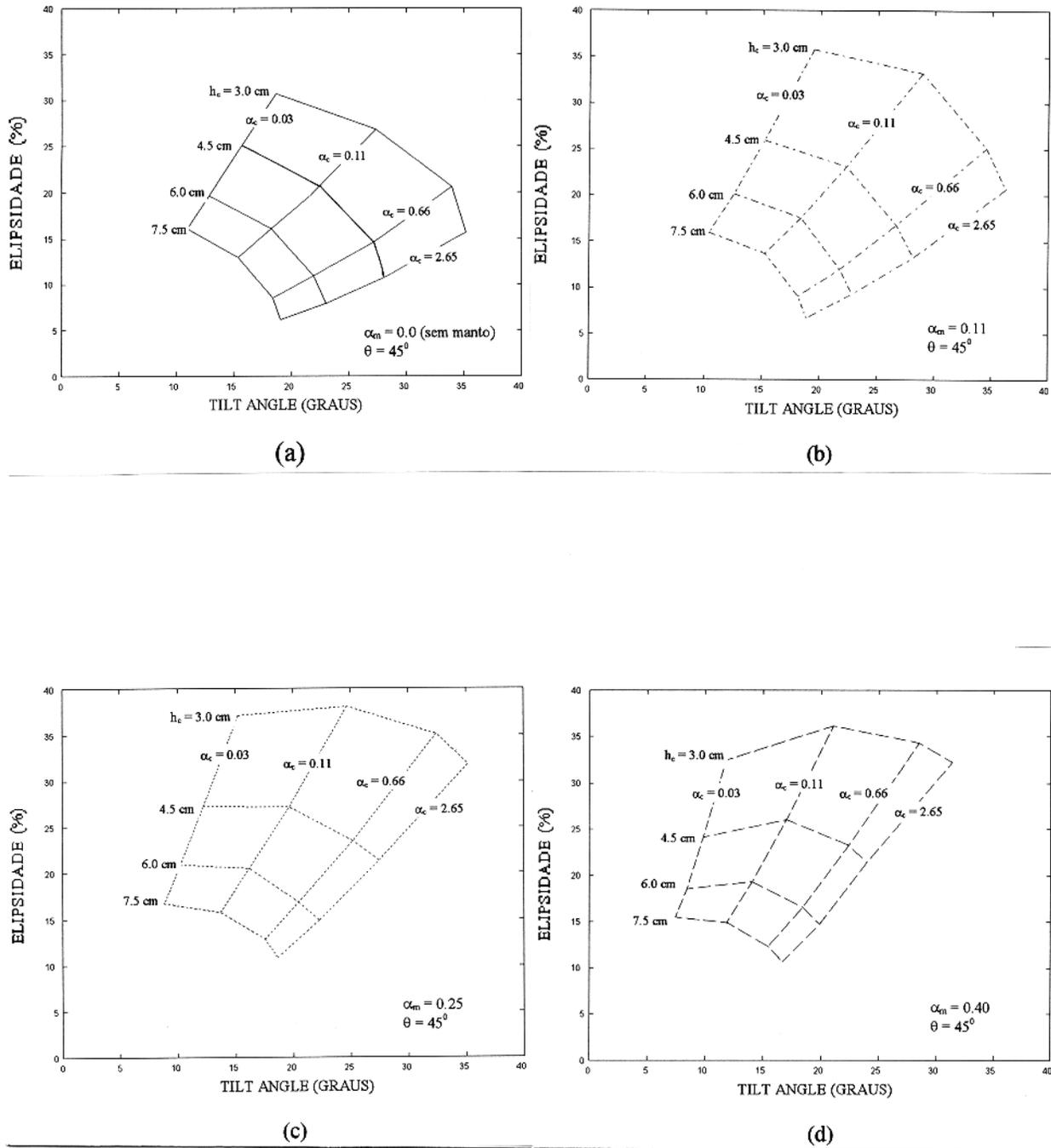


Figura 5.12 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 45^\circ$: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,25$; (d) $\alpha_m = 0,40$.

GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS

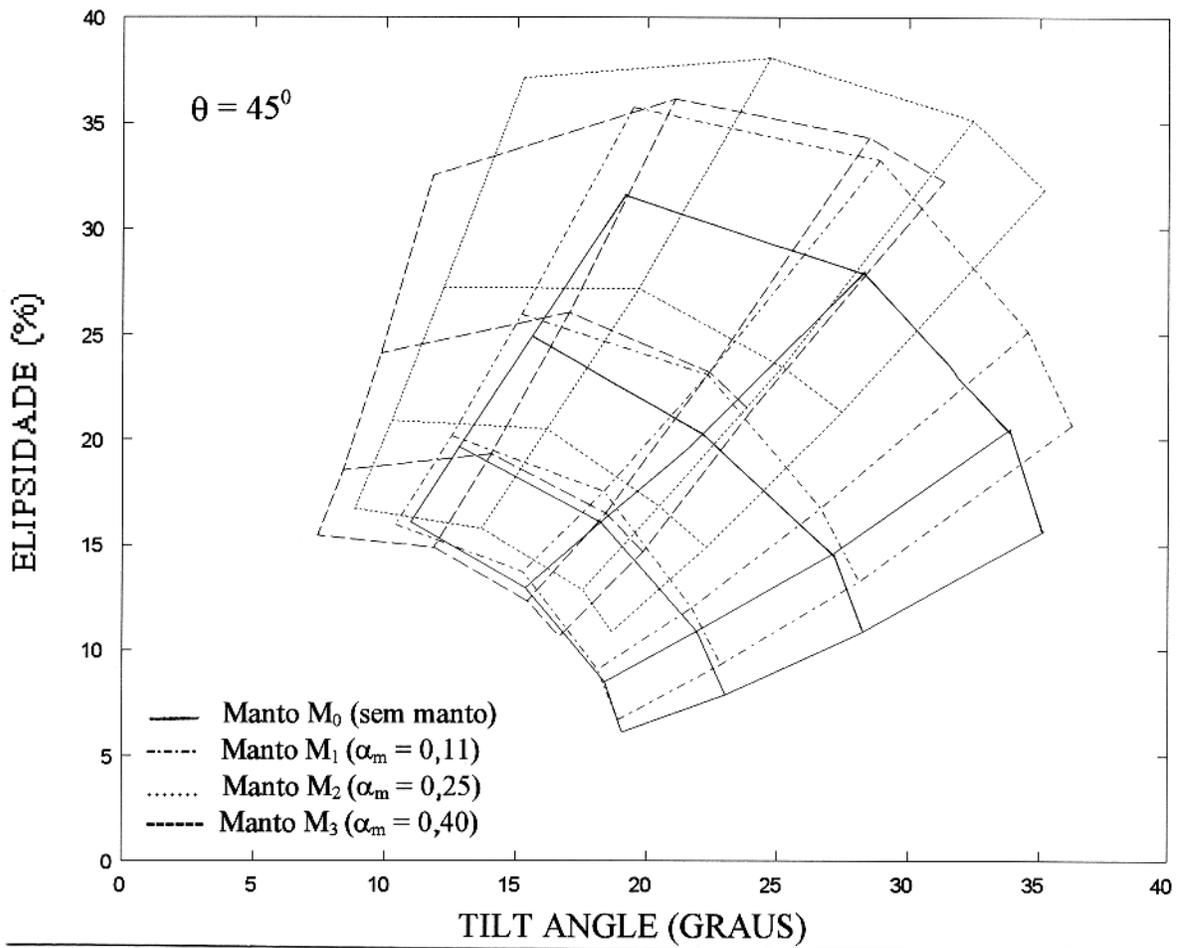


Figura 5.13 - Rotação anti-horária do diagrama de Argand devido a presença do manto para $\theta = 45^\circ$.

GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS

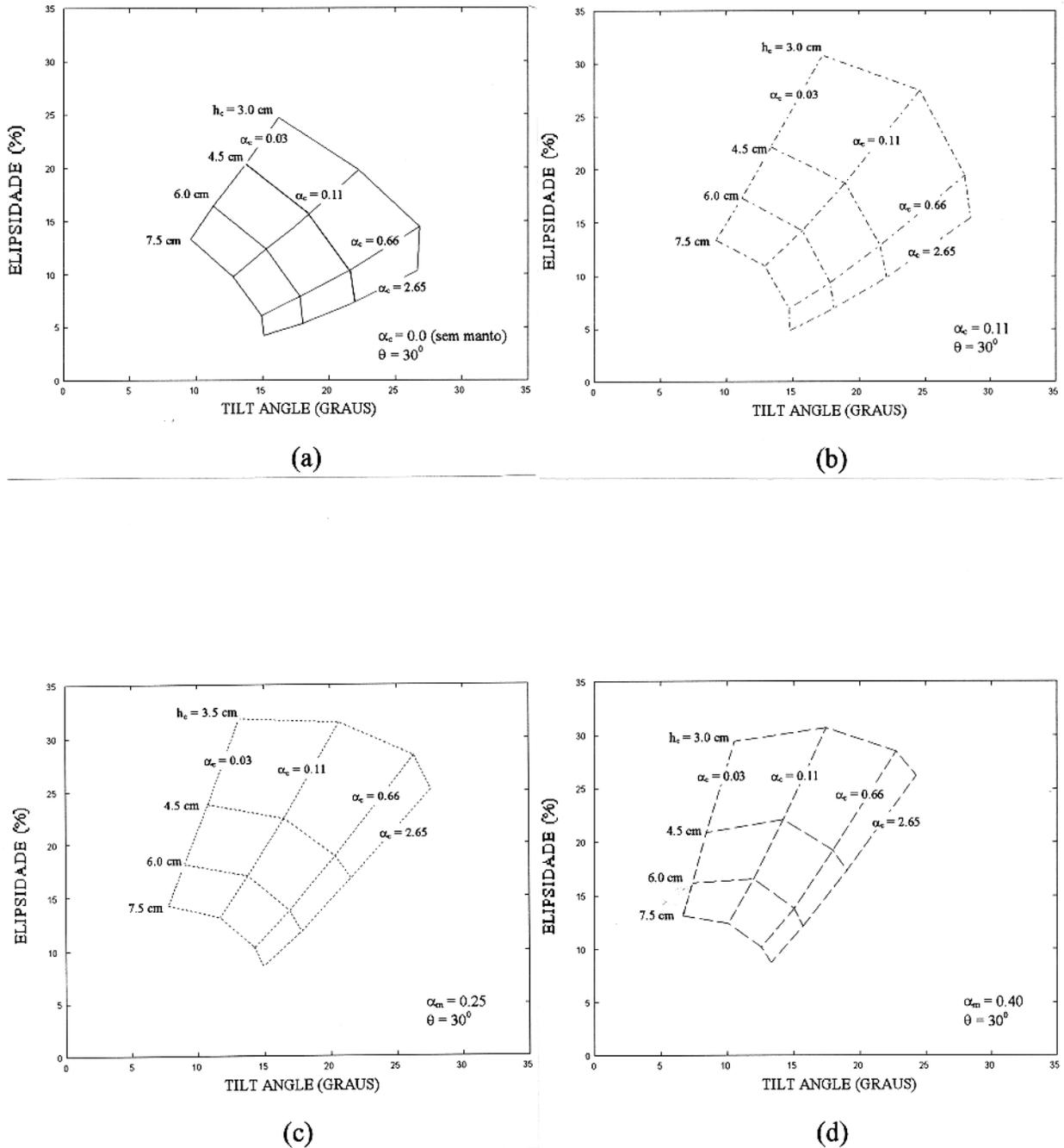


Figura 5.14 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\theta = 30^\circ$: (a) $\alpha_m = 0,0$ (sem manto); (b) $\alpha_m = 0,11$; (c) $\alpha_m = 0,25$; (d) $\alpha_m = 0,40$.

GENERALIZAÇÃO DOS EFEITOS

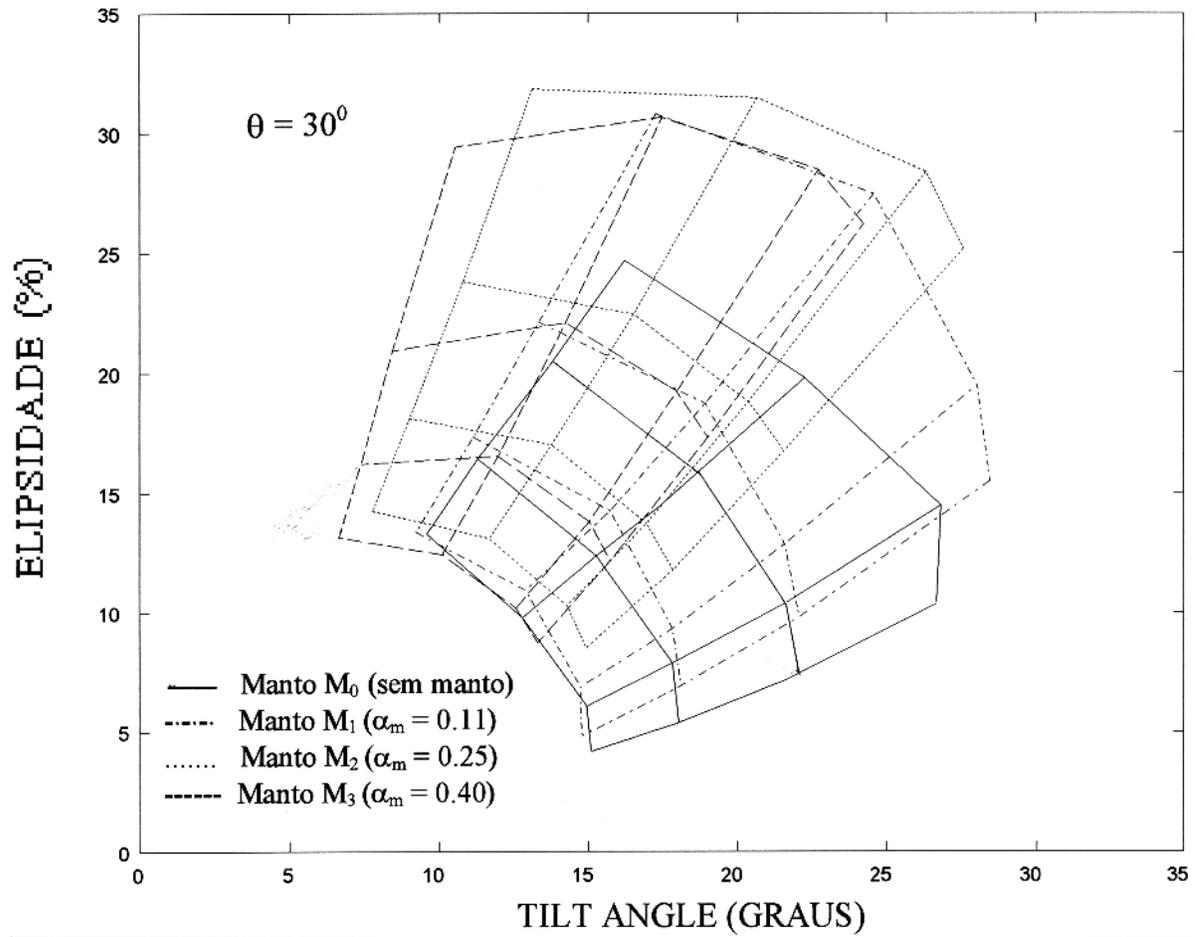


Figura 5.15 - Rotação anti-horária do diagrama de Argand devido a presença do manto para $\theta = 30^\circ$.

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

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

1) Na presença dos mantos M_1 ($\alpha_m = 0,11$) e M_2 ($\alpha_m = 0,25$), observou-se um aumento nas anomalias de elipsidade e uma atenuação nas anomalias de tilt angle.

Esse efeito pode ser explicado, pois quando um corpo é colocado num manto, ocorre o fenômeno de acanalamento, havendo desta forma uma maior concentração de corrente e a anomalia aumenta com mudança de fase anti-horária, isto em função de; quando o campo primário atravessa o manto, sofre uma rotação e atenuação de, respectivamente $(180/\delta)$ e $(1/e\delta)$ do seu valor original 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 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. O mesmo ocorre com o campo secundário ao atravessar o manto antes de chegar ao receptor.

2) Na presença do manto M_3 ($\alpha_m = 0,40$), observou-se uma atenuação tanto nas anomalias de tilt angle quanto nas anomalias de elipsidade. Isto acontece devido o fato de que agora, estando o manto mais condutivo, ocorre uma maior atenuação da onda (campo primário) antes de chegar ao corpo, bem como também do campo secundário antes de chegar a bobina receptora. Neste momento o fenômeno de acanalamento de corrente já não é tão forte como no caso de mantos menos condutivos (M_1 e M_2); o corpo já não absorve tanta corrente (as correntes começam a fluir no manto também) 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, enquanto que a profundidade deste também é menor. 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 observou-se que aumento da condutância do manto faz aumentar o coeficiente de assimetria nos perfis.

Recomenda-se para melhor compreensão dos efeitos do manto:

- 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) Considerar várias geometrias de corpos como: cilindros, discos e esferas.
- iii) Considerar a encaixante levemente condutiva. Além disso fazer o estudo para o manto não uniforme e;
- iv) Finalmente, recomenda-se testes de campo para verificação dos resultados obtidos em relação aos diagramas obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDUL-MALIK, M. M.; MYERS, J.O.; MCFARLANE, J. 1985. Model studies of topographic noise in VLF-EM data: accounting for the direction of morphological strike relative to survey line and magnetic field directions. **Geoexploration**, 23: 217-225.
- BASTOS, J.P.A. 1989. **Eletromagnetismo e Cálculo de Campos**. Florianópolis, Ed. da UFSC. 452 p.
- BOSSCHART, R.A. 1961. On the occurrence of low resistivity geological conductors. **Geophysical Prospecting**, 9(2): 203-212.
- CHAVES NETO, A.M.J. 1996. **Estudo de Geração de Campo Uniforme para Modelagem Eletromagnética**. Belém, UFPA. Centro de Geociências. 73 p. Tese (Mestrado em Geofísica). Curso de Pós Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1996.
- 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.
- DOSSO, H.W. 1966a. Analogue model for electromagnetic variations near vertical faults and dykes. **Canadian Journal of Earth Sciences**, 3: 287-303.
- DOSSO, H.W. 1966b. A plane-wave analogue model for studying electromagnetic variations. **Canadian Journal of Earth Sciences**, 44: 67-80.
- EDWARD, R.N. 1980. A grounded vertical long wire source system for plane wave magnetotelluric analog modeling. **Geophysics**, 45 (10): 1523-1529.
- FRASER, D. C. 1969. Contouring of VLF-EM data. **Geophysics**, 34: 958-967.
- FRISCHKNECHT, F.C. 1971. Eletromagnetic scala modeling. In: WAIT, J.R. **Eletromagnetic Probing in geophysics**. Boulder, Golem Press. p. 265-320.

- GRANT, F. S. & WEST, G. F.. 1965. **Interpretation Theory in Applied Geophysics**. New York, McGraw Hill. p. 444-564.
- HOHMANN, G.W. 1971. Eletromagnetic scattering by conductors in the earth near a line source of current. **Geophysics**. 36: 101-121.
- JONES, F.W. & PRICE, A.J. 1971. Geomagnetic effects of sloping and shelving discontinuities of earth conductivity. **Geophysics**, 36. 58-68.
- KAIKKONEN, P. 1979. Numerical VLF Modeling. **Geophysical Prospecting**. **Geoexploration**, 27(04): 815-834.
- KRAUS, J.D. 1978. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro, Guanabara. 780 p.
- LAJOIE, J. J. & WEST, G. F. 1977. Short note: Two selected Field Examples of EM Anomalies in a Conductive Enviroment. **Geophysics**, 42(3): 655-660.
- LEE, K.H.; PRIDMORE, D.F.; MORISSON, H.F. 1985a. A numerical solution for the electromagnetic scattering by a two-dimensional inhomogeneity. **Geophysics**, 50: 466-472.
- LEE, K.H.; PRIDMORE, D.F.; MORISSON, H.F. 1985b. A numerical for TM-mode plane waves incident on a two-dimensional inhomogeneity. **Geophysics**, 50: 1163-1165.
- LOWRIE, W. & WEST, G.F. 1965. The effect of conducting overburden on eletromagnetic prospecting meassurements. **Geophysics**, 30: 624-632.
- NEGI, J.G. 1967. Eletromagnetic screening due to a disseminated sferical zone over a conducting sphere. **Geophysics**, 30: 624-632.
- OLSSON, O. 1978. Scattering of eletromagnetic waves by a perfectly conducting half plane below a stratified overburden. **Radio Science**, 13: 391-397.
- OLSSON, O. 1980. VLF anomalies from a perfectly conducting half plane below an overburden. **Geophys. Prosp.**, 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. & KADEKARU, Kiyoshi. 1978. Efeito do intemperismo tropical nos levantamentos eletromagnéticos. In: CONG. BRAS. DE GEOL., 30., Recife, 1978. Anais. Recife, Sociedade Brasileira de Geologia. v.5, p. 2323-2330.
- PARASNIS, D.S. 1956. The electrical resistivity of some sulphide and oxide minerals and their ores. **Geophysical Prospecting**, 4: 249-278.
- PARASNIS, D.S. 1971. Analysis of some multi-frequency, multi-separation eletromagnetic surveys. **Geophysical Prospecting**, 19(2): 163-179.
- PARRY, J.R. & WARD, S.H. 1971. Eletromagnetic scattering from cylinders of arbitrary cross-section in conductive half-space. **Geophysics**, 36: 67-100.
- PATERSON, N. & RONKA, V. 1971. "Five Years of Surveying With the VLF-EM Method". Annual International Meeting., Toronto, Society of Exploration Geophysicists
- REITZ, J.R.; MILFORD, F.J.; CHRISTY, R.W. 1982. **Fundamentos da teoria eletromagnética**. Rio de Janeiro, Campus. 516 p.
- RIJO, L. 1977. **Modeling of electric and eletromagnetic data**. Thesis (Ph. D.), Univ. of Utah.
- SAYDAM, A. S. 1981. Very low-frequency eletromagnetic interpretation using tilt-angle and elipcity measurements. **Geophysics**, 46(11): 1594-1605.
- SILVA, L. M. C. & VERMA, O. P. 1986. Efeitos do manto de intemperismo sobre anomalias eletromagnéticas (HLEM) geradas por corpos tabulares inclinados. **Rev. Bras. Geoc.**, 16:285-239.
- SINCLAIR, G. 1948. Theory of eletromagnetic system. **Proc. I.R.E.**, 36: 1364-1370.
- STRATTON, J.A. 1941. **Eletromagnetic theory**. New York, McGraw-Hill.
- SWIFT, C.M. 1971. Theoretical magnetotelluric and Turam response from two-dimensional inhomogeneities. **Geophysics**. 36: 38-52.

- TELFORD, W. N. ET AL. 1976. **Applied Geophysics**. Cambridge. Cambridge University Press.
- TILSLEY, J.E., 1976. **Very low-frequency electromagnetic - Surveying for geological structures using a portable signal generator**. Institution of Mining and Metallurgy, v.85.
- VERMA, O.P. 1981. Electromagnetic response of fold models in a uniform field. **Geophysical Prospecting**, 29: 451-461.
- 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.
- WITTLES, A.B.L. 1969. Prospecting with radio frequency EM 16 in mountainous regions. **Western Miner**, 1969: 51-56.