

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

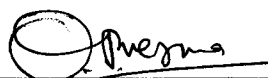
**ANOMALIAS ELETROMAGNÉTICAS DE CORPOS  
TABULARES INCLINADOS EM CONTATO COM O MANTO  
DE INTEMPERISMO USANDO DIFERENTES ARAANJOS  
DE BOBINAS - MODELAMENTO ANALÓGICO**

**TESE APRESENTADA POR  
ROBERTO CESAR ALVES SILVA**

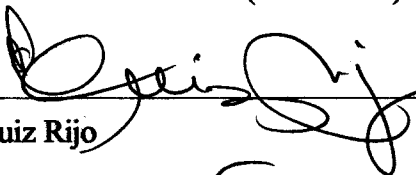
**COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE  
MESTRE EM CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA**

**Data de Aprovação : 16/03/1997**

**COMITÊ DE TESE:**



\_\_\_\_\_  
Dr. Om Prakash Verma (Orientador)



\_\_\_\_\_  
Dr. Luiz Rijo



\_\_\_\_\_  
Dr. Sergio Luiz Fontes

**BELÉM**

**1997**

**SILVA, Roberto Cesar Alves. Anomalias eletromagnéticas de corpos tabulares inclinados em contato com o manto de intemperismo usando diferentes arranjos de bobinas-modelagem analógica. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1997. 107p.**

**Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1997.**

**1. ANOMALIAS ELETROMAGNÉTICAS. 2. MANTO DE INTEMPERISMO. 3. MODELAGEM ANALÓGICA. 4. SLINGRAM. 5. PROSPECÇÃO ELETROMAGNÉTICA. 6. BOBINAS. I. Título.**

À minha esposa, meus filhos, meus irmãos e pais  
como prova de gratidão e esforço.

## AGRADECIMENTOS

Ao Orientador Dr. Om Prakash Verma pela credibilidade e orientação assumidas nesta Tese.

Aos Drs. Luis Rijo e Sérgio Luiz Fontes pelas contribuições e sugestões.

Ao Convênio UFPA/ PETROBRÁS/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.

A Dra. Maria Lúcia Carreira e aos companheiros de trabalho, pelo incentivo para a execução deste trabalho.

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

# SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	i
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	ii
<b>RESUMO</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
<b>1 - INTRODUÇÃO</b> .....	3
1.1 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	4
1.1.1 - Comportamento dos Campos EM na subsuperfície da Terra .....	4
1.1.2 - Indutância mútua .....	6
1.1.3 - A função resposta .....	7
1.2 - MÉTODOS “SLINGRAM” DE PROSPECÇÃO ELETROMAGNÉTICA .....	11
1.2.1 - Método “Slingram” .....	13
<b>2 - TÉCNICAS DE INTERPRETAÇÃO DE DADOS SLINGRAM E OBJETIVOS</b> ...	17
2.1 - INTERPRETAÇÃO DE DADOS “SLINGRAM” .....	18
2.2 - PROBLEMAS DE INTERPRETAÇÃO .....	18
2.2.1 - Efeitos do halo de intemperismo .....	19
2.2.2 - Efeitos da rocha encaixante condutiva .....	21
2.2.3 - Efeitos do manto de intemperismo .....	21
2.3 - OBJETIVOS E PROCEDIMENTOS GERAIS .....	24
<b>3 - MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	25
3.1 - MODELAGEM ANALÓGICA .....	25
3.2 - TEORIA DA SIMILITUDE .....	25
3.3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	27

3.3.1 - Parâmetros de resposta escolhidos .....	27
3.3.2 - Materiais utilizados no modelo .....	28
3.4 - CONJUNTO DE MODELAGEM .....	30
3.4.1 - Sistema de energização .....	30
3.4.2 - Sistema de recepção .....	31
3.4.3 - Sistema de disposição do modelo geoeletromagnético .....	34
3.5 - CALIBRAÇÃO E PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO .....	36
3.6 - OCORRÊNCIA DE ERROS .....	39
4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	40
4.1 - EFEITOS DO MANTO .....	42
4.1.1 - Relacionados ao parâmetro de resposta do corpo .....	43
4.1.2 - Relacionados à profundidade do corpo .....	43
4.1.3 - Relacionados ao mergulho do corpo .....	43
4.1.4 - Formação do pico-extra na quadratura .....	44
5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	76
5.1 - RELACIONADOS AO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CORPO .....	76
5.2 - RELACIONADOS À PROFUNDIDADE DO CORPO .....	77
5.3 - RELACIONADOS AO MERGULHO DO CORPO .....	77
5.4 - CAUSAS FÍSICAS DAS TRANSFORMAÇÕES DAS ANOMALIAS EM .....	79
6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	104

## RESUMO

A principal aplicação dos métodos eletromagnéticos é a prospecção de sulfetos maciços que pela própria natureza geológica são corpos longos e delgados, encrustados em rocha encaixante resistiva, permitindo a interpretação através de curvas de modelos reduzidos usando semi-planos em meio resistivo (ar-livre).

No entanto, com a extensão do uso dos métodos eletromagnéticos em regiões que tem um manto de intemperismo de parcialmente condutivo a condutivo, como na região Amazônica e nas regiões semi-áridas ou de climas tropicais, esta técnica de interpretação tem levado a resultados bem diferentes da situação real.

O objetivo deste trabalho é estudar a influência do manto de intemperismo em contato ôhmico com o corpo-alvo, utilizando os arranjos de bobinas horizontal coplanar (HCP), vertical coplanar (VCP), vertical coaxial (VCA) e mínimo (PERP), através do modelagem analógico. Para simular o corpo foram utilizadas placas de grafite, cujas dimensões satisfazem a condição de semi-plano. Para simular o manto foi usada uma solução de cloreto de amônia.

De forma geral, os resultados obtidos com os diversos arranjos apresentaram as mesmas características, ressalvada as diferenças peculiares de cada arranjo. De forma resumida tem-se as seguintes alterações na anomalia atribuídas à um manto condutivo em contato ôhmico com o corpo-alvo:

- i) Há rotação de fase, que inicialmente é em sentido anti-horário, mas mais adiante, com o aumento do número de indução do manto, torna-se horária;
- ii) Alteração na forma padrão do perfil de quadratura devido ao surgimento do pico extra no lado a favor do mergulho;
- iii) Só há uniformidade de comportamento para o pico-a-pico contra da quadratura, que cresce com o aumento número de indução do manto.

Maiores anomalias são obtidas com o sistema horizontal coplanar e as menores com o vertical coplanar. Neste estudo não foi observado formação de pico extra nas anomalias do arranjo vertical coplanar. Ainda, os efeitos de cobertura são mais acentuados no sistema horizontal coplanar comparados aos sistemas de bobina vertical e em anomalias de semi-planos menos inclinados e em menor profundidade.

## ABSTRACT

Electromagnetic methods are mainly applied in the prospection of massive sulphide deposits. These deposits are frequently long in extension and thin, therefore the interpretation can be carried out considering a half-plane model in a resistive ambient.

However, in Amazon region or in semi-arid and tropical regions where a partially conductive to conductive overburden is encountered, interpretations using a resistive ambient model give erroneous results.

The objective of this work is to study the influence of the conducting overburden on electromagnetic anomalies of inclined sheet-like bodies in ohmic contact with the overburden, using coil configurations - horizontal coplanar (HCP), vertical coplanar (VCP), vertical coaxial (VCA) and minimum couple system (PERP). These studies are realized with the aid of analog modelling where the ore-body is simulated by a graphite sheet and the conducting overburden by ammonium chloride solution.

Generally, the different coil systems studied here show the similar characteristics of the overburden effects, reserving some peculiar effects of each coil system. The effects of a conductive overburden in ohmic contact with the orebody could be briefly described as follows:

- (i) There is an anti-clockwise phase rotation initially with the increase in the overburden induction number, but with further increase the phase rotates clockwise;
- (ii) The form of the quadrature anomaly profile is altered due to the appearance of an extra peak on the down-dip side of the ore-body, and
- (iii) The peak to peak quadrature anomaly on the up-dip side increases uniformly with increase in the overburden induction number

Highest anomalies are obtained with the horizontal coplanar system and lowest with vertical coplanar. No extra-peak in the quadrature profile is observed with the vertical coaxial system in this study. Also, the overburden effects are more prominent in the horizontal coplanar system compared to vertical coil systems, and in the anomalies of the less inclined half-planes and at lesser depths.



# 1 - INTRODUÇÃO

O primeiro e mais comum uso dos Métodos EM é a localização e caracterização de corpos altamente condutivos, a maioria dos instrumentos e técnicas de interpretação foram desenvolvidas para esta aplicação. Na exploração direta de depósitos minerais condutivos o modelo geológico é geralmente suposto como consistindo de um corpo-alvo altamente condutivo tal como um corpo de minério de sulfeto maciço em uma rocha encaixante menos condutiva coberta por uma camada de condutividade intermediária.

Os sulfetos maciços são massas mineralizadas em que 50% ou mais do seu volume é constituído por sulfetos. Esse tipo de mineralização é importante por ser a fonte principal de zinco e chumbo, além de proporcionar também uma boa quantidade de cobre e, em menor quantidade, prata e ouro.

Os sulfetos mais abundantes nos depósitos de sulfetos maciços são normalmente: pirita ( $\text{FeS}_2$  - empregado na fabricação do ácido sulfúrico), pirrotita ( $\text{FeS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), galena ( $\text{PbS}$ ) e calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). As principais características físicas são: massa dentro de uma área de pelo menos  $90 \text{ m}^2$ , quantidade de sulfetos superior a 50%, condutividade elétrica tipicamente elevada e susceptibilidade magnética freqüentemente alta. Devido a elevada condutividade elétrica dos depósitos, os métodos geofísicos recomendados são os elétricos e eletromagnéticos.

O uso dos métodos EM para outros propósitos em vez de exploração mineral tais como águas subterrâneas, meio ambiente, ou investigações em engenharia têm crescido rapidamente. Na maioria destas aplicações, os contrastes de condutividade são bem menores que aqueles encontrados em prospecção de sulfetos maciços. Em estudos arqueológicos, variações na resposta causadas por mudanças na susceptibilidade magnética são muito úteis.

As primeiras interpretações de dados EM não levavam em conta os efeitos do manto de intemperismo, rocha encaixante e o halo de sulfetos disseminados na vizinhança do corpo, que eram admitidos como sendo altamente resistivos. O eventual sucesso das interpretações feitas, considerando essas simplificações, era sustentado no fato de que elas foram aplicadas em regiões em que as condições acima eram satisfeitas em parte: América do Norte (Canadá) e Escandinávia (Suécia). (WARD, 1971).

Com a extensão do uso dos métodos EM em outras regiões da Terra, verificou-se grandes discrepâncias entre os resultados interpretados (profundidade, mergulho e condutância dos corpos-alvo) e os valores reais, obtidos através de furos de sondagem. A explicação para estas discrepâncias reside no ambiente geoeletrico dos depósitos que não correspondem com as condições estabelecidas na modelagem, merecendo especial atenção, tratando-se de regiões trópicas e semi-áridas, a não consideração de uma camada superficial levemente condutiva.

A fim de se ilustrar a necessidade de se considerar uma cobertura levemente condutiva, cita-se as seguintes informações:

- A condutância do manto de intemperismo das regiões brasileiras, com exceção da Amazônica, varia de 0,1 a 1 S (PALACKY & KADEKARU, 1978);
- Na Amazônia o manto pode atingir espessuras consideráveis;
- Na Austrália, a condutância da camada superficial chega a atingir 10 S, apesar de sua espessura centimétrica (PRESTON, 1975).

Se for comparado os valores citados acima com os obtidos em análises de depósitos de sulfetos, que indicaram, em uma amostragem com 72 valores de condutância, que 85% dos depósitos variam de 0,4 a 60 S, sendo que, dentro desta faixa, 50% dos valores são inferiores a 10 S (BOSSCHART, 1961, PATERSON, 1961, STRANGWAY 1966, QUESTOR SURVEYS LTD., s.d.), tem-se então, para o manto, valores que certamente influenciam os dados de levantamento, justificando um estudo mais detalhado deste problema.

## 1.1 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.1.1 - Comportamento dos Campos EM na subsuperfície da Terra

Seja um meio homogêneo e isotrópico com condutividade elétrica  $\sigma$ , permissividade elétrica,  $\epsilon$ , e permeabilidade magnética,  $\mu$ . Pode-se descrever os fenômenos eletromagnéticos, em condições de linearidade, para esse meio usando as Equações de Maxwell.

A combinação adequada destas Equações tem como resultado as seguintes expressões:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (1.1)$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0. \quad (1.2)$$

Onde:  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  são, respectivamente, o campo elétrico e o campo magnético.

Em regiões não condutivas, utilizando-se baixa frequência com os campos variando senoidalmente com frequência  $\omega = 2\pi f$ , o que permite desprezar as correntes de deslocamento, o campo obedece à equação de Laplace ( $\nabla \vec{E}^2 = 0$  e  $\nabla \vec{H}^2 = 0$ ), enquanto que em zonas de considerável condutividade, as equações de campo são (TELFORD et al, 1976):

$$\nabla^2 \vec{E} = i\mu\omega\sigma \vec{E}, \quad (1.3)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = i\mu\omega\sigma \vec{H}. \quad (1.4)$$

As soluções das equações (1.3) e (1.4) são:

$$H_y(z,t) = H_0 e^{\left[-(\alpha\mu\sigma/2)^{1/2} z\right]} e^{\left[i(\alpha - i\mu\omega\sigma)^{1/2} z\right]}, \quad (1.5)$$

$$\vec{E}_x(z,t) = \vec{E}_0 e^{\left[-i\omega t \pm (\omega^2 \mu\epsilon - i\mu\omega\sigma)^{1/2} z\right]}, \quad (1.6)$$

$$J_x = (i\mu\omega\sigma)^{1/2} H_0 e^{\left[-(\alpha\mu\sigma/2)^{1/2} z\right]} e^{\left[i(\alpha - i\mu\omega\sigma)^{1/2} z\right]} = (i\mu\omega\sigma)^{1/2} H_y(z,t). \quad (1.7)$$

Aonde foi mantido somente os termos que permanecem finitos quando  $z \rightarrow \infty$ .

Essas equações representam uma onda altamente amortecida, cuja amplitude decresce exponencialmente com a distância e depende da expressão  $(\mu\omega\sigma)^{1/2}$ . Verifica-se que se for aumentada a frequência ou a condutividade do meio ter-se-á um aumento na atenuação, o que significa que para bons condutores, onde  $\sigma$  é grande, a onda será fortemente atenuada, havendo também um deslocamento de fase a medida que ela se propaga através do condutor. A atenuação do campo faz com que surjam correntes induzidas que irão se concentrar próximo à superfície do condutor e com isso gerarão um intenso campo secundário.

Com a difusão, as grandezas  $\vec{J}_x$ ,  $\vec{H}_y$  e  $\vec{E}_x$  vão diminuindo as suas amplitudes segundo uma função do tipo  $e^{-kz}$ . Uma avaliação dessa atenuação, para um determinado meio e uma determinada frequência, é o que convencionou-se chamar de "profundidade de penetração" ou

"skin depth", símbolo  $\delta$ , que por definição é a profundidade onde a amplitude está atenuada de  $\frac{1}{e} = 0.368$ , ou seja, de aproximadamente 37% de seu valor inicial, assim; pode-se escrever:

$$-K_i \delta = -1. \quad (1.8)$$

Onde  $K_i$  conforme equações (1.5), (1.6) ou (1.7) tem o valor de igual a  $[(\omega\mu\sigma)/2]^{1/2}$ , que substituindo na equação (1.8) resulta em :

$$\delta = 503,3 \left( \frac{1}{f\sigma} \right)^{1/2}. \quad (1.9)$$

### 1.1.2 - Indutância mútua

A indutância mútua é utilizada para descrever a interação entre circuitos elétricos que se encontram separados. Essa interação se deve à indução eletromagnética, descrita pela lei de Faraday. A indução mútua entre circuitos depende da geometria e distância entre os mesmos e das propriedades elétricas e magnéticas do meio em que os circuitos se encontram. Assim, se for mantida a geometria e a distância entre os circuitos, qualquer variação nas propriedades elétricas e/ou magnéticas do meio circundante modificará a indutância mútua. Conclui-se pelo exposto, que alterações no valor da indução mútua, indicarão as mudanças de materiais terrestres de diferentes propriedades elétricas e/ou magnéticas. Este é o princípio básico dos métodos de prospecção EM.

Seja dois circuitos, um sendo o primário e outro o secundário. Se for aplicada uma diferença de potencial dependente do tempo no campo primário, a variação do fluxo magnético através do circuito secundário produzirá uma f.e.m (força eletromotriz) induzida.

Se os circuitos estiverem no espaço livre, ter-se-á:

$$\varepsilon_{21} = - \frac{d\phi}{dt} = -M_{12} \left( \frac{dI_1}{dt} \right), \quad (1.10)$$

sendo :  $\varepsilon_{21}$  = f.e.m induzida no circuito secundário

$\phi$  = fluxo magnético através do circuito secundário

$M_{12}$  = coeficiente de indutância mútua

$I_1$  = corrente que circula no circuito primário

$M_{12} = M_{21}$  (Lei da reciprocidade de Helmholtz)

A indutância mútua  $M_{12}$  entre dois circuitos 1 e 2 é dada por (TELFORD et al., 1976):

$$M_{12} = \frac{\mu}{4\pi} \oint_2 \oint_1 \frac{d\vec{\ell}_1 \cdot d\vec{\ell}_2}{r} \quad (1.11)$$

Onde  $d\vec{\ell}_1$ ,  $d\vec{\ell}_2$  são elementos de comprimento nos circuitos 1 e 2,  $r$  a distância entre eles.

No caso de duas bobinas coaxiais,

$$M_{12} = \frac{\pi\mu\alpha^2 b^2}{2L^3}, L \gg a, b, \quad (1.12)$$

onde  $a$  e  $b$  são os raios das bobinas e  $L$  a distância entre elas.

Se as bobinas são coplanares

$$M_{12} = \frac{\pi\mu\alpha^2 b^2}{4L^3}, L \gg a, b \quad (1.13)$$

Se as bobinas forem perpendiculares:  $M_{12} = 0$

### 1.1.3 - A Função resposta

Analisando a equação (1.11), verifica-se que para os sistemas de prospecção EM, em que a distância entre as bobinas transmissora e a receptora é fixa, a indutância mútua só mudará quando o sistema atravessar uma zona anômala em sua vizinhança, ou seja quando as propriedades elétricas e/ou magnéticas do meio se alterarem; a intensidade do campo secundário produzido por tal anomalia, se houver linearidade, é proporcional à intensidade do campo primário do sistema.

Havendo anomalia, ter-se-á um acréscimo na força eletromotriz induzida na bobina secundária. Este acréscimo pode ser determinado pela expressão:

$$\Delta\varepsilon_{21} = -\Delta M_{12} \frac{dI}{dt} \quad (1.14)$$

A anomalia poderá ser avaliada pela razão adimensional:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{12}} = \frac{\Delta M_{12}}{M_{12}} \quad (1.15)$$

que geralmente é medida em p.p.m ou em percentagem.

Desta forma pode-se afirmar que as anomalias EM são simplesmente as variações no coeficiente de indutância mútua entre um par de bobinas próxima a uma região condutiva. Como essas mudanças geralmente não estão em fase com a corrente do transmissor,  $\Delta M_{12}$  é uma quantidade complexa.

De forma bem simplificada, pode-se representar as condições de campo através de um circuito com três espiras, conforme a Figura 1.1

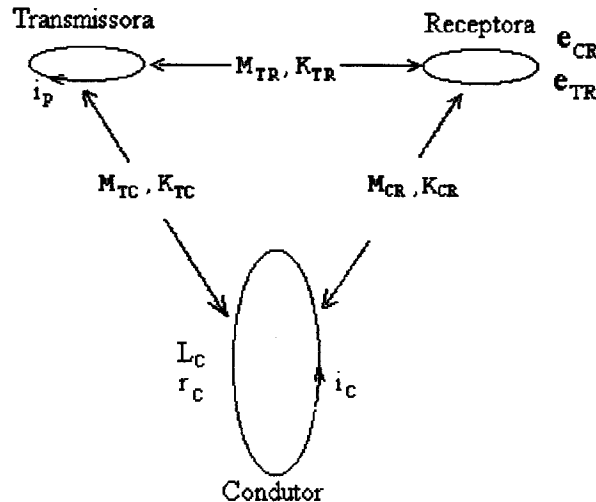


Fig. 1.1 - Representação de um sistema de prospecção EM (Segundo GRANT & WEST, 1965)

onde:

$I_t = I_{0t} e^{(i\omega t)}$  : corrente que circula no transmissor

$I_c = I_{0c} e^{(i\omega t)}$  : corrente que circula no condutor

$K_{TC}$  e  $K_{CR}$  = coeficientes de acoplamento entre o transmissor - condutor e condutor-receptor respectivamente.

$M_{TC}$  e  $M_{CR}$  = indutâncias mútuas entre transmissor-condutor e condutor-receptor respectivamente.

$L_C$  = auto-indutância do condutor

$R_C$  = resistência do condutor

Pela lei de Faraday, a corrente alternada que circula no transmissor induz na bobina receptora e no condutor uma f.e.m. Pela mesma razão, as correntes induzidas no condutor induzem uma f.em na bobina receptora . A razão entre a f.e.m induzida pelo condutor na bobina receptora e a induzida pelo acoplamento direto transmissor -receptor, conforme GRANT & WEST (1965) é dada por:

$$\frac{\varepsilon_{CR}}{\varepsilon_{TR}} = -\left(\frac{K_{CR}K_{TC}}{K_{TR}}\right)\left(\frac{Q^2 + iQ}{1 + Q^2}\right). \quad (1.16)$$

Onde:

$Q = (\omega L)/R$ , que é o fator de qualidade ou parâmetro resposta

O termo  $\left(\frac{K_{CR}K_{TC}}{K_{TR}}\right)$  é chamado de coeficiente de acoplamento ou fator geométrico. Esta

razão geralmente tem um valor muito pequeno, pois  $K_{TR} \gg K_{CR}$  ou  $K_{TC}$  , uma vez que as bobinas transmissora e receptora estão acopladas através do ar, onde a atenuação é praticamente zero.

O termo  $\left(\frac{Q^2 + iQ}{1 + Q^2}\right)$  é conhecido como função resposta e está relacionado com as

propriedades elétricas do condutor e da frequência utilizada.

Abaixo a curva da função resposta versus o parâmetro resposta, em termos das componentes real e imaginária:

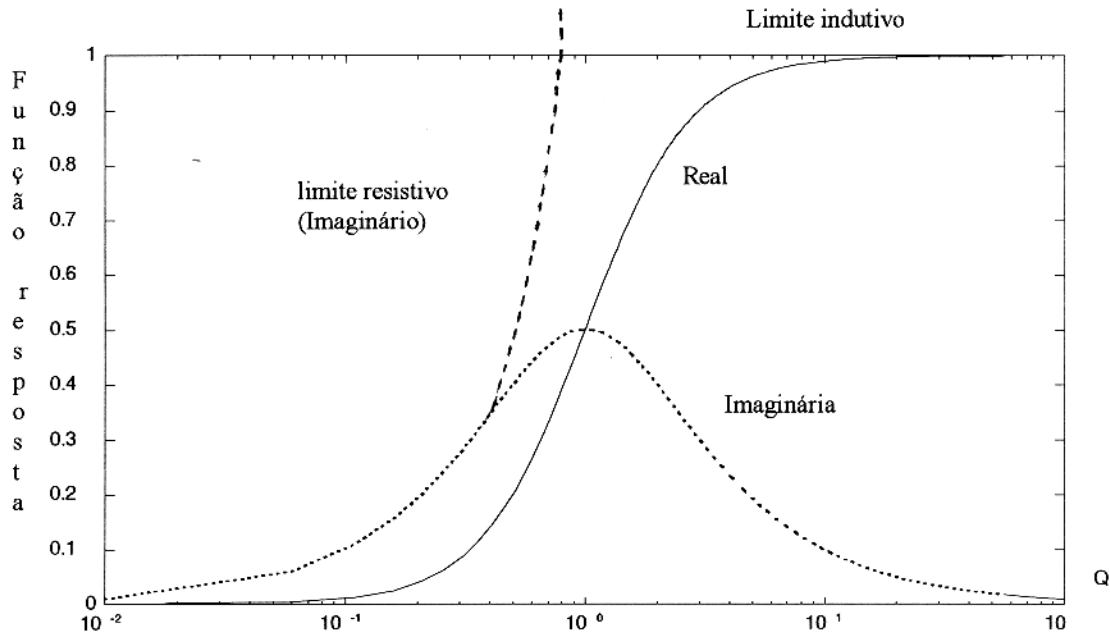


Figura 1.2 - Função resposta de um sistema EM em campo magnético alternado (Segundo GRANT & WEST, 1965)

Através da análise destas curvas pode-se concluir :

1. Um aumento de  $Q$ , significa que a condutividade elétrica do corpo aumenta e a parte imaginária cresce primeiro linearmente, em seguida, suavemente. Sua magnitude é maior que a fração real, até  $Q=1$ , quando ambas as componentes têm valor 0,5. Em seguida, a componente imaginária decresce até se anular para grandes valores de  $Q$ , enquanto que a componente real vai crescendo até atingir o valor máximo (=1), no chamado limite indutivo, para grandes valores de  $Q$ , onde a resposta é puramente em fase, isto é,

$$\lim_{Q \rightarrow \infty} \left( \frac{Q^2}{1+Q^2} + \frac{iQ}{1+Q^2} \right) \cong 1. \quad (1.17)$$

Então,



$$\frac{\varepsilon_{CR}}{\varepsilon_{TR}} = - \frac{K_{CR} K_{TC}}{K_{TR}} \quad (1.18)$$

Que é o valor máximo para ótimos condutores

2. Quando  $Q$  é muito pequeno, ambas as componentes, real e imaginária da função resposta, também são pequenas. A parte real atinge um mínimo antes e a resposta fica somente em quadratura, isto é

$$\lim_{Q \ll 1} \left( \frac{Q^2}{1+Q^2} + i \frac{Q}{1+Q^2} \right) \cong Q(Q+i)(1-Q^2) \cong iQ \quad (1.19)$$

Então,

$$\frac{\varepsilon_{CR}}{\varepsilon_{TR}} = iQ \left( \frac{K_{CR} K_{TC}}{K_{TR}} \right) \quad (1.20)$$

Este valor, que é muito pequeno comparado com o limite indutivo, é proporcional à frequência do campo e é característico de um pobre condutor.

Como na faixa de  $0 \leq Q \leq 1$ , a componente imaginária é maior que a componente real e na faixa de  $1 \leq Q \leq \infty$  ocorre o inverso, a razão entre as componentes real e imaginária fornece algum diagnóstico sobre o condutor; portanto é aconselhável que se escolham valores de frequência e/ou espaçamento entre as bobinas que conduzam a um valor de  $Q \geq 1$ , onde se pode analisar melhor a resposta .

## 1.2. MÉTODOS "SLINGRAM" DE PROSPECÇÃO ELETROMAGNÉTICA ("FIXED SEPARATION DIPOLAR LOOPS CONFIGURATIONS")

A sensibilidade de um sistema eletromagnético depende de sua habilidade de determinar precisamente pequenos campos secundários.

Quase todos os métodos com bobinas-dipolar no domínio da frequência usam um dos quatro diferentes tipos de esquema de medidas:

- 1) A fase de uma ou mais componentes espaciais do campo é medida relativamente à corrente no bobina-fonte;

- 2) duas componentes espaciais do campo são medidas simultaneamente e o resultado é expresso como a razão entre as magnitudes das componentes e a diferença de fase entre as componentes, ou como parâmetros da elipse de polarização.
- 3) O mergulho ("dip") e as vezes a direção de "strike" do campo são medidos pela rotação da bobina receptora até encontrar a posição de sinal mínimo e
- 4) A diferença entre medidas da mesma componente em duas ou mais frequências é determinada.

Todos estes métodos são projetados de forma que não seja necessário calcular o campo primário para obter a normalização dos resultados.

As configurações de bobinas mais comuns estão ilustradas na Figura 1.3, junto com as abreviações ou nomes correspondentes.

As configurações Horizontal Coplanar (HCP), Vertical Coplanar (VCP), e vertical Coaxial (VCA), proporcionam acoplamento máximo com o campo primário entre as bobinas, enquanto as configurações perpendicular (PERP), NULA e paralela (PAR) não proporcionam acoplamento com o campo primário, ou o mesmo é mínimo. Com o uso do teorema da reciprocidade, as funções das bobinas como fonte e receptor podem ser permutadas sem mudar a resposta.

Para a maioria dos métodos, as medidas são muito sensíveis aos desvios na orientação e espaçamento entre as bobinas que podem ocorrer devido às irregularidades do terreno.

Como contraste com os métodos com grandes fontes, métodos com fontes dipolares são mais rápidos e de fácil manuseio, particularmente quando aplicados a sondagens de reconhecimento. No entanto a profundidade de investigação é usualmente bem menor.

Quando a fonte é pequena e portátil uma variedade de técnicas de sondagens pode ser usada. Com o método de movimento da fonte, tanto a fonte quanto o receptor são movimentados em cada estação, de forma que o acoplamento entre a fonte e o terreno muda para cada estação, sendo usualmente plotado com o valor do ponto médio entre fonte e receptor. Este ponto plotado é certamente uma convenção, uma vez que cada medida é influenciada de forma complexa pela estrutura de condutividade através de um grande volume de terreno.

Para métodos de fonte dipolar que usam configurações simétricas, a posição da fonte e do receptor podem ser trocadas sem afetar a forma do perfil. Tais configurações produzem anomalias sobre condutores que são simétricas com respeito a configuração. Por outro lado, configurações assimétricas geralmente produzem anomalias simétricas invertidas sobre condutores simétricos quando as bobinas são intercambiadas. A mudança na resposta quando as bobinas são intercambiadas não contradiz o teorema da reciprocidade.

### 1.2.1 - Método Slingram

É uma técnica no domínio da frequência. O método foi inicialmente desenvolvido na Suécia, em 1937, e é considerado uma derivação do método Sundberg. Tem aplicação tanto terrestre quanto aérea ("rigid-boom"), sendo um dos métodos E.M. mais comumente empregado em prospecção geofísica.

Na América do Norte, slingram é freqüentemente conhecido como método HLEM ("Horizontal Loop Eletromagnetic"). Embora a configuração HCP seja a mais comumente usada, as configurações PERP, VCP, e VCA são também usadas com o mesmo equipamento. O método HLEM é somente uma variante do método slingram.

Nesta técnica, as duas bobinas, em geral circulares (0.5 a 2.0 m de diâmetro), podem ser construídas com núcleo de ar ou de ferrite. A bobina transmissora comporta-se como um dipolo magnético oscilante uma vez que por ela circula uma corrente de frequência relativamente baixa. Dessa bobina, parte através de um cabo ou telemetria, uma tensão para o aparelho receptor. No receptor há um compensador que permite ajustar a fase e a amplitude da tensão de modo que a mesma possa servir de referência para as medidas das componentes do campo eletromagnético secundário.











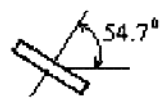





1.			HCP
2.			PERP
3.			VCP
4.			VCA
5.			NULO
6.			PARALELO
7.			H WAVETILT
8.			V WAVETILT

Figura 1.3 Oito configurações comuns de bobinas dipolar

Os espaçamentos empregados em medidas slingram padrão variam de 10 a 300-400 m. Como uma regra inviolável, quando se estiver usando configuração HCP, o espaçamento entre as bobinas deve ser de no mínimo duas vezes a profundidade até a extremidade superior da chapa. Quando grandes espaçamentos estão sendo usados, a resolução de condutores individuais pode ser pobre e se mais de um condutor ocorrer dentro de uma distância horizontal da ordem do espaçamento entre as bobinas, a interpretação dos resultados torna-se difícil. Frequentemente mais do que um espaçamento é empregado para estudar anomalias particulares; o uso de mais de uma configuração pode ser também útil.

As freqüências usadas como padrão em equipamentos de pequena fonte estão na faixa de 40 a 56 KHz. Os primeiros instrumentos operavam em única freqüência, mas nos dias atuais, a maioria dos equipamentos tem sido projetados para operar com duas ou mais freqüências.

O equipamento slingram é calibrado e operado de forma que as leituras são as componentes em fase e quadratura do campo secundário normalizadas pelo campo primário. Em termos dos campos eletromagnéticos,  $H$ , entre as bobinas transmissora e receptora, a maioria dos equipamentos são projetados para proverem as seguintes leituras:

$$\text{Leituras em-fase} = \text{Re}al\left(\frac{H_s}{H_p}\right) \times 100\%,$$

$$\text{Leituras em quadratura:} = \text{Im}ag\left(\frac{H_s}{H_p}\right) \times 100\%.$$

Onde:  $\vec{H}_p$  e  $\vec{H}_s$  são os campos magnéticos primário e secundário, respectivamente.

Quando as configurações PERP ou PAR são usadas, não há campo primário para compensar. Neste caso  $\vec{H}_p$  é geralmente tomado como sendo o mesmo das bobinas coplanares.

Os resultados obtidos são apresentados sob a forma de perfis, onde os valores das componentes são atribuídos ao ponto médio entre a distância das bobinas. O sistema é simétrico, o que significa que as posições das bobinas podem ser permutadas e as leituras permanecem as mesmas.

Erros no posicionamento e alinhamento das bobinas são provavelmente as maiores fontes de erro nas medidas slingram. Sobre um terreno altamente resistivo, erros no espaçamento entre as bobinas causa erros na componentes em fase que são proporcionais ao

cubo do percentual de erro no espaçamento. Assim, para se manter erros na componente em fase menores do que 1%, erros no espaçamento não podem ser maiores que 0.3%.

Mau orientação das bobinas é raramente um problema. Se uma bobina está mal orientada o erro na leitura depende do coseno do ângulo de erro para bobinas coplanar e do seno do ângulo de erro para bobinas perpendiculares. Por exemplo, o erro na componente em fase é de 1% para um erro de  $8,1^\circ$  no alinhamento de uma das bobinas em uma configuração coplanar, ou um erro de  $0,57^\circ$  no alinhamento de uma bobina em configuração perpendicular. No entanto, mal-orientação pode causar erros maiores em regiões condutivas onde o campo secundário está presente.

Para que os dados forneçam informações adequadas ao serem interpretados, é necessários que se tome uma série de precauções quando da obtenção dos mesmos. As principais dizem respeito a variações de espaçamento entre as bobinas, que devem ser evitados ao máximo, bem como a orientação das mesmas.

Variações no espaçamento são mais freqüentes e por esse fato, é preferível que se envie o sinal de referência através de cabos do que por telemetria, o que permite um certo controle sobre o espaçamento (além de baratear os custos de equipamento).

Instrumentos sensíveis operando com número de induções muito pequenos ("low induction numbers" - LIN) são vistos como uma variação do slingram. Nas medidas de condutividade, somente a componente em quadratura é medida com instrumentos LIN. Esta consideração é feita porque a componente em quadratura é proporcional a condutividade

Para operar na faixa de baixo número de indução, o espaçamento entre bobinas deve ser muito menor do que o "skin depth" em qualquer meio dentro da faixa do sistema.

## 2 - TÉCNICAS DE INTERPRETAÇÃO DE DADOS SLINGRAM E OBJETIVOS

A interpretação de dados eletromagnéticos de campo é feita comparando estes resultados com as soluções analíticas, numéricas e modelagem analógica. No entanto, cada procedimento de interpretação possui suas limitações, por exemplo, as soluções analíticas, que consistem em soluções teóricas de certos modelos, geralmente primam por situações ideais, ou seja, corpos de forma regular (esfera, cilindro e placa infinita) o que as afastam das situações reais (limitação por insuficiência de modelos matemáticos). Na modelagem numérica, exige-se modernos equipamentos de computação, tornando dispendiosa a interpretação (elevado tempo de processamento e respostas aproximadas). Já as interpretações através de modelagem analógica, possuem algumas limitações de ordem operacional.

Métodos de interpretação de perfis de dados de fonte dipolar dependem dos objetivos e características dos dados. Usualmente, o primeiro passo na interpretação é encontrar as características gerais dos modelos físicos que deverão completar os dados. Na seleção do modelo mais adequado, o intérprete necessita de conhecimento de trabalho das respostas para uma larga variedade de modelos. Uma vez que o tipo de modelo é selecionado, técnicas de interpretação adequadas àquele modelo são aplicadas.

De certo modo perfis EM são mais complexos e mais difíceis de interpretar do que perfis geofísicos suaves de dados tais como resultados gravimétrico ou magnéticos. Por outro lado, a maior complexidade dos resultados EM frequentemente permite maior confiabilidade e detalhamento na interpretação.

Até alguns anos atrás, a interpretação de perfis de dados com bobinas pequenas era baseado primeiramente na comparação direta com curvas de modelos em escala ou aplicação de nomogramas derivados dos dados de modelo em escala. Atualmente, acrescentou-se à interpretação, modelos analíticos e numéricos. Os modelos analíticos e numéricos disponíveis para interpretação de dados de pequenas bobinas incluem esferas, camadas em semi-espaço, folhas finas, prismas e cilindros.

## 2.1 - INTERPRETAÇÃO DE DADOS SLINGRAM

A interpretação consiste na comparação dos perfis de campo com perfis obtidos através de modelagem reduzida ou digital. A simples comparação dos perfis permite indicações qualitativas sobre a localização (profundidade) e mergulho do condutor. A profundidade do corpo pode ser estimado como sendo aproximadamente a metade da distância entre os pontos em que a componente real inverte de sinal. O mergulho é estimado pelo grau de simetria entre os dois picos máximos das componentes.

Pode ser utilizado, também para interpretação, os diagramas de Argand ou Curvas de Índice de Anomalias, que produzem resultados quantitativos para o mergulho, profundidade e condutância  $\sigma t$  do corpo. Pode-se observar que, dentro de certos limites, é possível separar o produto  $\sigma t$ , bastando que se utilize equipamentos de multifrequências (PARASNIS, 1971).

## 2.2 - PROBLEMAS NA INTERPRETAÇÃO

Um modelo geológico simples, mas que representa de forma realista o ambiente encontrado na prospecção de sulfetos maciços está representado na Figura 2.1. Os métodos eletromagnéticos foram bastante utilizados e desenvolvidos no Canadá e na Escandinávia, locais onde, geralmente, as rochas encaixantes são altamente resistivas, o manto de intemperismo delgado e o halo de disseminação de sulfetos são pouco desenvolvidos. Sob estas condições, os efeitos destes meios geológicos sobre os corpos condutivos eram desprezíveis. A interpretação dos dados era feita através de modelos constituídos de corpos regulares em espaço livre. Os resultados eram satisfatórios e confiáveis.

Entretanto, com uso dos métodos E.M em outras áreas, sobretudo àquelas em que os corpos condutivos são envolvidos por meios de resistividade relativamente baixa levou a discrepâncias bem apreciáveis quanto a interpretação dos dados baseados no modelo ar-livre, tanto os modelos de laboratório como os teóricos, mostrando que o mesmo não era adequado, induzindo a erros consideráveis.

As discrepâncias observadas utilizando-se as técnicas convencionais de interpretação de dados EM (as que não consideram os meios parcialmente condutivos envolvendo os corpos



condutivos ), podem ser estudadas nos trabalhos apresentados por PARASNIS (1971), VERMA (1972), PRESTON (1975), LAJOI & WEST (1977), PALACKY & KADEKARU (1978) e outros. Os efeitos do halo, rocha encaixante e do manto de intemperismo são resumidos por NEGI & GUPTA (1968), WARD et al. (1974) e VERMA (1982). A seguir, tem-se um resumo dos efeitos do halo condutivo, rocha encaixante e do manto de intemperismo.

### **2.2.1 - Efeitos do halo condutivo**

Os efeitos do halo condutivo nas resposta eletromagnéticas foram estudados por NEGI (1967), NEGI & RAVAL (1969), WAIT (1969), FULLER(1971), NEGI & VERMA (1972), PODDAR (1975), PRESTON (1975), NAGENDRA et al. (1980) e CABALERRO (1983). Os resultados podem ser resumidos como segue:

- 1 - As curvas de resposta na frequência ou tempo mostram, em geral dois picos: ao halo corresponde um pico em altas frequências, ou estágios iniciais de decaimento com o tempo, ao corpo central, corresponde um pico em baixas frequências ou estágios finais de decaimento no tempo.
- 2 - Com o aumento do número de indução do halo comparado ao do corpo, os dois picos desaparecem formando uma curva suave e a resposta da combinação do corpo e do halo tornam-se indistinguíveis;
- 3 - A resposta em quadratura da anomalia eletromagnética é mais sensível aos efeitos do halo comparada à em-fase.

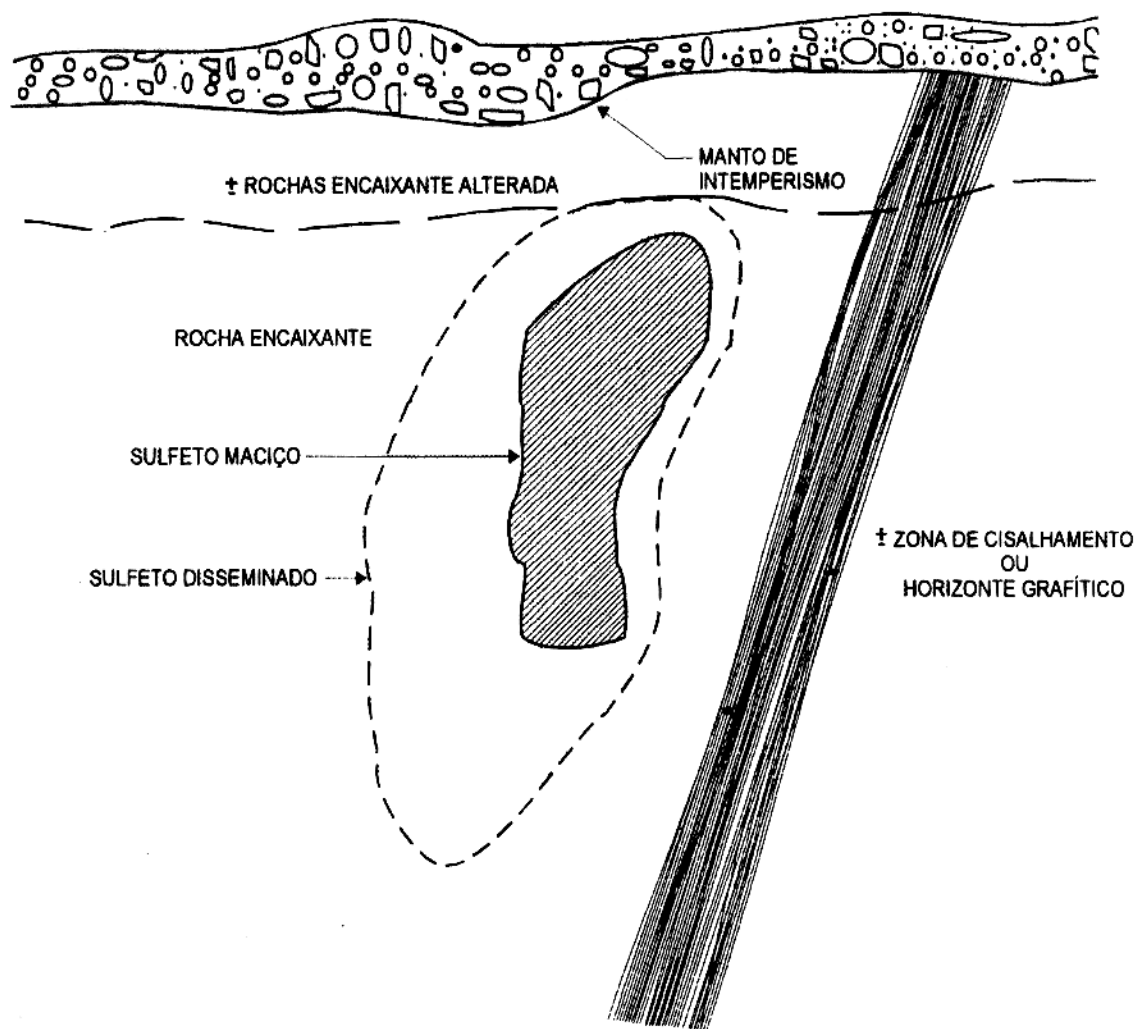


Figura 2.1 Representação esquemática do ambiente geológico geral encontrado na prospecção de sulfetos maciços

### 2.2.2 - Efeitos da rocha encaixante condutiva

Estudos dos efeitos de rochas encaixantes condutivas sobre a resposta eletromagnética de corpos condutivos foram estudadas por GAUR (1959), FRISCHNECHT (1971), GUPTA SARMA & MARUN (1971), VERMA (1972), WON (1980) e HANNESON (1981). Os efeitos são resumidos abaixo:

1. Para rochas encaixantes parcialmente condutivas, ocorrerá um aumento na amplitude e uma rotação na fase. Em rochas encaixantes com altos valores de condutividade (na faixa da condutividade do corpo) provavelmente ocorrerá uma diminuição na amplitude e o corpo parecerá mais profundo;
2. Para condutores subsuperficiais rasos, verifica-se um aumento na amplitude e , no caso de condutores mais profundos, provavelmente ocorrerá uma diminuição na mesma;
3. Ocorrerão mudanças na forma do perfil;
4. Um corpo não condutivo, em uma rocha encaixante condutiva, próximo à superfície, provoca uma anomalia eletromagnética.

Conclui-se, portanto, pelo exposto acima, que estimativas de condutância, profundidade e inclinação dos corpos estarão erradas quando interpretadas sem considerar a rocha encaixante.

### 2.2.3 - Efeitos do manto de intemperismo

Na relação eletromagnética entre o manto de intemperismo e o corpo condutivo existe duas situações possíveis: ambos estão isolados eletronicamente ou estão em contato. Neste trabalho, a fim de facilitar a distinção entre estas duas situações foram feitas as seguintes definições:

1. manto condutivo (cobertura condutiva): termo que caracteriza a situação em que existe contato ôhmico entre o manto e o corpo-alvo.
2. manto indutivo(cobertura indutiva): quando não existir o contato ôhmico

O estudo dos efeitos do manto de intemperismo através de modelos analíticos mostrou-se inconveniente pelo grau de dificuldade em se obter as suas soluções, restringindo os modelos a formas simplistas, longe da realidade geológica. Este fato levou a um impulso maior das técnicas de modelagem digital e analógica, desenvolvidas tanto no domínio do tempo quanto no da frequência.

Abaixo, em resumo, os trabalhos desenvolvidos, bem como levantamentos de campo que serviram de referência para situar o problema em questão:

## 1. Domínio do tempo

### 1.1. Modelo Analógico

SPIES (1975): anomalias devidas a corpos semi-planos, com diferentes mergulhos, detectadas pelo sistema aero INPUT

## 2. Domínio da Frequência

### 2.1. Modelo Digital

LAJOI & WEST (1976): método TURAM com semi-planos verticais.

### 2.2. Modelo Analógico

LOWRIE & WEST (1965): bobinas horizontais coplanares, modelo vertical

SILVA (1981): uso da Técnica de bobinas horizontais coplanares (HLEM) em modelo tipo semi-plano, com diferentes mergulhos e manto indutivo.

JOSHI et al.(1984):uso da Técnica HCP para modelo semi-plano vertical, simulando o manto condutivo e indutivo.

QUEIROZ (1986): uso dos arranjos de bobinas HCP, VCA e VCP, mudando a frequência e o espaçamento entre bobinas, para uma simulação de manto indutivo e semi-plano vertical.

NERES (1989): uso da Técnica HCP em modelos de semi-plano inclinado nos casos de manto indutivo e condutivo.

## 3. Trabalho de Campo

3.1 PARASNIS (1971): levantamento mudando o espaçamento entre as bobinas e a frequência de trabalho nos casos de manto indutivo.

3.2. PALACKY & KADEKARU (1978): manto indutivo

3.3. LAJOI & WEST (1977): verificaram que os resultados plotados nos Diagramas de Índice de Anomalia divergiam consideravelmente dos valores esperados, tomando como referência o ar-livre.

De forma geral, os trabalhos relacionados anteriormente indicaram a existência de modificações bem significativas, tais como rotação de fase e alteração da amplitude da anomalia (LOWRIE & WEST, 1965), o que foi comprovado também por LAJOI & WEST (1977), apesar de usarem técnicas diferentes, acrescentado ainda, conforme trabalho de SILVA (1981), o aparecimento de um pico extra nos perfis de quadratura, no caso de semi-planos inclinados. Como consequência direta dos efeitos da rotação de fase e alteração da amplitude da anomalia, pode-se ter a inversão da componente em quadratura, levando a interpretações errôneas sobre a condutância e a profundidade do corpo, o que torna inviável a utilização dos modelos para interpretações quantitativas confiáveis.

Em resumo, tem-se os seguintes resultados:

**Cobertura Condutiva:** ocorrem os seguintes efeitos, quando se compara os resultados plotados com os Diagramas de Índice de Anomalia (DIA), sem a presença do manto.

1. Rotação em sentido anti-horário e dilatação nas curvas de índice de profundidade ( $h_c/L$ ). Tantos os valores em fase como os de quadratura aumentam, sendo mais apreciável neste último. A quantidade de rotação é relativamente maior para condutores mais pobre do que para mais condutor.
  2. Se for negligenciado o efeito da cobertura, o corpo será interpretado como menos condutivo e mais raso que o real .
- **Cobertura Indutiva:** Os efeitos produzidos são o inverso para o caso do manto condutivo, ou seja:
    1. Rotação em sentido horário e as curvas de índice de profundidade sofrem uma contração. Há diminuição em ambas as anomalias, em fase e quadratura, sendo o efeito mais significativo nesta última. A quantidade de rotação é tanto maior quanto mais condutor for a cobertura.
    2. Negligenciando-se o efeito da cobertura , o corpo será interpretado como mais condutivo e mais profundo que o real.

Através de explorações de campo no Canadá usando equipamentos EM de multifrequência, LAJOI & WEST (1977) , concluíram que para uma cobertura indutiva ( $\sigma = 0.7$  S) com um aumento na frequência, tem-se uma rotação horária na curva de índice de anomalia.

Para um acoplamento condutivo entre o manto e o corpo-alvo, quando a frequência é aumentada, a rotação é inicialmente no sentido anti-horário, em seguida, o vetor gira no sentido horário, para frequências ainda maiores. Um resultado semelhante foi obtido por HANNESON (1981) para modelagens numéricas de um semi-plano vertical, fino encrustado em uma rocha encaixante condutiva e coberta por uma manto em acoplamento indutivo. Com o aumento no parâmetro resposta da camada de cobertura, há de início uma rotação anti-horária na curva de índice de anomalia, para valores moderados do parâmetro de resposta do manto, em seguida ela se torna horária para maiores valores de  $\alpha_m$ .

Pelo exposto acima podemos concluir que sobre condições favoráveis (uma cobertura pobre ou moderadamente condutiva em contato ôhmico com um condutor) a resposta EM do condutor torna-se maior na presença da cobertura.

### 2.3 - OBJETIVOS E PROCEDIMENTOS GERAIS

Neste trabalho foi feito o estudo das respostas obtidas com diferentes sistemas de bobinas: horizontal coplanar (HCP), vertical coaxial (VCA), vertical coplanar (VCP) e arranjo mínimo (PERP); para modelos de semi-planos inclinados em contato com o manto (caso de manto condutivo), através de modelagem analógico no domínio da frequência.

Foi feito o estudo dos efeitos de variação dos seguintes parâmetros:

- i) Inclinação do semi-plano:  $\theta = 30^0, 45^0, 60^0$  e  $90^0$
- ii) Profundidade do corpo:  $h/l = 0.2, 0.3, 0.4$  e  $0.5$
- iii) Número de indução do manto: 4 valores ( $\alpha_m = 0, 0.14, 0.36$  e  $0.57$ )
- iv) Número de indução do corpo: 4 valores ( $\alpha_c = 5.70, 11.40, 28.20$  e  $56.40$ ).

Com este estudo tem-se uma complementação dos trabalhos realizados por SILVA (1981), que estudou o manto de intemperismo para o acoplamento indutivo com o corpo-alvo, utilizando o arranjo HCP; QUEIROZ (1986) que fez um desenvolvimento das anomalias eletromagnéticas para um condutor tabular vertical com acoplamento indutivo com o corpo alvo, para várias frequências e separações, utilizando os arranjo HCP, VCA e VCP e o de NERES (1989) que estudou o efeito do manto indutivo e ôhmico, usando o arranjo HCP e vários mergulhos para o modelo

### 3 - MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 - MODELAGEM ANALÓGICA

Também conhecida como a técnica de modelos em escala reduzida, é bastante difundida em prospecção EM, por ser bem versátil (facilmente adaptável para várias situações) e de fácil utilização (não exige um conhecimento específico muito profundo por parte dos operadores).

Nos últimos anos, a interpretação de dados E.M é feita através do auxílio de modelos reduzidos, devido a grande dificuldade de se obter as soluções analíticas dos problemas E.M.

A reprodução precisa da configuração geométrica das linhas de força do sistema real através de modelos é a condição fundamental para o modelagem reduzida. Sinclair apud FRISCHKNECHT (1971), foi um dos primeiros a desenvolver as condições para o modelagem E.M, fazendo uso da teoria da similitude eletromagnética. A redução das dimensões lineares do modelo é compensada por um aumento na frequência da fonte e/ou aumento na condutividade dos modelos utilizados.

#### 3.2 - TEORIA DA SIMILITUDE

A possibilidade de se modelar um dado sistema eletromagnético reside na linearidade das Equações de Maxwell, que por sua vez, descrevem o campo E.M em qualquer meio linear. Convém informar que ambientes ferromagnéticos e/ou ionizados na presença de campos eletromagnéticos são meios não-lineares. Meios lineares são os que as propriedades magnéticas podem variar de ponto para ponto no espaço, mas essas variações são independentes do tempo.

Abaixo, fazendo uso da análise dimensional, desenvolvida por FRISCHKNECHT (1971), está descrita matematicamente a Teoria da Similitude:

Seja  $P(x_c, y_c, z_c)$  um ponto qualquer do sistema no campo (sistema real),  $P(x_m, y_m, z_m)$  um ponto qualquer do sistema modelo e  $\ell$  o fator linear de escala entre o sistemas de campo e modelo. Assim, pode-se escrever:

$$x_c = \ell \cdot x_m, y_c = \ell \cdot y_m \text{ e } z_c = \ell \cdot z_m. \quad (3.1)$$

Da mesma forma que as grandezas lineares mantêm proporções pode-se estabelecer:

$$\vec{E}_c(x_c, y_c, z_c, t_c) = a \cdot \vec{E}_m(x_m, y_m, z_m, t_m), \quad (3.2)$$

$$\vec{H}_c(x_c, y_c, z_c, t_c) = b \cdot \vec{H}_m(x_m, y_m, z_m, t_m), \quad (3.3)$$

$$k = \left( \frac{\omega_c}{\omega_m} \right) = \left( \frac{f_c}{f_m} \right) = \left( \frac{t_m}{t_c} \right). \quad (3.4)$$

Onde  $a$ ,  $b$  e  $k$  são fatores de escala para as intensidades dos campos elétrico, magnético e para a frequência, respectivamente.

Usando a equação de difusão do campo eletromagnético em baixa frequência (equações 1.3 e 1.4) para os dois sistemas, tem-se:

$$\nabla_c^2 (\vec{E}_c \text{ ou } \vec{H}_c) = i \mu_c \sigma_c \omega_c (\vec{E}_c \text{ ou } \vec{H}_c), \quad (3.5)$$

$$\nabla_m^2 (\vec{E}_m \text{ ou } \vec{H}_m) = i \mu_m \sigma_m \omega_m (\vec{E}_m \text{ ou } \vec{H}_m). \quad (3.6)$$

Usando a definição de Laplaciano:  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ , pode-se obter a relação:

$$\nabla_c^2 = \frac{1}{\ell^2} \left( \frac{\partial^2}{\partial x_m^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_m^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_m^2} \right) = \frac{1}{\ell^2} (\nabla_m^2). \quad (3.7)$$

Substituindo (3.7) em (3.5) e considerando as relações lineares para  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$ , tem-se:

$$\frac{1}{\ell^2} (\nabla_m^2) (a \cdot \vec{E}_m \text{ ou } b \cdot \vec{H}_m) = i \mu_c \sigma_c \omega_c (a \cdot \vec{E}_m \text{ ou } b \cdot \vec{H}_m). \quad (3.8)$$

Comparando a equação acima com a equação (3.6)

$$\mu_m \sigma_m \omega_m = \ell^2 \mu_c \sigma_c \omega_c. \quad (3.9)$$

Como  $\ell$  pode ser expresso como:  $\ell = \frac{\ell_c}{\ell_m}$ , onde

$\ell_c$  = dimensão linear característica do sistema de campo ou real

$\ell_m$  = dimensão linear característica do sistema do modelo

Pode-se escrever:

$$\ell_m^2 \mu_m \sigma_m \omega_m = \ell_c^2 \mu_c \sigma_c \omega_c. \quad (3.10)$$

Sendo o primeiro e o segundo membro da equação acima denominados, respectivamente, de número de indução (ou parâmetro de resposta) do sistema real ou de campo ( $\alpha_c$ ) e do sistema modelo ( $\alpha_m$ ).



Pelo exposto acima, pode-se concluir que qualquer sistema real, que seja linear, pode ser simulado em laboratório, bastando, para tanto, que se consiga obter a igualdade entre os número de indução do campo com o do modelo.

É oportuno informar que a dimensão linear tem diferentes significados conforme a técnica E.M. utilizada e a forma do corpo utilizado. Para o que foi desenvolvido neste trabalho, tem-se:

Corpo simulado: semi plano em campo dipolar

$\ell^2$  = é igual ao produto da espessura (t) da chapa e a distância entre as bobinas (L)

### 3.3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.3.1 - Parâmetros de Resposta Escolhidos

A condutividade elétrica de minerais e rochas varia dentro de um intervalo bastante amplo. Em trabalho de prospecção ela é normalmente tomada com valores entre  $10^{-5}$  e  $10^4$  S/m (HEILAND, 1968).

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

Na modelagem é mais vantajoso considerar-se a condutância obtida para diferentes ocorrências minerais. Isto porque a condutividade medida 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 de separação do parâmetro  $\sigma$ , salvo em levantamento multi-frequências, mesmo assim dentro de certos limites. Conforme resultados de campo e medidas de laboratório, a frequência maior de ocorrência para os valores de condutância dos minerais e rochas encontra-se na faixa de 0,4 a 10 S.

Para o manto de intemperismo das regiões brasileiras, a condutância varia entre 0,1 a 1,0 S.

Uma vez que frequências inferiores a 2.000 Hz são as mais utilizadas em prospecção EM e o espaçamento entre bobinas se encontra na faixa de 30 até 150 m, sendo que é aconselhável a

utilização de grandes espaçamentos entre as bobinas a fim de que se diminua o efeito de blindagem provocada pelo manto de intemperismo, pode-se, com esses dados e as informações citadas acima, estimar os valores dos números de indução para os corpos-alvo.

Considerando-se as restrições feitas acima e os valores mais significativos para condutâncias do corpo e do manto, foram usados os seguintes parâmetros de resposta para o corpo  $\alpha_c$  e para o manto  $\alpha_m$ , uma vez que, de forma geral, esses parâmetros são bastante representativos de situações geológicas reais:

$$\alpha_c = 5,70 \text{ a } 56,80$$

e

$$\alpha_m = 0, 0.14, 0.36 \text{ e } 0.57$$

### 3.3.2 - Materiais utilizados no modelo

Neste trabalho, o fator geométrico de escala está em torno de 600. Usando esse fator, o espaçamento entre as bobinas (L) foi reduzido para 0.15 m. A frequência utilizada foi de 100 kHz. Este valor foi escolhido com o propósito de se obter números de indução do corpo ( $\alpha_m$ ) e do manto ( $\alpha_m$ ) com as condutividades dos materiais disponíveis no laboratório para simulação da situação geológica do modelo geológico.

#### a) Manto de Intemperismo

O manto de intemperismo foi simulado por uma solução de cloreto de amônia ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), tendo espessura constante ( $t_m$ ) igual a 0.15m.

Para se obter estabilidade nos valores da condutividade das soluções utilizadas, o ambiente do laboratório foi climatizado, mantendo-se a sua temperatura sempre em torno de 25° C. Os valores de condutividade das soluções foram monitoradas sempre que se fazia as medidas, com isso se garantia a sua uniformidade. Foi utilizado um condutivímetro modelo BM-31, fabricado pela Digimed Instrumentação Analítica Ltda, a fim de se obter o monitoramento da solução.

Os valores de condutividades, condutâncias e os números de indução dos mantos utilizados neste trabalho estão contidos na Tabela 3.1. onde o manto  $M_0$  representa o ar-livre ou sem-manto.

## b) Corpo

Para simular os corpos condutivos mineralizados foram utilizadas placas de grafite com espessuras diferentes  $t_c = (1.0; 2.0; 5.0 \text{ e } 10) \times 10^{-3} \text{ m}$  e condutividade estimada em  $0.5 \times 10^5 \text{ S/m}$ . As placas de grafite possuem as seguintes dimensões:  $0.40 \times 0,60 \text{ m}$ , enquanto que o espaçamento entre as bobinas é de  $L=0.15 \text{ m}$ ; com esses dados verifica-se que a placa satisfaz as condições para modelar um semi-plano; conforme MARTIN (1960), ou seja, se as bordas da placa estão a mais de  $0.75 \cdot L$  da linha de caminhamento e seu comprimento é superior a  $2xL$ , a placa se comporta como um semi-plano.

Os valores para a condutividade, condutâncias e o número de indução dos corpos utilizados neste trabalho estão contidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.1- Parâmetros de resposta do manto

Manto	Condutividade (S/m) ( $\sigma_m$ )	Condutância (S) ( $\sigma_m t_m$ )	Número de indução ( $\omega \mu_m \sigma_m t_m L$ )
M <sub>0</sub>	0,0	0,0	0,0
M <sub>1</sub>	8,6	1,29	0,15
M <sub>2</sub>	20,04	3,01	0,36
M <sub>3</sub>	32,17	4.83	0,57

Tabela 3.2 - Parâmetros de resposta do corpo

Corpo	Espessura ( $10^{-3}$ m) ( $t_c$ )	Condutância (S) ( $\sigma_c t_c$ )	Número de indução ( $\omega \mu_c \sigma_c t_c L$ )
C <sub>1</sub>	1,0	50	5,70
C <sub>2</sub>	2,0	100	11,40
C <sub>3</sub>	5,0	250	28,20
C <sub>4</sub>	10,0	500	56,80

Nas tabelas acima tem-se  $\omega = 2\pi \times 10^5$  rad/s,  $\mu_c = \mu_m = 4 \times \pi \times 10^{-7}$  H/m,  $L = 0.15$  m e  $t_m = 0,15$  m.

Neste trabalho considerou-se pouco desenvolvido o halo de sulfetos disseminados, não sendo, portanto o mesmo modelado, e a rocha encaixante muito resistiva, sendo representada pelo ar. Não há uso de materiais ferromagnéticos no conjunto da modelagem, de forma que as condições de linearidade ficaram asseguradas durante a execução do trabalho.

### 3.4 - CONJUNTO DE MODELAGEM

O conjunto de modelagem consiste de ( a ) sistema de energização, ( b ) sistema de recepção e ( c ) dispositivo físico de simulação; a Figura 3.1 mostra , através do diagrama em bloco, este conjunto.

#### 3.4.1 - Sistema de energização

Antes de descrever o sistema de energização é importante ressaltar que o equipamento fundamental deste trabalho é o Analisador de circuito (NETWORK ANALIZER HP 8751A), aparelho que funciona tanto como fonte de alimentação como analisador de sinal.

Este sistema é constituído por uma bobina transmissora ( $T_x$ ) alimentada pela fonte interna do Analisador de circuito. A potência fornecida pela fonte interna do Analisador é muito baixa para alimentar diretamente a bobina transmissora, sendo necessária a sua amplificação. Para esse fim foi utilizado um amplificador de potência (POWER AMPLIFIER/SUPPLY - HP 467 A).

A bobina transmissora tem um diâmetro de 0.025 m e altura de 0.08 m, sendo enrolada com fio esmaltado de cobre bitola nº. 28 SWG, possuindo 250 espiras. O diâmetro interno é de 0.013 m; com núcleo de ar. Esta bobina está blindada eletrostaticamente através de uma malha de fio fino construída manualmente sobre um tecido.

Dados sobre a bobina transmissora:

Auto-indutância	274 $\mu$ H
Resistência	1,685 $\Omega$

### 3.4.2 - Sistema de recepção

Constituí-se de uma bobina receptora ( $R_x$ ), de dois pré-amplificadores de sinal, atenuador e o Analisador de circuitos (NETWORK ANALIZER HP 8751A).

A bobina receptora possui as mesmas dimensões da bobina transmissora, a diferença reside no fio utilizado e no número de espiras; ela contém 600 espiras de fio esmaltado de cobre com bitola nº 40 SWG. Esta bobina também está blindada eletrostaticamente com o mesmo tipo de blindagem da bobina transmissora.

Dados sobre a bobina receptora:

Auto-indutância	2.2 mH
Resistência	43 $\Omega$

O sinal recebido pela bobina receptora (ou seja a f.e.m induzida) é inicialmente amplificada através do primeiro pré-amplificador, que está localizado bem próximo das bobinas, mas de forma que não interfere nos sinais, esse ganho inicial é de 10, ou seja o sinal é amplificado de dez vezes; nesta primeira etapa, a impedância do sinal é diminuída na saída. Em seguida, este sinal atravessa o segundo pré-amplificador, que tem ganho unitário, ou seja, não produz nenhuma

amplificação, servindo apenas como um casador de impedância com a linha que leva o sinal para o Analisador.

Conforme o nível de sinal, as vezes é necessário que o mesmo seja atenuado antes de entrar no Analisador. Este atenuador permite um melhor casamento de impedância entre a linha e o Analisador.

O uso do Analisador de sinais é bem simples: deve-se, inicialmente programá-lo, através do conjunto de comandos do seu "menu", escolhendo-se a potência de saída, para alimentar a bobina transmissora, a frequência de trabalho, o canal, os parâmetros a serem medidos.

Não há necessidade de se preocupar com as escalas de medição, uma vez que o aparelho fornece o recurso de auto-escala, o que permite a visualização dos sinais de entrada para qualquer situação.

O aparelho permite que se grave os dados gerados através de disquete, uma vez que ele contém uma unidade de disco própria, convertendo as curvas obtidas em tabelas. Os arquivos gerados podem ter a extensão que se desejar. Há recursos de suavização e empilhamento dos dados medidos.

Os parâmetros medidos neste trabalho foram as componentes reais e imaginárias do campo resultante para cada ponto de medida. Os arquivos resultantes foram gerados com a extensão TXT. As tabelas contidas nestes arquivos são tratadas através de programas elaborados em MATLAB, programas esses que permitem decompor o campo resultante (processo de cancelamento) obtendo-se o campo secundário e o campo primário, a normalização em relação ao campo primário, e por fim as componentes em fase e quadratura. Essas componentes são plotadas, obtendo-se os perfis de medição.

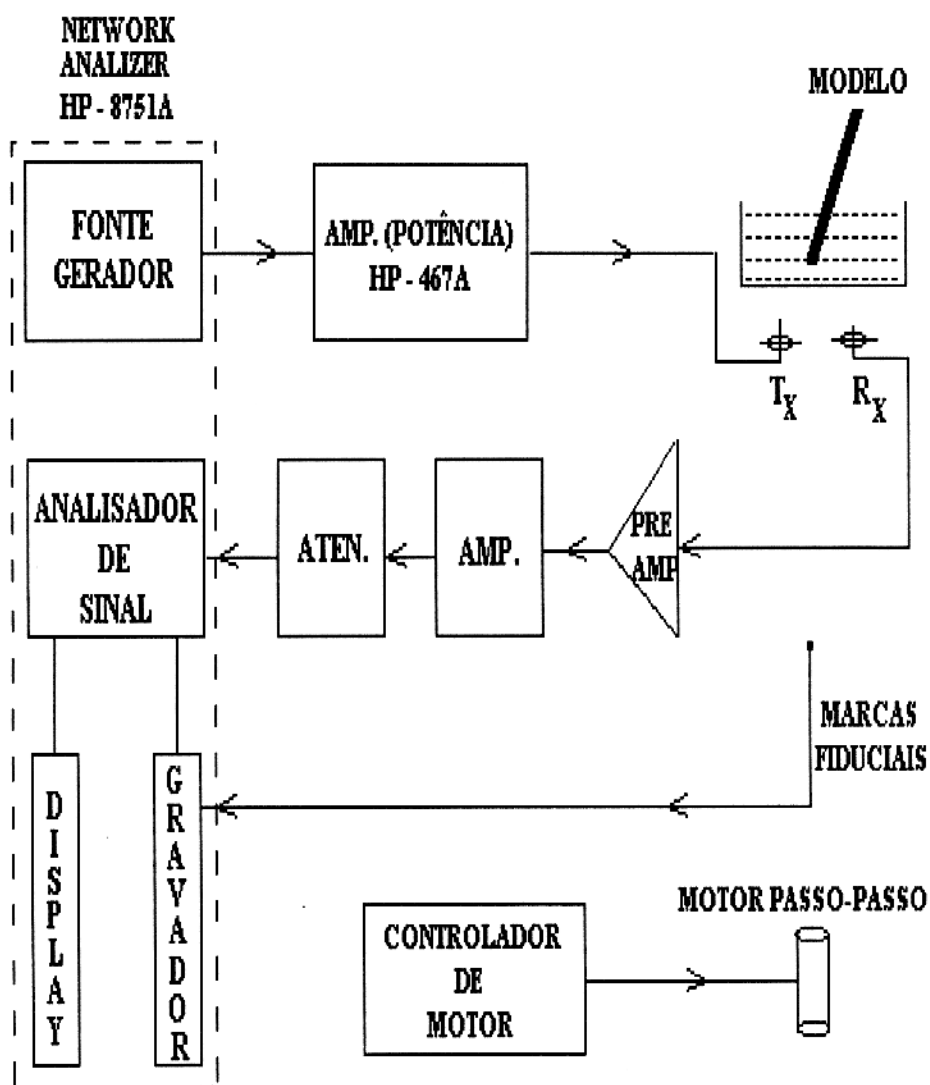


Figura 3.1 Diagrama de Blocos dos Sistemas de Transmissão e Recepção

### 3.4.3 - Sistema de disposição do modelo geoletromagnético

Na disposição do modelo desenvolvido, foi utilizado uma estrutura de madeira com 0.69 m de altura, 1.80 m de comprimento e 1.46 m de largura. A altura de 0.7 m foram colocados dois trilhos horizontais, onde neles desloca-se um carrinho de acrílico que contém o suporte das bobinas receptora e transmissora e o primeiro pré-amplificador

O carrinho é movido por um motor passo-a-passo com 1,5 W 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 das bobinas  $R_x$  e  $T_x$ , 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 cm×40 cm que tem uma amarração na parte inferior, o suporte é ajustável à 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 as bobina  $R_x$  e  $T_x$ . 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 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  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . A chapa na posição vertical (mergulho de  $90^\circ$ ) foi calibrada através de um esquadro. Na Figura 3.6 é mostrado um croqui da situação modelada.



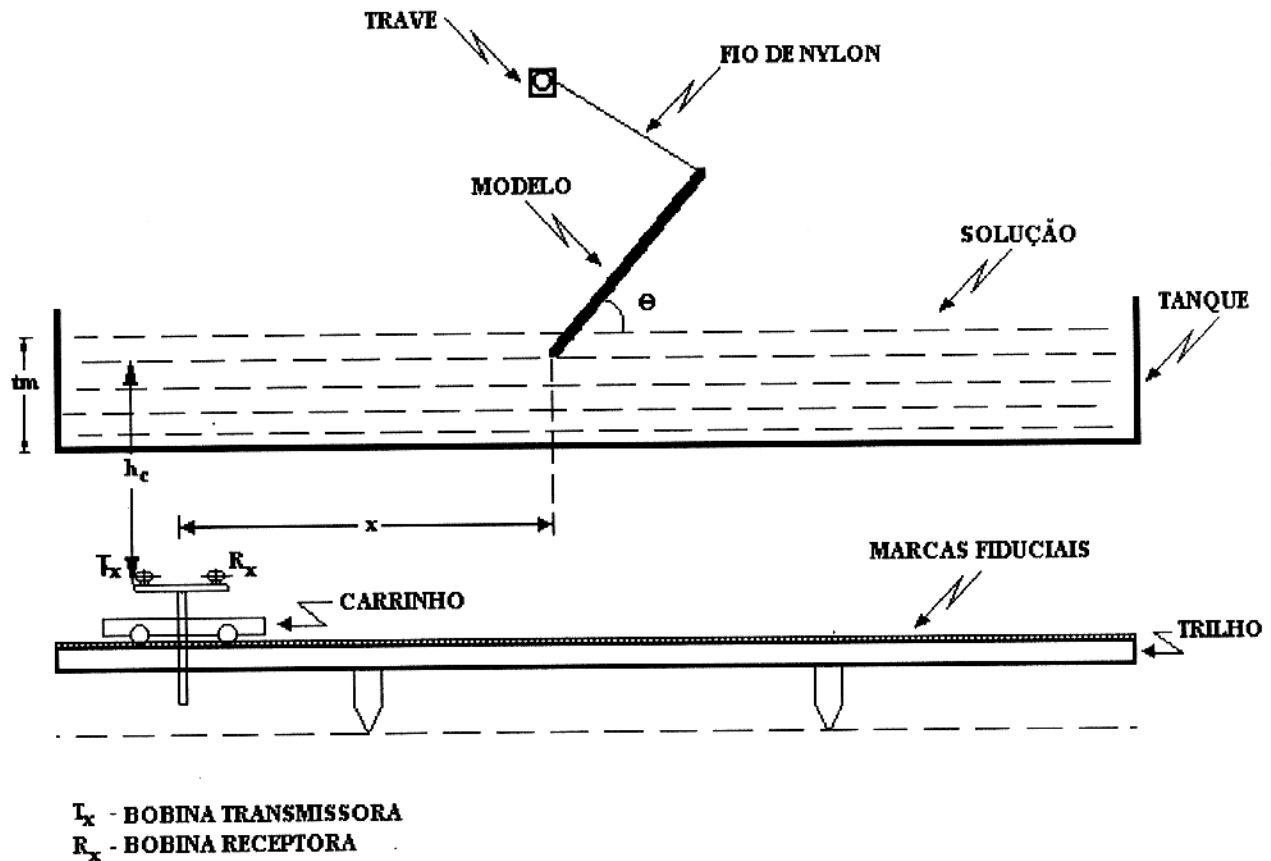


Figura 3.2 Diagrama esquemático mostrando a posição do modelo, a solução (manto de intemperismo) e o sistema de bobinas

### 3.5 CALIBRAÇÃO E PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

#### a) Calibração

A calibração consiste em obter e compensar o campo de acoplamento direto entre o transmissor e a bobina receptora (campo primário) a fim de se obter somente o sinal das anomalias. Este procedimento foi feito através de programas que tratam os dados medidos.

As medidas obtidas (componentes real e imaginária do campo resultante) são normalizadas em relação ao campo primário ou de acoplamento direto entre o transmissor e a bobina receptora, na ausência do corpo, mas com o manto.

Nos arranjos VCA, VCP e HCP, o campo de normalização é obtido através das medidas dos primeiros pontos, uma vez que estes estão afastados do corpo alvo, satisfazendo a condição exigida para a medição do acoplamento direto. O arranjo mínimo é normalizado em relação ao acoplamento direto do arranjo HCP, neste caso, é necessário, antes da medição, que se obtenha o campo de referência através do uso do arranjo HCP, movimentando as bobinas, neste arranjo, na ausência do corpo alvo.

As medidas obtidas através do aparelho representam as curvas das componentes real e imaginária do campo resultante (acoplamento direto + campo secundário), sendo, necessário o cancelamento do campo primário e em seguida a transformação das medidas em componentes em fase e quadratura em relação ao campo primário. Estas operações são feitas através de um "software", não necessitando da calibração do aparelho para esses fins específicos. Na Figura 3.3 tem-se a representação gráfica do que foi discutido acima. O procedimento matemático associado pode ser descrito como segue:

Seja:  $\vec{H}_p$  = campo magnético primário

$\vec{H}_s$  = campo magnético secundário

$\vec{H}_r$  = campo magnético resultante

A leitura em fase é dada pela expressão:  $\text{Real}\left(\frac{\vec{H}_s}{\vec{H}_p}\right) \cdot 100\%$ , ou seja a fase é a parte real da razão entre os dois números complexos  $\vec{H}_s$  e  $\vec{H}_p$ . Da mesma forma a leitura da quadratura é dada pela expressão:  $\text{Imag}\left(\frac{\vec{H}_s}{\vec{H}_p}\right) \cdot 100\%$

Como o que se mede através do aparelho são os campos resultantes em cada ponto de medição, torna-se necessário fazer a decomposição desses vetores para cada ponto, para que se possa obter os vetores  $\vec{H}_p$  e  $\vec{H}_s$ , ponto a ponto, ou seja:

Valor medido:  $\vec{H}_R = \vec{H}_p + \vec{H}_s$  (para cada ponto). Os vetores podem ser escritos através de seus componentes real e imaginário, assim:

$$\vec{H}_R = \vec{R}_R + \vec{I}_R i$$

$$\vec{H}_p = \vec{R}_p + \vec{I}_p i$$

$$\vec{H}_s = \vec{R}_s + \vec{I}_s i$$

$$\phi = \text{tg}^{-1}\left(\frac{Q}{E}\right), \quad Q = \text{componente em quadratura e } E = \text{componente em fase}$$

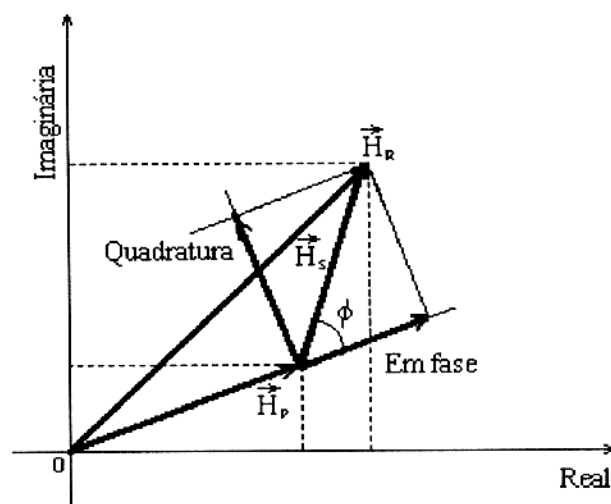


Figura 3.3 - Obtenção do campo secundário pela decomposição do campo total

## b) Procedimento de medição

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 os arranjos de bobinas VCA, VCP, HCP e PERP, com o conjunto de bobinas receptora e transmissora, caminhando transversalmente ao corpo. A interação entre o corpo e o manto foi realizada colocando-se o modelo em diferentes profundidades ( $h_c/L$ ). Estas profundidades foram medidas desde o topo do corpo até a linha que passa pelo centro das bobinas. Neste trabalho foram utilizadas as profundidades de  $h_c/L = 0,2$ ;  $0,3$ ;  $0,4$  e  $0,5$ .

O corpo foi ainda disposto segundo os seguintes ângulos de mergulho  $\theta = 90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $30^\circ$ . A Figura 3.4 ilustra situações em que o corpo se encontra na posição vertical e também com mergulho de  $\theta = 45^\circ$  em duas profundidade distintas.

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 modelagem fossem satisfeitas foi admitido a inexistência de materiais ferromagnéticos no conjunto de modelagem.

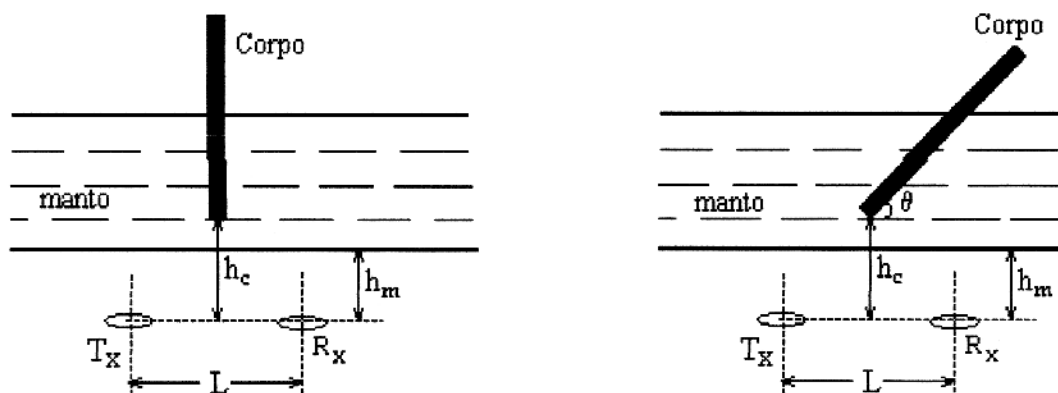


Figura 3.4 - Situações modeladas de manto condutivo, onde o corpo encontra-se nas posições vertical e com um mergulho  $\theta = 45^\circ$  em duas profundidades distintas.

### 3.6 - OCORRÊNCIA DE ERROS

Enquanto que os métodos analíticos podem obter resultados exatos, no caso de modelagens 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 se construir entretanto, a utilização de bobinas não reduzidas adequadamente é uma prática comum em modelagem. Quando o espaçamento entre as bobinas ( $L$ ) satisfaz a seguinte relação:  $L > 5 \cdot a$ , sendo  $a$  o raio das bobinas, o campo devido a bobina pode ser considerado igual ao de um dipolo, com erro menor que 2 %. (TELFORD et al., 1976), neste trabalho esta condição foi satisfeita, uma vez que  $L = 6 \cdot a$

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

#### b) Erros de posicionamento dos modelos e das bobinas

Os erros máximos das profundidades do corpo e das espessuras do manto foram estimadas em  $\pm 1.5\%$  e  $\pm 2\%$ , respectivamente. Para a distância entre as bobinas o erro gira em torno de  $\pm 1.5\%$ . A precisão do ângulo de mergulho foi estimada em  $\pm 3\%$ , estes erros foram estimados em relação aos perfis medidos para  $90^\circ$ .

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, por produzirem repetibilidade ao longo do trabalho.

## 4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os efeitos de manto foram estudados para os arranjos VCP, VCA, HCP e PERP, havendo contato entre o corpo e o manto (manto ôhmico ou galvânico). Considerou-se a situação representada pela Figura 3.4, onde a profundidade é ajustada movimentando-se a placa em relação a posição das bobinas, ou seja, com o aumento da profundidade há mudança da área de contato entre o corpo e o manto.

A ênfase das discussões reside na verificação das alterações das curvas de fase e quadratura na presença de manto (solução) em relação ao ar livre (sem manto).

Os parâmetros estudados foram:

- 1) Profundidade do corpo : alterada através do movimento vertical da placa, mantendo-se constante a altura das bobinas até o manto ( $h_m = 28 \text{ mm}$ ).  
Foram usados quatro valores de profundidade ( $hc/l = 0.2, 0.3, 0.4 \text{ e } 0.5$ ).
- 2) Inclinação do semi-plano ( $\theta = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ \text{ e } 30^\circ$ );
- 3) Número de indução do manto:  $\alpha_m = 0$  (sem manto), 0.15, 0.36 e 0.57 ;
- 4) Número de indução do corpo:  $\alpha_c = 5.70, 11.40, 28.20 \text{ e } 56.80$ .
- 5) Arranjo de bobinas: HCP, VCP, VCA e PERP

A descrição dos perfis consiste basicamente no estudo dos picos das curvas, metodologia já consagrada em trabalhos anteriores. Nas Figuras 4.1, 4.8, 4.15 e 4.22, tem-se os perfis típicos para os arranjos utilizados com as respectivas definições dos picos.

É oportuno salientar que as curvas foram, de forma geral, divididas em dois picos: o pico-a-favor e o pico contra. Os adjetivos contra e a favor estão relacionados ao fato da parte da curva correspondente ao pico estar no lado a favor ou contrário ao mergulho da placa, ou melhor descrevendo, se está sobre a influência direta ou não da chapa inclinada, ver Figura 4.1. Posteriormente, verificou-se a necessidade de se definir mais um pico, denominado de extra, por se manifestar em situações bem peculiares, não sendo geral como os outros dois, veja Figuras 4.1, 4.8 e 4.22.

Na definição dos picos para os arranjos HCP, VCP, VCA e PERP fica visível a possibilidade de se dividir cada pico em duas partes: uma que vai da linha de base a parte superior do pico (valor máximo), denominado de pico positivo, e outra que vai da base do perfil até a parte inferior (valor mínimo), pico-negativo. Neste trabalho estes valores foram denominados de forma abreviada: PP (pico positivo) e PN (pico negativo), sendo acrescidos das terminações A e C quando estiverem relacionados ao lado a favor e contra, respectivamente (ver Figuras 4.1, 4.8, 4.15 e 4.22).

Observa-se que na definição de picos adotada neste trabalho, para os arranjos HCP, VCP e VCA, o pico negativo é comum para os pico-a-favor e contra, ou seja:  $PNA = PNC$  (ver Figuras 4.1, 4.8 e 4.15), usando a notação sugerida; quanto ao arranjo PERP, observa-se o contrário: o pico positivo é comum para os pico-a-favor e contra, ou seja:  $PPA = PPC$  (ver Figura 4.22).

De forma resumida, tem-se para a definição de picos:

Tabela 4.1 - Definição dos picos para o arranjos utilizados

Arranjo	Pico - contra (PC)	Pico a favor (PA)
HCP		
VCP	$PC = PPC - PN$	$PA = PPA - PN$
VCA		
PERP	$PC = PP - PNC$	$PA = PP - PNA$

Onde:

PN = pico negativo;

PNC = pico negativo contra;

PNA = pico negativo a favor

PP = pico positivo;

PPC = pico positivo contra;

PPF = pico positivo a favor.

Obs.: nas equações da Tabela acima os sinais algébricos em relação a linha de base devem ser considerado. Os picos serão os valores absolutos das somas algébricas.

Os termos: pico negativo e pico positivo para a quadratura , em algumas situações, se mostram inadequados , uma vez que estes picos podem ter os seu valores máximos abaixo da linha de base, ou os valores mínimos acima da linha de base , como se observa nas Figuras 4.1 (o pico positivo a favor tem o valor negativo) e 4.15 (o pico negativo tem o sinal positivo), o que torna sem lógica a expressão pico positivo ou pico negativo. Apesar desse inconveniente, fez-se uso destes termos nesta análise de resultados, por facilitar sobremaneira a descrição das variações observadas.

#### 4.1. EFEITOS DO MANTO

As anomalias obtidas sobre semi-planos inclinados podem sofrer grandes modificações quando está presente o manto de intemperismo. Estas modificações dependem da situação em que se encontra o corpo em relação ao manto, ou seja se existe contato ôhmico ou não, do contraste de condutividades entre o corpo e o manto, do arranjo de bobinas utilizado, etc.

Para o arranjo HCP, entre as várias modificações observadas pode-se citar , de forma geral :

- Para manto sem contato com o corpo: há rotação de fase da anomalia, em sentido horário, acompanhada da redução de sua amplitude;
- Para manto com contato ôhmico com o corpo: há rotação de fase, em sentido anti-horário e em algumas situações há aumento na amplitude (a serem discutidos posteriormente)

Para qualquer das situações acima há ainda mudanças na forma dos perfis, que está relacionada com o surgimento de um pico extra na componente em quadratura. O aparecimento de um pico extra na quadratura está relacionado com a diminuição do mergulho do corpo e se apresenta mais nitidamente quanto maiores forem  $\alpha_c$  ,  $\alpha_m$  e menores valores de  $h/L$  . Ver Figuras 4.1, 4.4, 4.5, para o arranjo HCP, Figuras 4.8, 4.12, 4.14 para o arranjo VCP e Figuras 4.22, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 para o arranjo PERP.

O pico extra se forma porque, quando o mergulho do corpo diminui, há uma maior aproximação deste com o manto, havendo, com isso um aumento na interação eletromagnética entre ambos. Em sua forma inicial, esse pico promove a redução do pico-a-pico a favor da quadratura, tornando-o inferior ao valor do pico-a-pico contra. Ver as mesmas figuras do parágrafo anterior.



É oportuno salientar que as observações citadas acima, relacionadas a situação em que o manto está em contato ôhmico com o corpo, são válidas para os arranjos VCP, VCA, ressaltando-se que neste último, com os parâmetros utilizados neste trabalho, não foi detectada a formação do pico extra. Para o arranjo PERP, se for feita a adaptação quanto a definição dos picos tem-se resultados bastante similares aos citados acima.

A seguir, são considerados os efeitos do manto em relação ao parâmetro resposta do corpo ( $\alpha_c$ ), índice de profundidade ( $h_c/L$ ) e o mergulho do corpo ( $\theta$ ).

#### 4.1.1 - Efeitos relacionados ao parâmetro de resposta do corpo ( $\alpha_c$ )

O efeito mais notável a se atribuir a  $\alpha_c$  é o fato do mesmo favorecer o surgimento do pico extra na quadratura, isto para os arranjos: HCP, VCP e PERP. Ver Figuras 4.4, 4.5 para o arranjo HCP, Figura 4.12 para o arranjo VCP e Figuras 4.25 e 4.26 para o arranjo PERP.

Dentro da faixa de  $\alpha_c$  utilizada neste trabalho observar-se que, com o aumento de  $\alpha_c$ , os valores de pico-a-pico da componente em-fase crescem, enquanto que os valores para a quadratura diminuem, estando ou não o manto presente.

#### 4.1.2 - Efeitos relacionados à profundidade do corpo

A amplitude da anomalia diminui com o aumento da profundidade, tornando-se menos nítida (Figuras 4.7, 4.13, 4.21, 4.28). Isto é fácil de compreender porque as interações eletromagnéticas em jogo são maiores quanto mais próximo estiver o corpo do arranjo de bobinas e do manto.

#### 4.1.3 - Efeitos relacionados ao mergulho ( $\theta$ )

Nas Figuras 4.6, 4.14, 4.20 e 4.27 são mostradas anomalias provocadas por um condutor com  $\alpha_c = 28,20$  para cada arranjo de bobinas utilizado, com ângulos de  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $30^\circ$ .

A análise destas anomalias mostra que:

A presença do manto não altera a feição da em-fase. Para os arranjos HCP, VCP e VCA, com a diminuição do ângulo de mergulho do corpo, o pico positivo a favor cresce e o contra diminui e a anomalia torna-se progressivamente assimétrica. Para o arranjo PERP, vale o mesmo resultado, só que aplicável ao pico negativo, neste caso a anomalias são sempre assimétricas.

o mesmo resultado, só que aplicável ao pico negativo, neste caso a anomalias são sempre assimétricas.

(b) A quadratura tem o mesmo comportamento da em fase na ausência de manto. No entanto com a presença do manto a forma do perfil se altera, notadamente quando o corpo possui elevados valores de  $\alpha_c$  e em pequenos mergulhos  $\theta$ , quando ocorre a formação do pico-extra. O pico positivo a favor diminui e o contra cresce.

#### 4.1.4 - Formação do pico-extra na quadratura

Nas Figuras 4.1, 4.8 e 4.22 tem-se a definição dos picos-extra para os arranjos HCP, VCP e PERP. O pico-extra surge para pequenos mergulhos  $\theta$ , maiores valores de  $\alpha_c$  e  $\alpha_m$ . Nas Figuras 4.29, 4.30 e 4.31 tem-se os perfis mostrando o comportamento do manto com a variação dos parâmetros  $h_c/L$ ,  $\theta$  e  $\alpha_c$ .

Os valores de pico-a-pico para o pico-extra são medidos em relação ao pico positivo a favor da quadratura para os arranjos HCP, VCP, enquanto que para o arranjo PERP, eles são medidos em relação ao pico negativo a favor. Seus valores são plotados com o sinal negativo.

Pela análise das Figuras 4.29, 4.30 e 4.31 pode-se concluir:

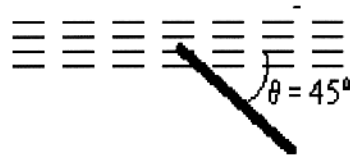
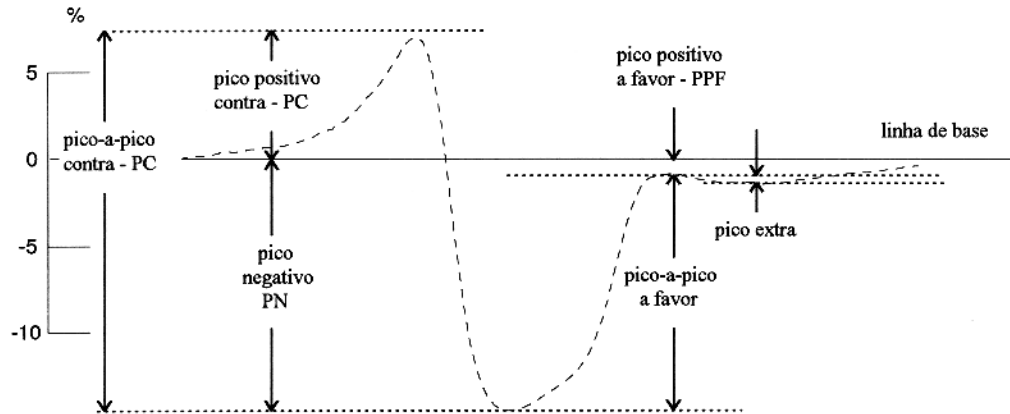
- Para um dado valor de manto ( $\alpha_m$ ) e um determinado corpo ( $\alpha_c$ ): o pico-extra aumenta com a diminuição do mergulho  $\theta$ , mantendo-se a profundidade constante ( $h_c/L$ ).
- Para um dado valor de manto ( $\alpha_m$ ) e um determinado corpo ( $\alpha_c$ ): o pico-extra aumenta com a diminuição da profundidade ( $h_c/L$ ), mantendo-se o mergulho constante ( $\theta$ ).
- Com o aumento do número de indução do manto, o pico-extra inicialmente aumenta, no entanto com a continuação, há diminuição do seu valor. Isto se explica pelo fato de não ser mais possível determinar os valores dos picos positivos ou negativos a favor que são usados na determinação do valor do pico-extra. Ver Figura 4.5 para o arranjo HCP, onde fica difícil a definição do pico positivo.

## ARRANJO HCP

\_\_\_\_\_ Em fase, - - - - - Quadratura

$$\alpha_{c3} = 28,20, \alpha_c = 0,36, h_c/L = 0.2$$

## EM QUADRATURA



## EM FASE

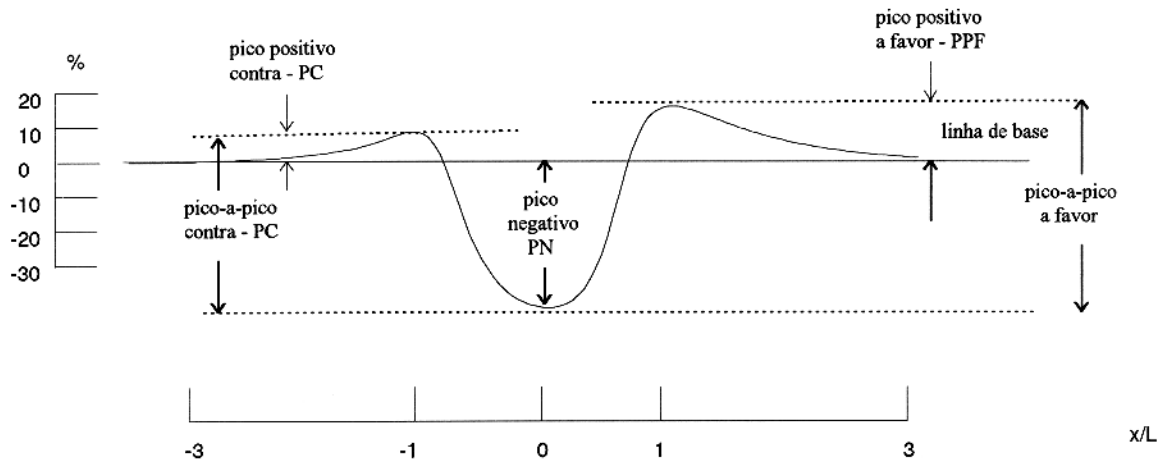


Figura 4.1 Definição de picos na presença de manto de  $\alpha_m = 0,36$ , havendo formação de pico-extra na quadratura. Não existindo pico-extra, os picos na quadratura são definidos da mesma maneira que a em fase.

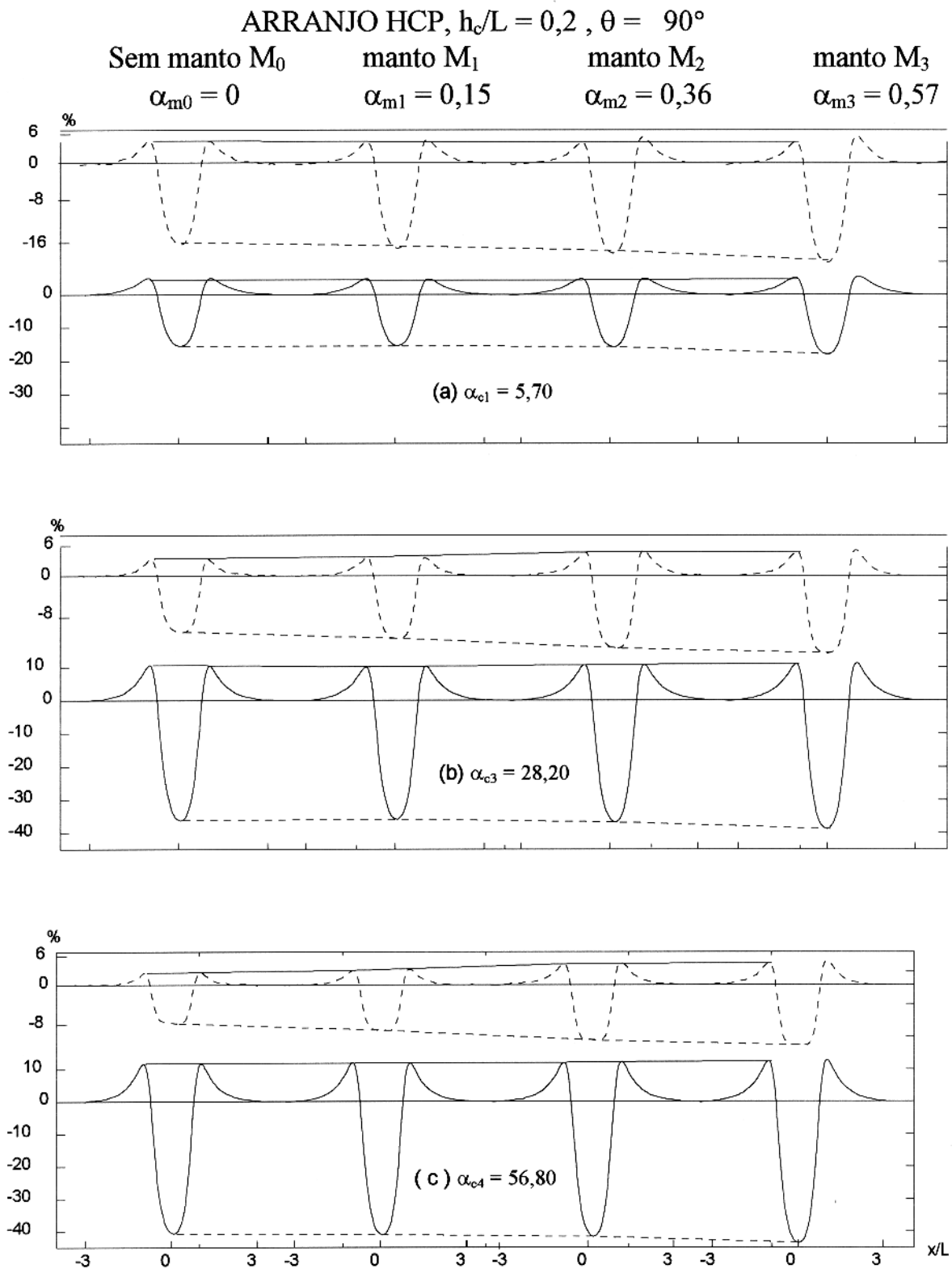


Figura 4.2 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$ , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$  e profundidade  $h_c/L = 0,2$  com arranjo coaxial coplanar

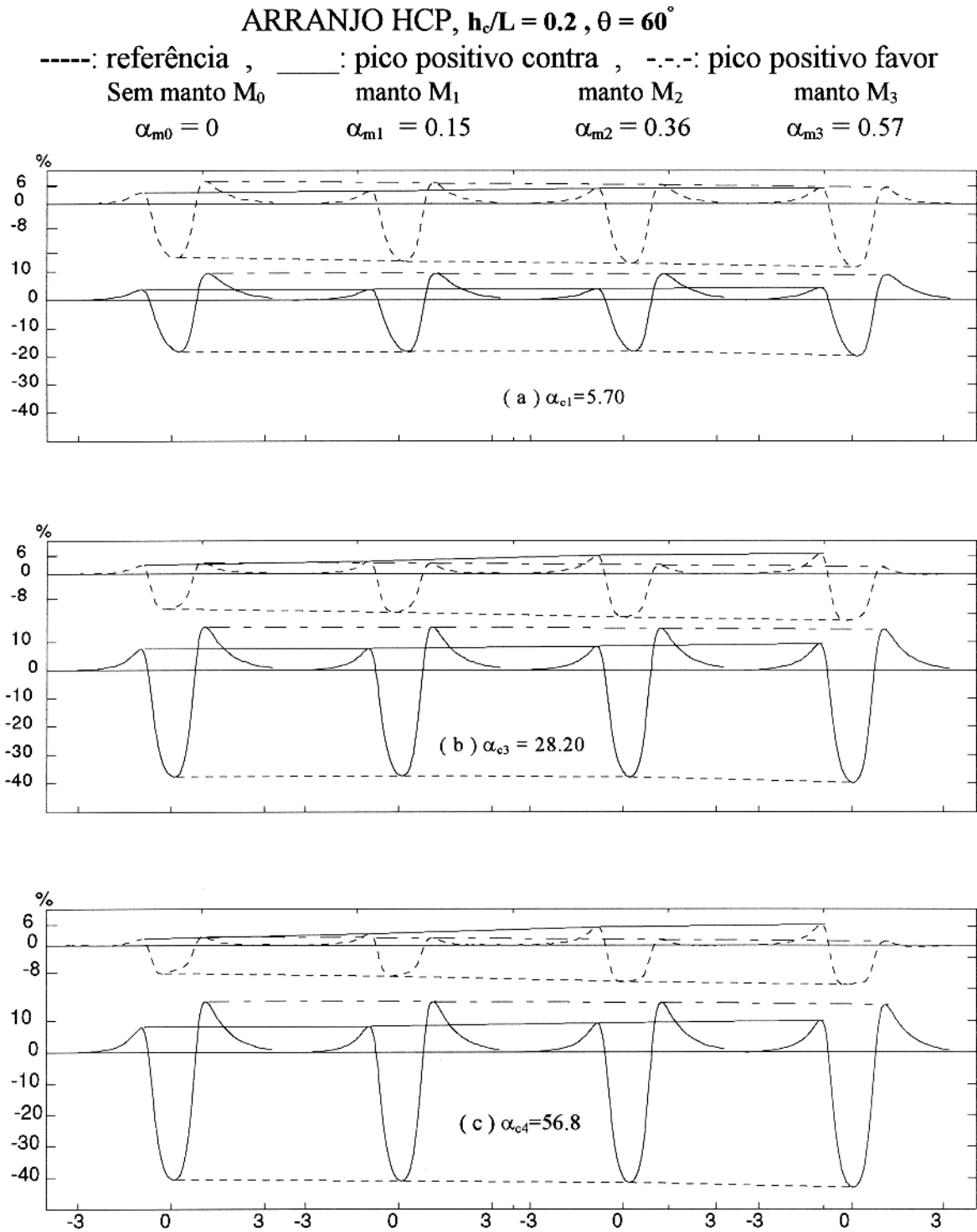


Figura 4.3 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$ , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$  para  $\theta = 60^\circ$  e profundidade  $h_c/L = 0,2$  com arranjo horizontal coplanar

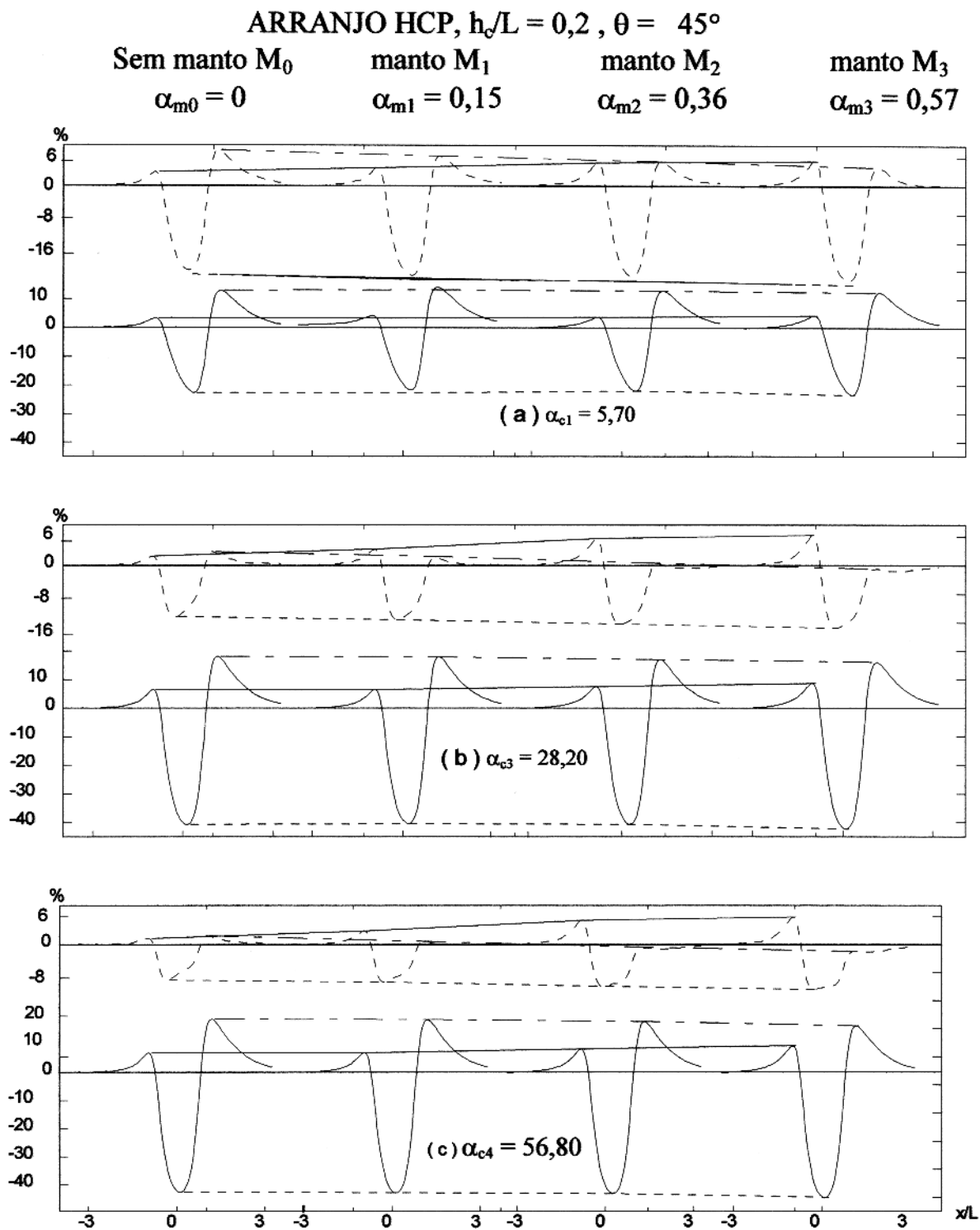


Figura 4.4 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$ , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$  para  $\theta = 45^\circ$  e profundidade  $h_c/L = 0,2$  com arranjo horizontal coplanar

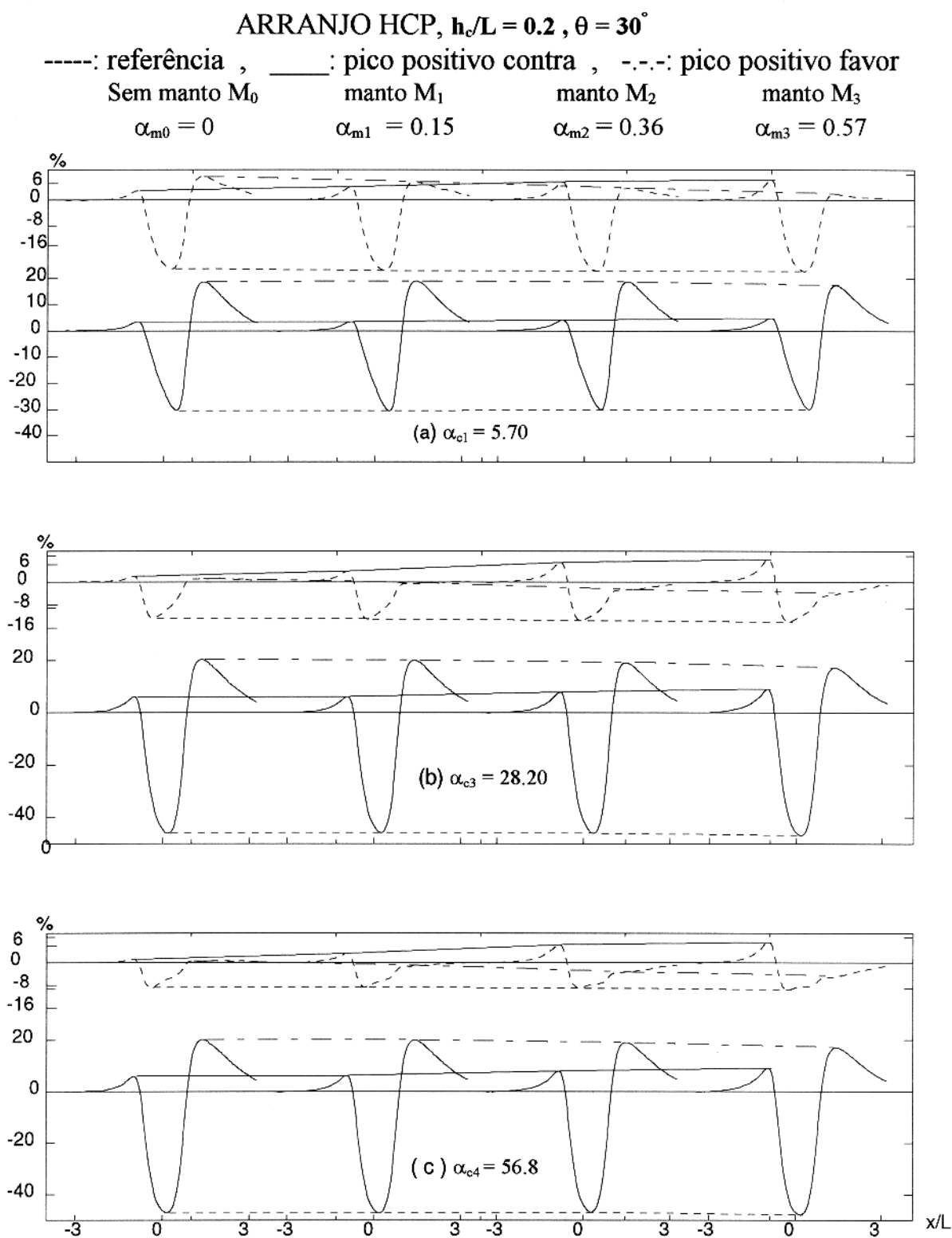


Figura 4.5 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$ , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$  para  $\theta = 30^\circ$  e profundidade  $h_c/L = 0,2$  com arranjo horizontal coplanar

ARRANJO HCP,  $\alpha_{c3} = 28.20$ ,  $h_c/L = 0.3$

-----: referência, —: pico positivo contra, -.-.-: pico positivo favor  
 Sem manto  $M_0$       manto  $M_1$       manto  $M_2$       manto  $M_3$   
 $\alpha_{m0} = 0$        $\alpha_{m1} = 0.15$        $\alpha_{m2} = 0.36$        $\alpha_{m3} = 0.57$

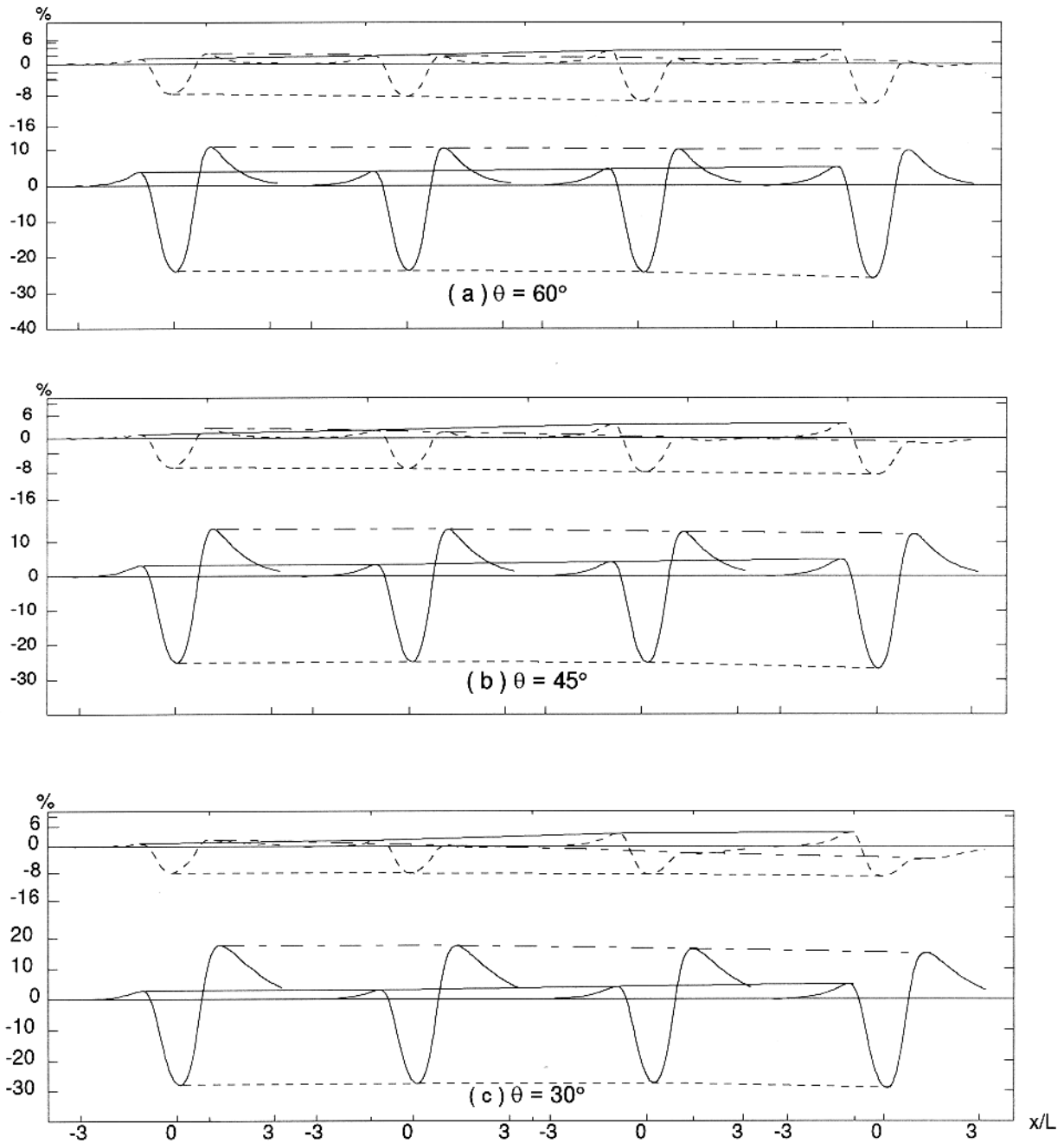


Figura 4. 6 Efeito dos mantos nas respostas com mergulhos de (a)  $\theta = 60^\circ$ , (b)  $\theta = 45^\circ$  e (c)  $\theta = 30^\circ$  para  $\alpha_c = 28,20$  e profundidade  $h_c/L = 0,3$  com arranjo horizontal coplanar



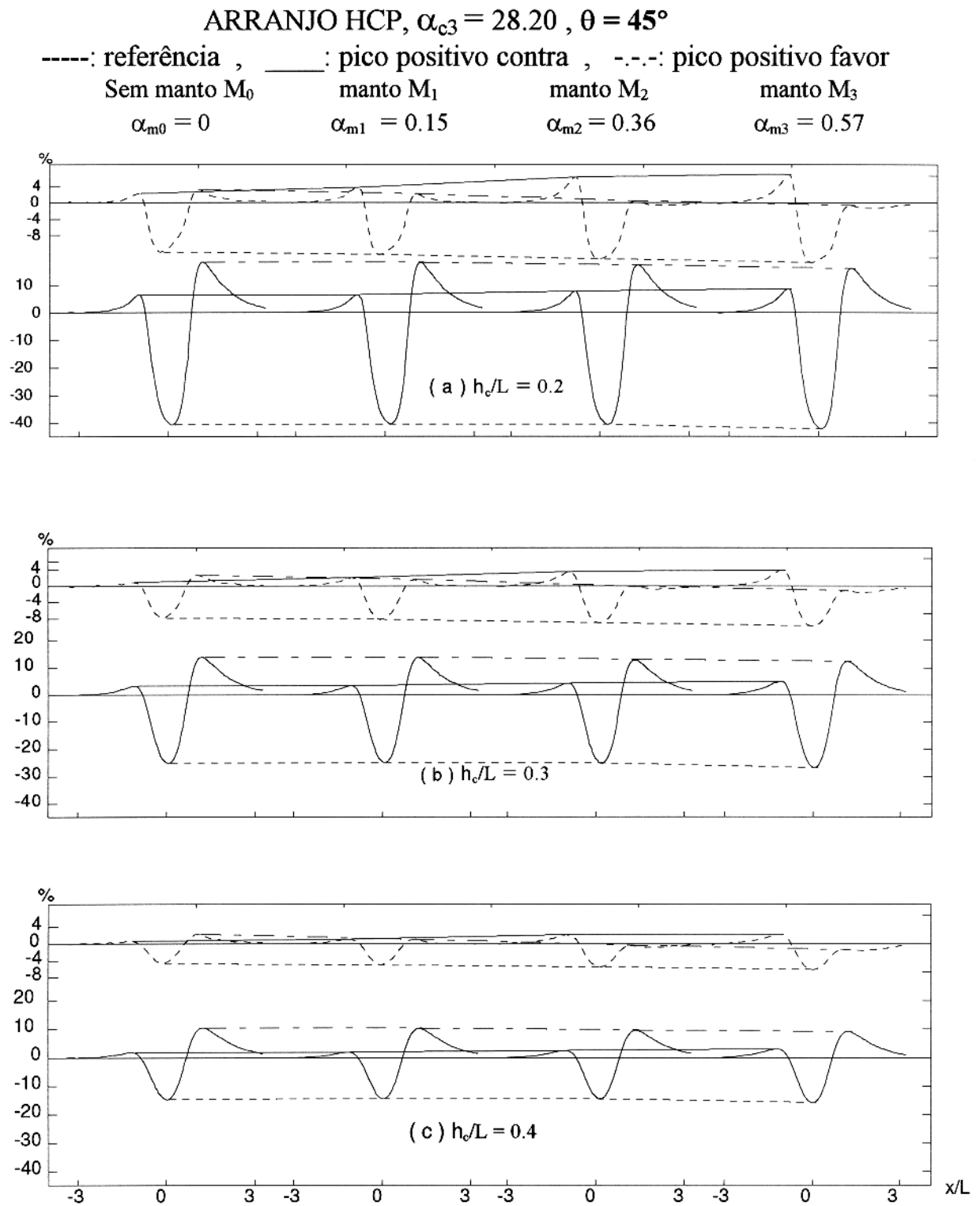


Figura 4.7 Efeito dos mantos nas respostas com profundidade de (a)  $h_c/L = 0.2$ , (b)  $h_c/L = 0.3$  e (c)  $h_c/L = 0.4$  para  $\alpha_c = 28,20$  e mergulho  $\theta = 45^\circ$  com arranjo horizontal coplanar

## ARRANJO VCP

\_\_\_\_\_ Em fase, - - - - - Quadratura

$$\alpha_{c3} = 56.80, \alpha_{m3} = 0.57, h_c/L = 0.2$$

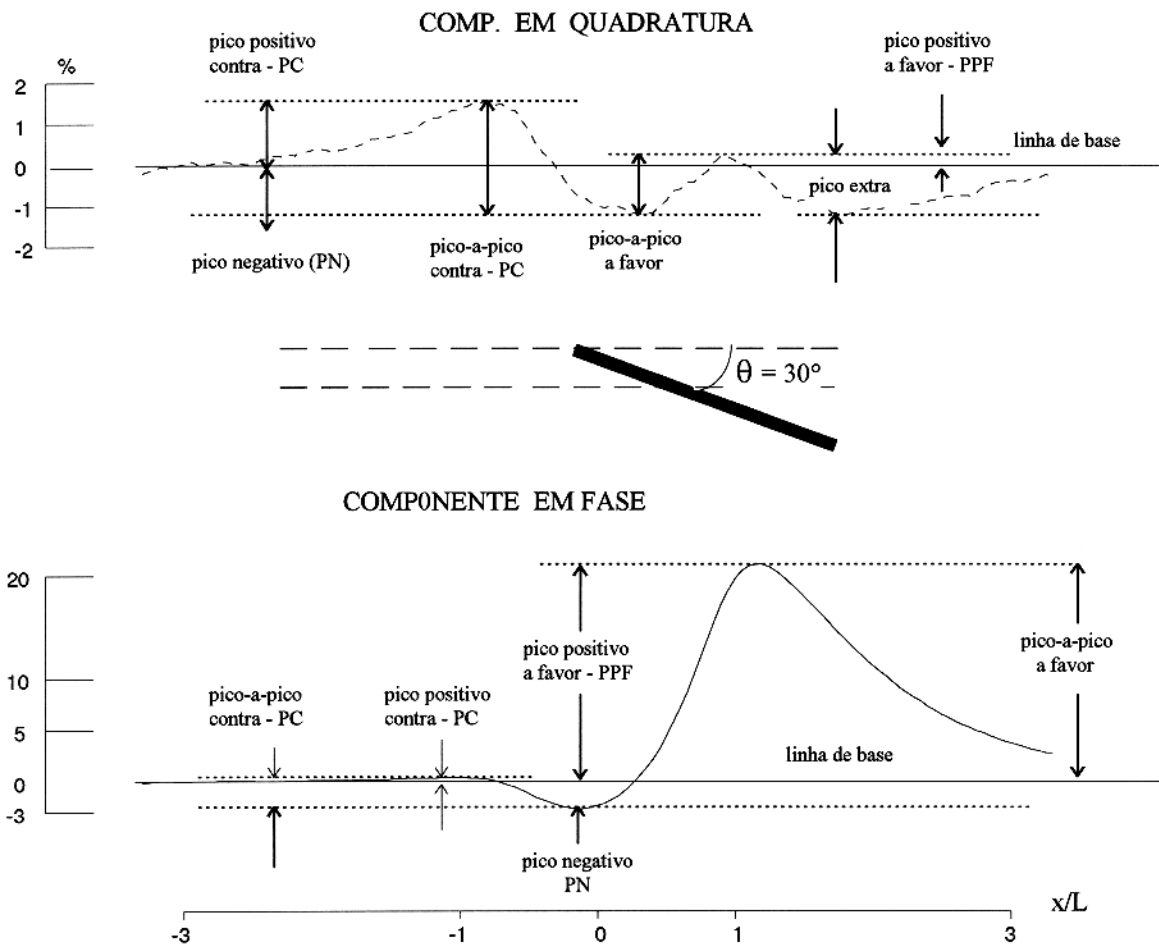


Figura 4.8 Definição de picos na presença de manto de  $\alpha_m = 0,57$ , havendo formação de pico-extra na quadratura. Não existindo pico-extra, os picos na quadratura são

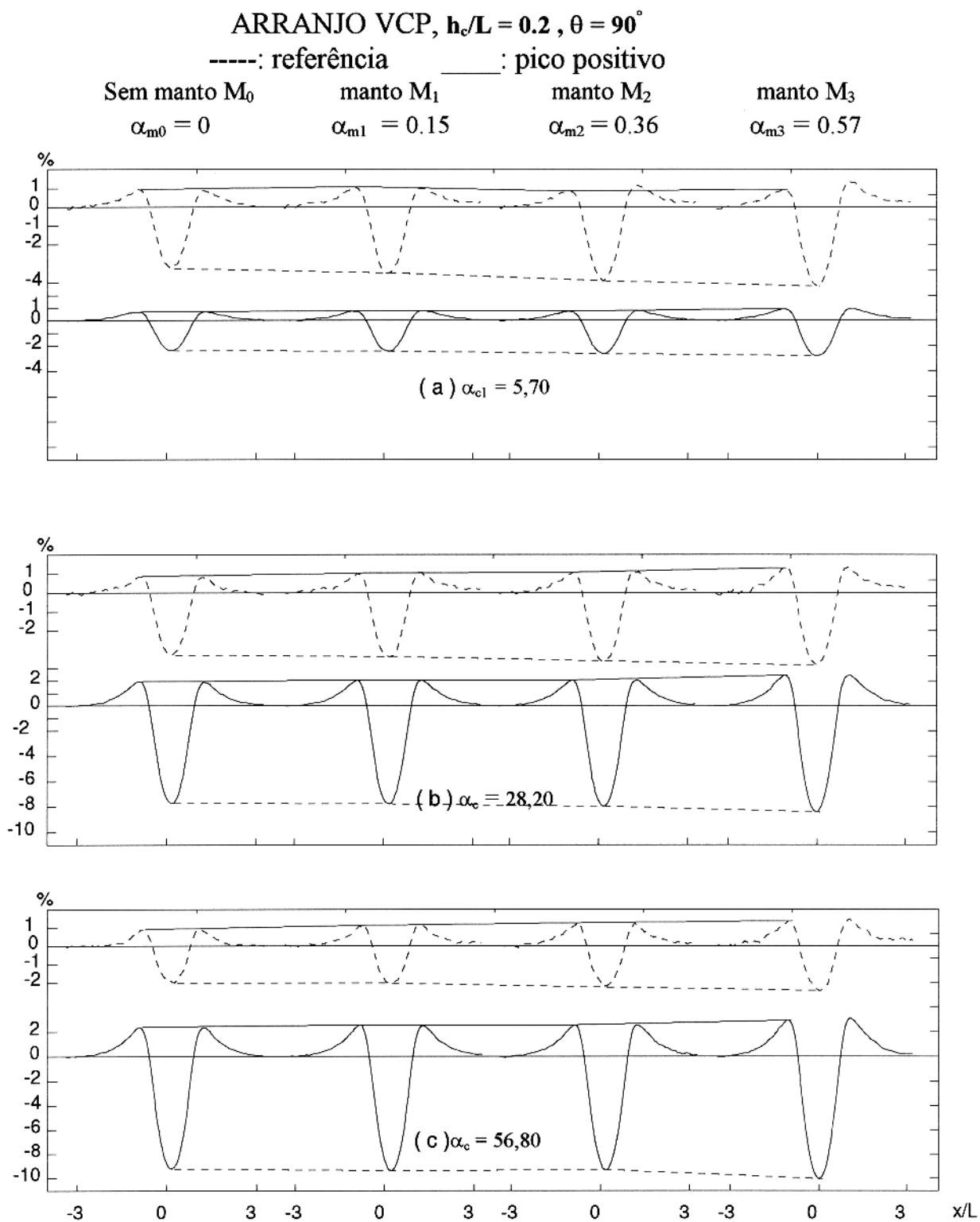


Figura 4.9 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$ , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$  para  $\theta = 90^\circ$  e profundidade  $h_c/L = 0,2$  com arranjo vertical coplanar

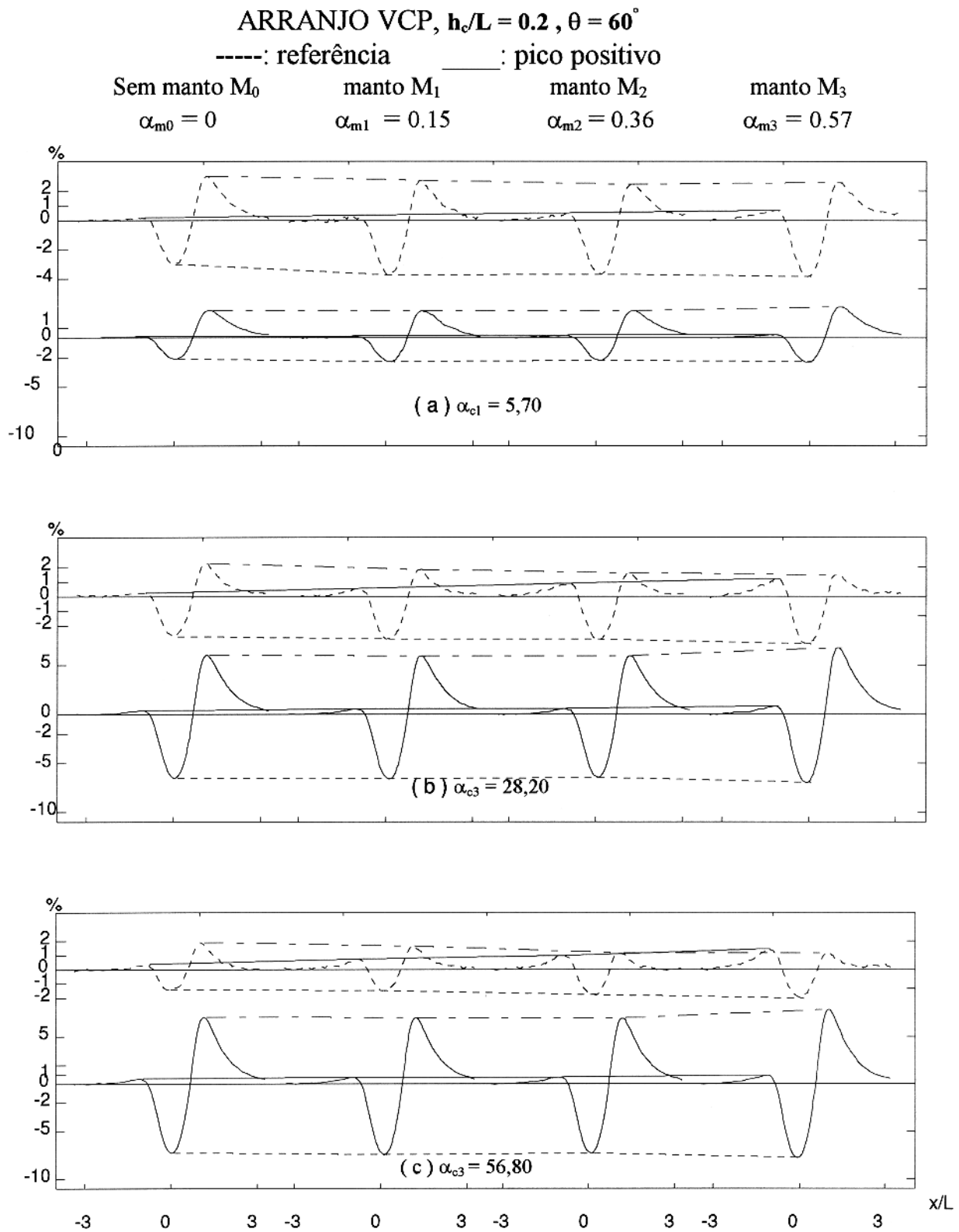


Figura 4. 10 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$ , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$  para  $\theta = 90^\circ$  e profundidade  $h_c/L = 0,2$  com arranjo vertical coplanar

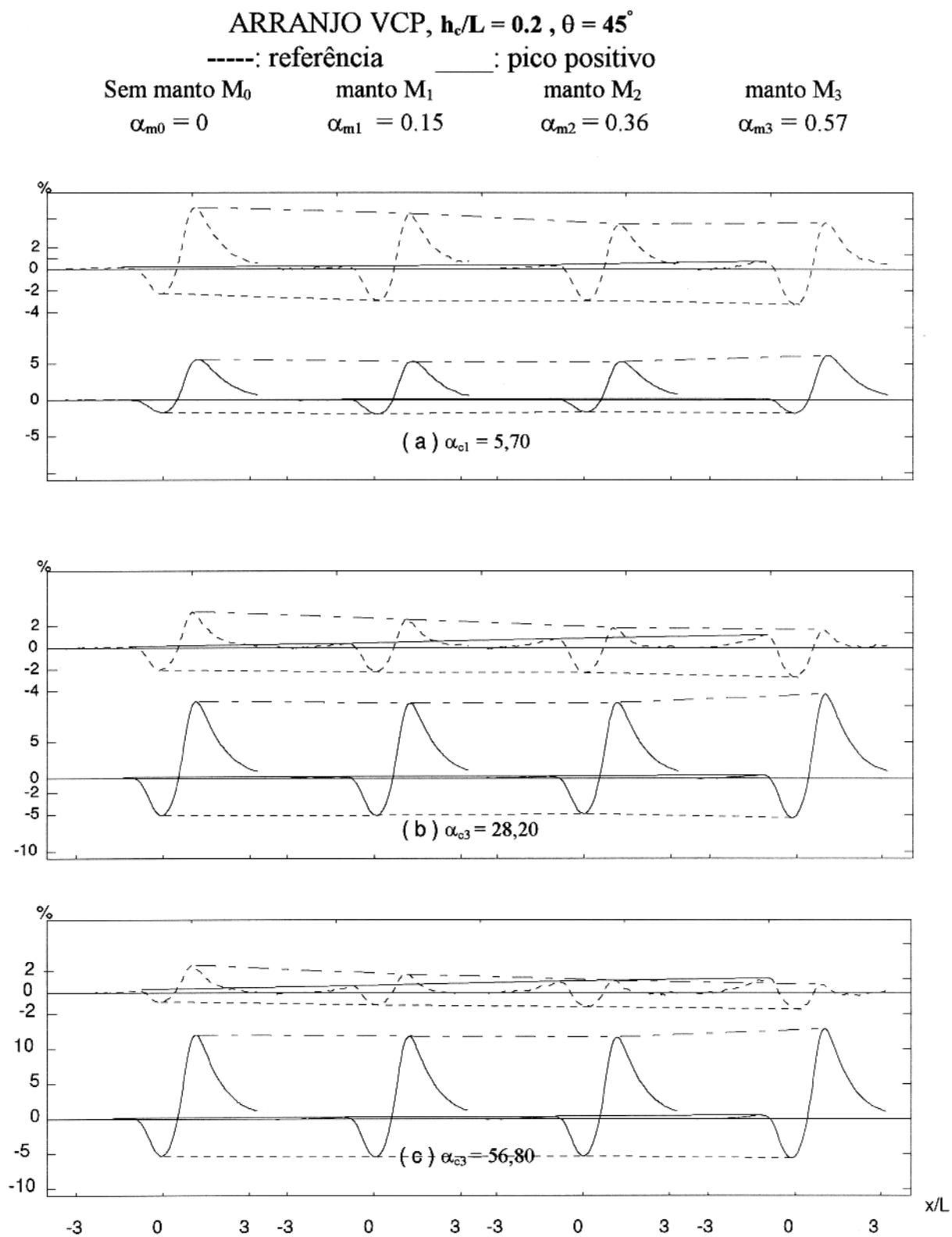


Figura 4. 11 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$ , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$  para  $\theta = 45^\circ$  e profundidade  $h_c/L = 0,2$  com arranjo vertical coplanar

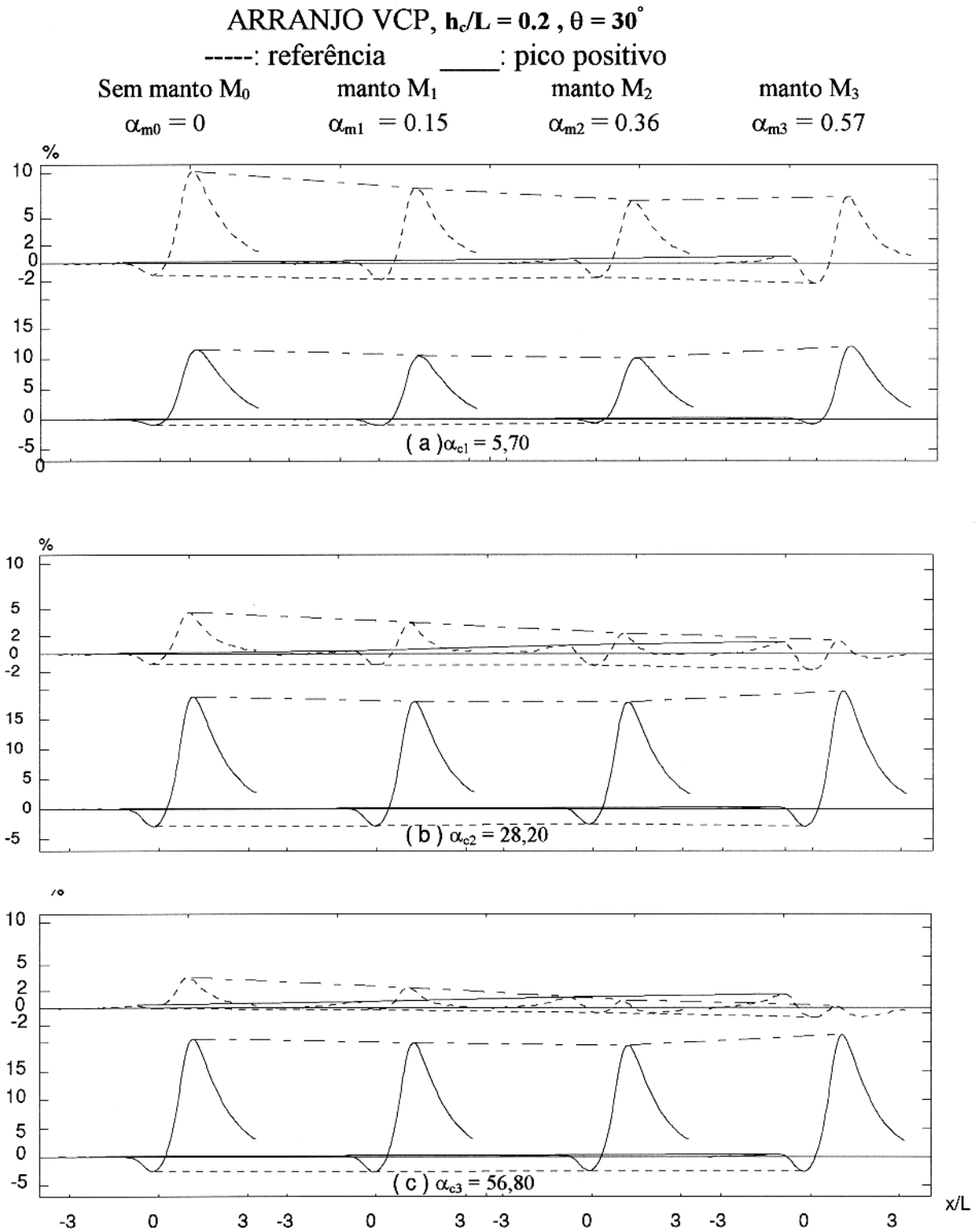


Figura 4. 12 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$ , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$  para  $\theta = 30^\circ$  e profundidade  $h_c/L = 0,2$  com arranjo vertical coplanar

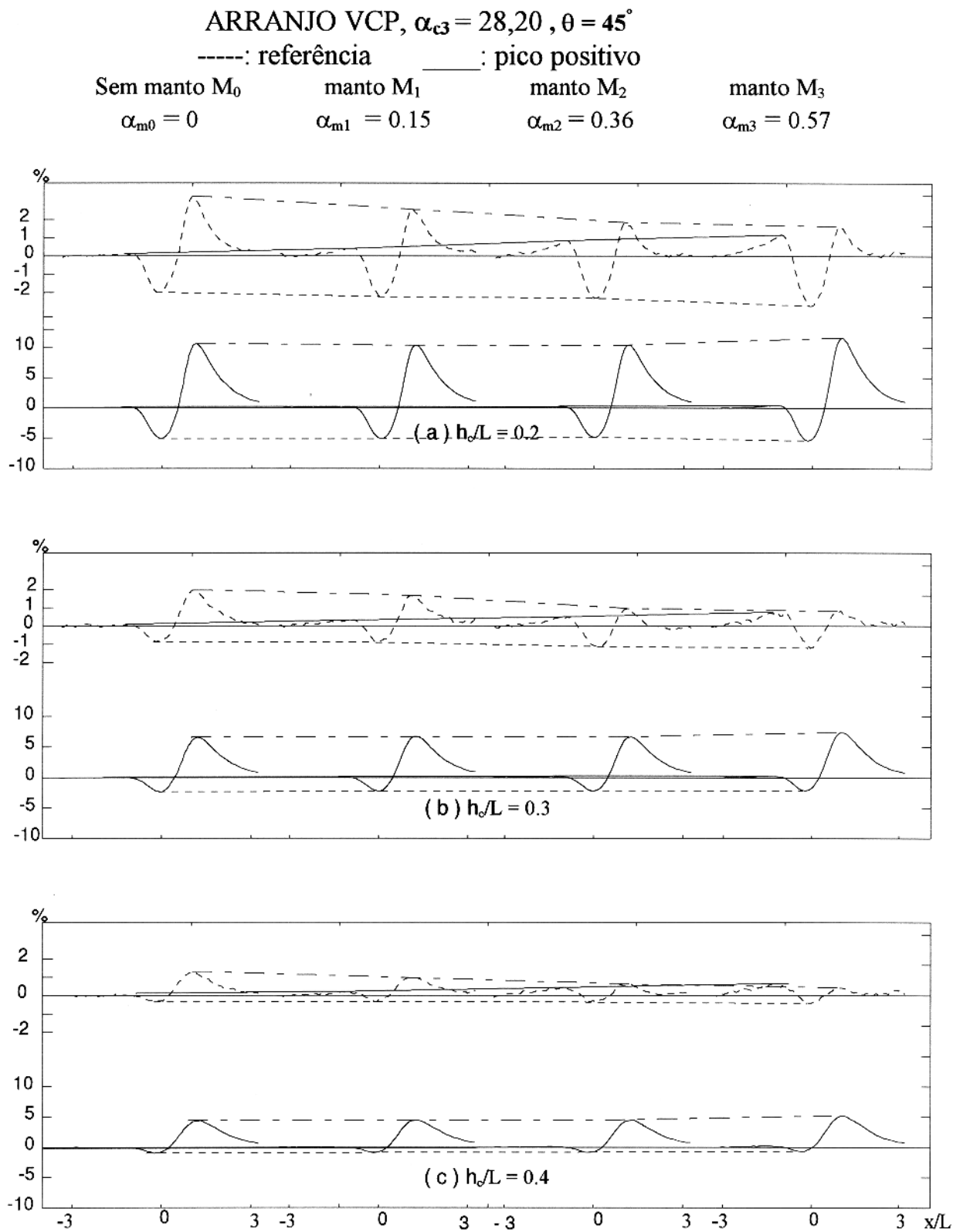


Figura 4. 13 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $h_c/L = 0.2$ , (b)  $h_c/L = 0.3$  e (c)  $h_c/L = 0.4$  para  $\theta = 45^\circ$  e  $\alpha_c = 28,20$  com arranjo vertical coplanar

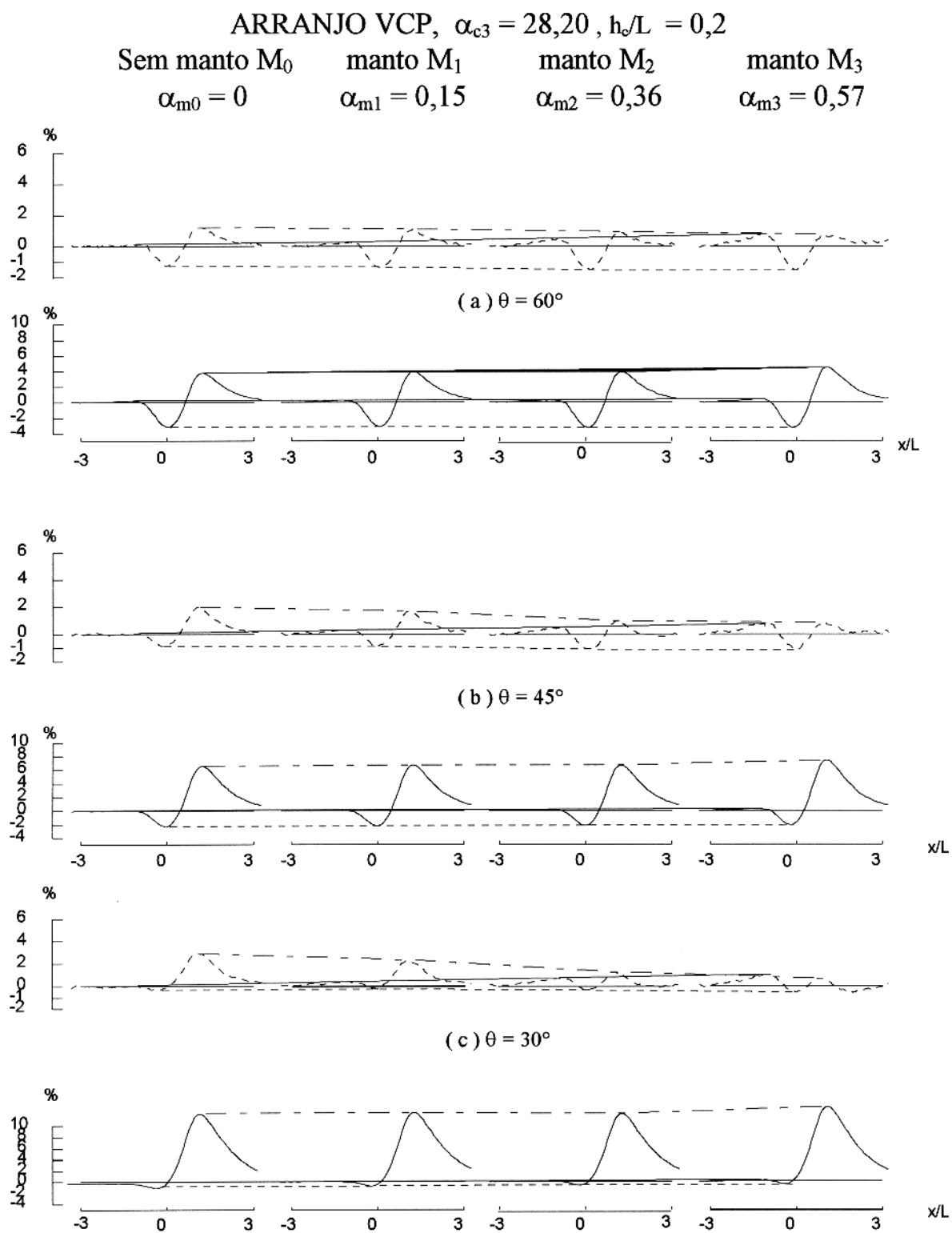


Figura 4.14 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\theta = 60^\circ$ , (b)  $\theta = 45^\circ$  (c)  $\theta = 30^\circ$  para profundidade  $h_c/L = 0,2$  e  $\alpha_{c3} = 28,20$  com arranjo vertical coplanar



## ARRANJO VCA

\_\_\_\_\_ EM FASE      - - - - QUADRATURA

$$\alpha_{c3} = 28,20 \quad , \quad h_c/L = 0,2, \quad \alpha_{m2} = 0,36$$

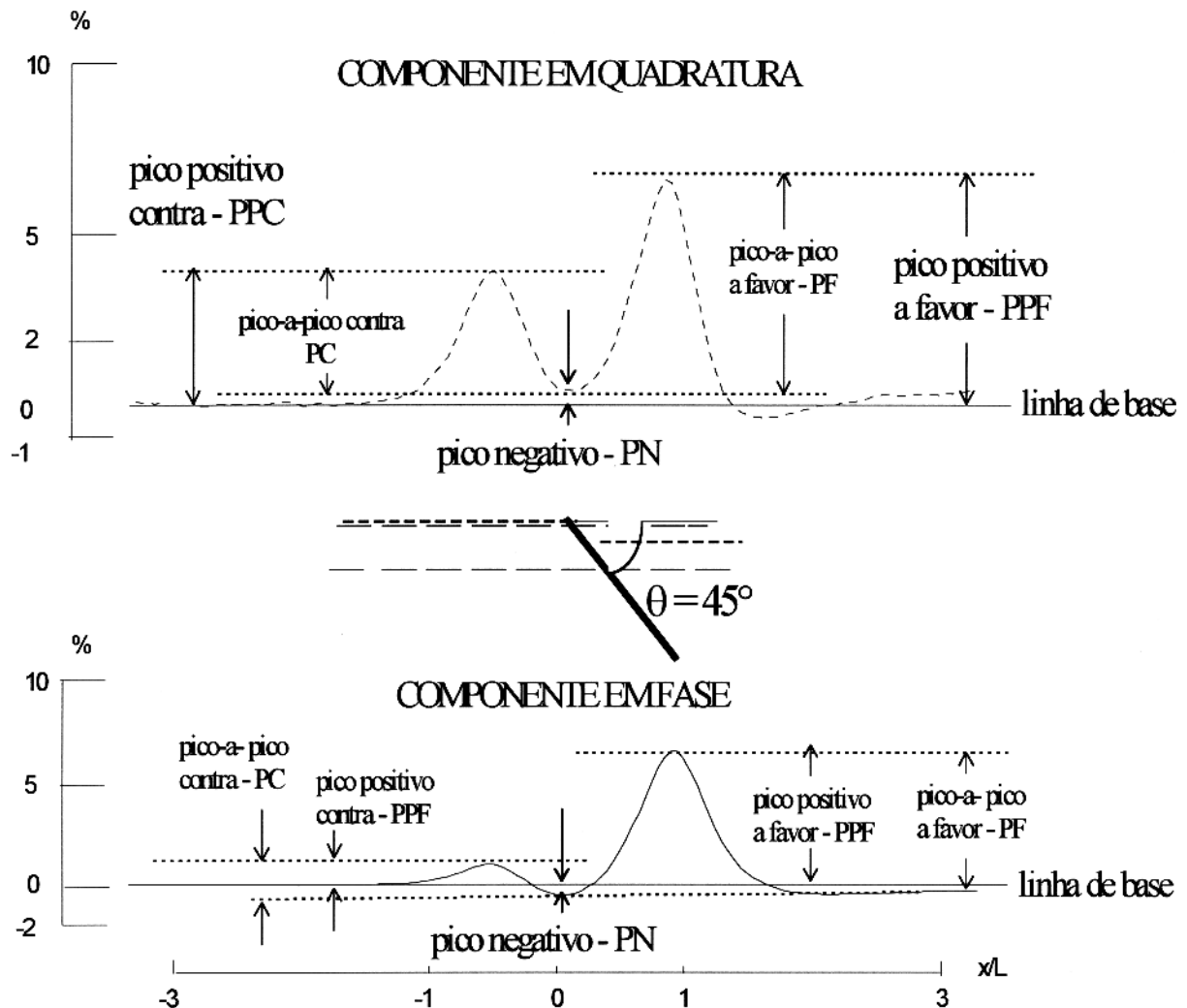


Figura 4.15 Definição de picos na presença de manto  $\alpha_m = 0,36$ . Não há formação de pico extra para este arranjo com os parâmetros estudados neste trabalho.

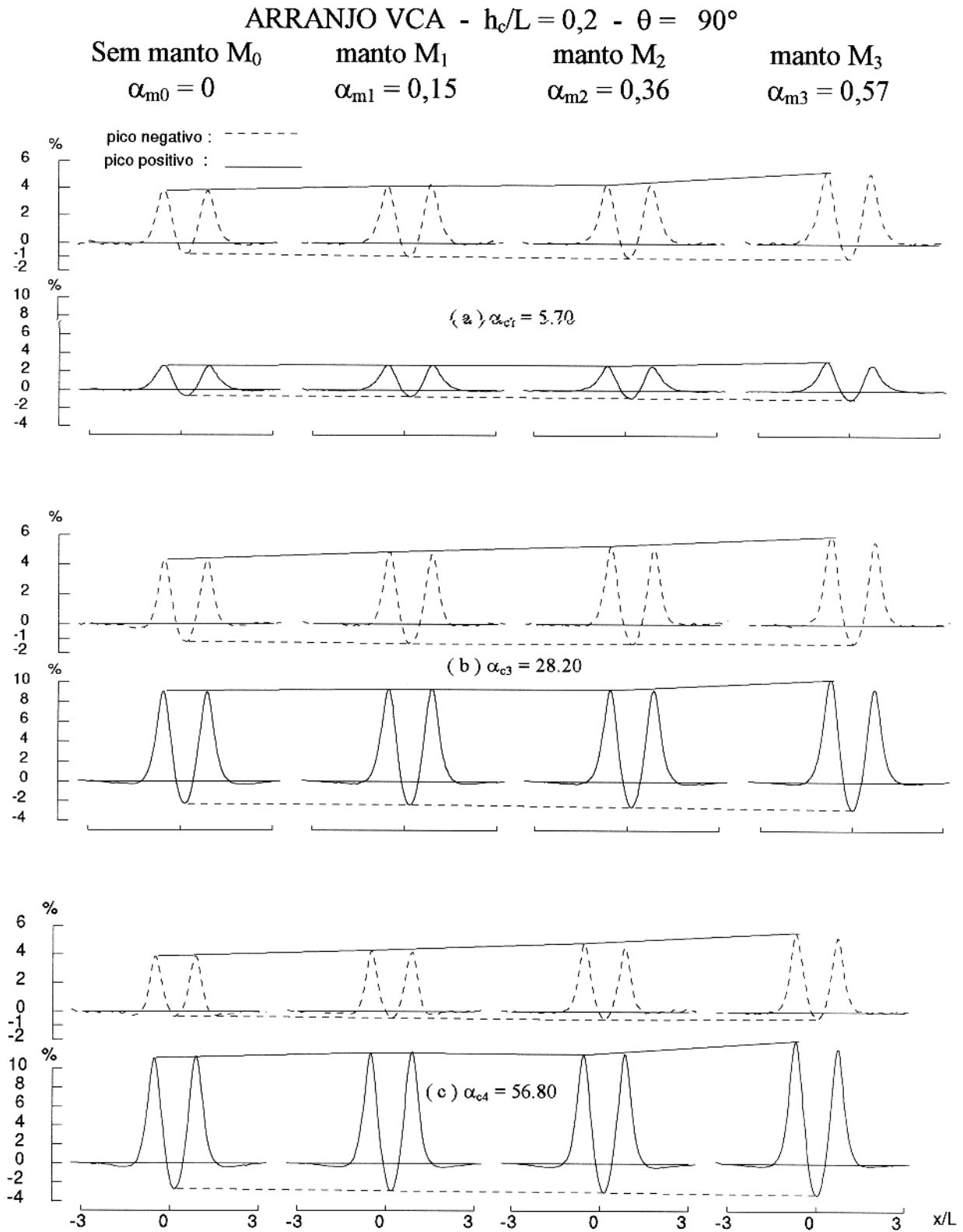


Figura 4.16 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$ , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$  e profundidade  $h_c/L = 0,2$  com arranjo vertical coaxial

ARRANJO VCA -  $h_c/L = 0,2$  -  $\theta = 60^\circ$ 

pico negativo: - - - - , pico positivo a favor: - - - - , pico positivo contra: ———

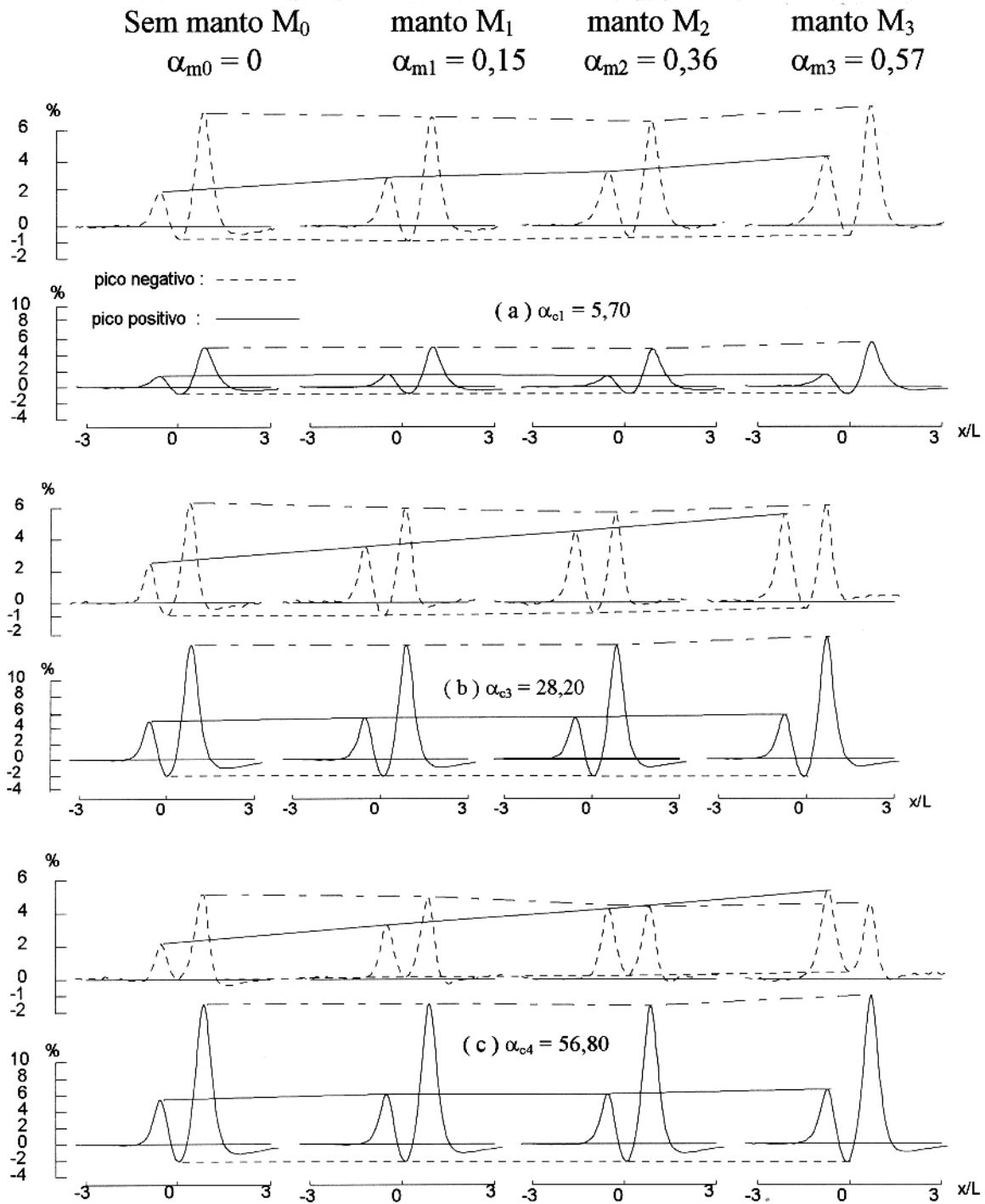


Figura 4.17 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$ , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$  e profundidade  $h_c/L = 0,2$  com arranjo vertical coaxial

ARRANJO VCA -  $h_c/L = 0,2$  -  $\theta = 45^\circ$ 

pico negativo: - - - - - , pico positivo a favor: - - - - - , pico positivo contra: ———

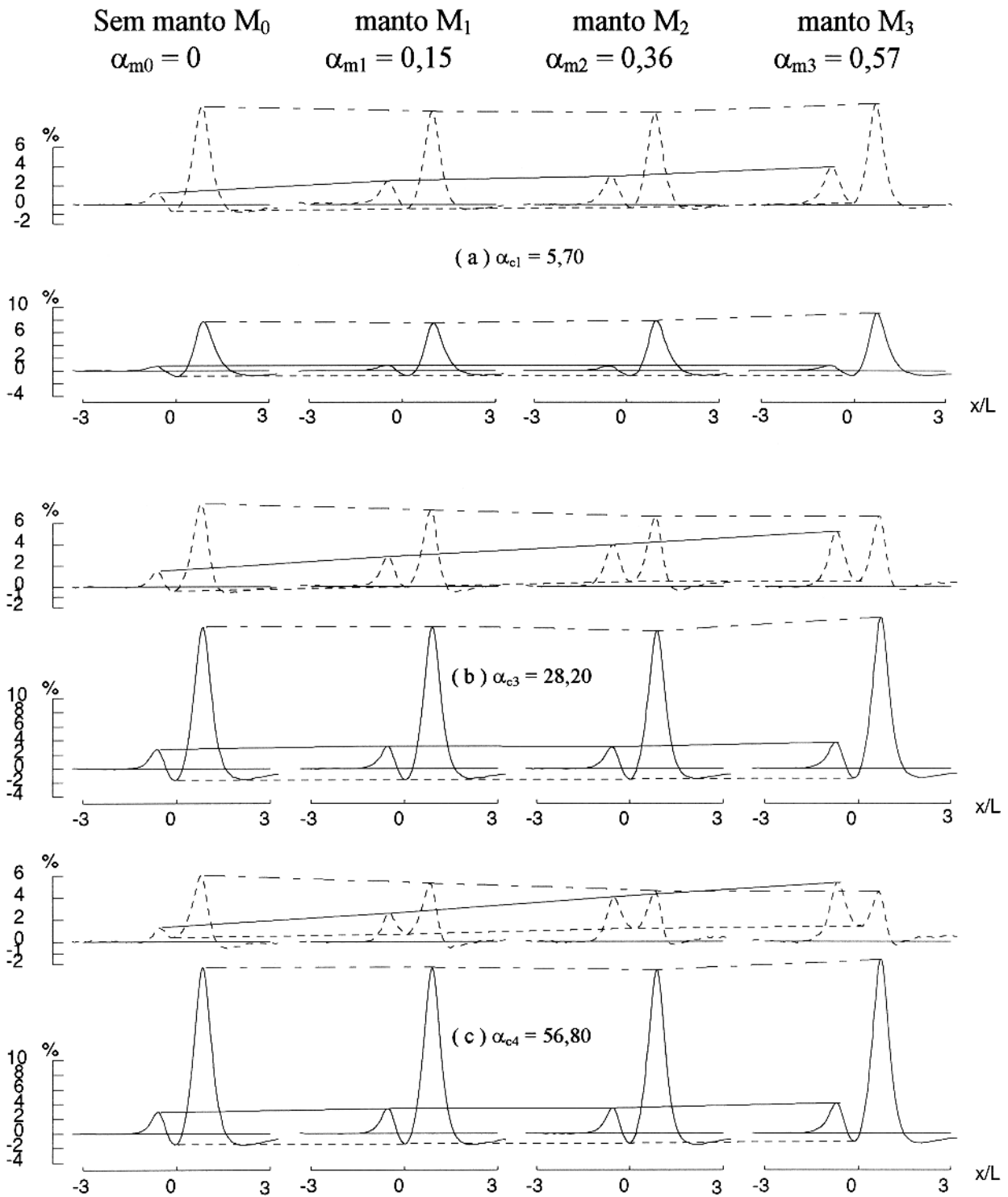


Figura 4.18 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$ , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$ , para  $\theta = 45^\circ$  e profundidade  $h_c/L = 0,2$  com arranjo vertical coaxial

ARRANJO VCA -  $h_c/L = 0,2$  -  $\theta = 30^\circ$ 

pico negativo: - - - - , pico positivo a favor: - - - , pico positivo contra: ———

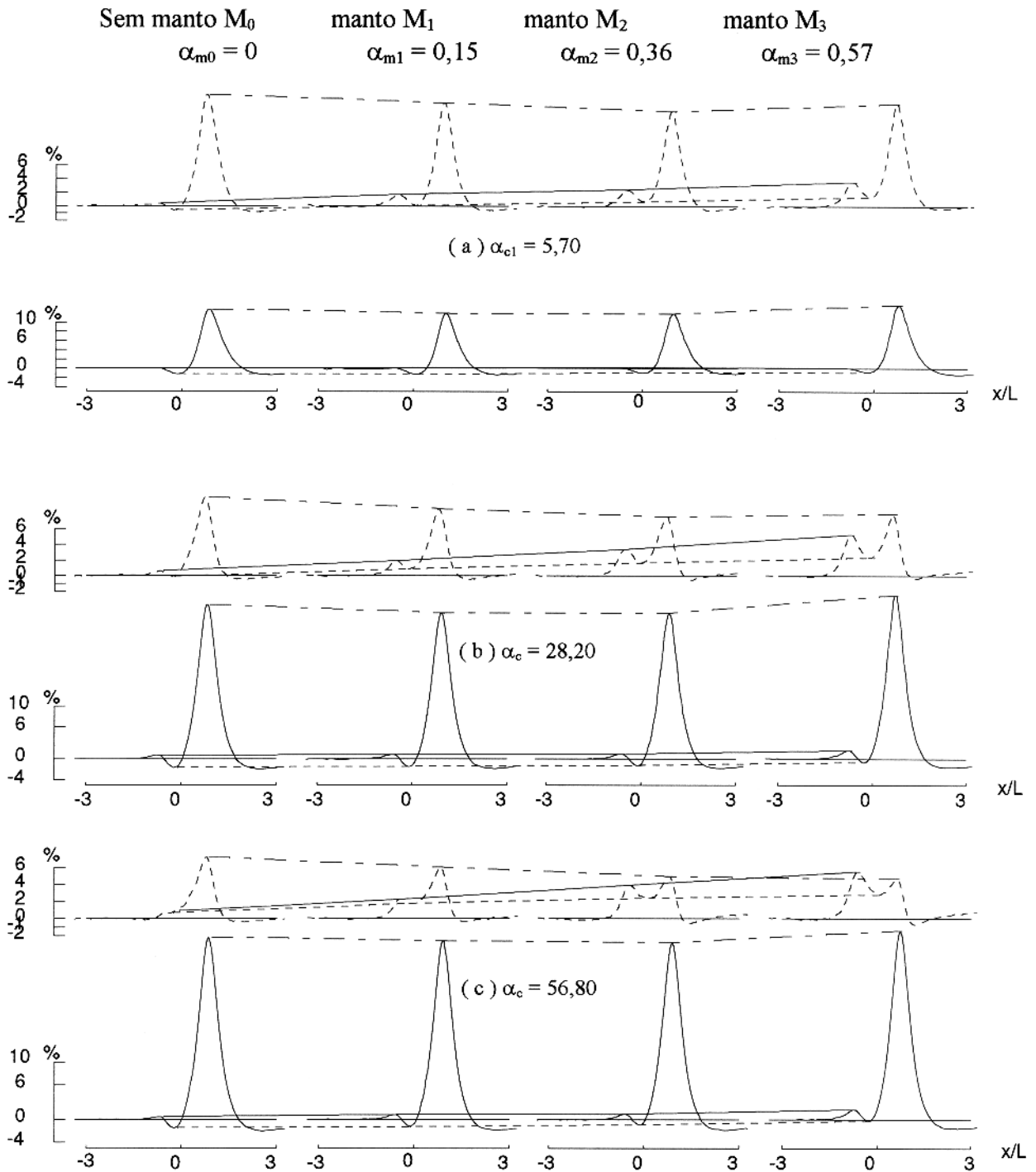


Figura 4.19 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$ , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$ , para  $\theta = 30^\circ$  e profundidade  $h_c/L = 0,2$  com arranjo vertical coaxial

ARRANJO VCA -  $\alpha_{c3} = 28,20$  -  $h_c/L = 0,3$ 

pico negativo: - - - - , pico positivo a favor: - - - - , pico positivo contra: ———

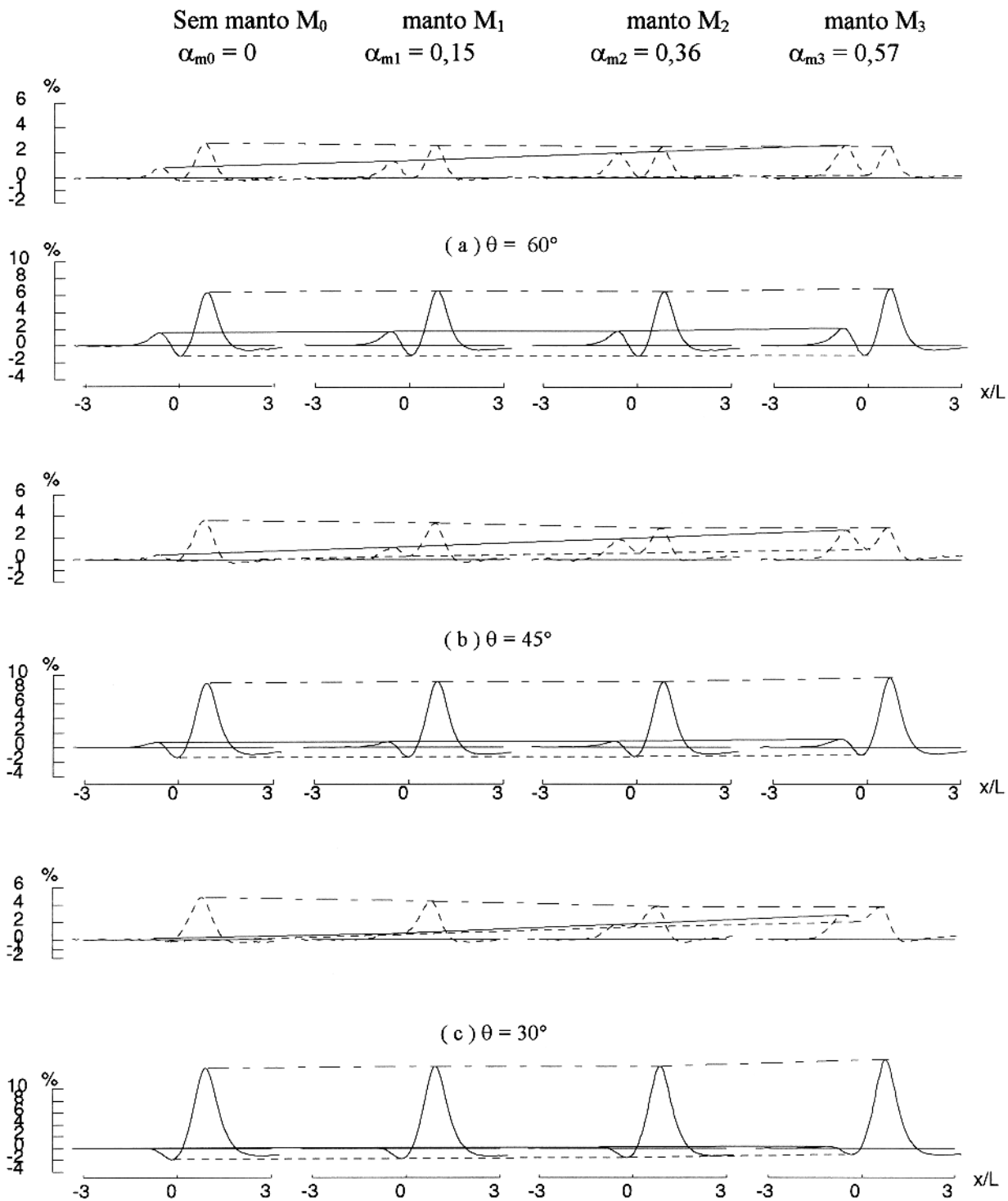


Figura 4.20 Efeito dos mantos nas respostas com mergulhos de (a)  $\theta = 60^\circ$ , (b)  $\theta = 45^\circ$  e (c)  $\theta = 30^\circ$ , para  $\alpha_{c3} = 28,20$  e profundidade  $h_c/L = 0,3$  com arranjo vertical coaxial

ARRANJO VCA -  $\alpha_{c3} = 28,20$  -  $\theta = 45^\circ$

pico negativo: - - - - , pico positivo a favor: - - - - , pico positivo contra: ———

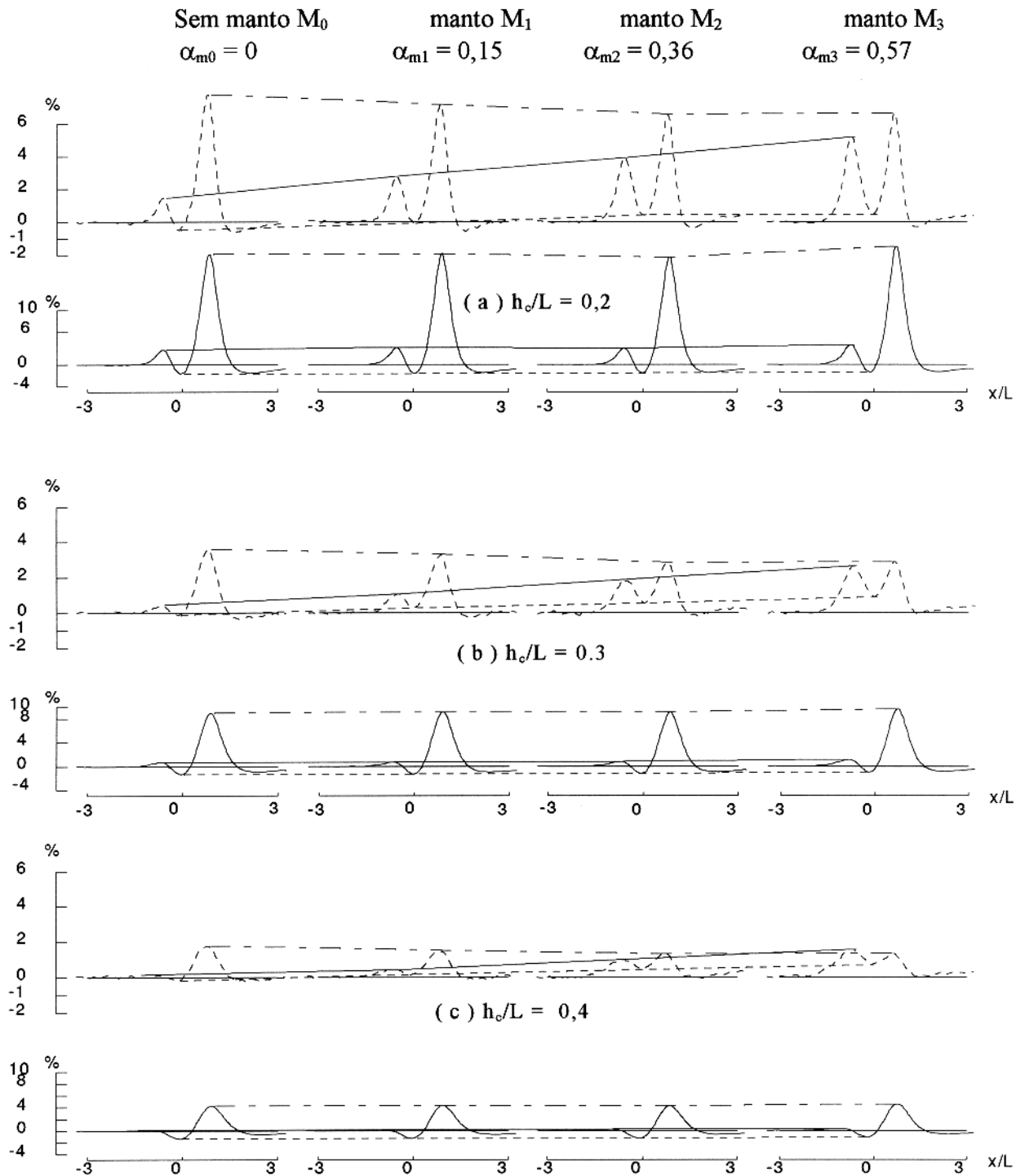


Figura 4.21 Efeito dos mantos nas respostas com profundidades de (a)  $h_c/L = 0,2$ , (b)  $h_c/L = 0,3$  e (c)  $h_c/L = 0,4$ , para  $\alpha_{c3} = 28,20$  e mergulho  $\theta = 45^\circ$  com arranjo vertical coaxial

## ARRANJO PERP

\_\_\_\_\_ EM FASE      - - - - QUADRATURA

$$\alpha_{c3} = 28,20 \quad , \quad h_c/L = 0.2, \quad \alpha_{m2} = 0,36$$

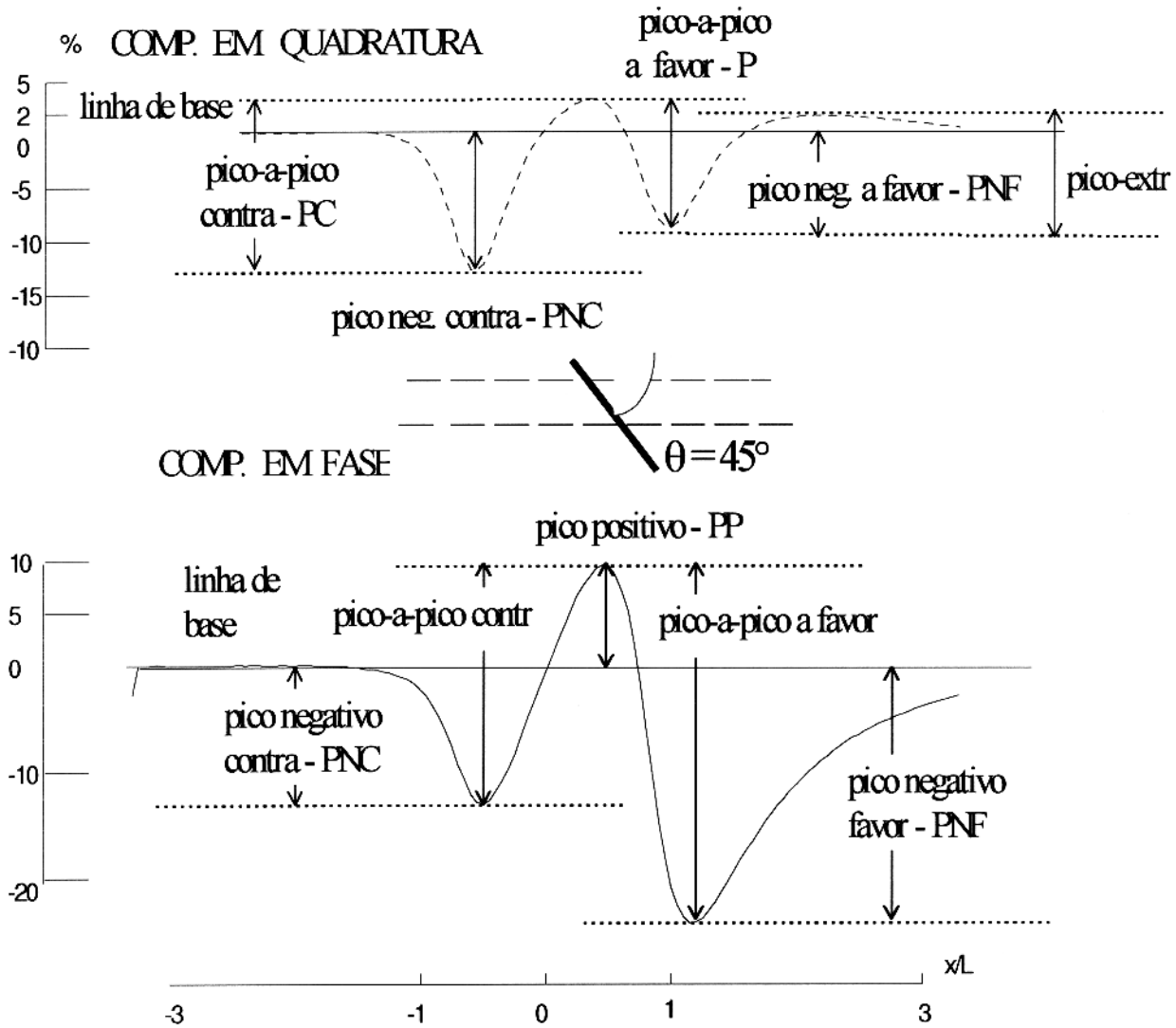


Figura 4.22 Definição de picos na presença de manto  $\alpha_m = 0,36$ , havendo formação de pico extra na quadratura. Não existindo pico-extra, os picos na quadratura são definidos da mesma maneira que a em fase.



ARRANJO PERP -  $h_c/L = 0.2$  -  $\theta = 90^\circ$

pico negativo: - - - - , pico positivo a favor: - - - , pico positivo contra: ———

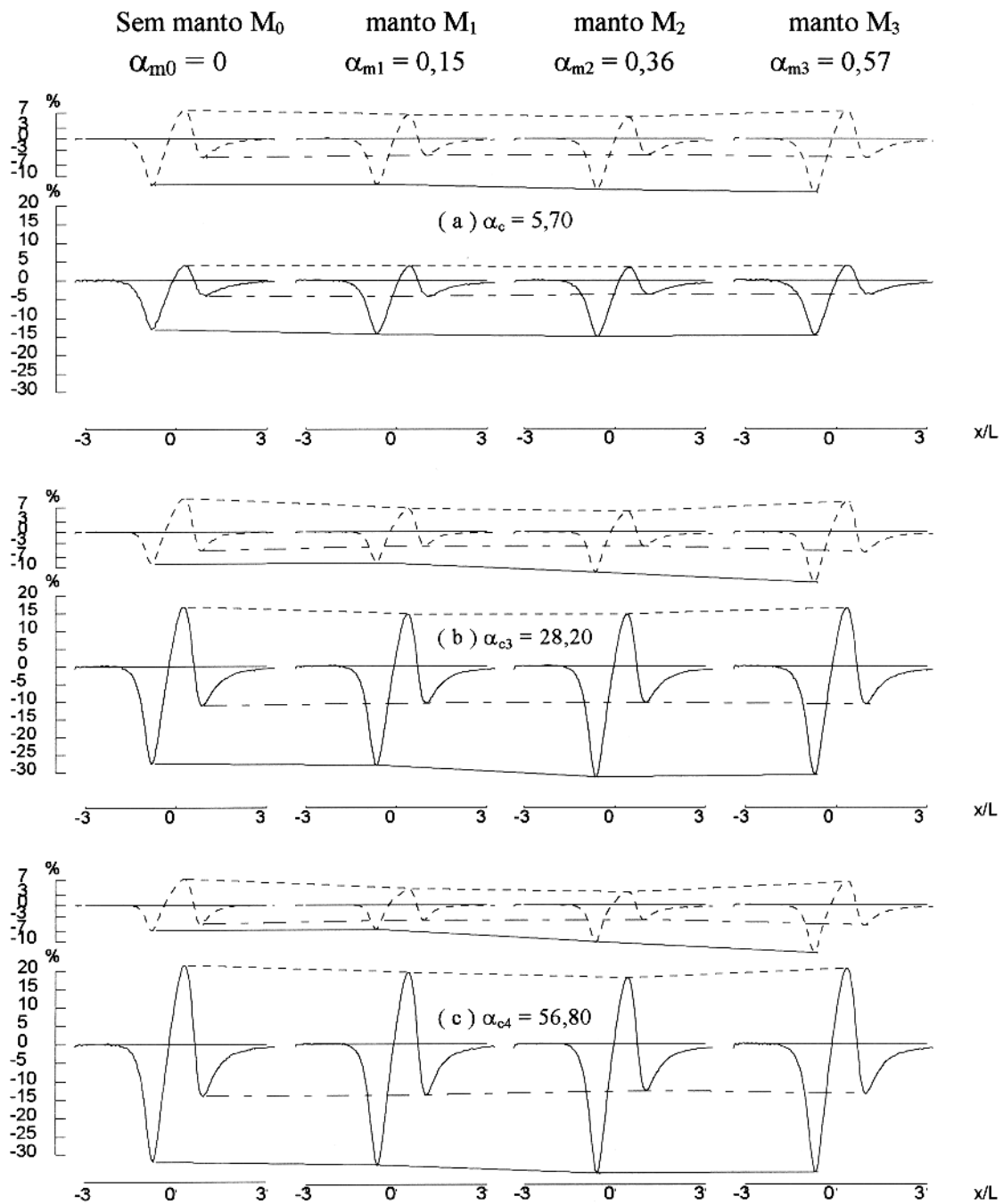


Figura 4.23 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$  , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$ , para  $\theta = 90^\circ$  e profundidade  $h_c/L = 0.2$  com arranjo mínimo

ARRANJO PERP -  $h_c/L = 0.2$  -  $\theta = 60^\circ$

pico negativo: - - - - , pico positivo a favor: - - - - , pico positivo contra: ———

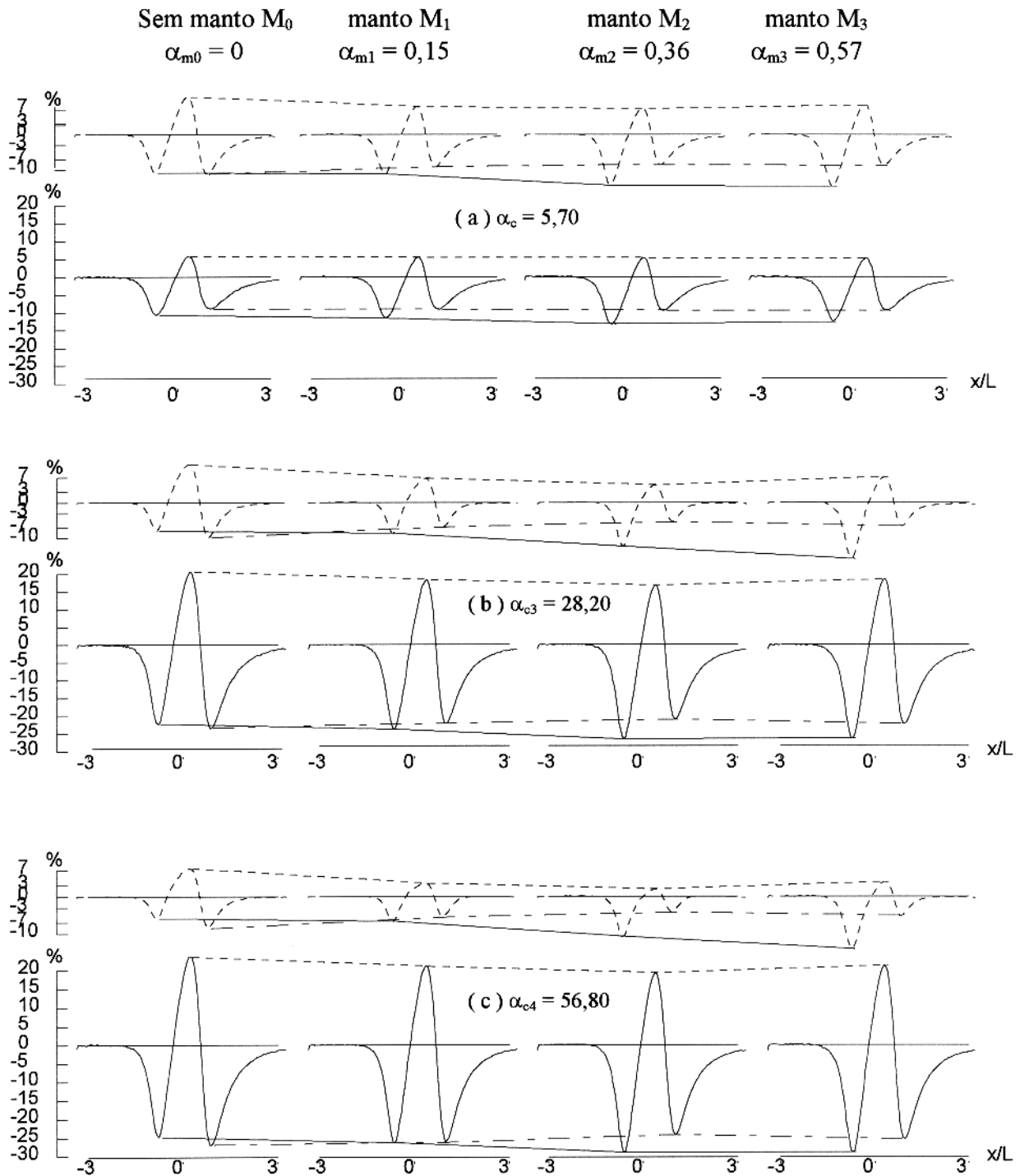


Figura 4.24 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$  , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$ , para  $\theta = 60^\circ$  e profundidade  $h_c/L = 0.2$  com arranjo mínimo

ARRANJO PERP -  $h_c/L = 0.2$  -  $\theta = 45^\circ$ 

pico negativo: - - - - , pico positivo a favor: - - - , pico positivo contra: ———

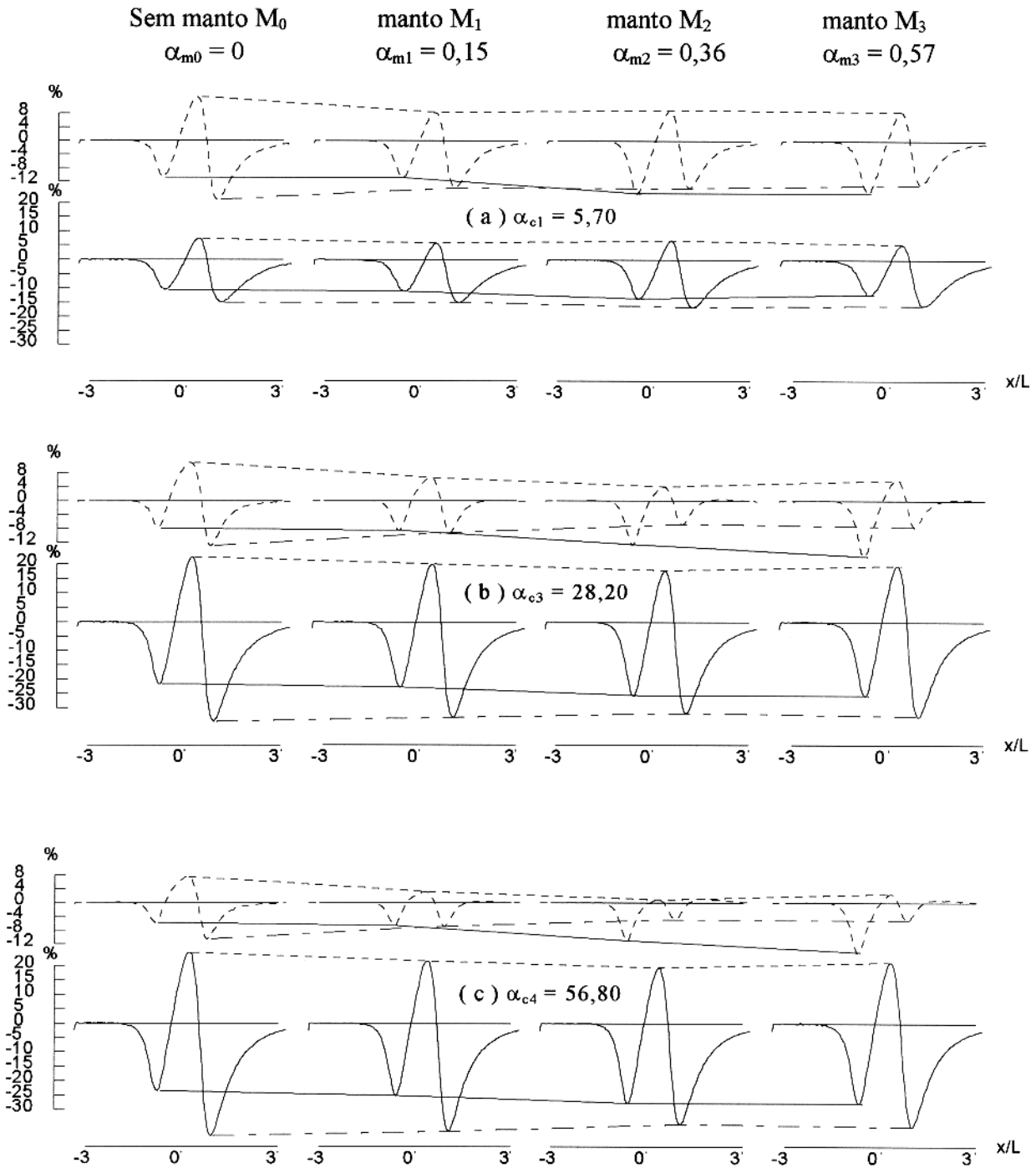


Figura 4.25 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$ , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$ , para  $\theta = 45^\circ$  e profundidade  $h_c/L = 0.2$  com arranjo mínimo

ARRANJO PERP -  $h_c/L = 0.2$  -  $\theta = 30^\circ$ 

pico negativo: - - - - , pico positivo a favor: - . - . , pico positivo contra: ———

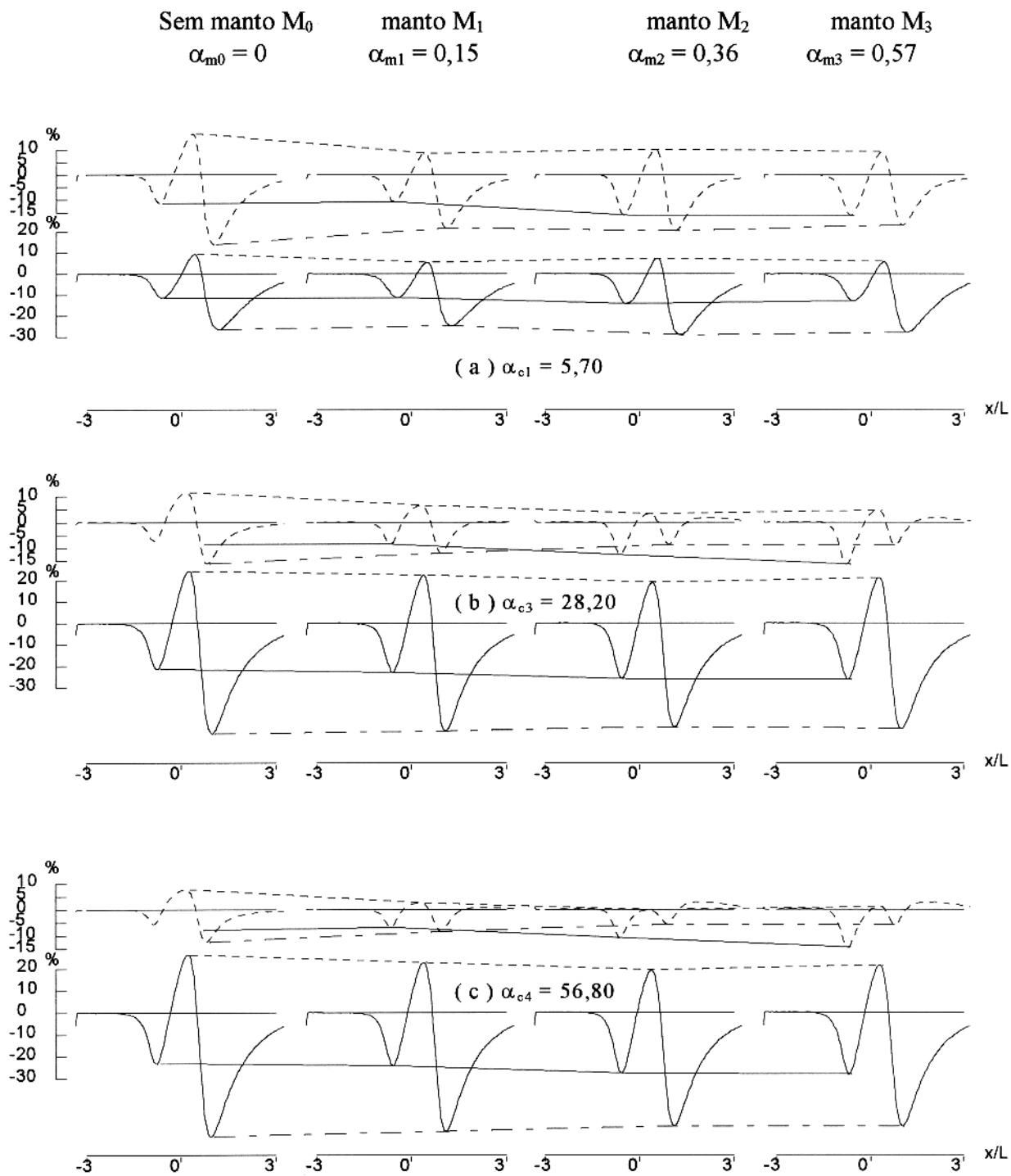


Figura 4.26 Efeito dos mantos nas respostas de condutores (a)  $\alpha_{c1} = 5,70$  , (b)  $\alpha_{c3} = 28,20$  e (c)  $\alpha_{c4} = 56,80$ , para  $\theta = 30^\circ$  e profundidade  $h_c/L = 0.2$  com arranjo mínimo

ARRANJO PERP -  $\alpha_c = 28,20$  -  $h_c/L = 0.2$

pico negativo: - - - - , pico positivo a favor: - - - - , pico positivo contra: ———

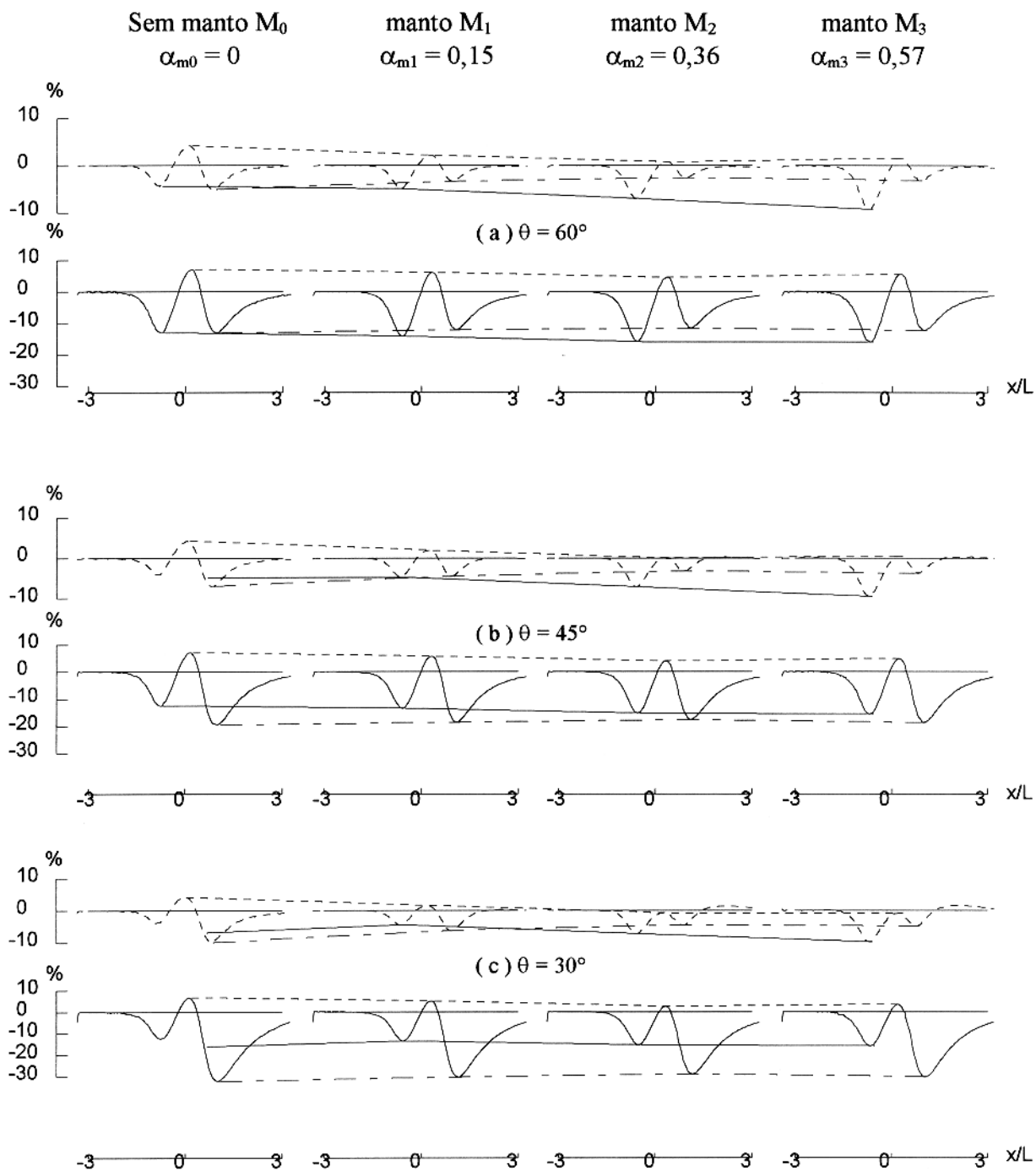


Figura 4.27 Efeito dos mantos nas respostas com mergulhos de (a)  $\theta = 60^\circ$ , (b)  $\theta = 45^\circ$  e (c)  $\theta = 30^\circ$ , para  $\alpha_{c3} = 28,20$  e profundidade  $h_c/L = 0.3$  com arranjo mínimo

ARRANJO PERP -  $\alpha_{c3} = 28,20$  -  $\theta = 45^\circ$

pico negativo: - - - - , pico positivo a favor: - - - - , pico positivo contra: ———

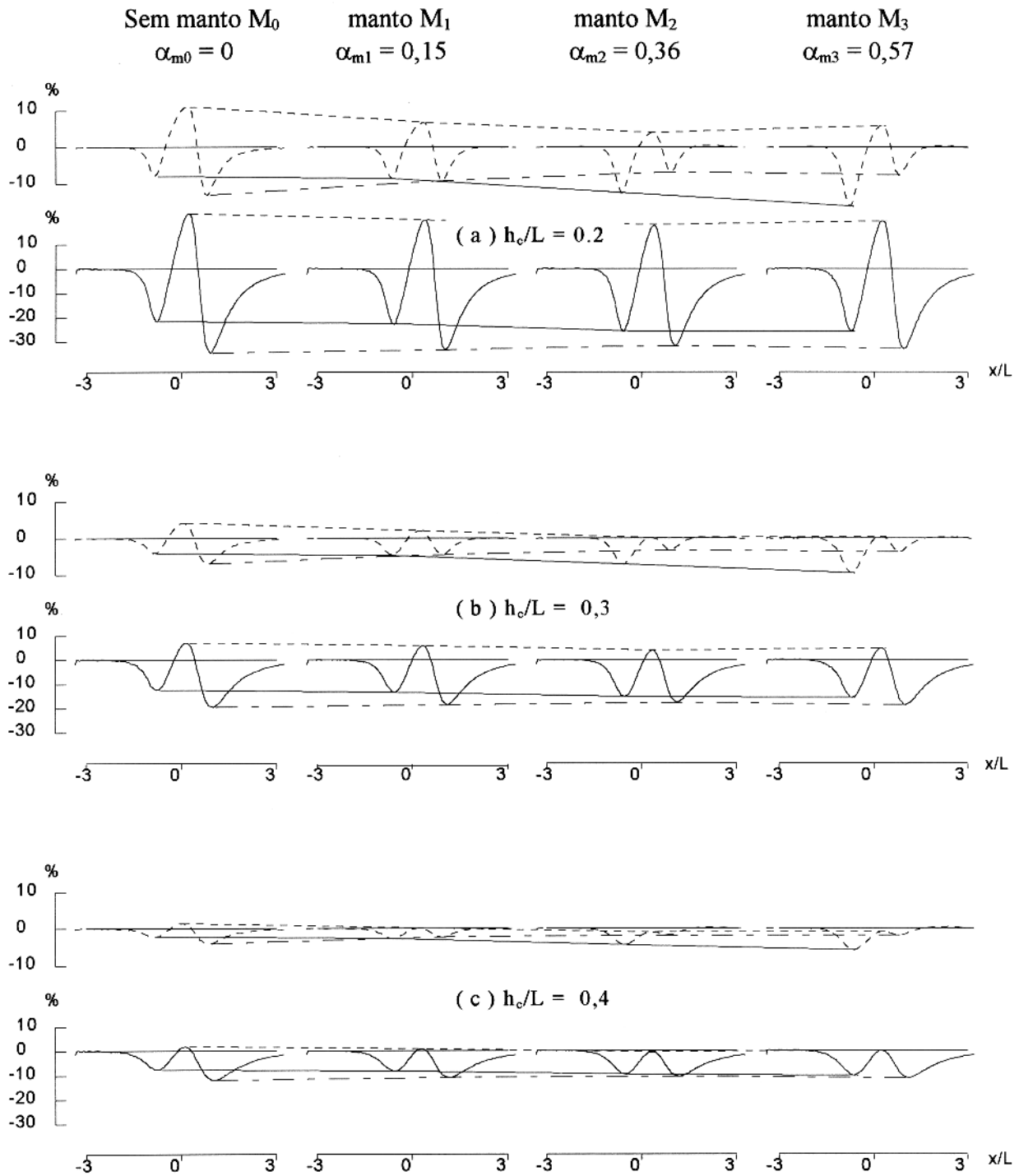


Figura 4.28 Efeito dos mantos nas respostas com profundidade (a)  $h_c/L = 0,2$ , (b)  $h_c/L = 0,3$  e (c)  $h_c/L = 0,4$  para  $\alpha_c = 28,20$  e mergulho  $\theta = 45^\circ$  com arranjo mínimo

## ARRANJO HCP - PICO EXTRA

manto  $M_2$  ( $\alpha_{m2} = 0,36$ )    manto  $M_3$  ( $\alpha_{m3} = 0,57$ )

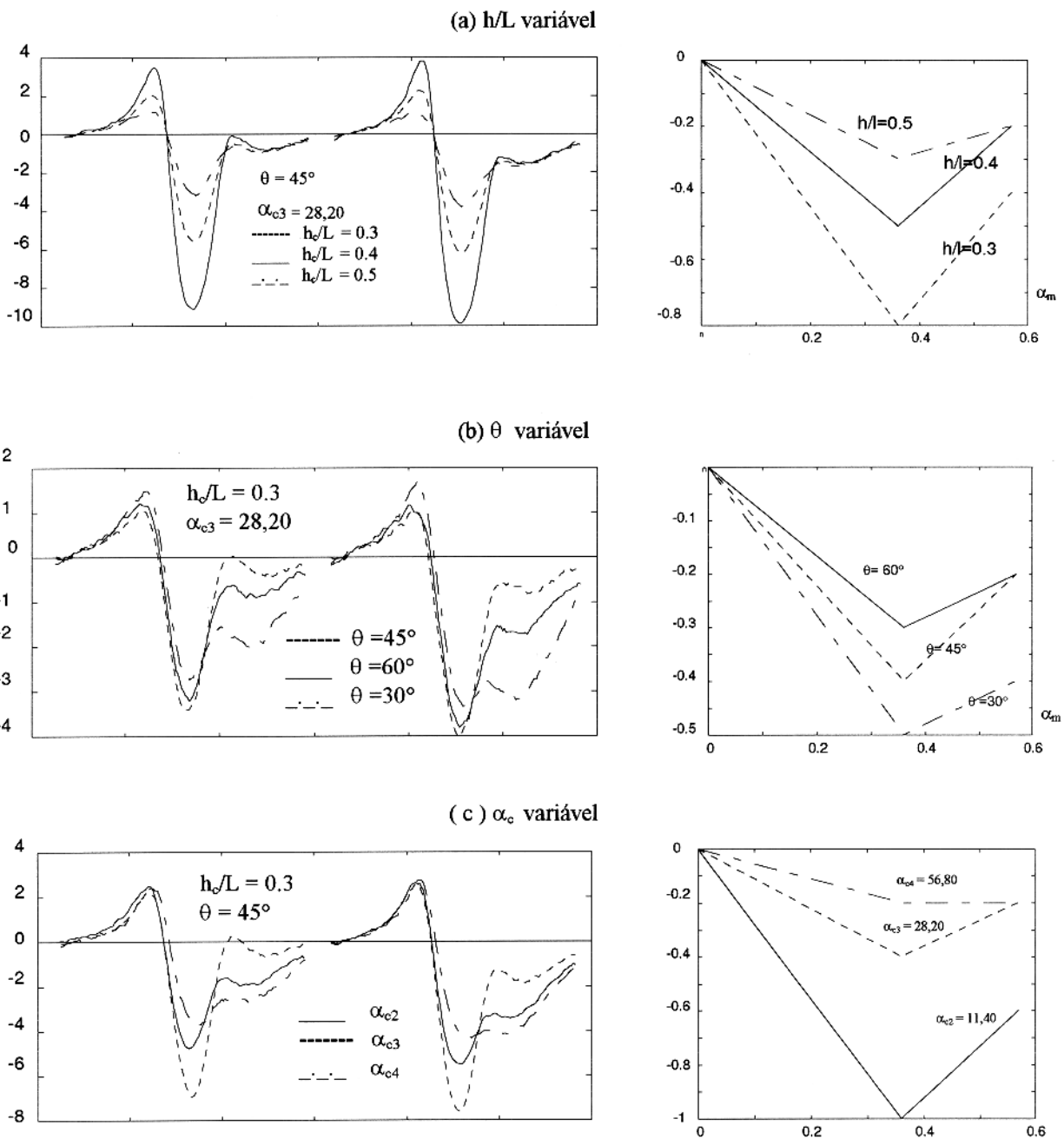


Figura 4.29 modificação nos valores de pico extra com a variação do manto (a)  $h/L$  variável, (b)  $\theta$  variável (c)  $\alpha_c$  variável

## ARRANJO VCP - PICO EXTRA

manto  $M_2$  ( $\alpha_{m2} = 0,36$ )    manto  $M_3$  ( $\alpha_{m3} = 0,57$ )

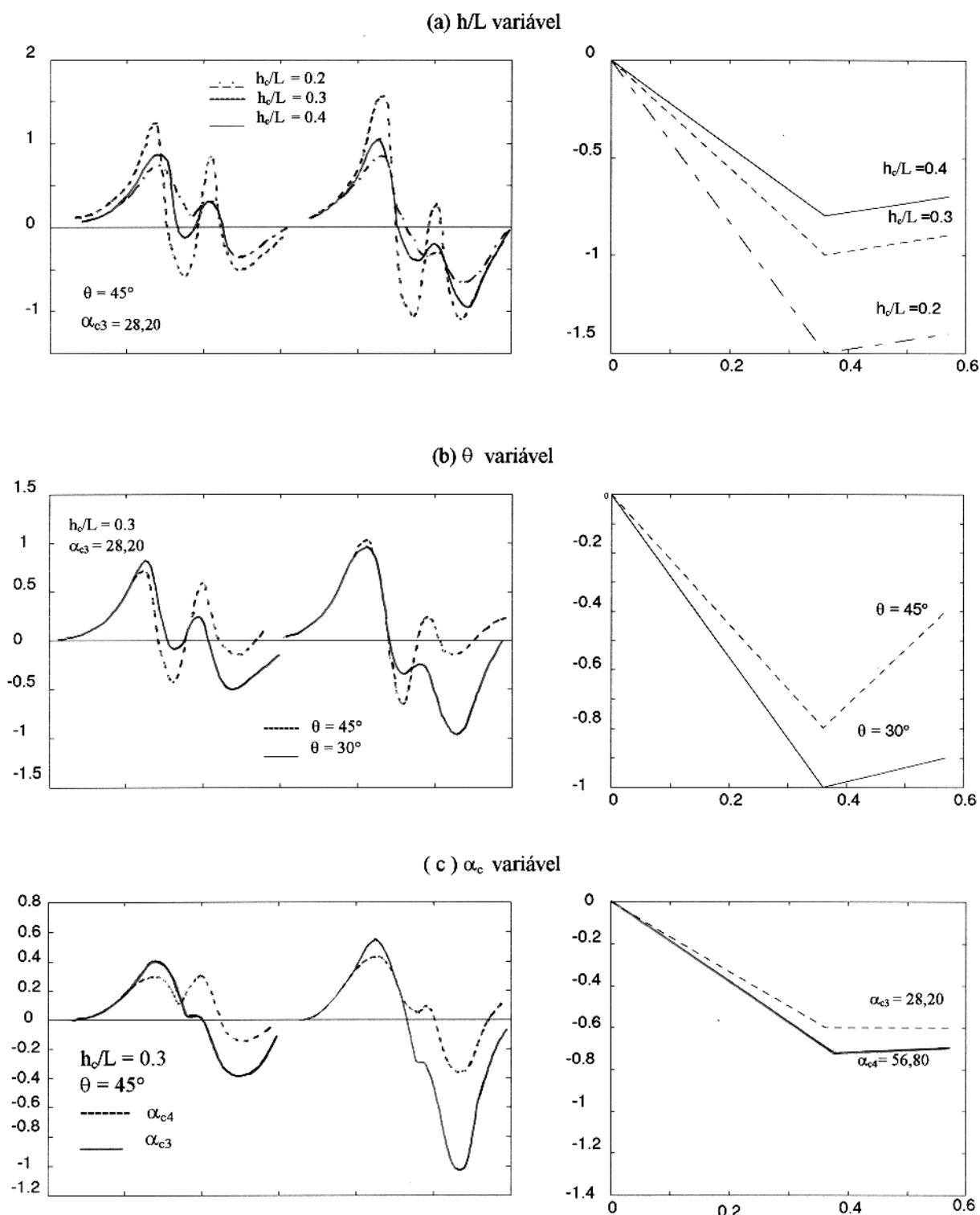


Figura 4.30 Modificação nos valores de pico extra com a variação do manto (a)  $h/L$  variável, (b)  $\theta$  variável (c)  $\alpha_c$  variável



## ARRANJO PERP - PICO EXTRA

manto  $M_2$  ( $\alpha_{m2} = 0,36$ )    manto  $M_3$  ( $\alpha_{m3} = 0,57$ )

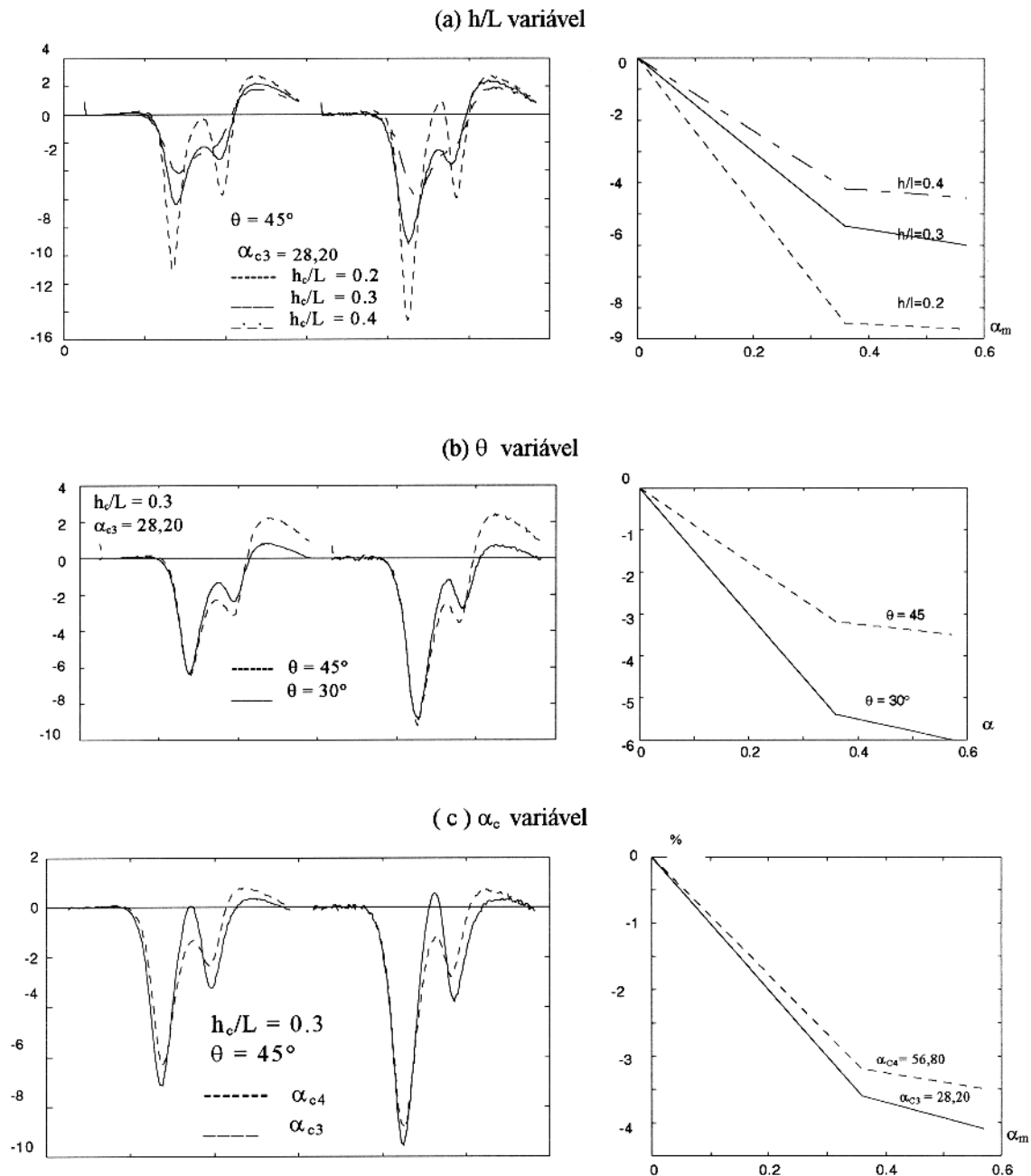


Figura 4.31 modificação nos valores de pico extra com a variação do manto (a)  $h/L$  variável, (b)  $\theta$  variável (c)  $\alpha_c$  variável

## 5 - ANÁLISE DE RESULTADOS

Na análise dos resultados procura mostrar as variações dos perfis , através de gráficos que representam os efeitos das variações dos parâmetros. A seguir tem-se a análise dos efeitos dos parâmetros.

### 5.1 - EFEITOS RELACIONADOS AO PARÂMETRO DE RESPOSTA DO CORPO ( $\alpha_c$ )

Nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 tem-se o comportamento dos valores de pico-a-pico em função da variação de  $\alpha_c$  , para vários mergulhos  $\theta$  . Da análise dessas figuras pode-se observar:

Os arranjos HCP, VCP , VCA e PERP, possuem comportamentos semelhantes quanto aos valores de pico-a-pico em função de  $\alpha_c$  . Pode-se resumir este comportamento como se segue abaixo:

#### a) arranjo HCP ( Ver Figuras 5.1 e 5.2)

- Componente em quadratura: com o aumento do número de indução do corpo ( $\alpha_c$ ) independente de ter ou não manto, o pico-a-pico contra , de início aumenta, no entanto, com a continuação do aumento de  $\alpha_c$  , ele diminui . Quanto ao pico-a-pico a favor tem-se que quando o mergulho do corpo é de  $\theta = 90^\circ$  , há de início uma aumento quando  $\alpha_c$  , com a continuação, este comportamento se inverte, havendo diminuição. Para os outros mergulhos só ocorre diminuição do pico-a-pico a favor;
- Componente em fase: com o aumento do número de indução do corpo ( $\alpha_c$ ) independente de ter ou não manto e do mergulho  $\theta$  do corpo, o pico-a-pico contra , aumenta . As mesmas alterações são observadas para o pico-a-pico a favor.
- Quando o mergulho do corpo é de  $\theta = 90^\circ$ , para qualquer  $\alpha_c$  , com o aumento do número de indução do manto  $\alpha_m$  , há aumento nos valores de pico-a-pico em relação a ausência de manto ( $M_0$  ou ar-livre). No entanto, quando se diminui o mergulho  $\theta$  , há comportamento distinto para os pico a favor e o contra. O pico contra sempre aumenta, enquanto que o pico a favor tem este aumento diminuído, até que em vez de aumento, ocorre diminuição. Ver Figura 5.2. Este comportamento é acentuado para maiores valores de  $\alpha_c$  e menores valores de mergulho  $\theta$  .

b) Os outros arranjos

- Comparando a Figuras 5.1 com 5.3, 5.6 e 5.7 verifica-se que o comportamento dos picos contra , com a variação de  $\alpha_c$  , é o mesmo para os arranjos HCP , VCP, VCA e PERP. Da mesma forma se conclui para o pico a favor, quando se compara a Figura 5.2 com 5.4, 5.5 e 5.8.

## 5.2 - EFEITOS RELACIONADOS A PROFUNDIDADE DO CORPO ( $h_c/L$ )

Nas Figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 tem-se o comportamento dos valores de pico a pico em função de  $h_c/L$  .

As componentes em fase e quadratura possuem a mesma forma de decaimento com a profundidade, tanto o pico contra como o a favor.

Para qualquer profundidade ( $h_c/L$  ) estudada os valores de pico-a-pico contra para a quadratura aumentam com o aumento do número de indução do manto. Para o valores de pico-a-pico a favor há diminuição

## 5.3 - EFEITOS RELACIONADOS AO MERGULHO ( $\theta$ )

Nas Figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 tem-se o comportamento dos valores de pico-a-pico em função de  $\theta$  . Da análise destas figuras pode-se concluir:

a) arranjo HCP

- Componente em quadratura: com a diminuição do mergulho ( $\theta$ ) , o pico-a-pico contra aumenta, independente de ter ou não manto. Quanto ao pico-a-pico a favor, este, quando não há manto, aumenta com a diminuição de  $\theta$ , porém, havendo manto, este comportamento, dependendo dos números de indução do corpo do ( $\alpha_c$ ) e do manto ( $\alpha_m$ ) , vai gradualmente diminuindo, até que ocorre diminuição. Ver Figura 5.13
- Componente em fase: para o pico-a-pico contra, pela Figura 5.13, observa-se dois comportamentos distintos, dependendo do número de indução do corpo  $\alpha_c$  : para corpos com baixos valores de  $\alpha_c$  (= 5,70) , com a diminuição do mergulho, ocorre um aumento no pico-a-pico contra; para corpos com  $\alpha_c$  (= 56,80) relativamente altos, ocorre, de

início uma diminuição, mas com a diminuição de  $\theta$ , prevalece o aumento do pico-a-pico contra. Para o pico-a-pico a favor, há sempre aumento do mesmo, quando se diminui o mergulho. Ver Figura 5.13.

b) Arranjo VCP

- Componente em quadratura: com a diminuição do mergulho ( $\theta$ ), o pico-a-pico contra diminui, independente de ter ou não manto, no entanto a presença do manto atenua este efeito. Quanto ao pico-a-pico a favor, este, aumenta com a diminuição de  $\theta$ , porém, havendo manto, este comportamento, dependendo dos números de indução do corpo do ( $\alpha_c$ ) e do manto ( $\alpha_m$ ), vai gradualmente diminuindo, até que em vez de aumento no valor de pico ocorre é diminuição. Ver Figura 5.14.
- Componente em fase: para o pico-a-pico contra, pela Figura 5.14, com a diminuição de  $\theta$ , há sempre diminuição do pico-a-pico contra. Para o pico-a-pico a favor, há sempre aumento do mesmo, quando se diminui o mergulho. Ver Figura 5.13.

c) Arranjo VCA

- Há o mesmo comportamento descrito para o arranjo VCP, conforme se verifica pela comparação direta das Figuras 5.14 e 5.15.

d) arranjo PERP

- Componente em quadratura: com a diminuição do mergulho ( $\theta$ ), o pico-a-pico contra aumenta, na ausência de manto, aumenta, sendo este aumento mais acentuado para corpos de menor número de indução. Havendo manto, dependendo dos números de indução do corpo ( $\alpha_c$ ), do manto ( $\alpha_m$ ), há uma mudança gradual de comportamento, conforme  $\alpha_c$  for aumentando; assim, para valores baixos de  $\alpha_c$ , há aumento no pico-a-pico contra com a diminuição de  $\theta$ , enquanto que para altos valores de  $\alpha_c$  ocorre diminuição. Quanto ao pico-a-pico a favor, este segue o mesmo comportamento descrito para o pico-a-pico contra. Ver Figura 5.16.
- Componente em fase: para o pico-a-pico contra há, independente de haver ou não manto, inicialmente, uma diminuição de valor, contudo, prosseguindo na diminuição do mergulho  $\theta$ , este comportamento se inverte, havendo aumento. Para o pico-a-pico a favor, há sempre aumento do mesmo, quando se diminui o mergulho. Ver Figura 5.16.

## 5.5 - CAUSAS FÍSICAS DAS TRANSFORMAÇÕES DAS ANOMALIAS EM

- a) O campo primário, ao atravessar o manto ôhmico, sofre rotação de fase e uma atenuação. O mesmo ocorrendo com o campo secundário, antes de chegar no receptor.

A atenuação e a rotação de fase que os campos magnéticos sofrem ao atravessar o manto podem ser avaliadas pelas relações  $1/e^{\delta}$  e  $180^{\circ}/\delta$ , dos seus valores iniciais, respectivamente, para cada metro de espessura percorrido no manto ( $\delta$  é o "skin depth", ver equação 1.9).

- b) No manto, que é considerado um meio homogêneo, há indução de correntes elétricas, que giram em planos horizontais. Essas correntes interagem com as que são induzidas no corpo. A medida que se diminui o mergulho do corpo esta interação vai aumentando, o que explica o surgimento do pico-extra na quadratura e outros fenômenos em corpos menos inclinados. Quando o corpo fica mais vertical, essa interação torna-se mínima, uma vez que no corpo as correntes se distribuem em um plano vertical enquanto que no manto elas estão na horizontal.

- c) Redistribuição de correntes

Quando um corpo de condutividade maior é colocado num manto parcialmente condutivo, há uma canalização da corrente para o corpo, havendo, portanto, uma maior concentração de correntes no corpo, produzindo um aumento da densidade de corrente, logo a anomalia aumenta, girando a fase no sentido anti-horário.

Observa-se que estes dois efeitos, atenuação da onda EM e o acanalemnto das correntes do manto para o corpo-alvo, produzem resultados antagônicos; enquanto um diminui a anomalia o outro a aumenta; portanto, o resultado global vai depender do saldo destes dois efeitos. Estes

efeitos dependem do arranjo de bobinas, distâncias físicas entre as bobinas e o corpo-alvo, mergulho do corpo e contraste de condutividade entre o corpo e o manto.

## ARRANJO HCP - PICO-A-PICO CONTRA

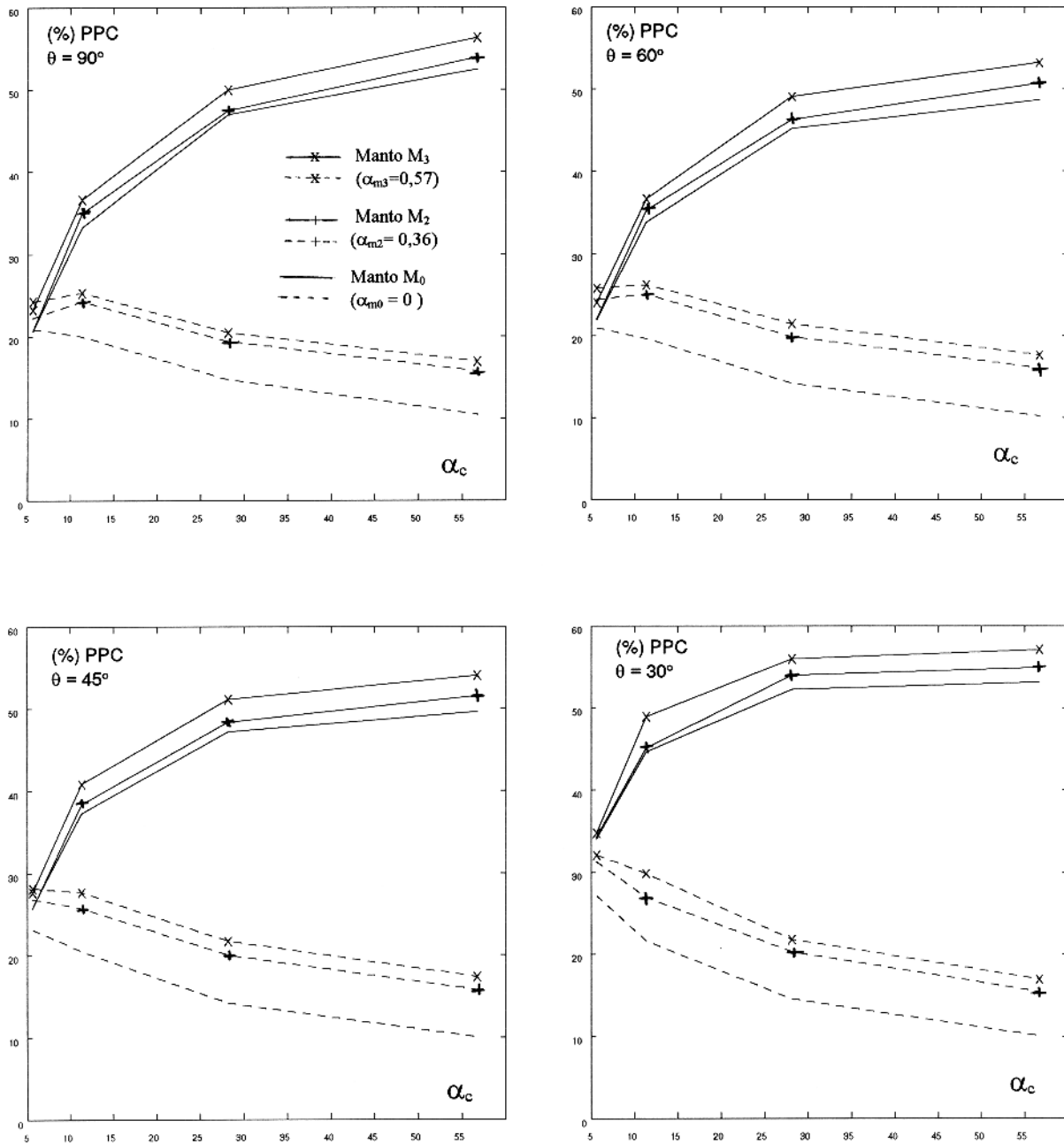
Em fase : ——— , Quadratura: ..... ,  $h/L=0.2$ 

Figura: 5.1 Variação dos valores de pico-a-pico contra (PPC) das componentes com o número de indução do corpo ( $\alpha_c$ )

## ARRANJO HCP - PICO-A-PICO FAVOR

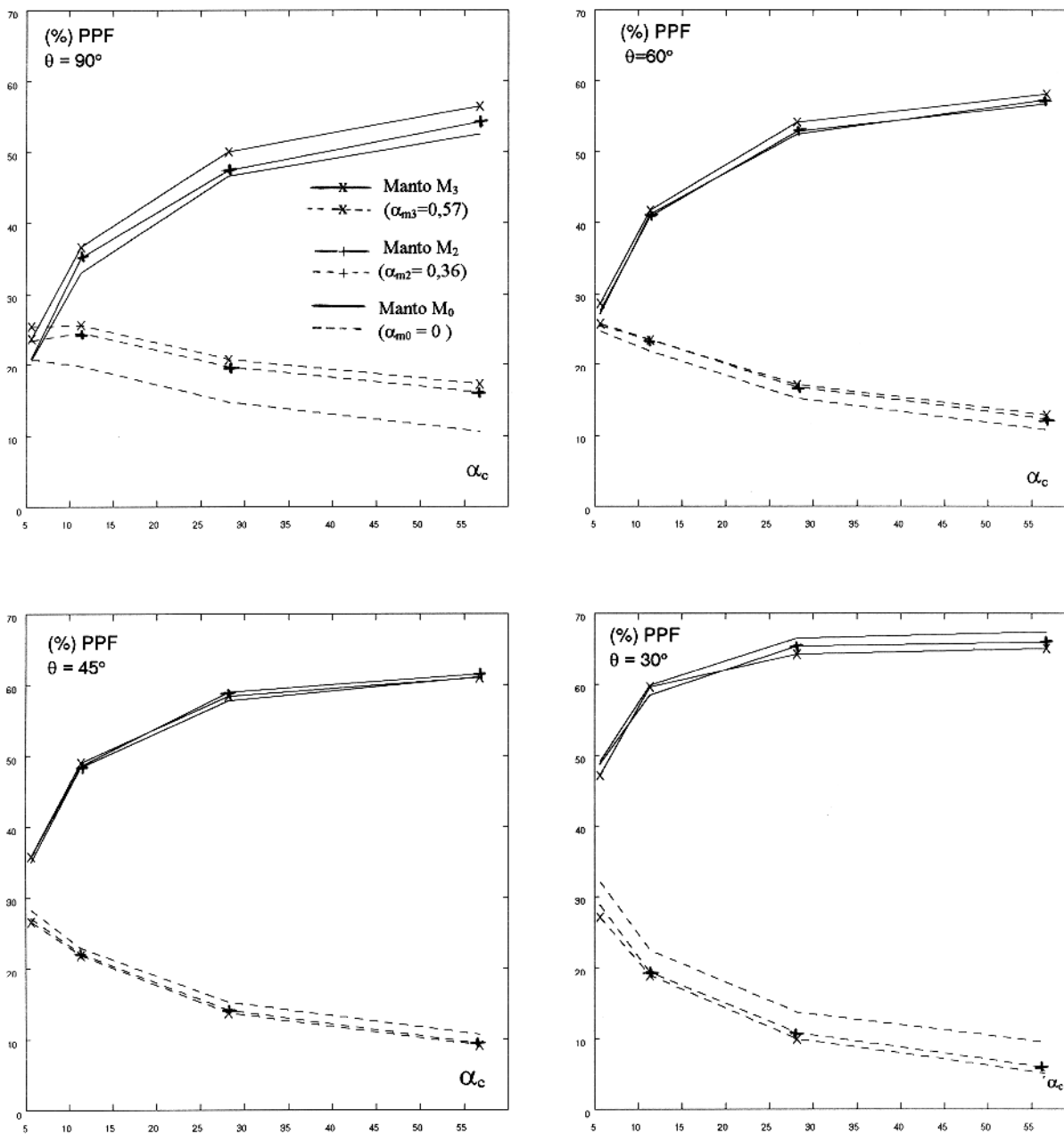
Em fase : ——— , Quadratura: ..... ,  $h_p/L=0.2$ 

Figura: 5.2 Variação dos valores de pico-a-pico favor (PPF) das componentes com o número de indução do corpo ( $\alpha_c$ )



## ARRANJO VCP - PICO-A-PICO CONTRA

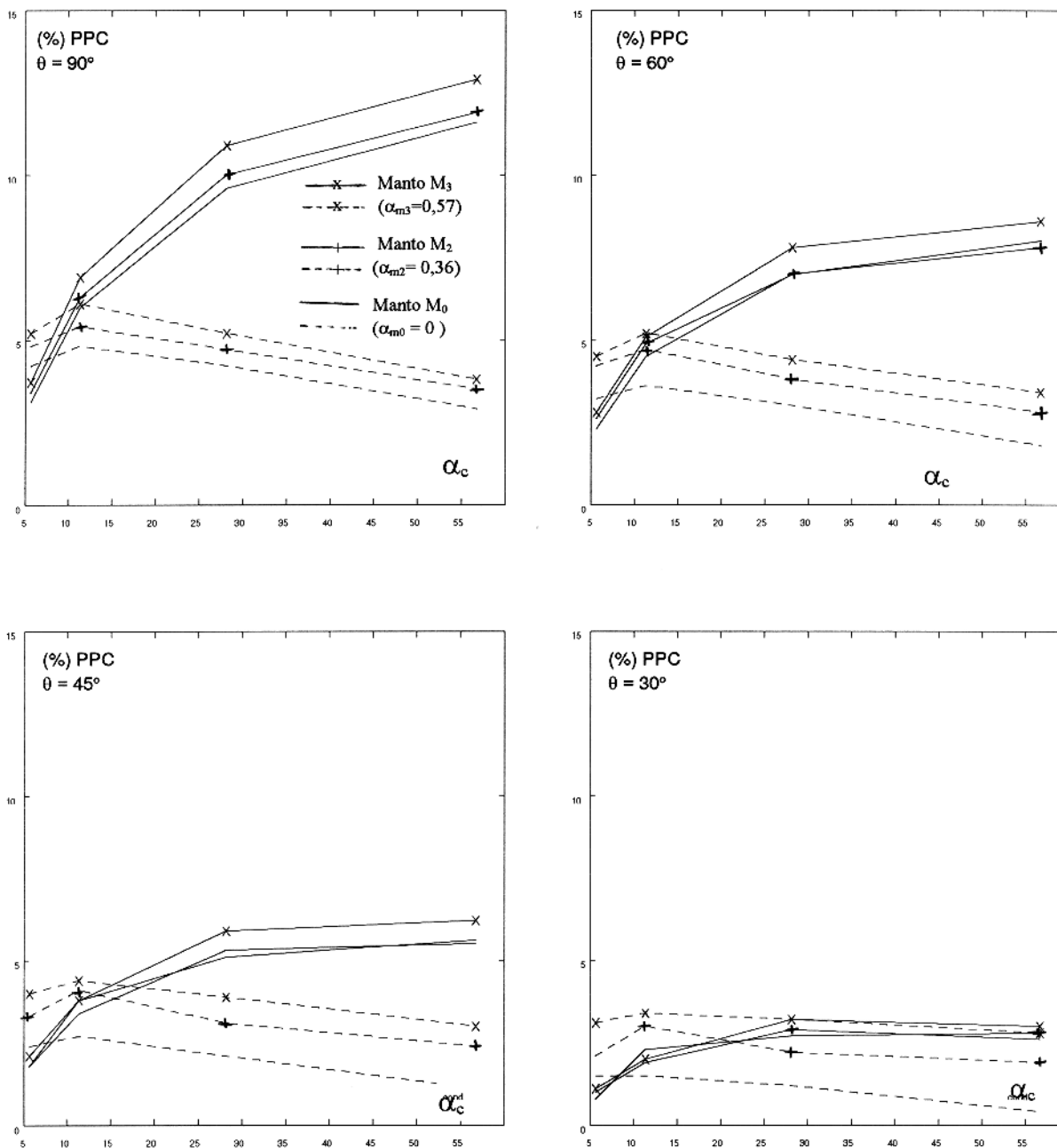
Em fase : ——— , Quadratura: ..... ,  $h_o/L=0.2$ 

Figura: 5.3 Variação dos valores de pico-a-pico contra (PPC) das componentes com o número de indução do corpo ( $\alpha_c$ )

## ARRANJO VCP- PICO-A-PICO A FAVOR

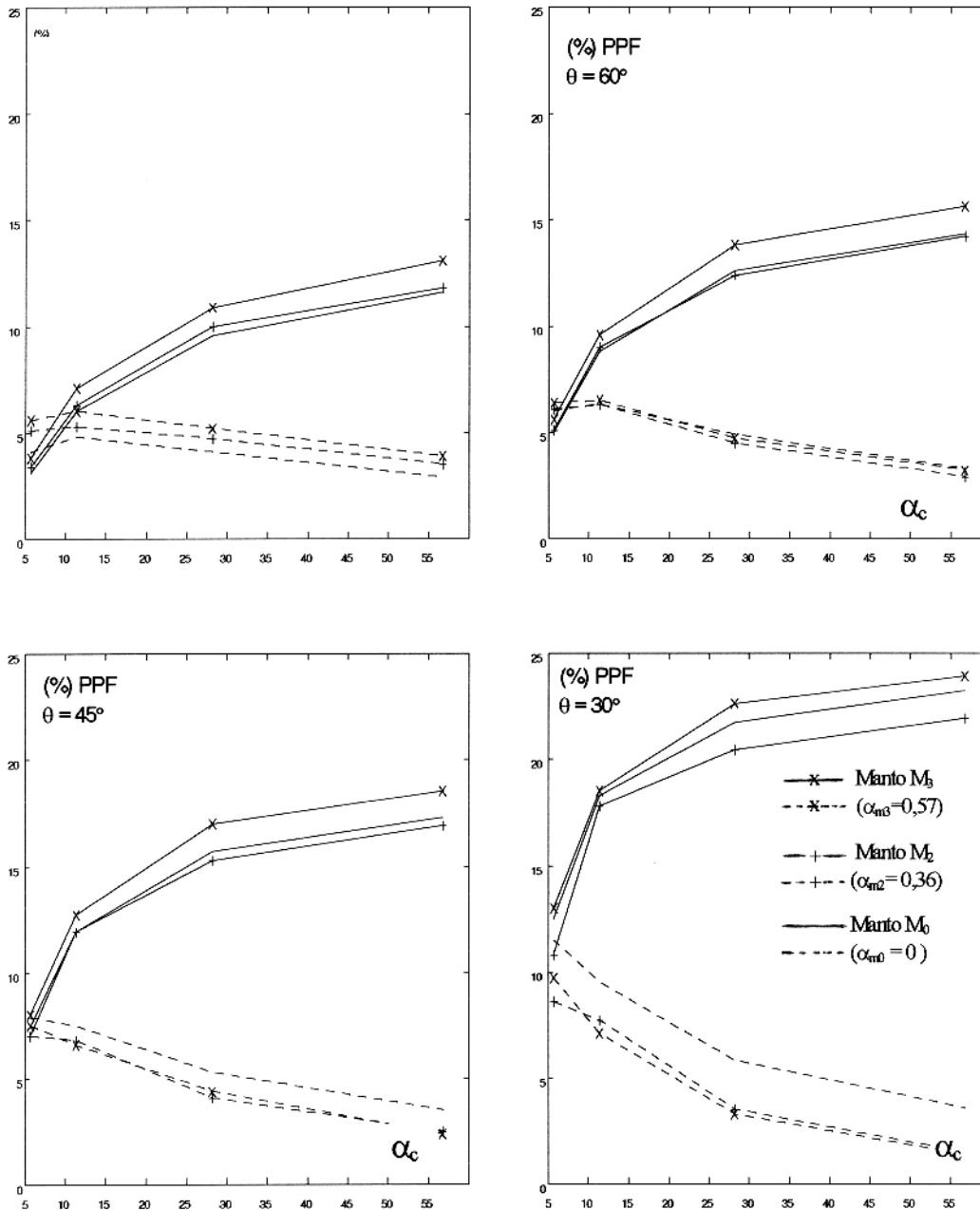
Em fase : ———, Quadratura: .....;  $h_o/L=0.2$ 

Figura: 5.4 Variação dos valores de pico-a-pico a favor (PPF) das componentes com o número de indução do corpo ( $\alpha_c$ )

## ARRANJO VCA- PICO-A-PICO A FAVOR

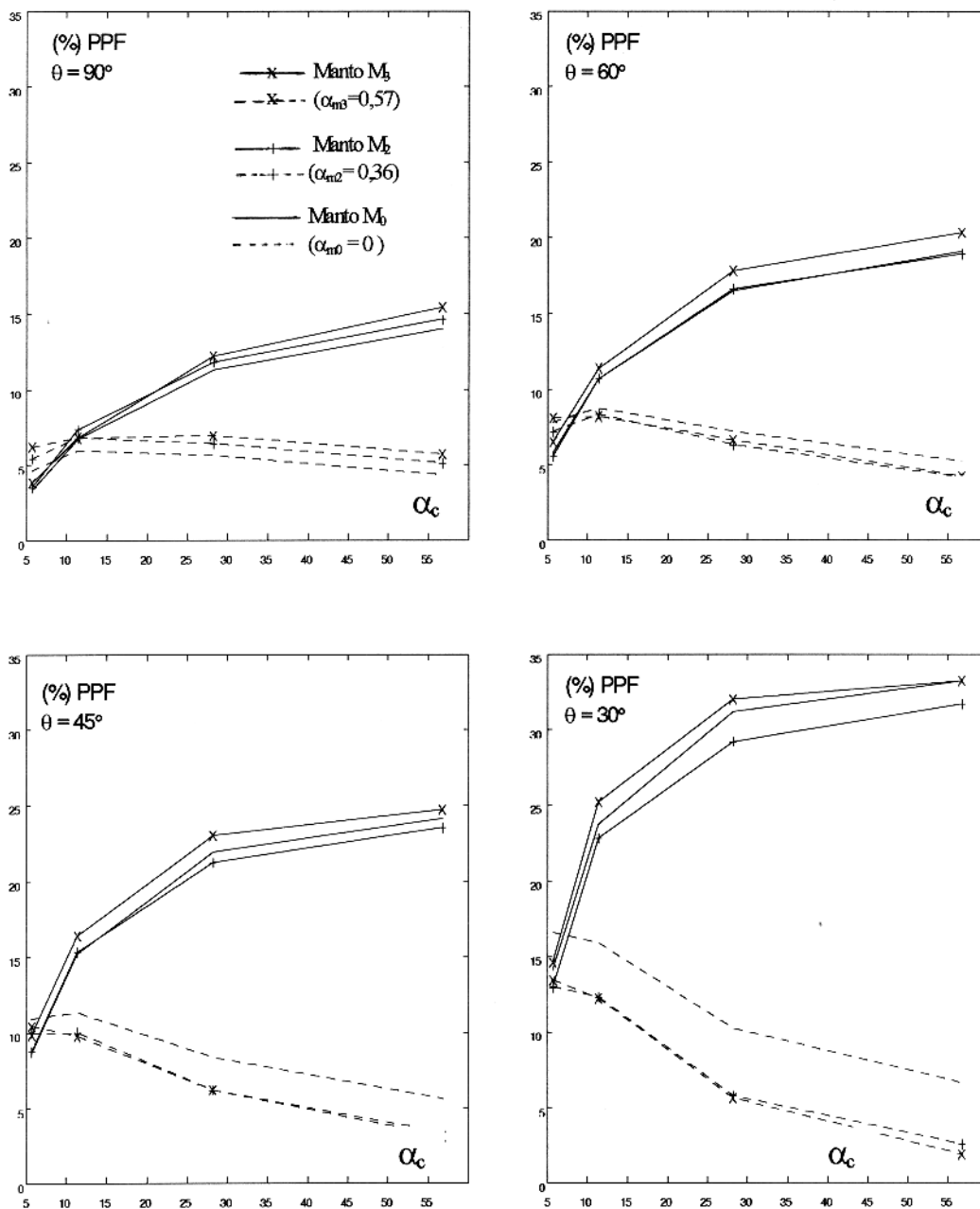
Em fase : ———— , Quadratura: ..... ,  $h_c/L=0.2$ 

Figura: 5.5 Variação dos valores de pico-a-pico a favor (PPF) das componentes com o número de indução do corpo ( $\alpha_c$ )

## ARRANJO VCA - PICO-A-PICO CONTRA

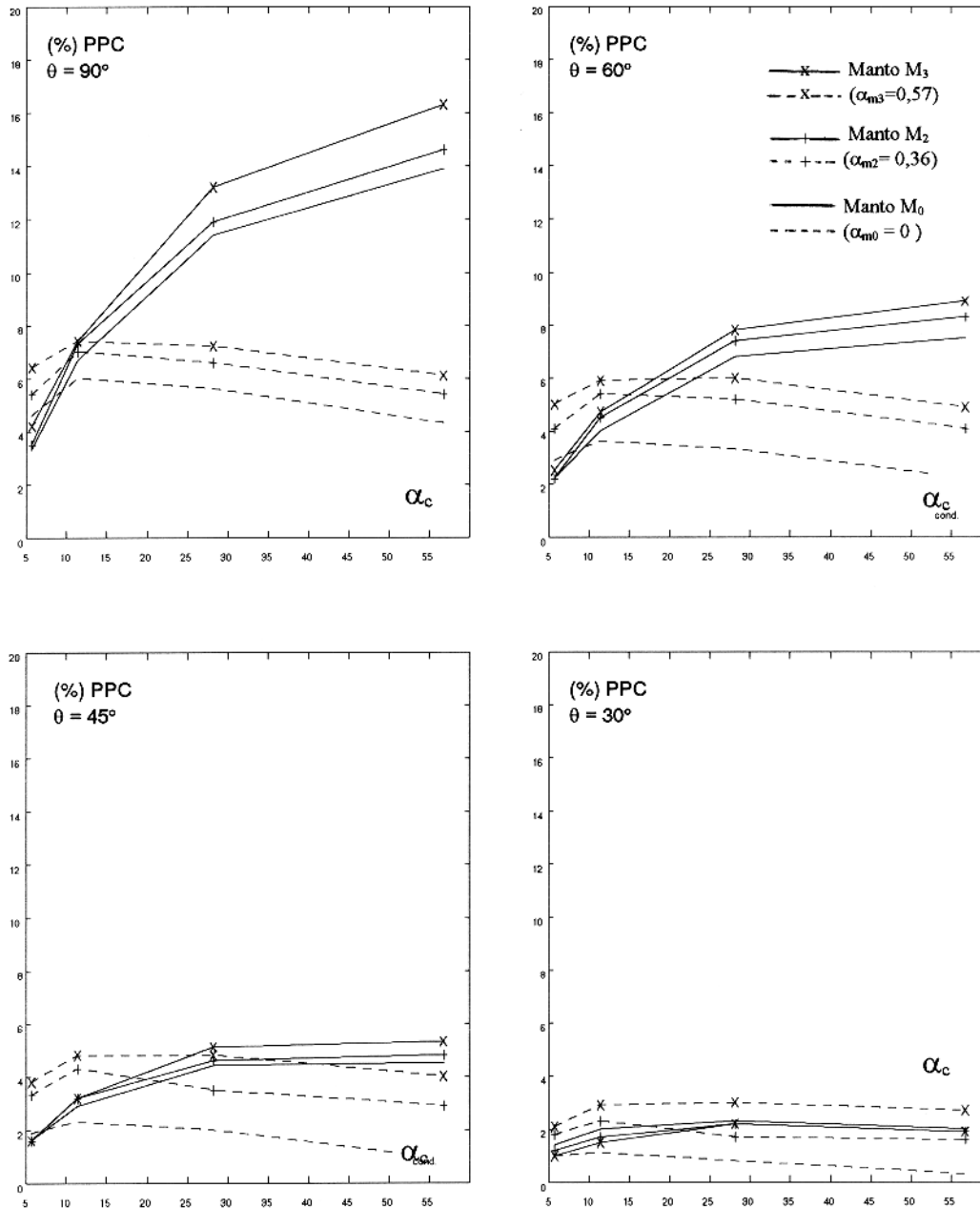
Em fase : ———, Quadratura: .....;  $h_0/L=0.2$ 

Figura: 5.6 Variação dos valores de pico-a-pico contra (PPC) das componentes com o número de indução do corpo ( $\alpha_c$ )

## ARRANJO PERP - PICO-A-PICO CONTRA

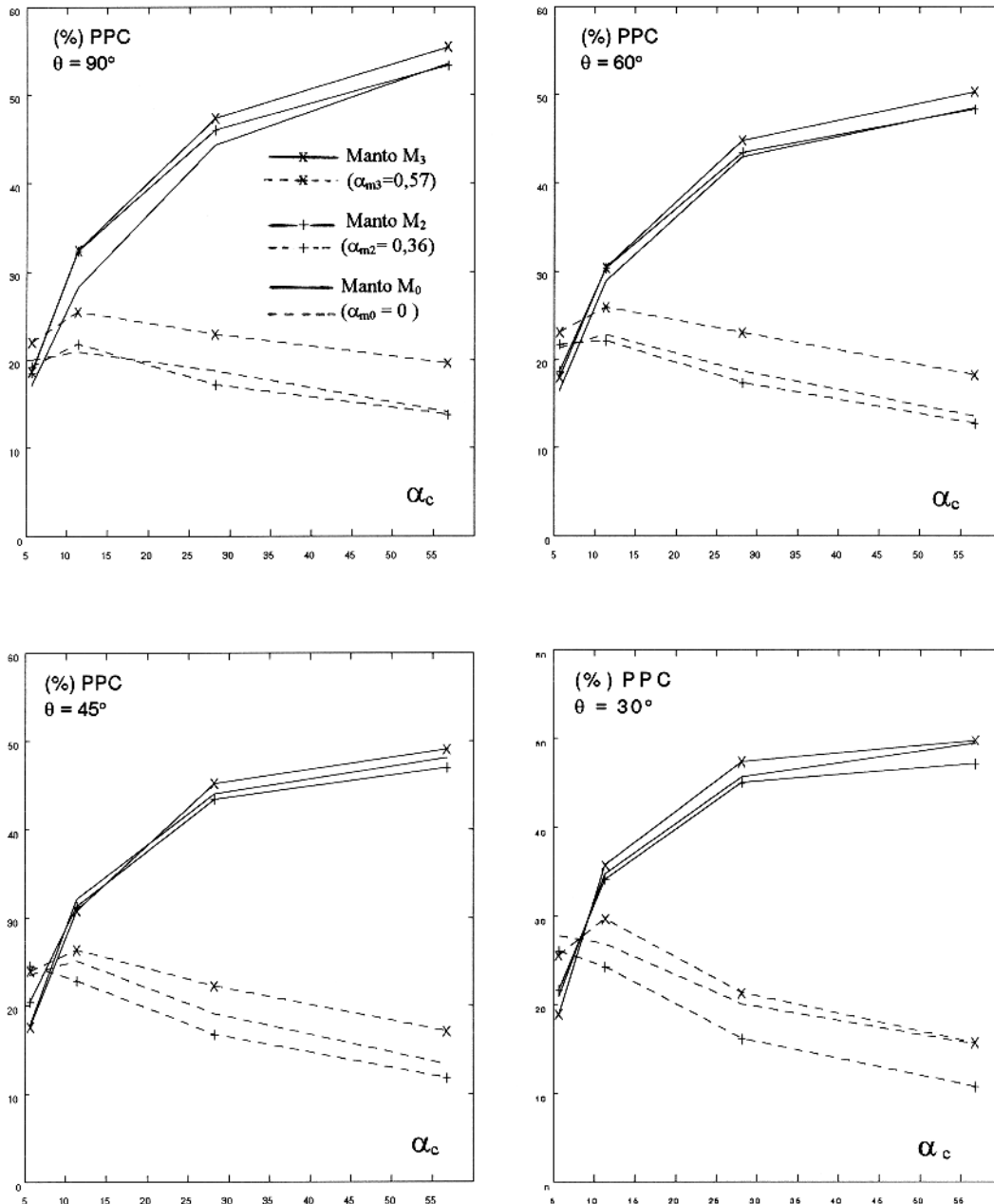
Em fase : ———, Quadratura: .....;  $h_0/L=0.2$ 

Figura: 5.7 Variação dos valores de pico-a-pico contra (PPC) das componentes com o número de indução do corpo ( $\alpha_c$ )

## ARRANJO PERP - PICO-A-PICO A FAVOR

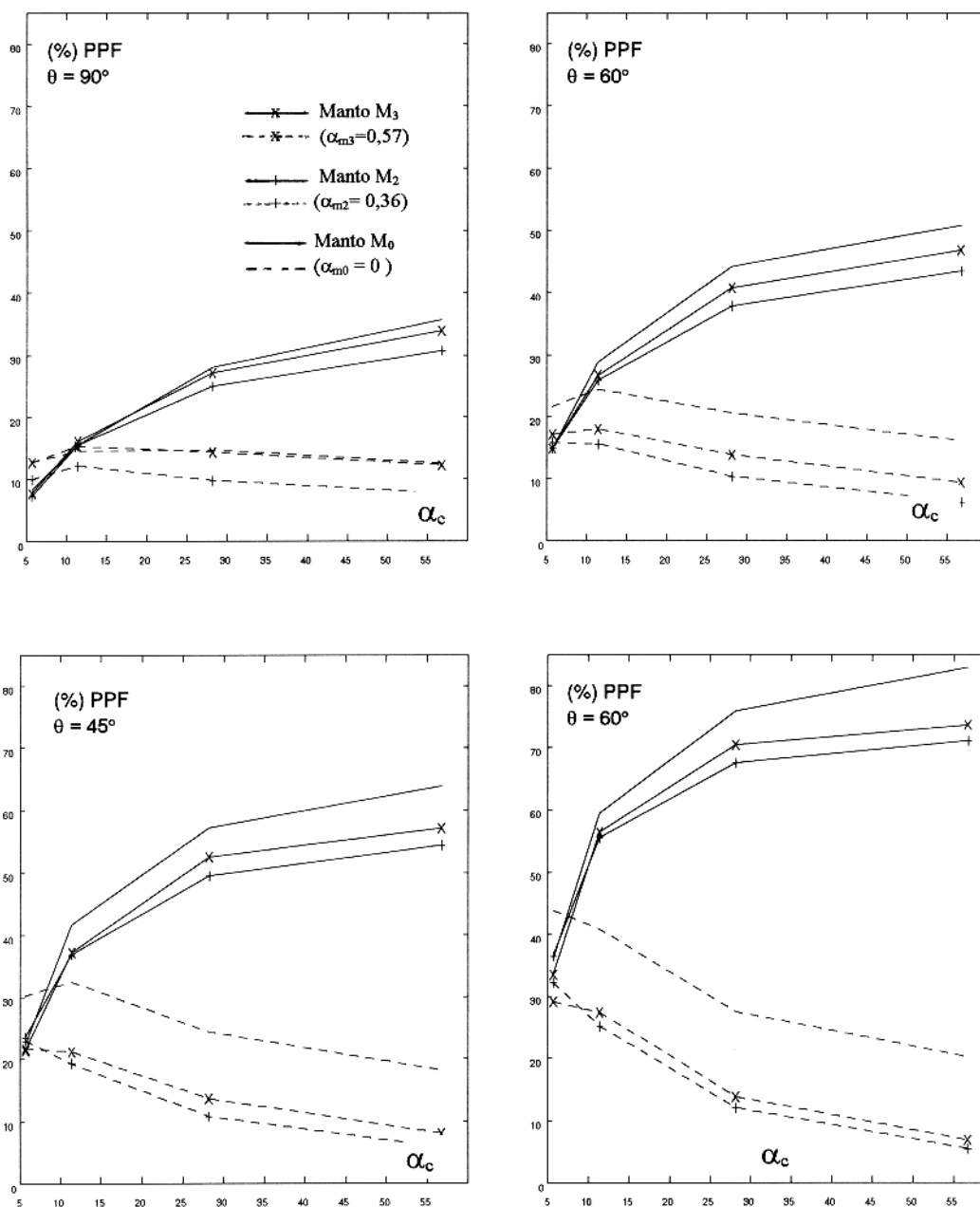
Em fase : ———, Quadratura: .....;  $h_c/L=0.2$ 

Figura: 5.8 Variação dos valores de pico-a-pico contra (PPF) das componentes com o número de indução do corpo ( $\alpha_c$ )

## ARRANJO HCP - PICO-A-PICO

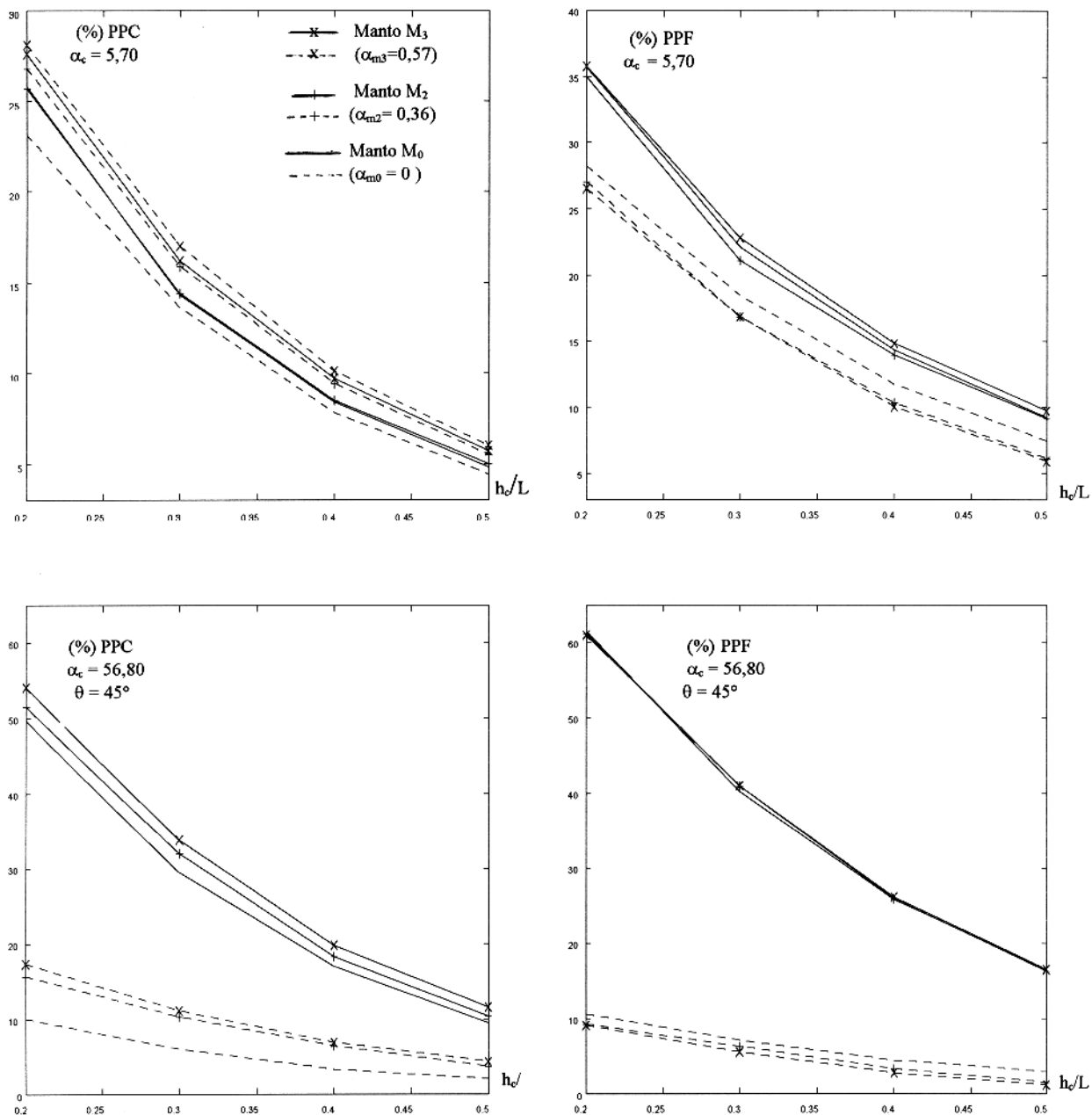
Em fase : ——— , Quadratura: ..... ,  $h_c/L=0.2$ 

Figura: 5.9 Variação dos valores de pico-a-pico das componentes com o índice de profundidade ( $h_c/L$ )

ARRANJO VCP - PICO-A-PICO

Em fase : ——— , Quadratura: ..... ,  $h_c/L=0.2$

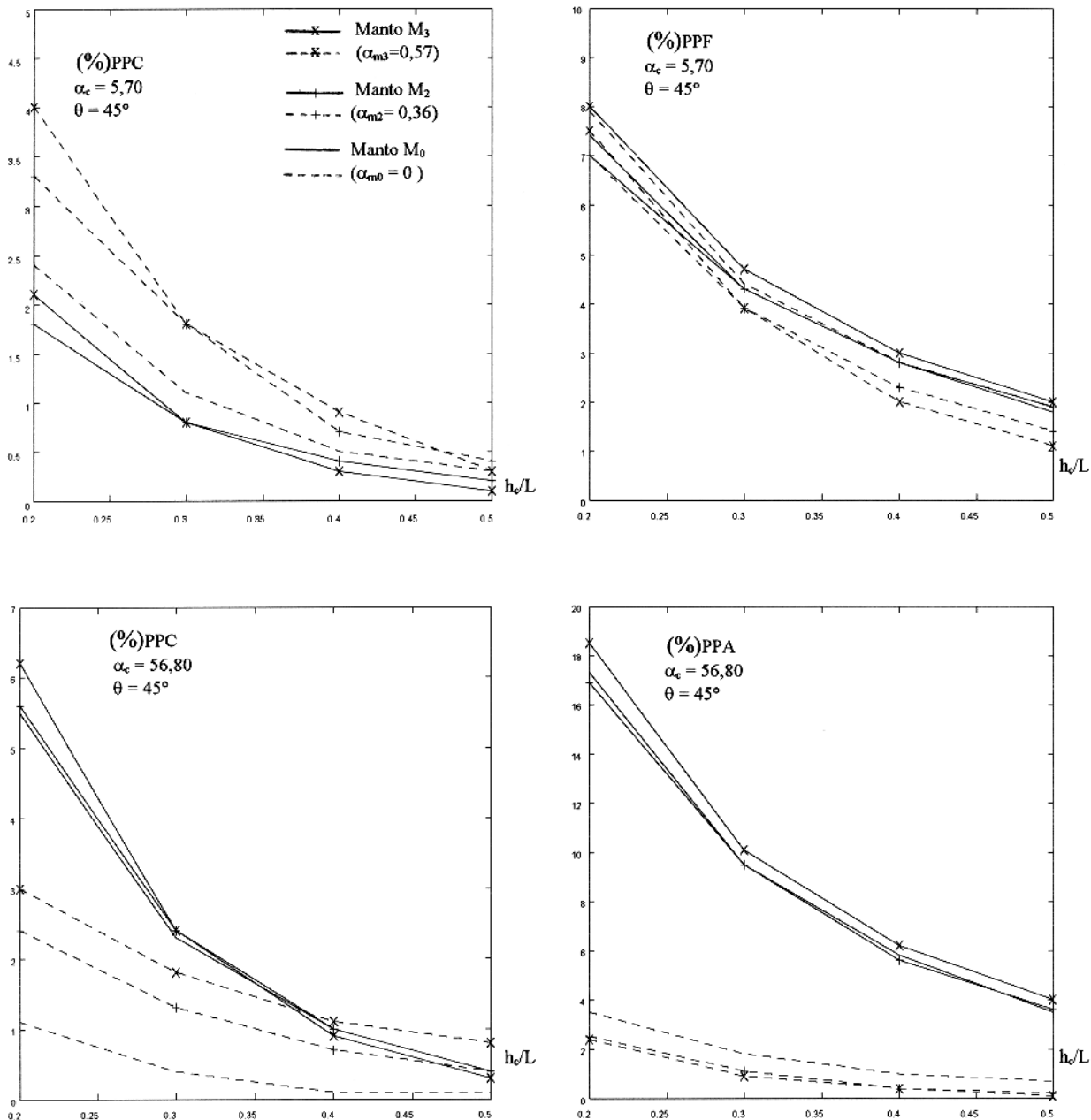


Figura: 5.10 Variação dos valores de pico-a-pico das componentes com o índice de profundidade ( $h_c/L$ )



## ARRANJO VCA - PICO-A-PICO

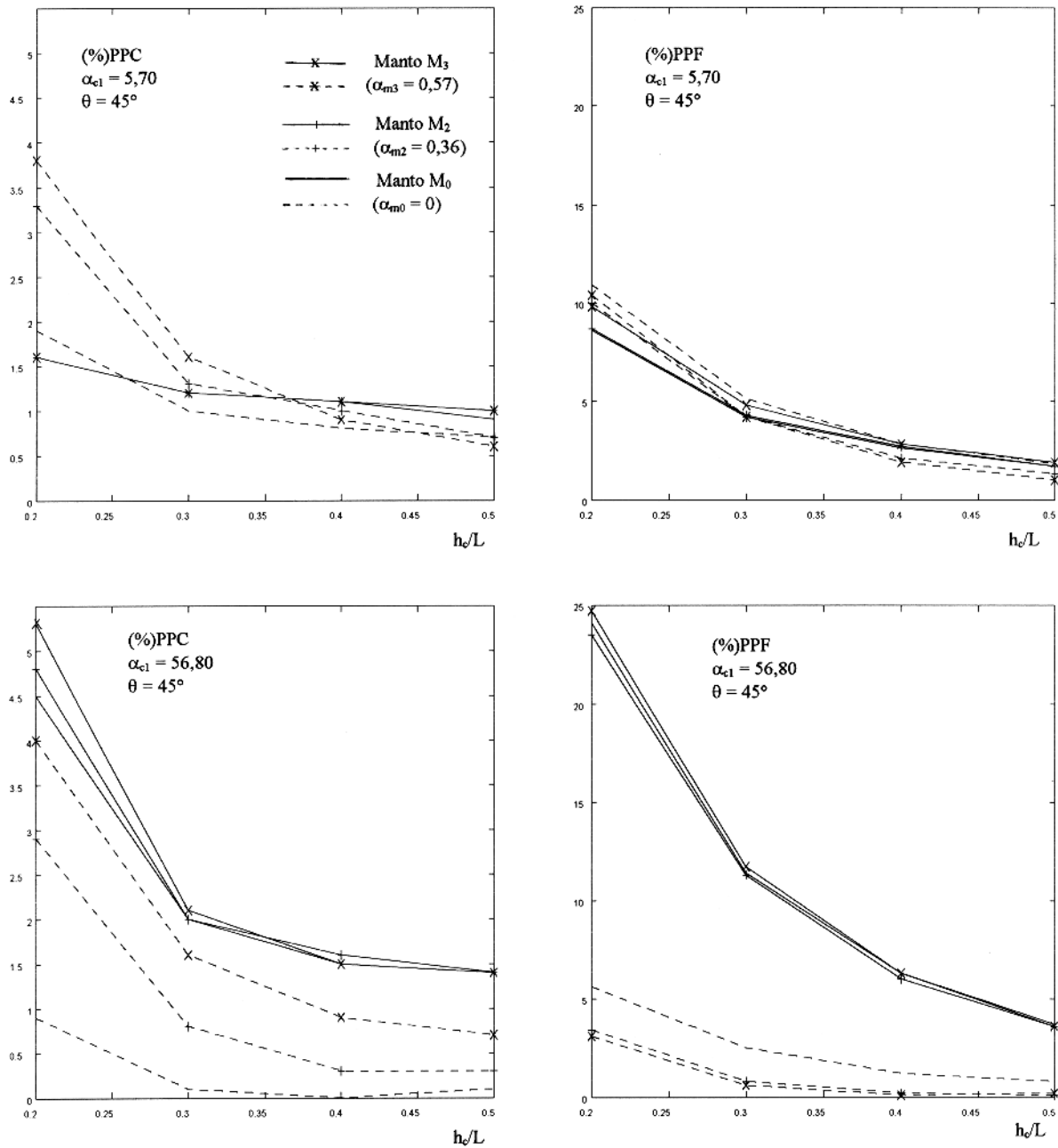
Em fase : ——— , Quadratura: ..... ,  $h_c/L=0.2$ 

Figura: 5.11 Variação dos valores de pico-a-pico das componentes com o índice de profundidade ( $h_c/L$ )

ARRANJO PERP - PICO-A-PICO

Em fase : \_\_\_\_\_ , Quadratura:..... ,  $h_c/L=0.2$

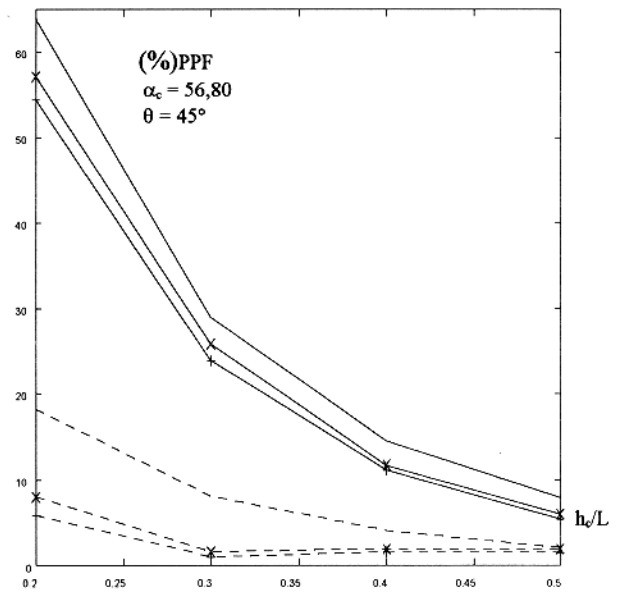
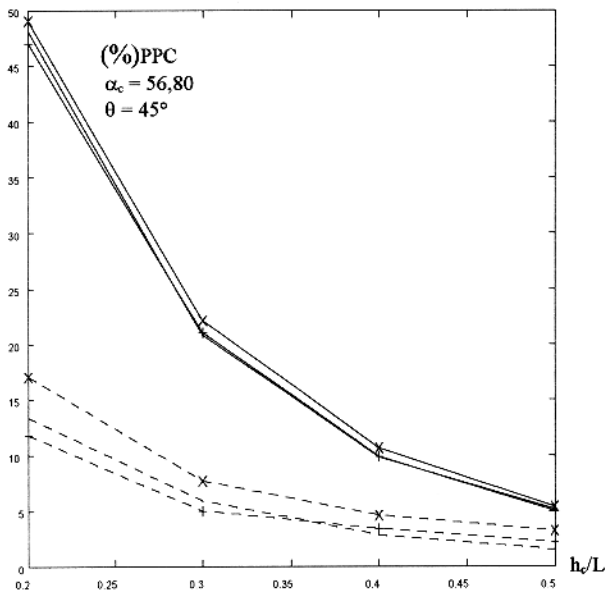
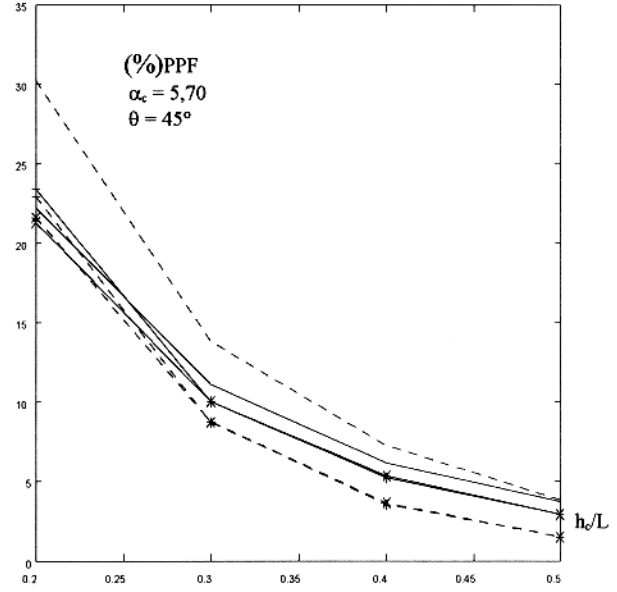
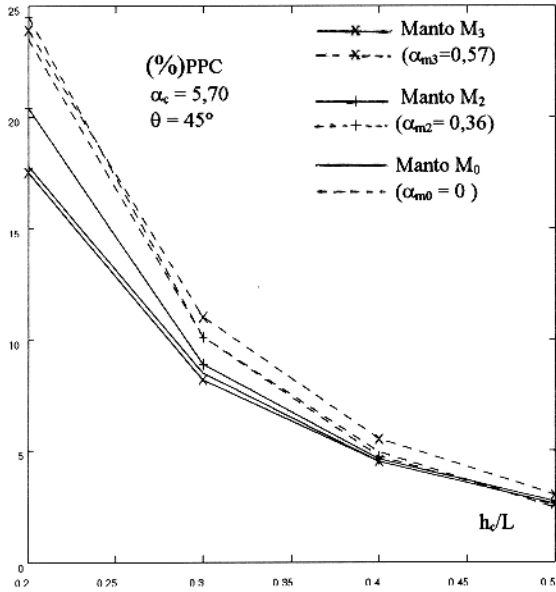
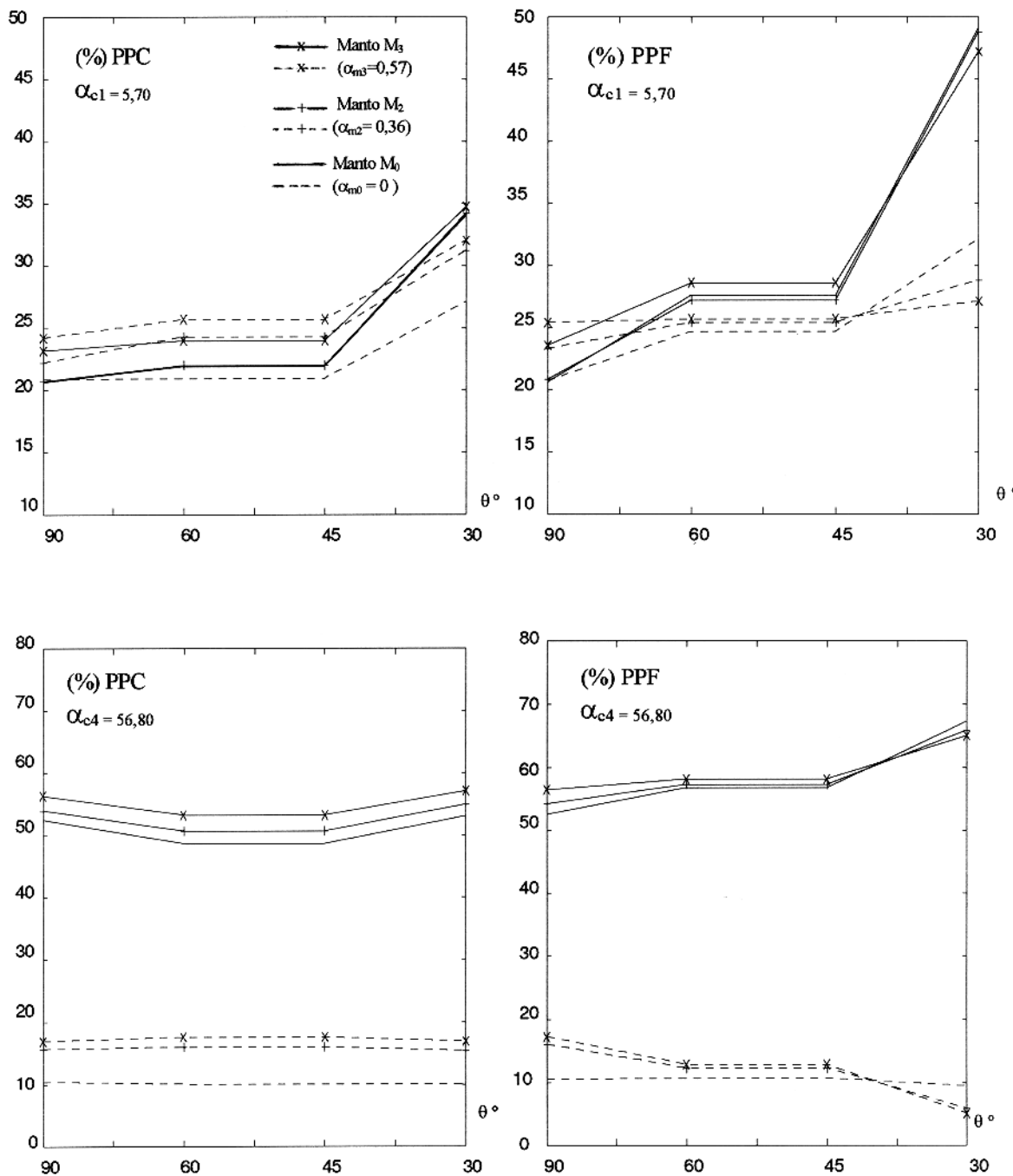
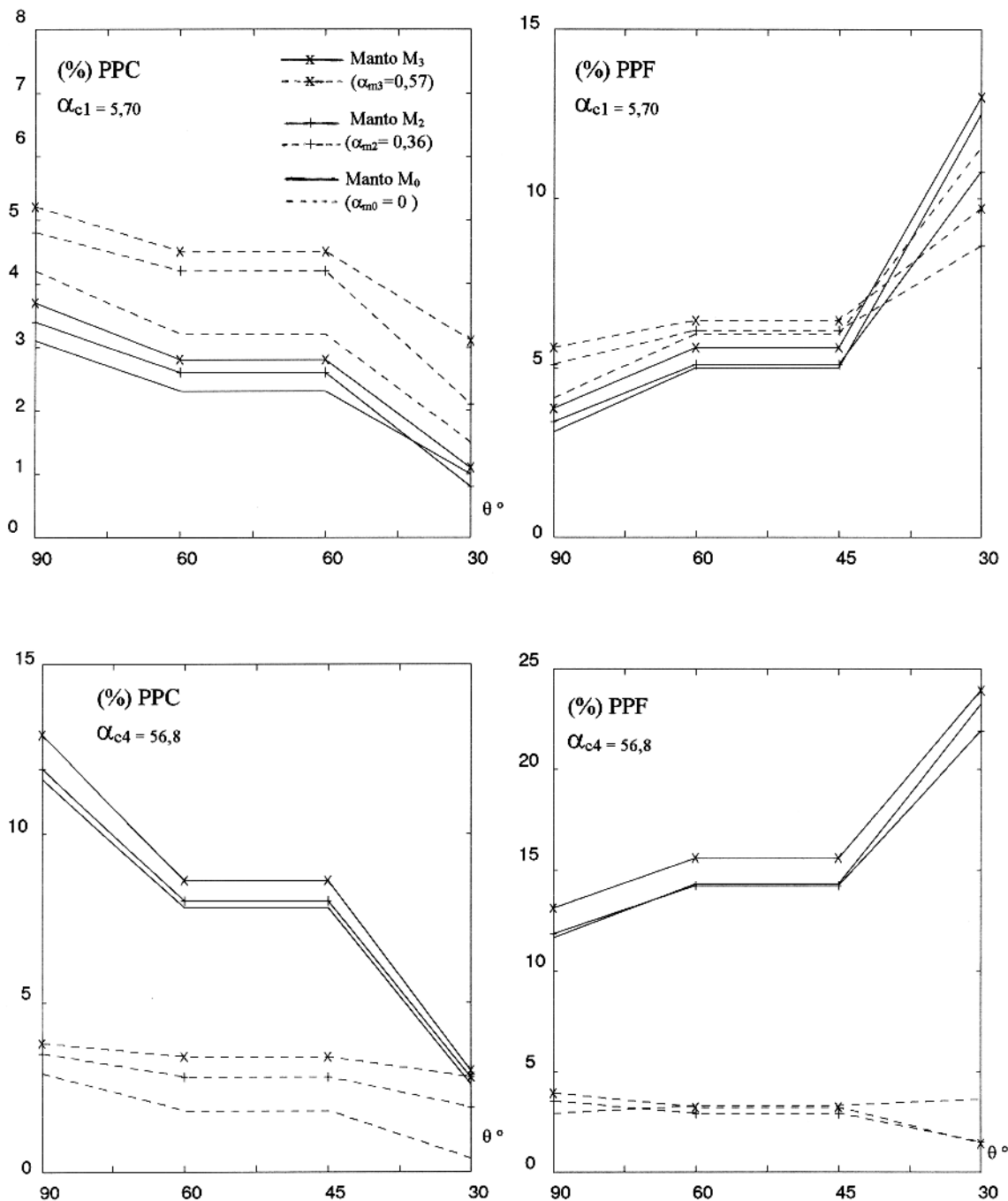


Figura: 5.12 Variação dos valores de pico-a-pico das componentes com o índice de profundidade ( $h_c/L$ )

## ARRANJO HCP - PICO-A-PICO

Em fase: ———, Quadratura: - - - - -  $h_c/L = 0.2$ Figura 5.13 variação dos valores de pico-a-pico das componentes com o mergulho ( $\theta$ ).

## ARRANJO VCP - PICO-A-PICO

Em fase: ———, Quadratura: - - - - -  $h_c/L = 0.2$ Figura 5.14 variação dos valores de pico-a-pico das componentes com o mergulho ( $\theta$ ).

## ARRANJO VCA - PICO-A-PICO

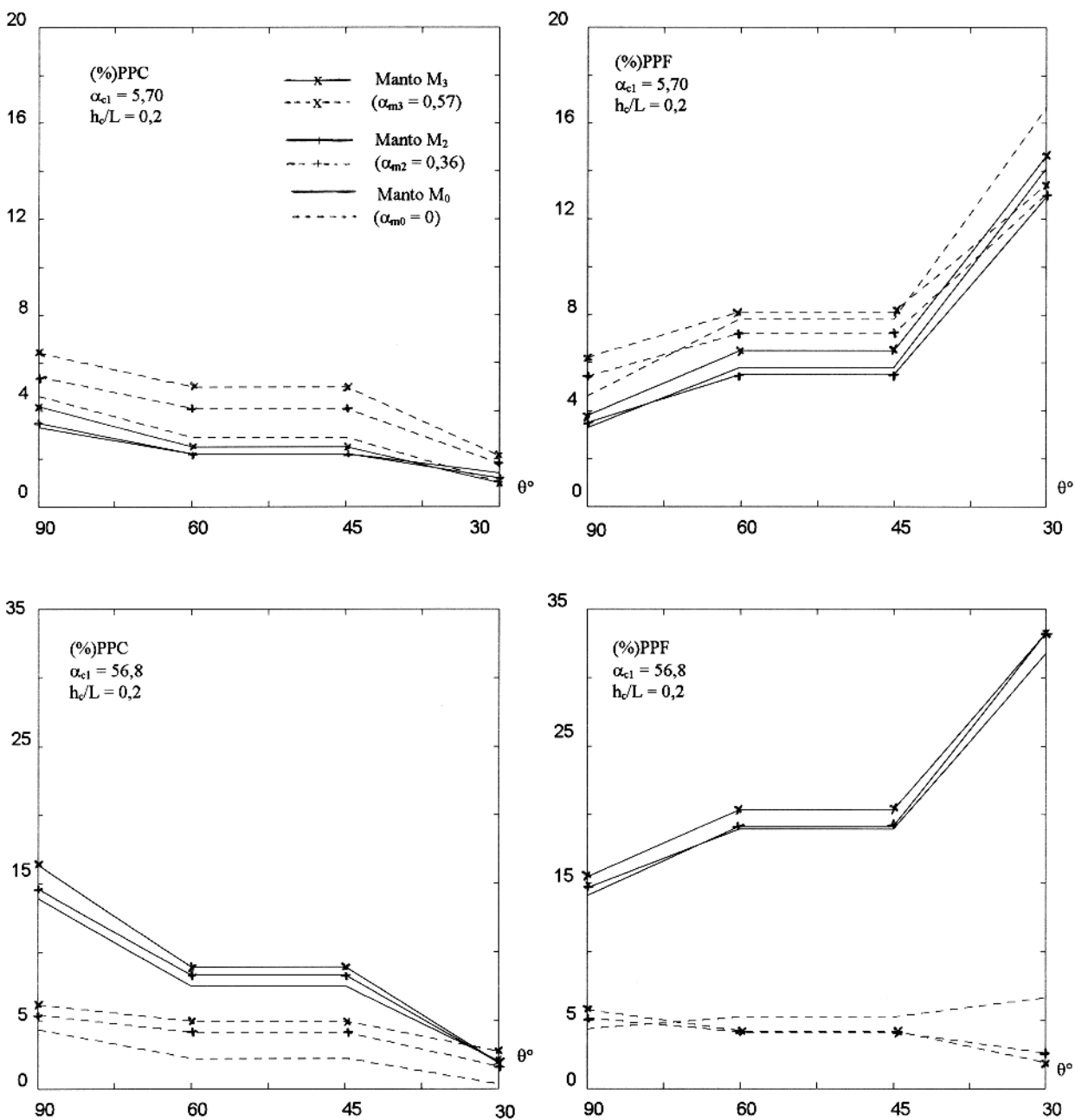
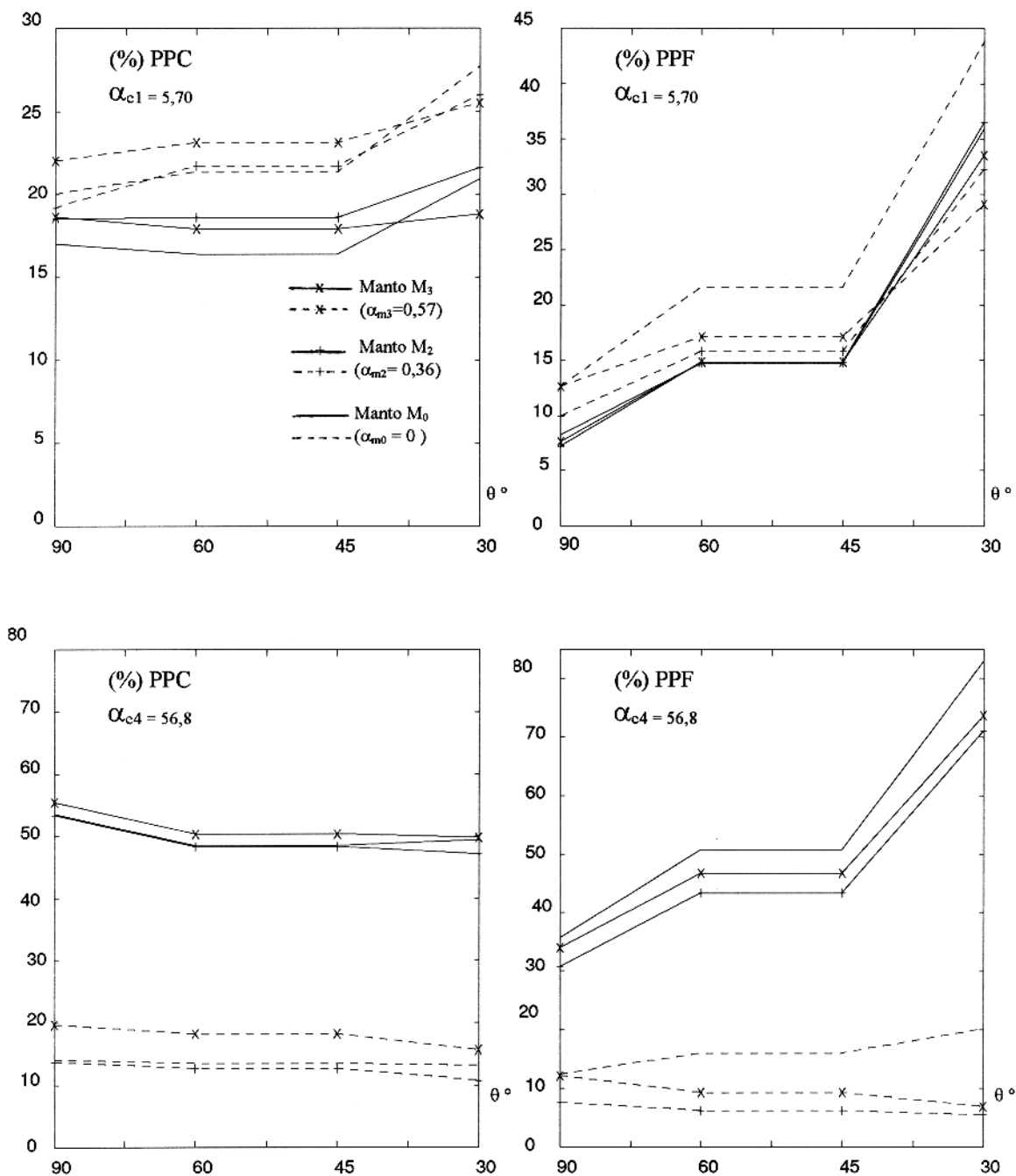
Em fase : ——— , Quadratura: ..... ,  $h_c/L=0.2$ 

Figura: 5.15 Variação dos valores de pico-a-pico das componentes com o mergulho ( $\theta^\circ$ )

## ARRANJO PERP - PICO-A-PICO

Em fase: ———— ,      Quadratura: - - - - -  $h_c/L = 0.2$ Figura 5.16 variação dos valores de pico-a-pico das componentes com o mergulho ( $\theta$ ).

## 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos mostraram o comportamento da resposta E.M de um corpo condutor do tipo semi-plano vertical e/ou inclinado em contato com o manto de intemperismo, no domínio da frequência, utilizando-se os arranjos de bobinas HCP, VCP, VCA e PERP.

Para a construção das curvas de índice de anomalias com os mergulhos de 60°, 45° e 30°, foram utilizados os valores de pico-a-pico contra, uma vez que o pico-a-pico a favor sofre grande influência do manto, ocorrendo situações em que os seus valores não ficam bem definidos (valores elevados de  $\alpha_c$  e  $\alpha_m$  e em maiores profundidades), como se pode ver na Figura 4.5, para  $\alpha_{c4} = 56,8$ ,  $\alpha_{m2} = 0,57$  e  $h_c/L = 0.2$ . O pico-a-pico contra sofre variações uniformes e para qualquer situação estudada, permitiu sua determinação.

Os resultados podem ser demonstrados de forma geral através de curvas de índice de anomalia. (ver Figura 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4.). Da análise dessas curvas, pode-se concluir:

O comportamento das curvas de índice de anomalias para os arranjos HCP, VCP e VCA são os mesmos:

- Há rotação de fase no sentido anti-horário
- As curvas de índice de profundidade sofrem um deslocamento para fora, ou seja são esticadas em relação a ausência de manto.
- A rotação para condutores pobres (menores valores de  $\alpha_c$ ) é menor comparada a obtida para corpos com maiores parâmetros de resposta.
- A rotação anti-horária e a expansão na curva de índice de profundidade dependem do número de indução da cobertura;
- Conseqüentemente, uma cobertura condutiva com maior número de indução fará com que o condutor apareça ser mais resistivo e menos profundo que o real, usando qualquer um dos arranjos acima.

Para o arranjo PERP observou-se algumas particularidades:

Para o primeiro manto ( $\alpha_{m1} = 0,15$ ) há rotação no sentido horário, havendo contração na curva de índice de profundidade, em um comportamento similar a situação de manto

indutivo, em seguida, com o aumento de  $\alpha_m$ , a rotação passa a ser no sentido anti-horário e a curva de índice de profundidade sofre uma expansão, comportamento similar aos outros arranjos.

Verificou-se que de forma geral, ocorreram as mesmas modificações dos perfis com a presença do manto para os diversos arranjos, essas modificações podem ser resumidas como:

1. Com o aumento da condutividade do manto as componentes em fase e quadratura aumentam quando o corpo está na vertical;
2. Para corpos inclinados, com o aumento da condutividade do manto, ocorre um aumento no pico-contrá e uma diminuição no pico a favor.
3. Há o surgimento do pico-extra para altos valores do número de indução do material e pequenas inclinações para os arranjos VCP, HCP e PERP. No arranjo VCA não foi obtido, com os parâmetros medidos o pico extra e a forma de se definir os picos neste trabalho.

Comparando com os trabalhos anteriores, verificou-se apenas uma discordância com os resultados obtidos por NERES (1989) e os resultados obtidos por JOSHI et al.(1984), que afirmam que para o arranjo HCP, a quantidade de rotação no sentido anti-horário é maior para os corpos menos condutores, enquanto que neste trabalho, com os parâmetros utilizados se verificou o contrário: a rotação é maior para os corpos mais condutores.

Pode-se afirmar que os resultados obtidos para o manto condutivo são similares aos resultados obtidos para a rocha encaixante condutiva.

Comparando os resultados para cada tipo de arranjo, conclui-se que o arranjo HCP é o que fornece melhor resposta EM, fornecendo uma boa indicação para o mergulho do corpo, sendo o melhor sistema de bobinas, o que justifica o seu consagrado uso em prospecção geofísica. Os arranjos VCP e VCA apresentam um nível muito baixo de anomalias (maiores sinais na faixa de 10%). O arranjo PERP tem um bom nível de anomalias, mas apresenta o inconveniente para se obter o sinal de referência e uma perfeita perpendicularidade entre as bobinas, a fim de se obter o acoplamento mínimo entre elas.



Some-se ainda a dificuldade de se obter uma avaliação qualitativa do mergulho do corpo, uma vez que os perfis são sempre assimétricos.

Recomenda-se que este mesmo tipo de estudo seja desenvolvido através modelos analíticos com soluções numéricas. São recomendáveis ainda estudos considerando a variação de espaçamento e frequência. E interessante que o desenvolvimento de estudo semelhante a este no domínio do tempo venha a ser realizado oportunamente.

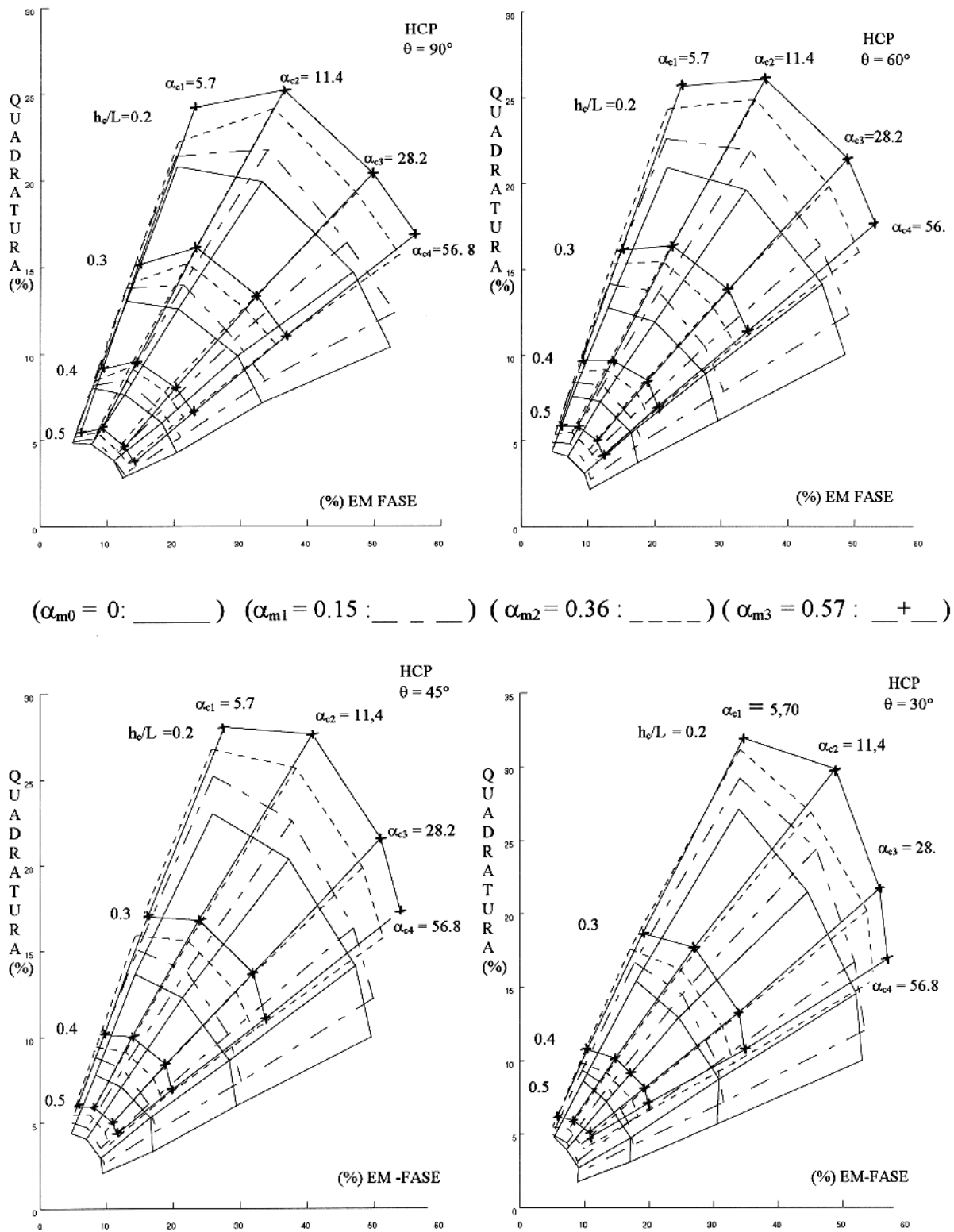


Figura 6.1 Curvas de índice de Anomalias para o arranjo horizontal coplanar para corpos com inclinações de  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $30^\circ$

( $\alpha_{m0} = 0$ : \_\_\_\_\_) ( $\alpha_{m1} = 0.15$ : \_ \_ \_) ( $\alpha_{m2} = 0.36$ : \_ \_ \_ \_) ( $\alpha_{m3} = 0.57$ : \_ \_ \_)

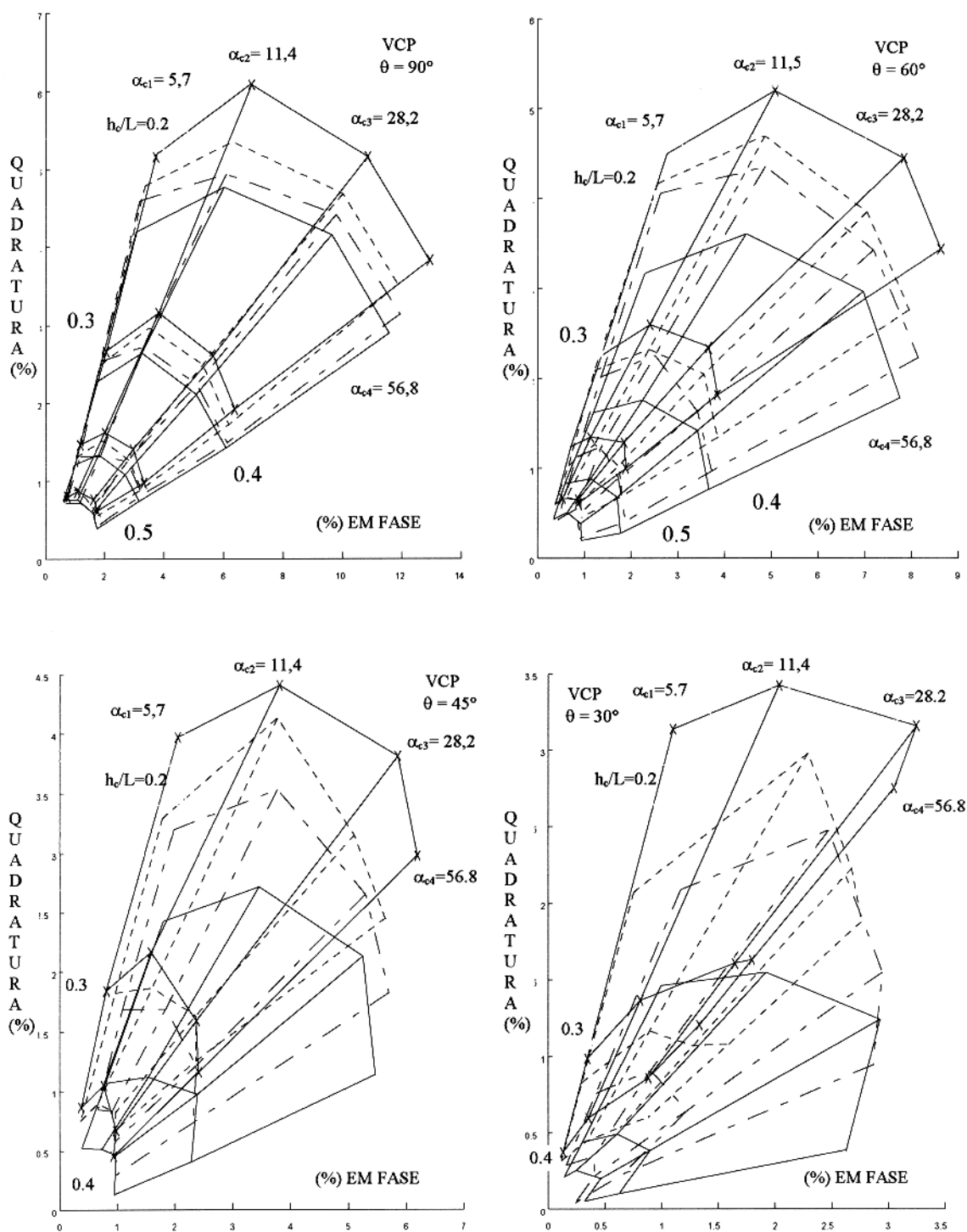


Figura 6.2 Curvas de índice de Anomalias para o arranjo VCP, para corpos com inclinações de  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $30^\circ$

( $\alpha_{m0} = 0$ : \_\_\_\_\_) ( $\alpha_{m1} = 0.15$ : \_ \_ \_) ( $\alpha_{m2} = 0.36$ : \_ \_ \_ \_) ( $\alpha_{m3} = 0.57$ : \_ \_ \_)

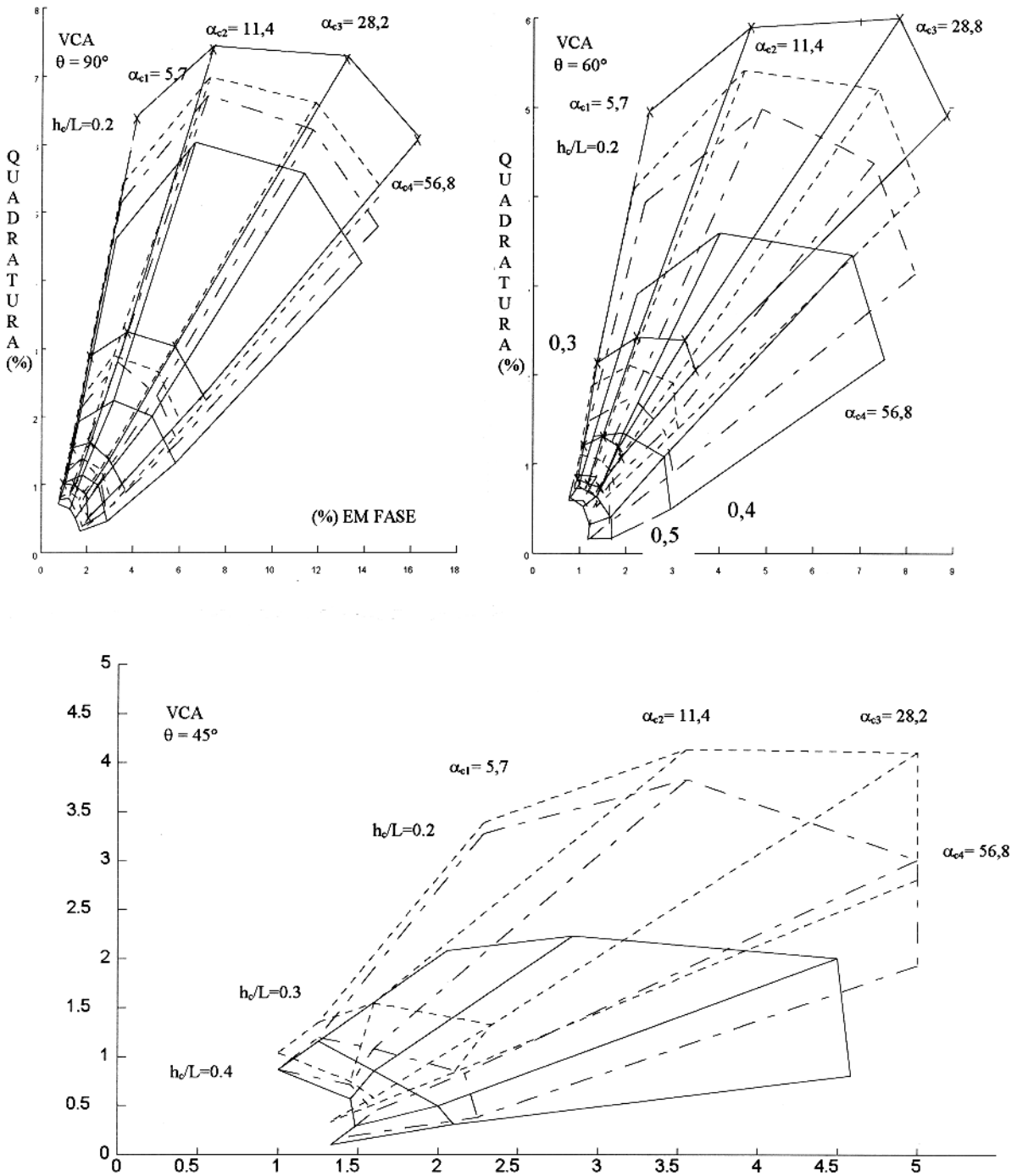


Figura 6.3 Curvas de índice de Anomalias para o arranjo VCA, para corpos com inclinações de  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $45^\circ$

( $\alpha_{m0} = 0$ : \_\_\_\_\_) ( $\alpha_{m1} = 0.15$ : \_ \_ \_) ( $\alpha_{m2} = 0.36$ : - - -) ( $\alpha_{m3} = 0.57$ : \_ \_ \_)

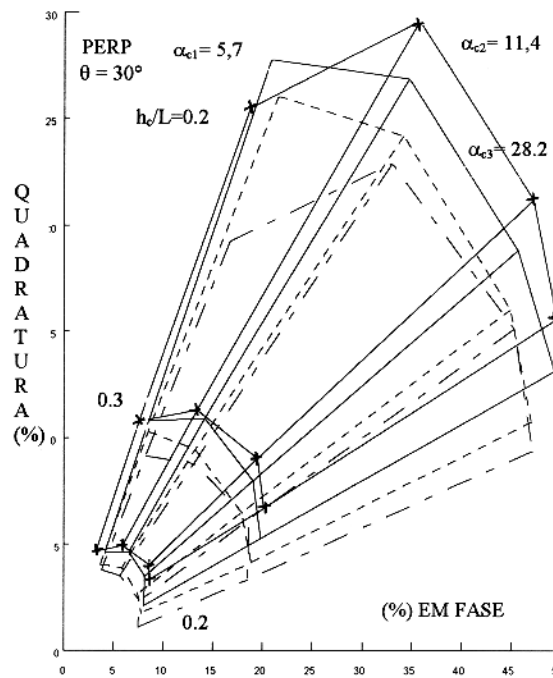
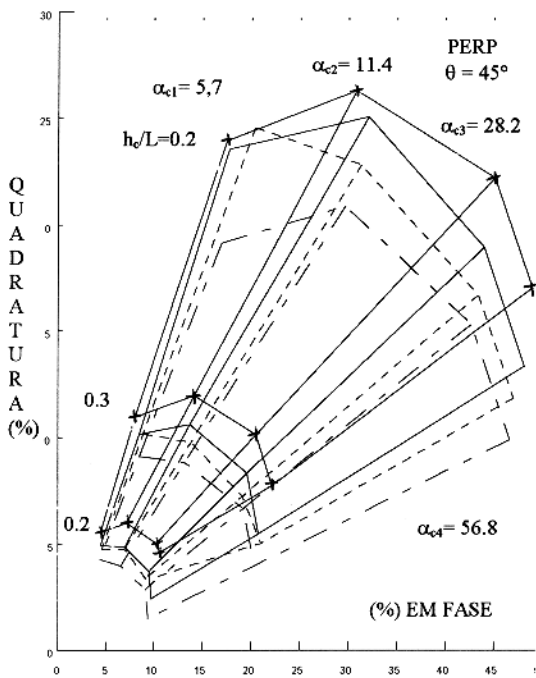
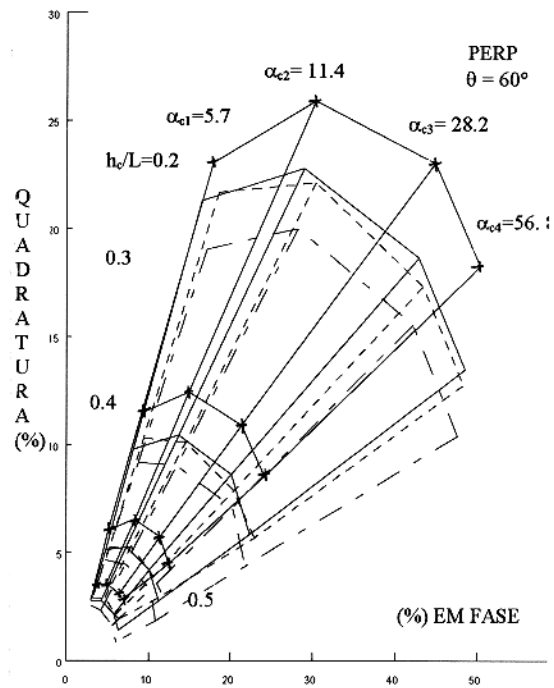
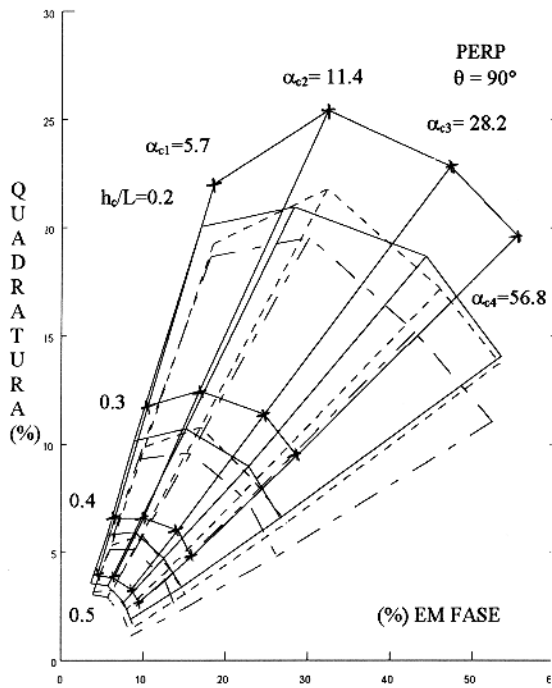


Figura 6.4 Curvas de índice de Anomalias para o arranjo mínimo - PERP, para corpos com inclinações de 90°, 60°, 45° e 30°

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOSSCHART, R.A. 1961 . On the occurrence of low resistivity geological conductors. **Geophysical Prospecting**, 9(2): 203-212.
- CABALLERO, A. 1983 . **Resposta HLEM de um cilindro horizontal envolto por um halo condutor obtido por modelamento analógico**. 77 p. Tese (Mestrado em Geofísica). Belém - UFPA / NCGG, 1983.
- FRISCHKNECHT, F.C. 1971. Electromagnetic scala modeling. In: WAITT, J.R. **Eletromagnetic Probing in geophysics**. Boulder, Golem Press. p. 265-320.
- FULLER, B.D. 1971 . Electromagnetic response of a conductive sphere surrounded by a conductive shell. **Geophysics**, 34: 9-24.
- GAUR, V.K. 1959. **Model experiments simulating conditions encountered in airborne electromagnetic prospecting**. Thesis (Ph. D. ) - University of London. 189 p.
- GRANT, F. S. & WEST, G. F. 1965. **Interpretation Theory in Applied Geophysics**. New York, McGraw Hill. p. 444-564.
- GUPTA SARMA, D. & MARU, V. M. 1971. A study of some effects of a conducting host rock with a new modelling apparatus. **Geophysics**, 36(1): 166-183.
- HANNESON, J.E. 1981. **The horizontal loop EM response of a vertical conductor in a conducting half-space**. Thesis (Ph.D.) - University of Toronto. 180 p.
- HEILAND, C.A. 1968 . **Geophysical Exploration**. New York, Hafner Publishing. 1013 p.
- JOSHI, M.S.; GUPTA, O.P.; NEGI, J.G. 1984 . Scale - model response of a thin vertical conductor below a conductive, inductive or laterally inhomogeneous overburden layer. **Geophysics**, 49: 2159-2165.
- LAJOIE, J. J. & WEST, G. F. 1976. The eletromagnetic response of a conductive inhomogeneity in a layered earth. **Geophysics**, 41(6A).

- LAJOIE, J. J. & WEST, G. F. 1977. Short not: Two selected Field Examples of EM Anomalies in a Conductive Enviroment. **Geophysics**, 42(3): 655-660.
- LOWRIE, W. & WEST, G.F. 1965. The effect of conducting overburden on eletromagnetic prospecting meassurements: **Geophysics**, 30: 624-632.
- MARTIN, L. 1960. **Field outside a conducting strip in the presence of a magnetic dipole**: unpublished M.A. thesis, University of Toronto.
- NAIR, M.R. ; BISWAS, S.K.; MAZUMDAR, K. 1968 Experimental studies on the eletromagnetic response of tilted conducting half-planes to a horizontal-loop prospecting system. **Geoexploration**, 6: 187-206.
- NAGENDRA, R.; RAMA PRASADA RAO, I.B.; BHIMASANKARAN, V.L.S. 1980 . Influence of a conducting shell in the one-loop version of the transient pulse induction method. **Geophysical Prospecting**, 28: 269-282.
- NEGI, J.G. 1967. Eletromagnetic screening due to a disseminated sferical zone over a conducting sphere. **Geophysics**, 30: 624-632.
- NEGI, J.G. & GUPTA, C.P. 1968. Models in applied electromagnetic. **Earth science Review**, 4(3): 219-241
- NEGI, J.G. & RAVAL, U. 1969. Negative eletromagnetic screening by a cilindrical conducting cover. **Geophysics**, 34(6): 944-957.
- NEGI, J.G. & VERMA, S.K. 1972. Time domain electromagnetic response of a shielded conductor. **Geophysical Prospecting**, 20: 901-909
- NERES, R.L. 1989. **Modelamento eletromagnético analógico de corpos tabulares em contato e sem contato com o manto**. Belém, UFPA/ Centro de Geociências, 62p.
- PALACKY, G. J. & KADEKARU, Kiyoshi. 1978. Efeito do intemperismo tropical nos levantamentos eletromagnéticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA.,30., Recife, 1978. **Anais**. Sociedade Brasileira de Geologia. v.5, p. 2323-2330.

- PARASNIS, D.S. 1971. Analisis of some multi-frequency, multiseperation eletromagnetic surveys. **Geophysical Prospecting**, 19 (2): 163-179.
- PATERSON, N. R. 1961. Experimental and field data fir the dual-frequency phase-shift method of airborne eletromagnetic prospecting. **Geophysics**, 26 (5): 601-617.
- PODDAR, M. 1975. Some experimental studies on the effect of a screen on the EM response of cylinder. **Geoexploration**, 13: 57-68.
- PRESTON, B. 1975. Review - Difficults for the eletromagnetic method in Austrália. **Geoexploration**, 13: 29-43.
- QUEIROZ, J.C.B. 1986 . **Estudo de anomalias eletromagnéticas de um condutor tabular vertical sob camadas parcialmente condutiva em multifreqüência e multiseparação através de modelagem analógico**. Belém, UFPA/CG. 99 p.
- QUESTOR Surveys Ltd. S.D. The Questor method. Mississauga, Ontario. Case histories: Brouillan Discovery, Detour River Discovery, Lessard Deposit, Magusi River Discovery, New InSCO Discovery, Rail Zone, Reed Lake Discovery, Thierry Deposit, Yava Zone. s.p.
- SILVA, L.M.S.1981. **Efeitos do manto de intemperismo sobre anomalias EM provocadas por corpos tabulares inclinados - Um estudo através de modelamento reduzido** . Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 115p. Tese (Mestrado em Geofísica)- Curso de Pós-Graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas, NCGG, UFPA, 1981.
- 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 sistem. **Proc. I.R.E.**, 36: 1364-1370.



- SPIES, B.R. 1975. The dual loop configuration of the transient electromagnetic method. **Geophysics**, 40(6): 1051-1057.
- STRANGWAY, D.W. 1966. Electromagnetic parameters of some sulfide ore bodies. In: Mining Geophysics. **Society of Exploration Geophysicists**. VI, p. 227-242.
- TELFORD, W. M. et al. 1976. **Applied Geophysics**. Cambridge, Cambridge University Press. 860 p.
- VERMA, O.P. 1972. **Electromagnetic models experiments simulating conditions encountered in geophysical prospecting**. Ph. D. Thesis - University of Roorkee, India. 143 p.
- VERMA, O.P. & GAUR, V.K. 1975. Transformation of electromagnetic anomalies brought about by a conducting host rock. **Geophysics**, 40(3):473-489.
- VERMA, O.P. - 1982 - **Analog EM modeling and the modifications of EM anomalies due a to partially conducting environment**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLIED GEOPHYSICS IN TROPICAL REGIONS. Belém, 1982. p. 208-234.
- WAIT, J. R. 1969. EM induction in solid conducting sphere enclosed by a thin conducting spherical shell. **Geophysics**, 34(5): 753-759.
- WARD, S.H. 1971 - Foreword and introduction. **Geophysics**, 36(1): 1-8.
- WARD, S.H.; PRIDMORE, D.F.; RIJO, L. GLENN, W.E. 1974. Multispectral electromagnetic exploration for sulfides: **Geophysics**, v. 39, p. 666-682.
- WON, J. 1980. A wide-band electromagnetic exploration method - some theoretical and experimental results: **Geophysics**, 45: 928-940.