

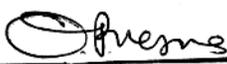
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEOFÍSICAS E GEOLÓGICAS

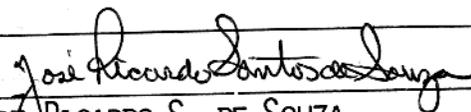
ESTUDO DE ANOMALIAS ELETROMAGNÉTICAS DE UM CONDUTOR TABULAR VERTICAL SOB CAMADAS PARCIALMENTE CONDUTIVA EM MULTIFREQUÊNCIA E MULTISEPARAÇÃO ATRAVÉS DE MODELAMENTO ANALÓGICO.

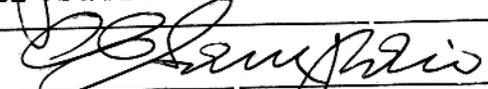
Tese Apresentada por
JOAQUIM CARLOS BARBOSA QUEIROZ
como requisito parcial à obtenção do grau em
MESTRE EM CIÊNCIAS
Na área de
GEOFÍSICA

Conferido pelo Programa de Pós-Graduação em
Ciências Geofísicas e Geológicas da
Universidade Federal do Pará

Aprovado: 09/05/86


OM PRAKASH VERMA (ORIENTADOR)


JOSÉ RICARDO S. DE SOUZA


EDSON EMANOEL S. SAMPAIO

Comitê de Tese

T. 266 QUEIROZ, Joaquim Carlos Barbosa
Q.3 Estudo de anomalias eletromag
néticas de um condutor tabular
vertical sob camadas parcialmen
te condutiva em multifrequência
e multiseparação através de mode
lamento analógico. Belém, UFPa/
CG., 1986

99 p.

Tese apresentada ao Centro de
Ciências da Universidade Federal
do Pará, para obter o grau de
Mestre em Ciências na área de
Geofísica.

1. Geofísica Aplicada. 2. Modela
mento analógico. 3- Manto de Intem
perismo. I. Universidade Federal
do Pará/Centro de Geociências. II
Título.

À Verônica
e a meus pais Joaquim e Maria Queiroz

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Om Prakash Verma (CG/UFPA) pela orientação durante o desenvolvimento desta Tese.

Ao Dr. José Ricardo S. de Souza, co-orientador deste trabalho, pelas sugestões apresentadas.

Ao Dr. Edson Emanuel S. Sampaio (PPPG/UFBA) pelas recomendações e sugestões oferecidas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelas bolsas de estudo concedidas no período de 03.82 a 12.85.

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo suporte financeiro dado à esta pesquisa.

Ao Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas da Universidade Federal do Pará (NCGG/UFPA) pela infraestrutura colocada à disposição para a realização deste trabalho.

Ao Senhor Adalberto pelos desenhos finais e a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização desta Tese.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| FIGURA | | Pág. |
|--------|--|------|
| 1 | Comportamento de H_y para diferentes valores de $\omega\mu\sigma$. | 12 |
| 2 | (a) Elipse de polarização (b) Polarização elíptica | 14 |
| 3 | Resposta de uma variedade de sistemas de bobinas sobre um semi-espaco homogêneo e isotrópico. | 19 |
| 4 | Representação de um sistema de prospecção EM. | 20 |
| 5 | Função resposta de um sistema EM em campo magnético alternado | 21 |
| 6 | Classificação dos sistemas de prospecção EM que utilizam bobinas T-R móveis | 25 |
| 7 | Classificação dos sistemas AEM (a) "Rigid boom" (b) "Towed bird" | 27 |
| 8 | Representação esquemática de um meio geológico geral encontrado em prospecção de depósitos de sulfetos. | 36 |
| 9 | Diagrama em blocos dos sistemas de energização e recepção. | 44 |
| 10 | Mudança nos perfis com variação da frequência; sistema horizontal coplanar; $L = 0,25$ m (a) componente em-fase para o corpo 1 (b) componente quadratura para o corpo 1 (c) componente em-fase para o conjunto C_1M_1 (d) componente quadratura para o conjunto C_1M_1 | 51 |
| 11 | Mudança dos perfis com a variação da frequência; sistema vertical coplanar; $L = 0,25$ m (a) componente em-fase para o corpo 1 (b) componente quadratura para o corpo 1 (c) componente em-fase para o conjunto C_1M_1 (d) componente quadratura para o conjunto C_1M_1 | 52 |
| 12 | Mudança dos perfis com a variação da frequência; sistema | 53 |

- tema vertical coaxial; $L = 0,25 \text{ m}$
- (a) componente em-fase para o corpo 1
- (b) componente quadratura para o corpo 1
- (c) componente em-fase para o conjunto $C_1 M_1$
- (d) componente quadratura para o conjunto $C_1 M_1$
- 13 Mudança dos perfis com a variação da separação T-R; 55
sistema horizontal coplanar; conjunto $C_1 M_1$
- (a) $f = 250 \text{ Hz}$
- (b) $f = 500 \text{ Hz}$
- (c) $f = 1 \text{ kHz}$
- (d) $f = 3 \text{ kHz}$
- 14 Mudança dos perfis com a variação da separação T-R; 56
sistema vertical coplanar; conjunto $C_1 M_1$
- (a) $f = 250 \text{ Hz}$
- (b) $f = 500 \text{ Hz}$
- (c) $f = 1 \text{ kHz}$
- (d) $f = 3 \text{ kHz}$
- 15 Mudança da resposta com a variação da separação T-R; 57
sistema vertical coaxial; conjunto $C_1 M_1$
- (a) $f = 250 \text{ Hz}$
- (b) $f = 500 \text{ Hz}$
- (c) $f = 1 \text{ kHz}$
- (d) $f = 3 \text{ kHz}$
- 16 Variação da componente em-fase com a condutância dos 59
corpos; sistema horizontal coplanar; $L = 0,25 \text{ m}$;
 $(\sigma t)_{C_1} = 1,6181 \times 10^4 \text{ S}$; $(\sigma t)_{C_2} = 3,3797 \times 10^4 \text{ S}$;
 $(\sigma t)_{C_3} = 7,3393 \times 10^4 \text{ S}$
- (a) $(\sigma t)_{M_1} = 0,0738 \times 10^4 \text{ S}$
- (b) $(\sigma t)_{M_2} = 0,0804 \times 10^4 \text{ S}$
- (c) $(\sigma t)_{M_3} = 0,1134 \times 10^4 \text{ S}$
- 17 Variação da componente em quadratura com a condutân 60
cia dos corpos; sistema horizontal coplanar; $L = 0,25 \text{ m}$;
 $(\sigma t)_{C_1} = 1,6181 \times 10^4 \text{ S}$; $(\sigma t)_{C_2} = 3,3797 \times 10^4 \text{ S}$;

$$(\sigma t)_{C_3} = 7,3393 \times 10^4 \text{ S}$$

$$(a) (\sigma t)_{M_1} = 0,0738 \times 10^4 \text{ S}$$

$$(b) (\sigma t)_{M_1} = 0,0804 \times 10^4 \text{ S}$$

$$(c) (\sigma t)_{M_1} = 0,1134 \times 10^4 \text{ S}$$

- 18 Variação da componente em-fase com a condutância dos 61

corpos; sistema vertical coplanar; $L = 0,20 \text{ m}$;

$$(\sigma t)_{C_1} = 1,6181 \times 10^4 \text{ S} ; (\sigma t)_{C_2} = 3,3797 \times 10^4 \text{ S} ;$$

$$(\sigma t)_{C_3} = 7,3393 \times 10^4 \text{ S}$$

$$(a) (\sigma t)_{M_1} = 0,0738 \times 10^4 \text{ S}$$

$$(b) (\sigma t)_{M_2} = 0,0804 \times 10^4 \text{ S}$$

$$(c) (\sigma t)_{M_3} = 0,1134 \times 10^4 \text{ S}$$

- 19 Variação da componente em quadratura com a con- 62

dutância dos corpos; sistema vertical coplanar ;

$$L = 0,20 \text{ m}; (\sigma t)_{C_1} = 1,6181 \times 10^4 \text{ S}; (\sigma t)_{C_2} = 3,3797 \times$$

$$10^4 \text{ S}; (\sigma t)_{C_3} = 7,3393 \times 10^4 \text{ S}$$

$$(a) (\sigma t)_{M_1} = 0,0738 \times 10^4 \text{ S}$$

$$(b) (\sigma t)_{M_2} = 0,0804 \times 10^4 \text{ S}$$

$$(c) (\sigma t)_{M_3} = 0,1134 \times 10^4 \text{ S}$$

- 20 Variação da componente em-fase com a condutância 63

dos corpos; sistema vertical coaxial; $L = 0,20 \text{ m}$;

$$(\sigma t)_{C_1} = 1,6181 \times 10^4 \text{ S} ; (\sigma t)_{C_2} = 3,3797 \times 10^4 \text{ S} ;$$

$$(\sigma t)_{C_3} = 7,3393 \times 10^4 \text{ S}$$

$$(a) (\sigma t)_{M_1} = 0,0738 \times 10^4 \text{ S}$$

$$(b) (\sigma t)_{M_2} = 0,0804 \times 10^4 \text{ S}$$

$$(c) (\sigma t)_{M_3} = 0,1134 \times 10^4 \text{ S}$$

- 21 Variação da componente em quadratura com a con- 64

dutância dos corpos; sistema vertical coaxial ;

$$L = 0,20 \text{ m}; (\sigma t)_{C_1} = 1,6181 \times 10^4 \text{ S}; (\sigma t)_{C_2} = 3,3797 \times 10^4 \text{ S};$$

$$(\sigma t)_{C_3} = 7,3393 \times 10^4 \text{ S}$$

- (a) $(\sigma t)_{M_1} = 0,0738 \times 10^4 \text{ S}$
 (b) $(\sigma t)_{M_2} = 0,0804 \times 10^4 \text{ S}$
 (c) $(\sigma t)_{M_3} = 0,1134 \times 10^4 \text{ S}$
- 22 Variação da componente em-fase com a separação de bobinas; sistema horizontal coplanar; manto M_1 66
 (a) $L_1 = 0,15 \text{ m}$
 (b) $L_2 = 0,20 \text{ m}$
 (c) $L_3 = 0,25 \text{ m}$
- 23 Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; sistema horizontal coplanar; manto M_1 67
 (a) $L_1 = 0,15 \text{ m}$
 (b) $L_2 = 0,20 \text{ m}$
 (c) $L_3 = 0,25 \text{ m}$
- 24 Variação da componente em-fase com a separação de bobinas; sistema horizontal coplanar; manto M_2 68
 (a) $L_1 = 0,15 \text{ m}$
 (b) $L_2 = 0,20 \text{ m}$
 (c) $L_3 = 0,25 \text{ m}$
- 25 Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; sistema horizontal coplanar; manto M_2 69
 (a) $L_1 = 0,15 \text{ m}$
 (b) $L_2 = 0,20 \text{ m}$
 (c) $L_3 = 0,25 \text{ m}$
- 26 Variação da componente em-fase com a separação de bobinas; sistema horizontal coplanar; manto M_3 70
 (a) $L_1 = 0,15 \text{ m}$
 (b) $L_2 = 0,20 \text{ m}$
 (c) $L_3 = 0,25 \text{ m}$
- 27 Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; sistema horizontal coplanar; manto M_3 71

- (a) $L_1 = 0,15$ m
(b) $L_2 = 0,20$ m
(c) $L_3 = 0,25$ m
- 28 Variação da componente em-fase com a separação de bobinas; sistema vertical coplanar; manto M_1 72
(a) $L_1 = 0,15$ m
(b) $L_2 = 0,20$ m
(c) $L_3 = 0,25$ m
- 29 Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; sistema vertical coplanar; manto M_1 73
(a) $L_1 = 0,15$ m
(b) $L_2 = 0,20$ m
(c) $L_3 = 0,25$ m
- 30 Variação da componente em-fase com a separação de bobinas; sistema vertical coplanar; manto M_2 74
(a) $L_1 = 0,15$ m
(b) $L_2 = 0,20$ m
(c) $L_3 = 0,25$ m
- 31 Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; sistema vertical coplanar; manto M_2 75
(a) $L_1 = 0,15$ m
(b) $L_2 = 0,20$ m
(c) $L_3 = 0,25$ m
- 32 Variação da componente em-fase com a separação de bobinas; sistema vertical coplanar; manto M_3 76
(a) $L_1 = 0,15$ m
(b) $L_2 = 0,20$ m
(c) $L_3 = 0,25$ m
- 33 Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; sistema vertical coplanar; manto M_3 77
(a) $L_1 = 0,15$ m
(b) $L_2 = 0,20$ m
(c) $L_3 = 0,25$ m
- 34 Variação da componente em-fase com a separação de bobinas; sistema vertical coaxial; manto M_1 78
(a) $L_1 = 0,15$ m
(b) $L_2 = 0,20$ m

- (c) $L_3 = 0,25 \text{ m}$
- 35 Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; sistema vertical coaxial; manto M_1 79
(a) $L_1 = 0,15 \text{ m}$
(b) $L_2 = 0,20 \text{ m}$
(c) $L_3 = 0,25 \text{ m}$
- 36 Variação da componente em fase com a separação de bobinas; sistema vertical coaxial; manto M_2 80
(a) $L_1 = 0,15 \text{ m}$
(b) $L_2 = 0,20 \text{ m}$
(c) $L_3 = 0,25 \text{ m}$
- 37 Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; sistema vertical coaxial; manto M_2 81
(a) $L_1 = 0,15 \text{ m}$
(b) $L_2 = 0,20 \text{ m}$
(c) $L_3 = 0,25 \text{ m}$
- 38 Variação da componente em fase com a separação de bobinas; sistema vertical coaxial; manto M_3 82
(a) $L_1 = 0,15 \text{ m}$
(b) $L_2 = 0,20 \text{ m}$
(c) $L_3 = 0,25 \text{ m}$
- 39 Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; sistema vertical coaxial; manto M_3 83
(a) $L_1 = 0,15 \text{ m}$
(b) $L_2 = 0,20 \text{ m}$
(c) $L_3 = 0,25 \text{ m}$
- 40 Variação das amplitudes máximas com a frequência nas várias separações de bobinas; sistema horizontal co planar. 85
- 41 Variação das amplitudes máximas com a frequência nas várias separações de bobinas; sistema vertical coplanar. 86
- 42 Variação das amplitudes máximas com a frequência nas várias separações de bobinas; sistema vertical coaxial. 87

FIGURA

Pág.

| | | |
|----|--|----|
| 43 | Respostas obtidas para o manto M_3 variando a frequência; sistema horizontal coplanar. | 89 |
| 44 | Respostas obtidas para o manto M_3 variando a frequência; sistema vertical coplanar. | 90 |
| 45 | Respostas obtidas para o manto M_3 variando a frequência; sistema vertical coaxial. | 91 |
| 46 | Perfis de campo obtidos sobre um corpo vertical de sulfetos sob manto de intemperismo. | 94 |

TABELA

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Condutividade de algumas rochas encaixantes comuns. | 11 |
| 2 | Condutividade de minerais bons condutores. | 11 |
| 3 | Materiais utilizados em modelamento com os correspondentes minerais. | 33 |
| 4 | Características das folhas metálicas usadas no modelamento. | 45 |

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| RESUMO | 01 |
| ABSTRACT | 03 |
| 1. INTRODUÇÃO | 05 |
| 2. MÉTODOS DE PROSPECÇÃO EM | 08 |
| 2.1 Introdução | 08 |
| 2.2 Comportamento dos Campos EM na Terra | 08 |
| 2.3 Combinação de Campos EM | 13 |
| 2.4 Potencial Vetor Magnético | 15 |
| 2.5 Indutância Mútua | 16 |
| 2.5.1 Indutância Mútua de um Sistema de Bobinas sobre um Semi-espaço Homogêneo e Isotrópico | 17 |
| 2.5.2 A Função Resposta | 20 |
| 2.6 Classificação dos Métodos Eletromagnéticos | 23 |
| 3. TÉCNICAS DE INTERPRETAÇÃO E OBJETIVOS | 29 |
| 3.1 Solução Analítica | 29 |
| 3.2 Modelamento Digital | 29 |
| 3.3 Modelamento Analógico | 31 |
| 3.3.1 Teoria da Similitude EM | 31 |
| 3.3.2 Material para Modelamento | 33 |
| 3.3.3 Tipos de Modelos | 34 |
| 3.4 Os Problemas na Interpretação | 35 |
| 3.4.1 Efeitos de Halo Condutivo | 35 |
| 3.4.2 Efeitos de Rocha Encaixante Condutiva | 37 |
| 3.4.3 Efeitos do Manto de Intemperismo | 37 |
| 3.5 Objetivo do Trabalho | 40 |
| 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 42 |
| 4.1 Modelo de Laboratório | 42 |
| 4.1.1 Consideração Física | 42 |
| 4.1.2 Materiais Utilizados | 43 |
| 4.2 Equipamento | 43 |
| 4.2.1 Sistema de Energização | 43 |
| 4.2.2 Sistema de Recepção | 46 |
| 4.2.3 Sistema de Disposição dos Modelos | 46 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.3 | Processo de Medição | 47 |
| 4.3.1 | Calibração | 47 |
| 4.3.2 | Medições | 48 |
| 4.4 | Fontes de Erros | 48 |
| 4.4.1 | Erros Sistemáticos | 48 |
| 4.4.2 | Erros Não-Sistemáticos | 49 |
| 5. | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 50 |
| 5.1 | Modificações nos Perfis devido ao Manto de Intemperis- mo | 50 |
| 5.1.1 | Efeito da Frequência | 50 |
| 5.1.2 | Efeito da Separação Transmissor-Receptor | 54 |
| 5.2 | Análise das Respostas | 54 |
| 5.2.1 | Efeito da Condutância dos Corpos | 58 |
| 5.2.2 | Efeito da Condutância do Manto | 58 |
| 5.2.3 | Efeito da Separação entre as Bobinas | 65 |
| 5.2.4 | Efeito de Diferentes Sistemas de Bobinas | 65 |
| 6. | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 84 |
| 7. | CONCLUSÕES | 92 |
| 8. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 95 |

RESUMO

A resposta eletromagnética (EM) de um corpo condutivo envolvido por uma zona parcialmente condutiva, torna-se bastante diferente daquela de um corpo condutivo em um meio altamente resistivo. As zonas parcialmente condutivas, como por exemplo, rocha encaixante, halo de sulfetos disseminados ou manto de intemperismo, que envolvem o corpo condutivo, afetam a resposta EM de diferentes maneiras, dependendo de suas características físicas e geométricas e, em particular, do sistema de prospecção EM utilizado.

Neste trabalho em modelamento analógico, foi feita uma análise de anomalias EM provocadas por corpos condutivos tabulares verticais sob manto de intemperismo, em levantamentos terrestres para diferentes sistemas de bobinas - horizontal coplanar, vertical coplanar e vertical coaxial - em oito frequências na faixa de 250 Hz a 35 kHz e separações entre as bobinas de 0,15; 0,20 e 0,25 m.

O manto de intemperismo foi simulado por folhas de aço finas dispostas horizontalmente e o corpo condutor principal por folhas de alumínio finas colocadas verticalmente. As dimensões das folhas foram determinadas de acordo com as condições de modelamento para o plano e o semi-plano.

Foram utilizados três corpos e três mantos com diferentes espessuras e condutividades, simulando, deste modo, diversas situações geológicas. Os resultados mostraram que cada sistema de bobinas é afetado diferentemente pela presença do manto de intemperismo.

Para a análise dos resultados foi plotado um conjunto de diagramas considerando os valores pico-a-pico das anomalias em fase e em quadratura. Um outro conjunto de diagramas mostra as amplitudes máximas em fase, que ocorrem quando a componente em quadratura se anula em uma frequência relativamente baixa para um conjunto de corpo-manto, e as amplitudes máximas em quadratura, que ocorrem quando a resposta em fase atinge um mínimo próximo de zero, em frequências relativamente altas. Com isto foi possível conhecer a faixa de frequências para cada sistema de bobinas, onde a resposta EM se encontra o mínimo afetada pela presença do manto de intemperismo.

A maior amplitude na resposta é obtida no sistema horizontal coplanar e a menor no sistema vertical coplanar. Um aumento na separação entre as bobinas é acompanhado por um deslocamento da anomalia para baixas frequências. A faixa de frequências, onde a presença do manto tem pouca influência na resposta do corpo condutivo, é maior para o sistema vertical coaxial e menor para o sistema horizontal coplanar.

Esses resultados dão uma luz para o conhecimento da posição e da largura da banda de frequências utilizável, assim como as melhores separações entre transmissor-receptor, para auxiliar no planejamento de sistemas de prospecção EM, de modo que a resposta fique o mais livre possível de sinais indesejáveis, tais como os causados pela presença do manto de intemperismo.

ABSTRACT

Partially conducting environment surrounding an ore body highly affect its electromagnetic response. Conducting host rock, overburden and disseminated sulphide halo, for example, affect the electromagnetic response in different ways depending upon their electrical properties, areal and geometrical relation with the target, and in particular to the EM system used for prospecting.

In the thesis, EM anomalies due to vertical tabular conducting bodies under an overburden, obtained through reduced scale models, are analysed for different ground EM systems - horizontal coplanar, vertical coplanar and vertical coaxial - in 8 frequencies between 250 Hz to 35 kHz and the coil separation 0,15; 0,20 and 0,25 m.

Overburden was simulated by horizontally placed thin stainless steel sheet and the main conducting target by thin aluminium sheets placed vertically below the former. The dimensions of these sheets were determined according to the modelling conditions for a plane and half-plane.

Various geological situations were represented in modelling using the combinations of the three metallic sheets of varying thicknesses and conductivities to simulate the ore body and another three sheets to simulate the overburden.

Set of diagrams are plotted using peak-to-peak inphase and quadrature anomalies for analysing the results. However, another set of diagrams show that the maximum inphase anomaly occurs when the quadrature counterpart is zero at relatively low frequencies when the ore-body together with the overburden is studied. On the other hand, the maximum amplitude in quadrature is obtained at relatively high frequencies when the inphase component attains the minimum, almost zero. With this type of analysis, it was to know the band of frequencies, for each of prospecting systems studied, in which the EM response of the ore body is least affected by the overburden.

Highest response was obtained with the horizontal coplanar system and the least with the vertical coplanar coils. An increase in the separation between the transmitter-receiver resulted in dislocating the peaks to lower frequencies. Widest band of frequencies, in which the EM response of the body is least affected

ted by the overburden, is obtained in case of vertical coaxial system and narrowest for the horizontal coplanar coils.

These results helps us in planning the EM prospecting systems by knowing the position and the band with of frequencies to be used along with otimum transmitter-receiver separation such that the EM response remains free from undesired signals, for example those caused by to overburden.

1. INTRODUÇÃO

Os métodos indutivos de prospecção EM tem conseguido bons resultados na exploração mineral, sobretudo em regiões onde as formações superficiais são altamente resistivas, como é o caso de regiões áridas onde os solos se encontram quase totalmente ressequidos ou regiões polares ou subpolares onde o terreno se apresenta congelado a considerável profundidade.

Estudos da resposta EM de modelos em escala reduzida de corpos geológicos de geometria simples, simulados por folhas metálicas ao ar livre, foram bastante utilizados na interpretação de levantamentos EM em regiões de solo congelado, como Canadá e Escandinávia, onde o uso dos métodos EM era largamente difundido. Nesses modelos geológicos a rocha encaixante e o manto de intemperismo eram considerados altamente resistivos e o halo de sulfetos pouco desenvolvido, podendo estes serem representados pelo ar.

Entretanto a aplicação dos métodos EM em regiões tropicais e semi-áridas, apresentou dificuldades devido a presença de uma camada superficial de alta condutividade que são comumente encontradas nestas regiões. Em muitas partes do continente Australiano, por exemplo, a espessura da cobertura condutiva é maior do que 30m alcançando valores relativamente altos de condutividade elétrica (Preston, 1975). No Brasil, sobretudo nas regiões tropicais, é frequente também a presença de mantos de intemperismo com mais de 20m de espessura e condutância variando entre 0,1 a 1,0 S (Palacky e Kadokaru, 1978). Essas camadas superficiais condutivas de considerável espessura, geram correntes secundárias que afetam drasticamente a resposta EM do corpo. Assim a interpretação de dados EM baseados em modelos ao ar-livre pode conduzir a erros grosseiros (Lowrie e West, 1965; Parasnis, 1971; Preston, 1975; Lajoie e West, 1977; Palacky e Kadokaru, 1978; Palacky e Sena, 1979).

Lowrie e West (1965) utilizando o sistema HLEM (bobinas horizontais), estudaram os efeitos do manto de intemperismo sobre a resposta de um condutor vertical, e concluíram que as medidas da profundidade e condutância dos corpos serão maiores quando interpretadas baseando-se em diagramas convencionais.

Parasnis (1971) baseado em levantamentos EM que utilizaram o sistema HLEM para diversas frequências e separações trans-

missor-receptor, também fez uma advertência para a interpretação das anomalias utilizando-se os diagramas de Argand convencionais. Muitos desses diagramas são baseados sobre modelos experimentais ou cálculos teóricos em corpos de geometria simples no espaço livre. Se a anomalia em uma certa separação ou frequência é conhecida, é possível prever a anomalia em qualquer outra separação ou frequência. Porém enquanto o resultado de tais separações concordam muito bem com os experimentos de laboratório, discrepâncias sistemáticas são observadas largamente em trabalhos de campo. O efeito de um manto condutivo obscurecendo a resposta EM pode ser o responsável por estas discrepâncias. Os resultados de vários levantamentos com modelos mostraram que a resposta devido ao manto condutivo aumenta mais rapidamente com um moderado decréscimo na separação transmissor-receptor do que com um grande aumento na frequência.

Palacky (1975) utilizando o sistema aéreo INPUT - domínio do tempo - estudou os efeitos do manto sobre anomalias de corpos do tipo semi-plano com várias inclinações e Hurley (1977), trabalhando também no domínio do tempo estudou os efeitos do manto sobre a resposta de modelos esféricos. Ambos os autores confirmaram as modificações que o manto provoca nas anomalias EM, dificultando bastante a interpretação.

Silva (1981) estudou os efeitos do manto em anomalias EM de semi-planos com várias inclinações utilizando o sistema HLEM no domínio da frequência. Além de confirmar os efeitos observados por Lowrie e West (1965) para semi-planos verticais, foi observado o aparecimento de um pico extra na quadratura no caso de semi-planos com pequenas inclinações.

Villegas-García (1979) estudou a resposta de um manto não-uniforme utilizando o sistema HLEM em diversas frequências e separações transmissor-receptor. Até a máxima frequência utilizada de 3631 Hz, foi observado que a resposta de um manto que apresenta uma descontinuidade do tipo "vale", é muito similar à resposta de uma folha condutora coberta por um manto uniforme. Quando existe um condutor embaixo do manto não-uniforme, pôde-se observar que a medida que a frequência diminui, a resposta do manto diminui progressivamente enquanto a resposta do conjunto corpo-manto experimenta um suave decaimento na amplitude até uma aparente saturação em frequências onde o efeito do manto é quase completa

mente eliminado. O uso do sistema em multifrequência e multise^{pa}ração facilitou bastante o reconhecimento da resposta caracterís^{ti}ca do manto.

Com este trabalho pretende-se estudar a resposta EM de um corpo tabular vertical coberto por um manto de intemperismo com o objetivo de encontrar melhores condições de levantamentos EM na presença do manto, ou seja, a melhor faixa de frequências assim como o adequado arranjo de bobinas e separações entre elas, onde a resposta EM esteja o mais livre possível de sinais indese^{ja}veis, como os causados pelo manto de intemperismo.

2. MÉTODOS DE PROSPECÇÃO EM

2.1. Introdução

O método eletromagnético mede o campo resultante da introdução, no terreno, de ondas geradas por fontes transmissoras artificiais ou naturais. Este campo primário, ao se propagar no subsolo, gera, devido à presença de condutores, campos secundários que influenciam o campo primário, de modo que, o campo resultante sobre áreas contendo condutores é suficientemente diferente daquele observado onde o meio é uniforme e desprovido de corpos condutivos. Os métodos de prospecção EM tem sido mais comumente utilizados na exploração mineral. Entre os minerais bons condutores e de interesse econômico temos os de grafite e os corpos mineralizados com pirrotita, galena, pirita, calcopirita e magnetita.

O principal problema da instrumentação EM é a separação dos campos primário e secundário com uma precisão eficiente. Existem dois métodos para atingir esse objetivo: sistemas no domínio do tempo e no domínio da frequência. Nos sistemas no domínio do tempo, exceto no UTEM - University of Toronto - (Lamontagne, 1975), as medidas são feitas pelo decaimento dos campos em um condutor depois que o transmissor é desligado. O campo primário existe em pulsos de duração limitada e o campo secundário é determinado na ausência do campo primário. Nos sistemas indutivos no domínio da frequência, o campo primário, que é constante quando a distância entre o transmissor e o receptor é fixa, é subtraído eletronicamente. Sendo o campo uma quantidade complexa, é possível medir as componentes real, que é em fase com o campo primário, e a componente imaginária que é 90° fora de fase. As frequências comumente usadas em sistemas de prospecção do tipo transmissor-receptor móveis, estão na faixa de 200 a 5000 Hz e a separação entre as bobinas variam de 30 a 250 m.

2.2. Comportamento dos Campos EM na Terra

Considerando um meio homogêneo e isotrópico que possui uma condutividade elétrica, σ , uma permissividade elétrica, ϵ , e uma permeabilidade magnética, μ . Os fenômenos eletromagnéticos que ocorrem nesse meio sob condições de linearidade, são regidos pelas equações de Maxwell, que combinadas convenientemente

conduzem a equações diferenciais de segunda ordem, conhecidas como equações de onda da forma:

$$\nabla^2 \bar{E} - \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

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

onde:

\bar{E} = vetor campo elétrico e

\bar{H} = vetor campo magnético.

Como na prática a maioria dos sistemas de prospecção EM no domínio da frequência variam senoidalmente com o tempo, substituímos nas equações (1) e (2) $\partial/\partial t$ por $i\omega$, onde ω é a frequência angular. Então obtemos,

$$\nabla^2 \bar{E} - i\omega\mu\sigma \bar{E} + \omega^2 \mu\epsilon \bar{E} = 0 \quad (3)$$

e
$$\nabla^2 \bar{H} - i\omega\mu\sigma \bar{H} + \omega^2 \mu\epsilon \bar{H} = 0 \quad (4)$$

As equações acima são frequentemente escritas na forma de uma equação de helmholtz como,

$$\nabla^2 \bar{E} + k^2 \bar{E} = 0 \quad (5)$$

e
$$\nabla^2 \bar{H} + k^2 \bar{H} = 0 \quad (6)$$

onde $k = (\omega^2 \mu\epsilon - i\omega\mu\sigma)^{1/2} \quad (7)$

A constante k é chamada de constante complexa de propagação e apresenta todos os parâmetros que influenciam os campos EM.

Se o campo magnético é plano-polarizado na direção y e se propaga na direção z , a densidade de corrente será polarizada na direção x e as soluções das equações (5) e (6) são,

$$\bar{E} = \bar{E}_x(z,t) = \bar{E}_0 \exp(-i\omega t + (\omega^2 \mu\epsilon - i\omega\mu\sigma)^{1/2} z) \quad (8)$$

$$\bar{H} = \bar{H}_y(z,t) = \bar{H}_0 \exp(-i\omega t + (\omega^2 \mu\epsilon - i\omega\mu\sigma)^{1/2} z) \quad (9)$$

e
$$\bar{J}_x = \sigma \bar{E}_x(z,t) = \bar{J}_0 \exp(-i\omega t + (\omega^2 \mu\epsilon - i\omega\mu\sigma)^{1/2} z) \quad (10)$$

Na constante de propagação, k , estão presentes a frequência angular, ω , e as propriedades físicas, σ , μ e ϵ .

O valor da permissividade elétrica, ϵ , para a água é da ordem de 80 e para rochas e minerais geralmente fica em torno de $9\epsilon_0 \approx 8 \times 10^{-11}$ F/m, onde ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo.

O efeito da permeabilidade magnética sobre os campos EM é pequeno, exceto em casos de meios contendo grande concentração de minerais ferromagnéticos. A permeabilidade magnética para ro-

chas e minerais varia muito pouco em relação à permeabilidade magnética do vácuo, μ_0 . Então geralmente é considerado que,

$\mu \approx \mu_0 \approx 1,3 \times 10^{-6}$ H/m para rochas e minerais em geral
e $\mu \leq 3\mu_0$ para minerais ferromagnéticos.

Em meios não-condutivos, a condutividade elétrica varia desde, praticamente zero no ar, até valores em torno de 10^{-3} S/m em rochas relativamente não-condutivas, como as listadas na Tabela 1.

As frequências típicas usadas em prospecção EM estão na ordem de 10^3 Hz. Para rochas encaixantes comuns, como as listadas na Tabela 1, $\sigma \approx 10^{-3}$ S/m, $\epsilon \approx 9\epsilon_0$, $\mu \approx \mu_0$, as equações (3) e (4) tornam-se,

$$\nabla^2 \vec{E} = (-4 \times 10^{-9} + 7 \times 10^{-6} i) m^2 \vec{E} \quad (11)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = (-4 \times 10^{-9} + 7 \times 10^{-6} i) m^2 \vec{H} \quad (12)$$

Em zonas altamente condutivas, como zonas de sulfetos (Tabela 2) onde, $\sigma \approx 10^4$ S/m,

$$\nabla^2 \vec{E} = (-4 \times 10^{-9} + 70i) m^2 \vec{E} \quad (13)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = (-4 \times 10^{-9} + 70i) m^2 \vec{H} \quad (14)$$

Nas equações acima a parte real dos coeficientes de \vec{E} e \vec{H} é pequena em relação à parte imaginária, e pode ser desprezada. Em rochas encaixantes comuns, geralmente o termo imaginário tem efeito muito pequeno mas em zonas altamente condutivas isto não ocorre.

Assim podemos concluir que, em regiões não-condutivas, o campo obedece à equação de Laplace, isto é,

$$\nabla^2 \vec{E} = 0, \quad (15)$$

e
$$\nabla^2 \vec{H} = 0 \quad (16)$$

enquanto em zonas de apreciável condutividade, as equações do campo são,

$$\nabla^2 \vec{E} = i\omega\mu\sigma\vec{E} \quad (17)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = i\omega\mu\sigma\vec{H} \quad (18)$$

cujas soluções são,

$$\vec{E} = \vec{E}_x(z, t) = \vec{E}_0 \exp(-i\omega t + (i\omega\mu\sigma)^{1/2} z) \quad (19)$$

| ROCHAS | CONDUTIVIDADE σ (S/m) | |
|----------|---------------------------------|--------------------|
| Basaltos | 10^{-4} | 10^{-2} |
| Calcário | 10^{-5} | 10^{-2} |
| Diabásio | 2×10^{-8} | 3×10^{-3} |
| Gabro | 10^{-6} | 10^{-5} |
| Gnaisse | 10^{-6} | 10^{-3} |
| Granito | 5×10^{-5} | 10^{-3} |
| Xisto | 10^{-5} | 10^{-3} |

Tabela 1. Condutividade de algumas rochas encaixantes comuns (Segundo Parasnis, 1966).

| MINERAIS | CONDUTIVIDADE σ (S/m) | |
|-------------|---------------------------------|-------------------|
| Bornita | 16×10^2 | 6×10^5 |
| Calcopirita | | 10^4 |
| Covelita | 12×10^3 | 33×10^5 |
| Galena | 1,6 | $3,8 \times 10^4$ |
| Grafita | 10^2 | 26×10^5 |
| Molibdenita | 10^4 | |
| Nicolita | 10^2 | 10^5 |
| Pirita | 10^{-1} | 10^4 |
| Pirrotita | 10^3 | 10^5 |

Tabela 2. Condutividade de minerais bons condutores (Segundo Parasnis, 1966).

$$\vec{H} = \vec{H}_x(z, t) = H_0 \exp(-i\omega t + (i\omega\mu\sigma)^{1/2} z) \quad (20)$$

$$\vec{J}_x = \sigma \vec{E}_x(z, t) = J_0 \exp(-i\omega t + (i\omega\mu\sigma)^{1/2} z) \quad (21)$$

onde $\vec{J}_0 = (i\omega\mu\sigma)^{1/2} H_0$, desde que $\nabla_x \vec{H} = \vec{J} + \partial \vec{D} / \partial t$

Separando as partes real e imaginária em exponenciais e mantendo somente os termos que permanecem finitos quando $z \rightarrow \infty$, podemos escrever:

$$\vec{H}_y = H_0 \exp(-(\omega\mu\sigma/2)^{1/2} z) \cdot \exp(i(\omega t - (\omega\mu\sigma/2)^{1/2} z)) \quad (22)$$

$$\vec{J}_x = (i\omega\mu\sigma)^{1/2} H_0 \exp(-(\omega\mu\sigma/2)^{1/2} z) \cdot \exp(i(\omega t - (\omega\mu\sigma/2)^{1/2} z)) \quad (23)$$

Essas equações representam uma onda altamente amortecida cuja amplitude decresce exponencialmente com a distância e depende do produto $(\omega\mu\sigma/2)^{1/2}$. A amplitude da corrente é $(\omega\mu\sigma)^{1/2}$ vezes o campo magnético em todos os pontos. Um aumento na frequência ou condutância ocasionará em um aumento na atenuação. Assim em bons condutores, onde σ é grande, a onda será fortemente atenuada, havendo também um deslocamento de fase conforme ela passa pelo condutor. As correntes induzidas responsáveis pela atenuação do campo magnético, serão igualmente concentradas próximo à superfície do condutor e produzirão correntes superficiais que gerarão um intenso campo secundário.

Para valores intermediários de $\omega\mu\sigma$, deverá ocorrer um campo de corrente induzido moderadamente forte, que por sua vez produzirá uma apreciável alteração no campo magnético. Essas correntes não estarão em-fase com o campo magnético ou uniformemente distribuídas, mas, em geral, tenderão a juntar-se próximo ao exterior do condutor. A figura 1 ilustra essas situações.

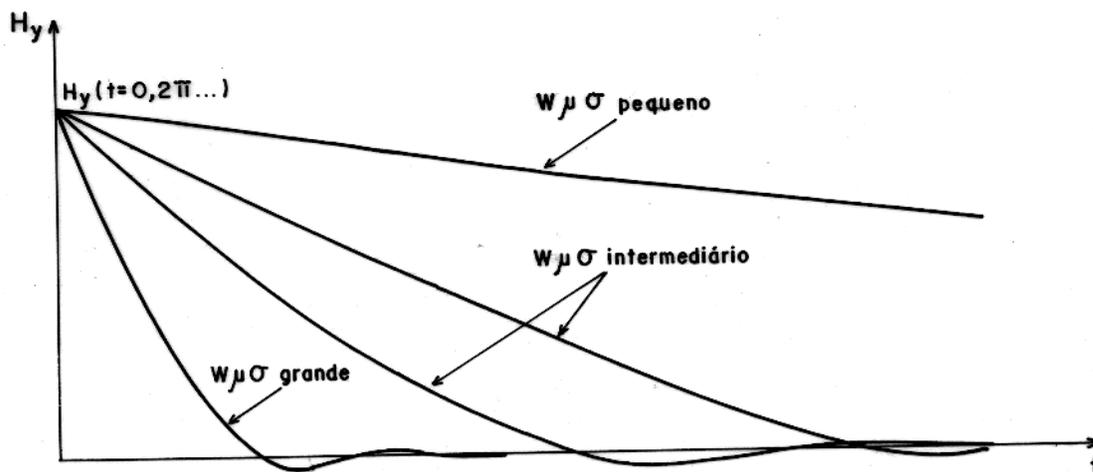


Fig. 1 - Comportamento de H_y para diferentes valores de $\omega\mu\sigma$ (Segundo Grant e West, 1965).

2.3. Combinação de Campos EM

O campo magnético secundário, gerado pelas correntes induzidas no condutor, em geral não se encontra em fase nem tem a mesma direção do campo primário em um ponto de observação, de modo que, normalmente o campo total é elipticamente polarizado. A onda elipticamente polarizada pode ser expressa em termos de duas componentes linearmente polarizadas, uma na direção x e outra na direção y. Deste modo, conforme a Fig. 2a, se a onda estiver se deslocando no sentido positivo (para fora da página), as componentes do campo magnético primário e secundário nas direções x e y são, respectivamente,

$$\bar{H}_{p_x} = \bar{H}_1 \text{sen}(\omega t) \quad (24)$$

$$\bar{H}_{s_y} = \bar{H}_2 \text{cos}(\omega t - \varphi) \quad (25)$$

onde, H_1 e H_2 são as amplitudes máximas das ondas linearmente polarizadas nas direções x e y respectivamente e dependem da geometria do transmissor, condutor e receptor.

φ = ângulo de fase em que H_s está defasado de H_p .

$$\text{Desde que } \text{cos}(\omega t - \varphi) = \text{cos}\omega t \text{cos}\varphi + \text{sen}\omega t \text{sen}\varphi \quad (26)$$

Substituindo $\text{cos}\omega t$ e $\text{sen}\omega t$ em (26) e rearranjando obtemos (Telford, 1976),

$$\frac{\bar{H}_{p_x}^2}{\bar{H}_1^2 \text{cos}^2} + \frac{\bar{H}_{s_y}^2}{\bar{H}_2^2 \text{cos}^2} - \frac{2\bar{H}_{p_x} \bar{H}_{s_y} \text{sen}}{\bar{H}_1 \bar{H}_2 \text{cos}^2} = 1 \quad (27)$$

que é a equação de uma elipse.

Mesmo se H_p e H_s não são ortogonais no espaço, o que geralmente acontece, esses vetores podem ser resolvidos em termos de duas componentes ortogonais, cuja expressão é mais complicada, mas ainda é a equação de uma elipse.

Consequentemente a superposição de campos EM produz um campo que é elipticamente polarizado, cujo vetor gira no espaço com uma amplitude mudando continuamente e suas extremidades descrevem uma elipse (Fig. 2a).

O plano do espaço que contém esta elipse normalmente fica inclinado levemente da horizontal ou da vertical. Isto ocorre porque sendo $\bar{H}_p \gg \bar{H}_s$, o eixo maior da elipse de polarização é determinado por \bar{H}_p , que normalmente, nos sistemas EM, está na horizontal ou na vertical.

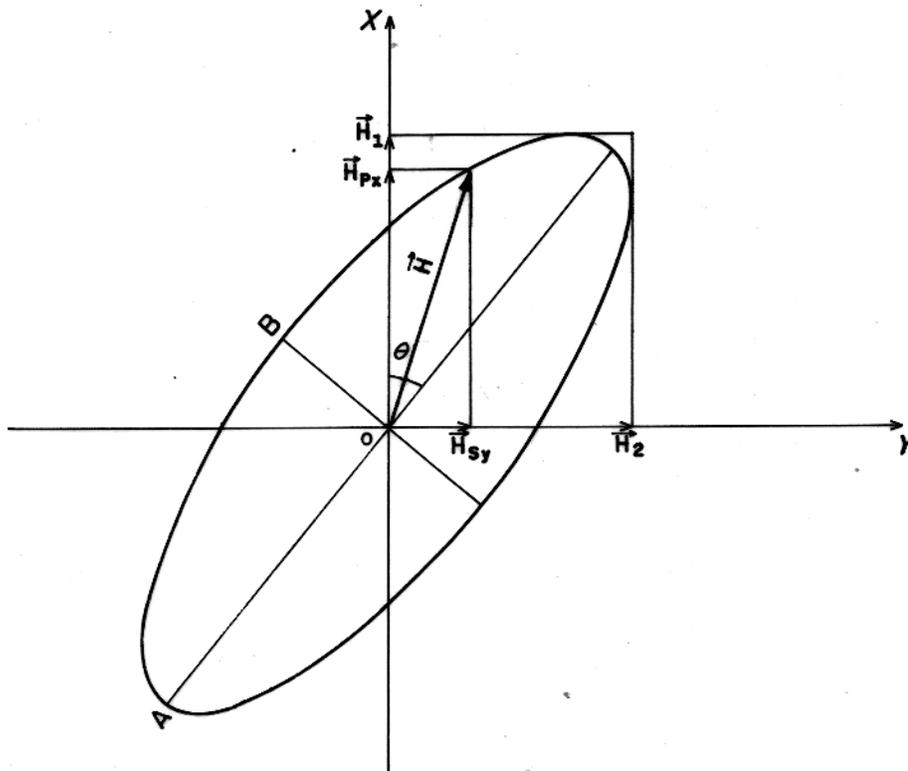


Fig. 2a - Elipse de polarização.

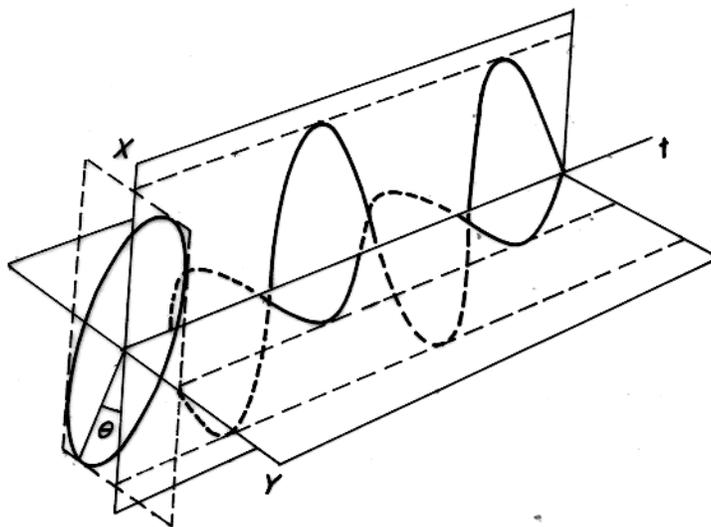


Fig. 2b - Polarização elíptica.

Casos particulares:

i) Quando $\varphi = \pi/2$, a equação (27) torna-se

$$(\bar{H}_{p_x} / \bar{H}_1 - \bar{H}_{s_y} / \bar{H}_2)^2 = 0 \quad (28)$$

$$\text{ou } \bar{H}_2 \bar{H}_{p_x} - \bar{H}_1 \bar{H}_{s_y} = 0 \quad (29)$$

que é a equação de uma reta que passa pela origem das coordenadas, tendo uma inclinação \bar{H}_2 / \bar{H}_1 .

Este é o caso de ótimos condutores. O campo secundário, em relação ao campo primário, sofre um atraso de $\pi/2$ devido ao acoplamento indutivo entre o transmissor e o receptor e um atraso adicional de fase, φ , determinado pelas propriedades elétricas do condutor. Assim,

$$\varphi = \text{tg}^{-1} L_s / R_s = \pi/2$$

ou $\text{tg} \rightarrow \infty$ quando $R_s \rightarrow 0$

onde L_s e R_s são respectivamente a indutância e a resistência do condutor.

ii) Quando $\varphi = 0$, a equação da elipse fica,

$$\bar{H}_{p_x}^2 / \bar{H}_1^2 + \bar{H}_{s_y}^2 / \bar{H}_2^2 = 1 \quad (30)$$

Este é o caso de maus condutores, uma vez que $R_s \gg L_s$ para $\varphi = 0$. O campo secundário está defasado somente de $\pi/2$ do campo primário. Quando $\bar{H}_1 = \bar{H}_2$, a combinação de \bar{H}_{p_x} e \bar{H}_{s_y} resulta em uma polarização circular.

2.4. Potencial Vetor Magnético

A análise de um campo EM é frequentemente facilitada pela introdução de funções auxiliares derivadas de \bar{E} e \bar{H} , conhecidas como potenciais. Um dos mais comumente utilizados é o potencial vetor magnético, relacionado ao fluxo magnético, B , da seguinte maneira:

$$\text{Como } \nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (\text{campo solenoidal}) \quad (31)$$

Por definição, a divergência do rotacional de uma função vetorial é zero. Então \bar{B} pode ser expresso como o rotacional de alguma outra função vetorial, chamada de potencial vetor, ou seja,

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad (32)$$

onde A é o potencial vetor magnético.

Assumindo que os campos variam senoidalmente no tempo. Como as frequências utilizadas são relativamente baixas (na ordem de 10^3), podemos obter a relação (Grant e West, 1965):

$$\nabla^2 A = -\mu \bar{J} \quad (33)$$

que é similar a uma equação de Poisson, cuja solução particular é da forma,

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int_v \frac{\bar{J} dv}{r} \quad (34)$$

onde $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$
e $\bar{J} = 0$ dentro do volume v .

O potencial vetor magnético não tem um significado físico como o potencial escalar em eletrostática e gravitação. É somente uma conveniência matemática na determinação dos campos EM.

2.5. Indutância Mútua

A indutância mútua é utilizada para descrever a interação entre circuitos elétricos a uma certa distância, devido a indução eletromagnética. Os fatores que estão relacionados à indução mútua são a disposição, geometria e espaçamento dos circuitos entre si, além das propriedades elétricas e magnéticas do meio nas proximidades dos mesmos. Por isso, qualquer variação das propriedades elétricas ou magnéticas do meio próximo aos circuitos, afetará a indutância mútua, quando os outros fatores permanecem constantes. Isso significa que as mudanças no valor da indução mútua, indicarão as mudanças de materiais terrestres de diferentes propriedades elétricas e magnéticas. Neste princípio estão baseados os métodos de prospecção EM.

A f.e.m. (força eletromotriz) induzida em um circuito secundário, devido ao fluxo de linhas magnéticas produzidas pela passagem de uma corrente variável no tempo, em um circuito primário, no espaço livre é,

$$\mathcal{E}_{21} = -d\phi / dt = -M_{12} (dI_1 / dt) \quad (35)$$

onde: \mathcal{E}_{21} = f.e.m. induzida no circuito secundário

ϕ = fluxo magnético através do circuito secundário

M_{12} = coeficiente de indutância mútua

I_1 = corrente que passa no circuito primário

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

A indutância mútua M_{12} entre dois circuitos 1 e 2 é dada por (Telford, 1976):

$$M_{12} = \frac{\mu}{4\pi} \oint_2 \oint_1 \frac{dl_1 dl_2}{r} \quad (36)$$

onde dl_1, dl_2 são elementos de comprimento nos circuitos 1 e 2, r a distância entre

No caso de duas bobinas coaxiais,

$$M_{12} = \pi \mu a^2 b^2 / 2L^3, \quad L \gg a, b \quad (37)$$

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

Se as bobinas são coplanares

$$M_{12} = \pi \mu a^2 b^2 / 4L^3, \quad L \gg a, b \quad (38)$$

2.5.1. Indutância mútua de um sistema de bobinas sobre um semi-espaço homogêneo e isotrópico

Se o sistema de bobinas, em vez de se encontrar no vácuo ou no espaço livre, está sobre a superfície de um terreno condutor homogêneo e isotrópico, a interação entre as bobinas será completamente modificada.

Os resultados podem ser expressos utilizando-se, em vez da indutância mútua, M_{12} , a impedância mútua, Z_{12} , que é, para dois determinados circuitos, a f.e.m. induzida no circuito secundário quando circula, no primário, uma corrente senoidal de intensidade unitária. Então se deduz de (35) que,

$$Z_{12} = -i\omega M_{12} \quad (39)$$

Wait (1955) examinou esta situação relacionando as impedâncias mútuas no semi-espaço homogêneo, isotrópico e no espaço livre, para várias configurações e posições das bobinas. As curvas resultantes são mostradas na figura 3 e as equações das mesmas são apresentadas abaixo.

a) Bobinas horizontais coplanares sobre a superfície do terreno

$$Z / Z_0 = (2 / (k^2 L^2)) (9 - (9 + 9kL + 4k^2 L^2 + k^3 L^3) \exp(-kL)) \quad (40)$$

com $Z_0 = m$

onde, Z = impedância mútua entre as bobinas no semi-espaço condutor homogêneo

Z_0 = impedância mútua entre as bobinas no espaço livre

L = distância entre as bobinas

$$k = (i\omega\mu\sigma)^{1/2} \quad ; \quad \mu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{H/m}$$

$$m = (i N_1 N_2 A_1 A_2 \cdot 10^{-7}) / L^3$$

N_1 = número de espiras da bobina 1

N_2 = número de espiras da bobina 2

A_1 = área da bobina 1

A_2 = área da bobina 2

b) Bobinas verticais coaxiais em cima da superfície do terreno

$$Z / Z_o = (\exp(-kL) / (k^2 L^2)) (12 + 12kL + 5k^2 L^2 + k^3 L^3) + 2 - 12 / k^2 L^2 \quad (41)$$

$$\text{com } Z_o = 2m$$

c) Bobinas verticais coplanares em cima da superfície do terreno

$$Z / Z_o = 2(((\exp(-kL) / (k^2 L^2)) (3 + 3kL + k^2 L^2 + 1 - 3/k^2 L^2))) \quad (42)$$

$$\text{com } Z_o = m$$

d) A primeira bobina é horizontal à superfície do terreno e a segunda é vertical com eixo perpendicular ao da primeira

$$Z / Z_o = - 1/2(k^2 L^2 (J_1 K_1 - J_o K_o) + 4kL (J_1 K_o - J_o K_1) + 16J_1 K_1) \quad (43)$$

com $Z_o = 2m$; J_o , J_1 , K_o , K_1 são funções modificadas de Bessel com argumento $(kL) / 2$

e) A primeira bobina é horizontal à superfície do terreno e a segunda é coaxial à primeira e está dentro da Terra.

$$Z / Z_o = (2\exp(-kL) / (k^2 L^2)) (12 + 12kL + 5k^2 L^2 + k^3 L^3) + 3((kL + 8 / kL) K_1(kL) + 4K_o(kL)) \quad (44)$$

$$\text{com } Z_o = 2m$$

f) As duas bobinas são verticais com eixos paralelos, sendo que a primeira está situada em cima do terreno e a segunda dentro da Terra.

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{(2 \exp(-kL) / (k^2 L^2)) (12 + 12kL + 5k^2 L^2 + k^3 L^3) - ((12 + k^2 L^2) K_0(kL) + 1/kL (24 + 5k^2 L^2) K_1(kL))}{(12 + k^2 L^2) K_0(kL) + 1/kL (24 + 5k^2 L^2) K_1(kL)} \quad (45)$$

com $Z_0 = m$

Em qualquer caso é desejável ter disponível, para pronta referência, as curvas teóricas para o semi-espaço homogêneo, isotrópico. O afastamento das curvas reais destas, pode ser considerado como uma perturbação resultante da estratificação ou inhomogeneidades de outras espécies. (Wait, 1955).

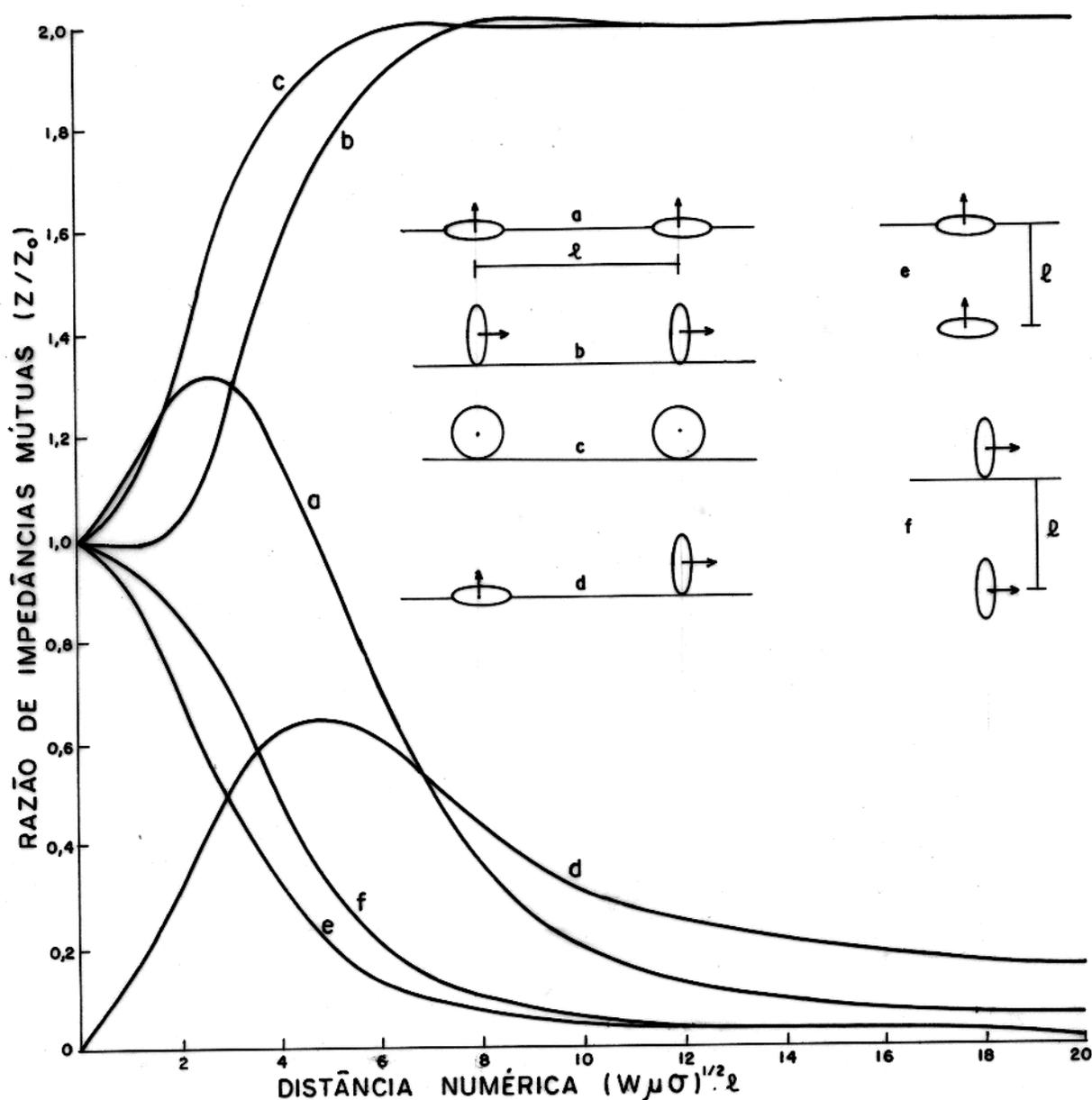


Fig. 3 - Resposta de uma variedade de sistema de bobinas sobre um semi-espaço homogêneo e isotrópico. (Segundo Wait, 1955)

2.5.2. A função resposta

Nos sistemas de prospecção EM em que a distância entre o transmissor e o receptor é fixa, a indutância mútua só mudará na presença de zonas condutivas em sua proximidade. A intensidade do campo secundário produzido por tal zona condutiva é proporcional à intensidade do campo primário do transmissor. Desde que, a f.e.m. adicional induzida no receptor deve ser proporcional à taxa de variação no tempo do campo secundário introduzido, pode-se escrever de maneira similar a (35),

$$\Delta \mathcal{E}_{21} = -\Delta M_{12} dI / dt \quad (46)$$

A anomalia EM será exatamente a razão adimensional

$$\Delta \mathcal{E}_{21} / \mathcal{E}_{21} = \Delta M_{12} / M_{12}$$

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

Assim 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, ΔM_{12} , é conseqüentemente uma quantidade complexa.

Na prática, podemos representar as condições de campo com um circuito de três espiras, conforme a figura 4.

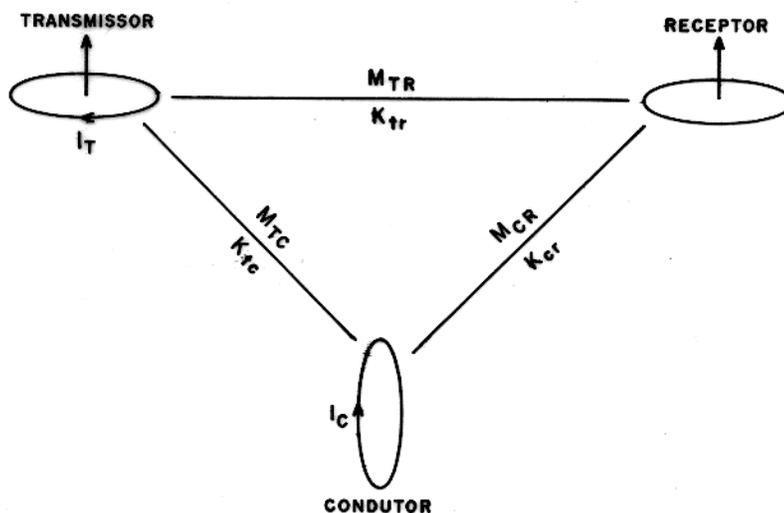


Fig. 4 - Representação de um sistema de prospecção EM. (Segundo Grant e West, 1965)

onde,

$I_T = I_{OT} \exp(i\omega t)$: corrente que circula no transmissor

$I_C = I_{OC} \exp(i\omega t)$: corrente que circula no condutor

$k_{1,2}$ = coeficiente de acoplamento entre o circuito 1 e o circuito 2

$M_{1,2}$ = indutância mútua entre o circuito 1 e o circuito 2

L_C = auto-indutância do condutor

R_C = resistência do condutor

A corrente alternada que circula no transmissor induz na bobina receptora e no condutor uma f.e.m. da forma,

$$\mathcal{E}_{TR} = - M_{TR} dI_T / dt = - i\omega M_{TR} I_{OT} \exp(i\omega t) \quad (48)$$

$$\mathcal{E}_{TC} = - M_{TC} dI_T / dt = - i\omega M_{TC} I_{OT} \exp(i\omega t) \quad (49)$$

A corrente induzida no condutor produz um campo secundário que induzirá uma f.e.m. na bobina receptora dada por,

$$\mathcal{E}_{CR} = - M_{CR} (dI_{OC} \exp(i\omega t) / dt) = - i\omega M_{CR} I_{OC} \exp(i\omega t) \quad (50)$$

A maioria dos equipamentos de prospecção EM medem a voltagem induzida pelo campo primário na ausência do condutor, isto é,

$$\mathcal{E}_{CR} / \mathcal{E}_{RT} = - i\omega (M_{CR} M_{TC}) / (M_{TR}) (R - i\omega L) / (R^2 + \omega^2 L^2) \quad (51)$$

Introduzindo em (51) o valor $Q = (\omega L) / R$, conhecido como fator de qualidade ou parâmetro de resposta, obtemos:

$$\mathcal{E}_{CR} / \mathcal{E}_{TR} = - ((M_{CR} M_{TC}) / (M_{TR} L)) ((Q^2 + iQ) / (1 + Q^2)) \quad (52)$$

onde,

$$M_{CR} = k_{CR} (L_C L_R)^{1/2}$$

$$M_{TC} = k_{TC} (L_T L_C)^{1/2}$$

$$M_{TR} = k_{TR} (L_T L_R)^{1/2}$$

Substituindo os valores acima em (52),

$$\mathcal{E}_{CR} / \mathcal{E}_{TR} = - ((k_{CR} k_{TC}) / k_{TR}) ((Q^2 + iQ) / (1 + Q^2)) \quad (53)$$

O termo $((k_{CR} k_{TC}) / k_{TR})$ é chamado de coeficiente de aco-

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

O termo $((Q^2 + iQ) / (1 + Q^2))$ é conhecido como função resposta e está relacionado às propriedades elétricas do condutor e à frequência utilizada.

Plotando-se a função resposta $((Q^2 / (1 + Q^2)) + (iQ) / (1 + Q^2))$ contra o parâmetro de resposta Q , nós obtemos duas curvas resultantes das partes real e imaginária da função. (figura 5).

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 tem valor igual a 0,5. Em seguida a componente imaginária decresce até se anular para grandes valores de Q . Neste caso, a parte real vai crescendo até atingir um valor máximo igual a um (1) no chamado limite indutivo, para grandes valores de Q , onde a resposta é puramente em fase, isto é,

$$\lim_{Q \rightarrow \infty} ((Q^2 / (1 + Q^2)) + iQ / (1 + Q^2)) \approx 1 \quad (54)$$

então,

$$\epsilon_{CR} / \epsilon_{TR} = - (k_{CR} k_{TC}) / k_{TR} \quad (55)$$

que é o valor máximo para ótimos condutores

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,

$$\lim_{Q \ll 1} (Q^2 + iQ) / (1 + Q^2) \approx Q(Q + i)(1 - Q^2) \approx iQ \quad (56)$$

então,

$$\epsilon_{CR} / \epsilon_{TR} = - iQ((k_{CR} k_{TC}) / k_{TR}) \quad (57)$$

Este valor, que é muito pequeno comparado ao 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 do condutor. Por isso é aconselhável que a escolha dos

valores da frequência e/ou espaçamento entre as bobinas, conduzam as componentes real e imaginária a se situarem na região onde $Q \geq 1$, onde se pode analisar melhor a resposta.

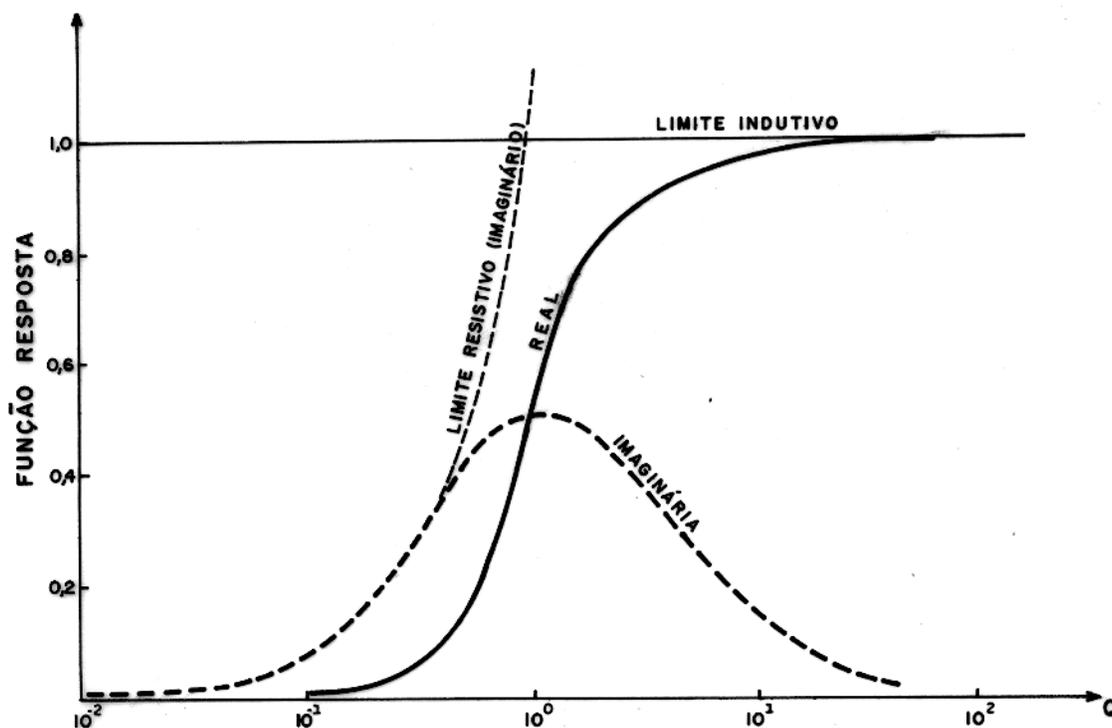


Fig. 5 - Função resposta de um sistema EM em campo magnético alternado. (Segundo Grant e West, 1965)

2.6. Classificação dos métodos Eletromagnéticos

A aplicação dos métodos de prospecção EM pode ser feita no ar ou na Terra utilizando-se vários sistemas de bobinas no domínio da frequência ou no domínio do tempo.

Os sistemas EM terrestres no domínio da frequência são subdivididos de acordo com:

- i) parâmetros de campo medidos
- ii) orientação transmissor-receptor
- iii) direção da linha transversa em relação ao sistema de bobinas.

i) os parâmetros de campo registrados em um sistema de prospecção podem ser:

- 1 - parâmetros da elipse de polarização:
 - a) mergulho e direção do plano de polarização
 - b) inclinação do eixo maior da elipse de polarização

As técnicas baseadas nesses parâmetros de medida são conhecidos como técnicas de "dip-angle" ou "tilt-angle".

- 2 - valores absolutos da amplitude do campo magnético total ou qualquer componente.
- 3 - intensidade do campo magnético relativo à amplitude e fase do campo magnético primário no ponto de observação.
- 4 - componentes em quadratura do campo magnético em relação às correspondentes, componentes em-fase.
- 5 - razões do campo magnético e diferenças de fase em pontos adjacentes de observação.

ii) quanto à orientação das bobinas transmissora e receptora os sistemas EM podem ser:

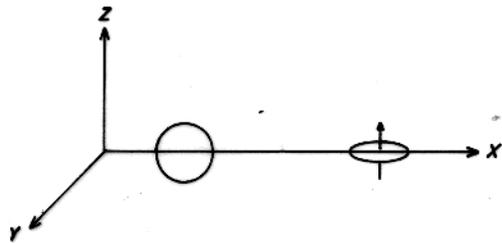
- 1 - Sistemas com transmissor fixo:
 - a) técnicas de fonte fixa "dip-angle" ou "tilt-angle", VLF
 - b) método "Bieler-Watson"
 - c) método "Two-frame" para comparação de amplitude
 - d) método compensador ou "Sundberg" para medidas das componentes real e imaginária
 - e) método TURAM para medidas de razão de amplitudes e diferenças de fase

- 2 - Sistemas com transmissor-receptor móveis

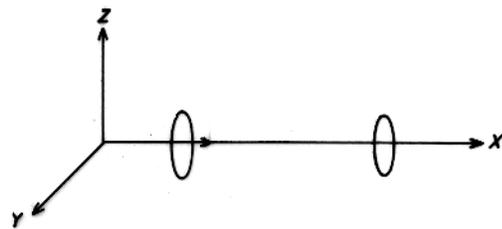
Esses sistemas usam bobinas transmissora e receptora portáteis e tem recebido várias denominações como: "Slingram", "Loop-frame", HLEM, VLEM, etc. Existe uma grande variedade de configurações mútuas entre as bobinas, porém nem todas práticas. As mais comuns são mostradas na figura 6.

iii) os sistemas baseados em relação à direção da linha transversa com respeito ao sistema de bobinas são:

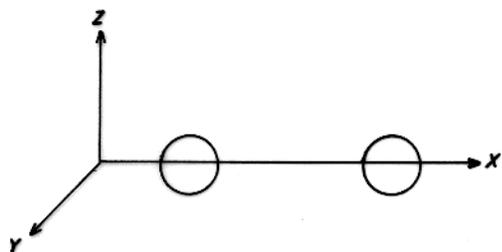
- 1 - Sistema "in line": neste caso as bobinas transmissora e receptora movem-se, uma atrás da outra, ambas situadas sobre a



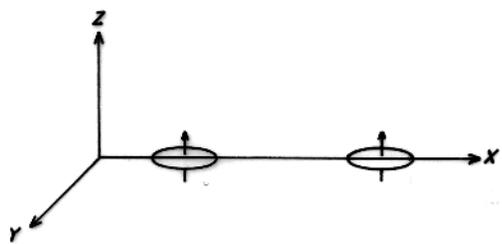
a) Sistema de bobina vertical ($T_Y R_X$) acoplamento mínimo-resposta nula para folhas planas infinitas.



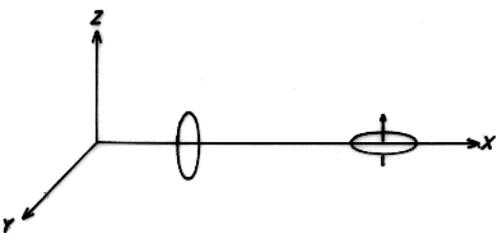
b) Sistema vertical coaxial ($T_X R_X$) acoplamento máximo-resposta pequena para folhas planas infinitas.



c) Sistema vertical coplanar ($T_Y R_Y$) acoplamento máximo-resposta razoável para folhas planas infinitas.



d) Sistema horizontal coplanar ($T_Z R_Z$) acoplamento máximo-Resposta boa para folhas planas infinitas.



e) ($T_X R_Z$) acoplamento mínimo-resposta ótima para folhas planas infinitas.

Fig. 6 - Classificação dos sistemas de prospecção que utilizam bobinas transmissora e receptora móveis.

mesma linha transversa na área a ser levantada.

2 - Sistema "broad-side": é o sistema em que as bobinas movem-se em uma direção perpendicular à linha que as liga.

Os sistemas EM aéreos tem sido tratados por vários autores entre os quais Pemberton (1962), Parasnis (1966) e Hood e Ward (1969).

De acordo com Hood e Ward (1969), os sistemas aéreos são classificados em dois tipos: o primeiro é aquele em que ambas as bobinas transmissora e receptora estão rigidamente montadas sobre uma estrutura fixa na fuselagem ou sobre uma estrutura rebocada pela aeronave. O segundo sistema é aquele em que a bobina transmissora é fixa na fuselagem e a bobina receptora é fixa em um "pássaro" rebocado abaixo e atrás da aeronave. Tal sistema recebe o nome de "Towed bird". Cada um desses sistemas pode ser subdividido de acordo com a configuração das bobinas e direção da linha transversa em relação ao sistema de bobinas. A figura 7 mostra as subdivisões dos sistemas Rígido ("Rigid boom") e "Towed bird".

As frequências de operação para esses sistemas estão na faixa de 140 a 4000 Hz. As separações entre as bobinas variam de 6 a 25m para os sistemas Rígidos e 61 a 152m para os sistemas "Towed bird".

Como a distância transmissor-receptor permanece fixa nos sistemas Rígidos, o campo primário é constante e pode ser anulado. Assim é possível medir as componentes real e imaginária da resposta EM de um condutor subsuperficial abaixo do sistema. Corpos condutivos com pequena inclinação tem melhor resposta em sistemas de bobinas horizontais, que medem somente a componente vertical do campo magnético. Corpos condutivos com grande inclinação apresentam melhor resposta em sistemas com bobinas verticais, que medem a componente horizontal do campo magnético.

O sistema de campo rotacional ("Rotary-field System") é uma combinação de um sistema horizontal coplanar e um sistema vertical coplanar. São utilizados dois aviões que devem viajar alinhados. Os transmissores dispostos ortogonalmente são fixados em um avião e os receptores na mesma disposição, em outro. Nos transmissores circulam correntes iguais mas defasadas de 90°, produzindo, deste modo, um campo EM circularmente polarizado, com eixo ao longo da linha de vôo. A f.e.m. induzida no par de bobinas

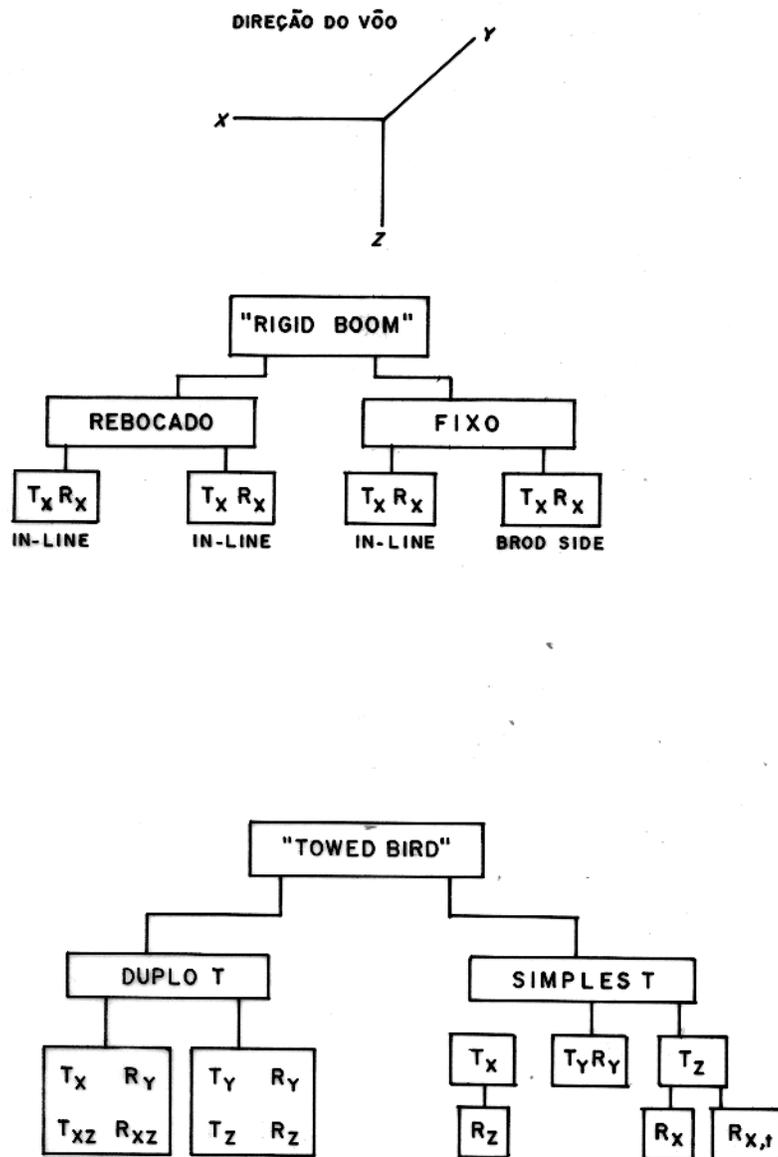


Fig. 7 - Classificação do sistema AEM. a) "Rigid Boom"; b) "Towed Bird",
(Segundo Hood e Ward, 1969)

receptoras, também são iguais e em quadratura. A tensão de saída de ambas as bobinas são amplificadas e a de uma delas é defasada em outros 90°, ficando deste modo, em oposição e por serem iguais se anulam tornando-se insensíveis ao campo primário. A presença de corpos condutivos no subsolo produz campos secundários que alteram este equilíbrio. Uma variação na distância entre os aviões, desde que eles permaneçam alinhados, não afetará o comportamento do sistema. A principal vantagem deste método é a sua grande penetração devido a boa separação entre o transmissor e o receptor. Devido a este cancelamento do campo primário, esses sistemas geralmente são considerados na classe dos sistemas rígidos ("Rigid boom system").

Nos sistemas "Towed bird", devido à variação constante entre o transmissor e o receptor por causa da velocidade do avião e da variação do vento, não é possível anular o campo primário. Consequentemente esses sistemas medem somente a componente em quadratura da anomalia EM ou a sua fase, que é a razão entre as componentes real e imaginária, sendo aquela grandemente representada pelo campo primário. Nas medidas desses sistemas são utilizadas, no mínimo, duas frequências.

3. TÉCNICAS DE INTERPRETAÇÃO E OBJETIVOS

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

3.1. Solução Analítica

O conhecimento da resposta EM teórica para certos modelos idealizados de possíveis condutores geológicos tem servido de base para a interpretação de muitos levantamentos de prospecção EM. Em muitos casos a resposta teórica tem sido obtida por medidas de laboratório. Entretanto a resposta de modelos de forma regular como esfera, cilindro e placa infinita, é mais simples em um tratamento matemático do que para modelos em laboratório. No caso de modelos mais realísticos como por exemplo a folha semi-infinita (semi-plano), as soluções tem sido obtidas somente para problemas especiais, isto é, considerando o corpo de condutividade infinita.

3.2. Modelamento digital

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

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

vento de grandes computadores.

Entre as várias técnicas de modelamento digital para simular a resposta de corpos bi e tri-dimensionais na terra temos: diferença finita (Patrick e Bostick, 1969; Jones e Price, 1971), elemento finito (Coggon, 1971; Rijo, 1977), análise "network" (Swift, 1971), equação integral (Parry e Ward, 1971; Hohmann, 1971) e métodos híbridos (Lee et al, 1981; Best et al, 1985).

Os métodos da diferença finita tem sido usado tanto para modelamento em resistividade (Jepsen, 1969 e outros) como para modelamento eletromagnético (Patrick e Bostick, 1969). Este método foi desenvolvido inicialmente para computar a resposta de uma fonte pontual em áreas com estruturas condutivas bi-dimensionais. Os custos de computação são minimizados pela redução de problemas tri-dimensionais em uma série de problemas bi-dimensionais.

O método do elemento finito é baseado no princípio de Hamilton da minimização de uma função de energia. Para problemas eletromagnéticos a função de energia necessária é a energia EM total. Como este princípio, minimização de energia, é geral o método pode ser preparado para situações eletromagnéticas de corrente direta ou magnetostática. Este método é especialmente adequado para modelamento de estruturas de forma irregular com diversas variações das propriedades físicas (Coggon, 1971). A formulação dos métodos que utilizam soluções de equação diferencial - diferença finita, elemento finito e análise "network" - é feita pela inversão de grandes matrizes associadas, no domínio da frequência. No domínio do tempo esta formulação é feita por meio de interação no tempo, sem a matriz de inversão, para uma solução explícita (Hohmann, 1982).

Rijo (1977) mostrou que os métodos de elemento finito, diferença finita e análise "network", são técnicas equivalentes de modelamento digital. Devido à discretização total da Terra esses métodos tem preferências no modelamento de geologia complexa.

Os métodos de equação integral envolvem maiores dificuldades matemáticas, mas sua vantagem está no fato de que os campos desconhecidos precisam ser encontrados somente nas regiões anômalas. Entretanto as matrizes envolvidas nesse método são muito extensas. Por isso as soluções integrais são mais eficientes para modelamento de um ou poucos corpos pequenos e, deste modo, são melhores do que as soluções de equações diferenciais para a avaliação do campo. Mais recentemente, pesquisas sobre modelamen

to tri-dimensional foi focalizado por métodos híbridos, que é uma combinação dos métodos que usam equação diferencial e equação integral. Entretanto devido a numerosas possibilidades de erros teóricos e em programação, é necessário que resultados por diferentes métodos sejam comparados, antes que uma solução numérica possa ser considerada válida.

3.3. Modelamento Analógico

A técnica de modelos em escala reduzida é muito utilizada em prospecção EM por causa da insuficiência de modelos matemáticos adequados e elevado tempo de processamento e respostas aproximadas no caso de soluções numéricas. Além disso a técnica em modelamento analógico é bem versátil, uma vez que pode ser facilmente adaptada para várias situações. A possibilidade da construção de um modelo em escala reduzida surge por causa da linearidade das equações diferenciais (equações de Maxwell) que descrevem os campos EM em meios homogêneos e não-homogêneos. A redução nas dimensões lineares do modelo é compensada por um aumento na frequência da fonte e/ou aumento na condutividade dos modelos empregados. Assim os resultados de trabalho em modelos reduzidos podem ser diretamente aplicados a sistemas em escala original.

3.3.1. Teoria da Similitude EM

O modelamento analógico é baseado na teoria da similitude, que estabelece que dois sistemas EM em escalas diferentes são equivalentes se ambos satisfazem as mesmas equações físicas. Sinclair (1948), a partir deste princípio, desenvolveu um rigoroso tratamento para os métodos EM, que serviu de base para vários trabalhos posteriores, como por exemplo, Grant e West (1965), Ward (1967) e Frischknecht (1971).

Considerando-se o meio linear onde existe um corpo condutivo envolvido por uma rocha encaixante de relativamente baixa condutividade. Para simular as configurações das linhas de força em um modelo deste sistema real, é aplicado um campo eletromagnético no mesmo,

Sendo $P(x,y,z)$ um ponto qualquer do sistema real e $P'(x',y',z')$ um do sistema modelo, os dois sistemas coordenados são relacionados pelas transformações lineares,

$$x = px' \quad ; \quad y = py' \quad ; \quad z = pz' \quad (58)$$

onde p é fator de escala para as coordenadas,

Relacionando E , H e t de ambos os sistemas, temos,

$$E(x, y, z, t) = aE'(x', y', z', t') \quad (59)$$

$$H(x, y, z, t) = bH'(x', y', z', t') \quad (60)$$

$$t = ct' \quad (61)$$

onde a , b , c são os fatores de escala para intensidade elétrica, intensidade magnética e tempo respectivamente.

As equações de onda para a intensidade do campo elétrico e magnético no sistema real são dadas por,

$$\nabla^2 \bar{E} + k^2 \bar{E} = 0 \quad (62)$$

$$\nabla^2 \bar{H} + k^2 \bar{H} = 0 \quad (63)$$

onde,

$$k^2 = (\omega^2 \mu \epsilon + i\omega \mu \sigma)^{1/2} \quad (64)$$

No sistema modelo, as equações de onda são,

$$(\nabla')^2 \bar{E}' + (k')^2 \bar{E}' = 0 \quad (65)$$

$$(\nabla')^2 \bar{H}' + (k')^2 \bar{H}' = 0 \quad (66)$$

onde,

$$(k')^2 = (\omega'^2 \mu' \epsilon' + i\omega' \mu' \sigma')^{1/2} \quad (67)$$

Transformando (65) através de (58), (59) e (61), obtemos,

$$p^2 \nabla^2 \frac{\bar{E}}{a} + k'^2 \frac{\bar{E}}{a} = 0 \quad (68)$$

A condição para que o sistema modelo possa simular satisfatoriamente o sistema real é que as equações (68) e (62) sejam iguais. Portanto,

$$k^2 = (k'^2) / (p^2) \quad (69)$$

Na aplicação de campos EM, a baixas frequências, em meios condutivos, as correntes de condução são muito maiores do que as correntes de deslocamento. Assim, desprezando-se os efeitos destas, a equação (69) torna-se,

$$\omega' \mu' \sigma' = p^2 \omega \mu \sigma \quad (70)$$

As dimensões lineares dos sistemas são relacionadas por p da seguinte forma:

$$p = L/L' \quad (71)$$

Substituindo-se o valor acima na equação (70),

$$\omega' \mu' \sigma' L'^2 = \omega \mu \sigma L^2 \quad (72)$$

Esses termos da equação (72) são conhecidos como número de indução (ou parâmetro de resposta) do modelo e do sistema real respectivamente. A condição para modelamento é que o número de indução ou parâmetro de resposta do modelo do campo sejam iguais.

Uma vez que os meios não lineares, como os ferromagnéticos, devem ser excluídos do modelo, geralmente pode-se considerar que $\mu = \mu'$.

3.3.2. Material para Modelamento

Os corpos minerais, tais como os sulfetos, de boa condutividade ($\sigma = 10$ a 10^2 S/m) podem ser simulados por metais com condutividade entre 10^6 a 10^7 S/m nos modelos reduzidos por escala em torno de 1:500, conservando a mesma frequência de campo. Corpos minerais de baixa condutividade podem ser simulados por grafite ($\sigma = 10^4$ S/m), carbono ($\sigma = 10^3$ S/m) ou aço inox ($\sigma = 10^3$ S/m).

A Tabela 3 mostra alguns materiais usados em modelamento, suas condutividades elétricas, os equivalentes no campo dessas condutividades e os minerais correspondentes dessa faixa de condutividade.

| MATERIAIS DE MODELOS | | EQUIVALENTES NO CAMPO (fator de escala, p = 500) | |
|----------------------|-------------------|---|--------------------------|
| Materiais | σ (S/m) | σ (S/m) | Minerais correspondentes |
| Cobre | $5,8 \times 10^7$ | $2,3 \times 10^2$ | Calcopirita |
| Alumínio | $3,3 \times 10^7$ | $1,3 \times 10^2$ | Galena-esfalerita |
| Duralumínio | $2,2 \times 10^7$ | 87 | Pirrotita |
| Chumbo | $4,5 \times 10^6$ | 18 | Calcopirita-hematita |

Tabela 3. Materiais utilizados em modelamento com os correspondentes minerais (Segundo Poddar e Bhattacharya, 1966)

3.3.3. Tipos de modelos.

O estudo do comportamento teórico de depósitos minerais em um campo EM, é feito para auxiliar na interpretação de anomalias observadas nos levantamentos de campo. São selecionados modelos de geometria simples para simular aproximadamente as várias formas de corpos minerais encontrados. É dado abaixo alguns corpos geométricos frequentemente usados e as formas geológicas que eles representam (Segundo Hood e Ward, 1969).

- | | |
|---------------------------|---|
| 1. esfera | - lente mineralizada |
| 2. cilindro | - conduto cilíndrico mineral |
| 3. semi-plano inclinado | - largo veio, fratura e falha preenchida com material condutivo |
| 4. disco inclinado | - pequeno veio ou depósito tabular |
| 5. disco horizontal | - porção limitada de manto de intemperismo |
| 6. plano total horizontal | - cobertura extensa de manto de intemperismo |
| 7. semi-espaço | - rocha encaixante |

No parâmetro de resposta $\omega\mu\sigma L^2$, a dimensão linear, L tem diferentes significados, de acordo com os sistemas EM e com os modelos utilizados. Assim:

1. Esfera em campo uniforme, $L = R$; (R = raio da esfera)
2. Cilindro em campo uniforme, $L = R$; (R = raio do cilindro)
3. Semi-plano em campo dipolar, $L^2 = t(l^2 + h^2)^{1/2}$

onde,

t = espessura da folha

l = espaçamento entre as bobinas

h = altitude sobre a superfície

Nos sistemas terrestres $h = 0$ e nos sistemas aéreos $l \ll h$. No caso da folha fina condutiva, não é possível separar o efeito da espessura e condutividade e a interpretação é feita para o produto σt .

3.4. Os problemas na interpretação

O modelo geológico de corpos de sulfetos mais realístico, embora simples é mostrado na Figura 8. Os métodos de prospecção eletromagnética foram largamente aplicados no Canadá e na Escandinávia, onde frequentemente as rochas encaixantes são altamente resistivas, o manto de intemperismo fino e o halo de disseminação de sulfetos não muito comum. Devido isto, os geofísicos ignoravam os efeitos destes meios geológicos sobre os corpos condutivos na interpretação. Assim os modelos utilizados para a interpretação dos dados EM comumente eram corpos de forma regular e no espaço livre.

Entretanto os modelos físicos e teóricos que utilizam condutores homogêneos e isotrópicos imersos no espaço livre estão sujeitos a erros consideráveis quando aplicados a áreas onde os corpos condutivos são envolvidos por meios de resistividade relativamente baixa. As discrepâncias observadas utilizando-se técnicas convencionais de interpretação de dados EM, isto é, sem considerar os meios parcialmente condutivos, podem ser vistas nos trabalhos apresentados por Parasnis (1971), Verma (1972), Preston (1975), Lajoie West (1977), Palacky e Kadekaru (1978) e outros. Os efeitos de halo, rocha encaixante e do manto de intemperismo são resumidos por Negi e Gupta (1968), Ward et al (1974) e Verma (1982).

3.4.1. Efeitos do halo condutivo

As mudanças na resposta eletromagnética, devido ao halo condutivo, foram estudados por Negi (1967), Negi e Raval (1969), Wait (1969), Fuller (1971), Negi e Verma (1972), Poddar (1975), Preston (1975), Nagendra et al (1980) e Caballero (1983). Os resultados são resumidos abaixo:

- 1 - As curvas de resposta na frequência ou no tempo mostram, em geral, dois picos. Ao halo corresponde um pico em altas frequências, ou estágios iniciais do decaimento com o tempo. Ao corpo central corresponde um pico em baixas frequências ou estágios finais do decaimento no tempo;
- 2 - Conforme aumenta o número de indução do halo comparado ao do corpo, os dois picos desaparecem em uma curva suave e a resposta da combinação do corpo e do halo tornam-se indistinguí-

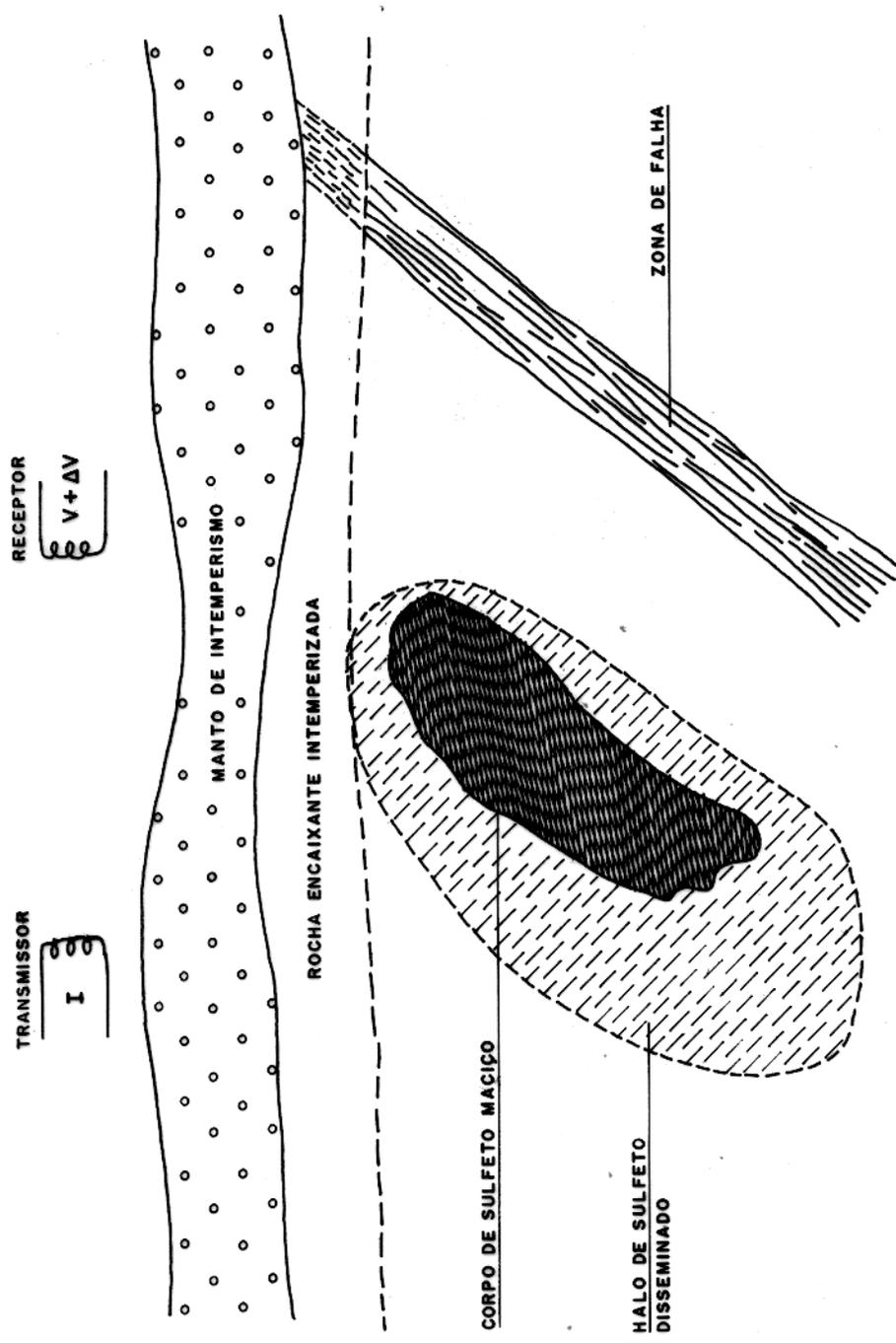


Fig. 8 - Representação esquemática de um modelo geológico geral, encontrado em prospecção de depósitos de sulfetos. (Segundo Ward et al, 1974)

veis;

- 3 - A resposta em quadratura da anomalia eletromagnética é mais sensível aos efeitos do halo comparada à componente em-fase.

3.4.2. Efeitos de rocha encaixante condutiva

Estudos de efeitos de rochas encaixantes condutivas sobre a resposta eletromagnética de corpos condutivos foram estudadas por Gaur (1959), Frischknecht (1971), Gupta Sarma e Maru (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 ocorre uma diminuição na mesma;
- 3 - Ocorrerão mudanças na forma dos perfis;
- 4 - Um corpo subsuperficial não condutivo, em uma rocha encaixante condutiva, próximo da superfície, provoca uma anomalia eletromagnética.

Neste caso a estimativa da profundidade, condutância e inclinação dos corpos estará errada quando interpretados sem considerar a rocha encaixante.

3.4.3. Efeitos do manto de intemperismo

Estudos sobre as mudanças que ocorrem na resposta EM de condutores, tem sido realizados para mantos de intemperismo com espessura uniforme, variável e ainda considerando situações onde o conjunto corpo-manto está ou não em contato galvânico.

a) No domínio do tempo

No domínio do tempo, Palacky (1975), Spies (1975) e Lamontagne (1975) estudaram os efeitos do manto uniforme e sem contato elétrico com o corpo. As seguintes conclusões foram tiradas destes trabalhos:

- 1 - Os níveis da base nos canais são levantados;
- 2 - A forma da anomalia é distorcida. Estas distorções são consideráveis em casos de modelos inclinados;
- 3 - O efeito do manto é mais acentuado nos primeiros canais. O canal um (1) é mais severamente afetado do que os outros;
- 4 - O sistema de bobinas horizontais é mais sensível aos efeitos do manto do que os outros.

No caso em que existe um contato elétrico entre o corpo condutor e o manto, os efeitos observados são similares àqueles de uma rocha encaixante parcialmente condutiva (Lamontagne, 1975). O principal efeito observado na curva de decaimento é um aumento da anomalia nos tempos iniciais. A mudança na base geral da resposta comparada àquela do manto sozinho, indica que o efeito do contato com o corpo do tipo dique, é principalmente ao curto-circuito das correntes do manto que poderiam estar fluindo em suas proximidades.

b) No domínio da frequência

Os efeitos de manto de intemperismo uniforme e sem contato elétrico com o corpo foram estudados por Lowrie e West (1965), Lajoie (1973), Coney (1977), Hanneson (1981), Silva (1981) e Joshi et al (1984). À medida em que a condutância do manto de intemperismo aumenta ocorrem as seguintes mudanças na resposta eletromagnética:

- 1 - A fase sofre uma rotação no sentido horário tanto maior quanto mais condutor for o corpo. Em consequência desta rotação, a componente em quadratura sofre uma reversão;
- 2 - Ocorre uma redução na amplitude da resposta;
- 3 - No caso de semi-planos com pequena inclinação há o aparecimento de um pico extra nos perfis em quadratura;
- 4 - O nível dos perfis é deslocado em relação à base de referência zero.

Assim na presença de manto, devido a rotação de fase no sentido horário a componente em fase aumenta enquanto a quadratura diminui. Consequentemente a razão em fase/quadratura, aumenta indicando maior condutância do corpo. Enquanto a diminuição da

amplitude da anomalia dá maior profundidade interpretada.

Para bons condutores, como a rotação na fase é maior a estimativa dos parâmetros são relativamente maiores.

Manto uniforme em contato elétrico com o corpo: os seguintes efeitos são observados (Joshi et al, 1984):

- 1 - A rotação na fase é no sentido anti-horário, ao contrário do que foi observado no caso de manto sem contato elétrico com o corpo;
- 2 - Esta rotação é maior para condutores pobres comparada àquela de bons condutores.

Consequentemente, neste caso, o corpo parecerá mais resistivo e mais raso se são usados os diagramas de interpretação convencionais.

Manto não-uniforme: Villegas Garcia (1979) estudou a resposta de um manto não-uniforme utilizando o sistema HLEM. Para modelar o manto foram utilizados placas de grafite com três tipos de descontinuidades na forma de escada ("step"), colina ("ridge") e vale ("valley"). Outra forma possível de descontinuidade pode ser considerada como uma combinação dessas três.

Foram investigadas variações na resposta devido à espessura máxima do manto, t , e tamanho geométrico das descontinuidades em relação à separação entre as bobinas e o "skin-depth", δ , ou frequência mantendo a condutividade, σ , constante.

Para a descontinuidade "escada", conforme a frequência aumenta, a componente em quadratura inicialmente cresce, inverte o perfil em $\delta \lesssim 0,8t$ e, aumentando mais a frequência, este perfil invertido ainda cresce e em seguida diminui. Na componente em-fase, o efeito é similar, porém mais lento. A posição da borda superior da descontinuidade se localiza em uma distância de aproximadamente metade da separação entre o transmissor-receptor a partir do pico mínimo da resposta. Consequentemente a migração do pico mínimo resultará a partir de levantamento em diferentes separações transmissor-receptor.

A resposta da descontinuidade "colina" é uma combinação de duas descontinuidades tipo escada. A anomalia é caracterizada por dois mínimos nas componentes em-fase e quadratura localizados sobre ambos os lados da "colina". O aparecimento do máximo entre eles é controlado pela largura da "colina" e separação

transmissor-receptor,

Até a máxima frequência estudada de 3631Hz, a resposta da descontinuidade "vale" é muito similar à resposta de uma folha condutora vertical coberta por um manto uniforme. Em geral foi observado que a resposta de um "vale" de razoável profundidade é muito maior em comparação à folha condutora de equivalente parâmetro de resposta, $\omega \mu L \sigma t$, e mesma altura.

Quando foi colocado um condutor em baixo de um manto não-uniforme, a resposta do modelo em frequências muito baixas pôde ser considerada como a superposição da resposta do corpo e do manto tomadas separadamente. Este mesmo efeito também foi observado por Lowrie e West (1965) no caso de um condutor vertical sob um manto uniforme. Isto acontece porque em baixas frequências quase não há interação EM entre os condutores. Ocorreu uma redução na estimativa da condutância, σt , do corpo devido ao manto não-uniforme. Esta redução é causada pela quadratura adicionada pelo manto irregular à resposta do corpo.

Enquanto a resposta do manto diminui progressivamente com a diminuição de frequência, a resposta do conjunto corpo-manto experimenta um suave decaimento na amplitude até uma aparente saturação em frequências onde o efeito do manto é quase completamente eliminado.

Portanto o reconhecimento da resposta característica do manto é facilitado com o uso de sistemas em diversas frequências e separações transmissor-receptor.

3.5. Objetivo do trabalho

Pretende-se estudar a resposta EM de um corpo tabular vertical sob manto de intemperismo com o objetivo de encontrar a melhor banda de frequências utilizável - sua posição e largura - assim como o adequado arranjo de bobinas e separações entre elas, para auxiliar no planejamento de sistemas de prospecção EM, de modo que a resposta possa ser melhorada. Isto é, o mais livre possível de sinais indesejáveis tais como aqueles causados pela presença do manto de intemperismo.

Foram estudadas as respostas EM de um semi-plano vertical, utilizando-se diferentes sistemas de bobinas - horizontal coplanar, vertical coplanar e vertical coaxial - e separações transmissor-receptor de 0,15; 0,20 e 0,25m, para sistemas de

prospecção EM terrestre "in line", em uma faixa de frequências de 250Hz a 35 kHz.

Vários parâmetros de resposta para o corpo e para o manto foram utilizados, simulando-se, deste modo, diversas situações geológicas.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Geralmente, os corpos condutivos mineralizados, tipicamente sulfetos, são representados por materiais de alta condutividade, tais como, alumínio, latão, cobre, aço inoxidável, grafite, etc, em conformidade com a equação da similitude (eq. 72) e considerando a frequência do modelo igual à do campo. Esses materiais são feitos de forma geométrica simplificada, como esferas, cilindros, blocos retangulares e folhas. Essas formas se aproximam razoavelmente de muitos corpos condutivos encontrados na Terra.

4.1. Modelo de laboratório

4.1.1. Consideração física

Os corpos que possuem uma dimensão, como a espessura, muito pequena em relação à largura e comprimento, podem ser simulados por modelos do tipo semi-plano. Neste caso encontra-se o dique, que é comumente encontrado em prospecção mineral. O manto de intemperismo, que também possui duas de suas dimensões bastante grandes comparadas à espessura, pode ser adequadamente simulado por modelos do tipo plano. Essa aproximação nem sempre é satisfatória, uma vez que o manto pode apresentar variações na espessura e condutividade.

Os dois modelos citados acima foram adotados neste trabalho, onde o manto de intemperismo é representado por uma folha horizontal fina e infinita em relação ao espaçamento entre as bobinas e o condutor principal por uma folha vertical fina e também de extensão infinita em profundidade. Para que as folhas sejam consideradas infinitas é necessário que nesses modelos as bordas dos mesmos estejam no mínimo a $0,75L$ das bobinas, onde L é o espaçamento entre elas (Lowrie e West, 1965), e o comprimento do corpo que simula o semi-plano seja superior a $2L$ (Martin, 1960 em Lowrie e West, 1965).

Neste trabalho, o halo de disseminação de sulfetos foi considerado pouco desenvolvido e a condutividade da rocha encaixante muito baixa, podendo ser representada pelo ar. Para que as condições de modelamento fossem satisfeitas foi ainda admitido a inexistência de materiais ferromagnéticos no conjunto de modelamento.

4.1.2. Materiais utilizados

A simulação do manto de intemperismo foi feita por folhas de aço e a do corpo por folhas de alumínio, Silva (1981) mediu as condutividades das folhas em tiras de 1,00m x 0,01m cortadas das folhas metálicas com um Resistivímetro Resistomak - Micro ohmeter tipo 2302. A espessura das folhas também foi medida por Silva (1981) com um micrômetro tipo Mitutoyo com precisão de 10^{-6} m. A temperatura ambiente foi em torno de 27,4°C, sendo que, para cada grau de variações de temperatura durante o trabalho, o erro na condutividade foi, no máximo, de cerca de 0,4%.

Para o manto foram utilizadas três folhas de aço com dimensões de 2,00m x 1,00m e para o corpo três folhas de alumínio de 1,00m x 0,80m de dimensões. Esses valores garantiram que fossem satisfeitas as condições de modelamento para o plano e o semi-plano, considerando que o máximo espaçamento entre as bobinas foi de 0,25m.

A Tabela 4 contém os valores da espessura e condutividade das folhas utilizadas para simular o corpo e o manto.

4.2. Equipamento

O conjunto de modelamento é formado pelos sistemas de energização, de recepção mostrados na Figura 9 e de disposição dos modelos.

4.2.1. Sistema de energização

Este sistema compõe-se de uma bobina transmissora alimentada por um oscilador, modelo GR-1316 da General Radio (USA), com faixa de frequência de 10 Hz a 100 kHz. As distorções no sinal de saída são inferiores a 1,0%. A máxima potência fornecida por este oscilador é 1,6 W. A impedância na saída foi de 2,5 ohm na faixa de voltagem utilizada de $\geq 5,0$ V e < 15 V. O oscilador também fornece duas voltagens (1,25 + 0,25 Vrms), uma em-fase com a saída e outra em quadratura. Essas voltagens são conectadas ao analisador de fase, e são utilizadas como sinais de referência.

A bobina transmissora diâmetro igual a 0,025m, foi enrolada com fio esmaltado de cobre bitola nº 20 SWG, possuindo 37 espiras. Um núcleo de ferrite foi colocado no centro desta bobina, de modo que os valores obtidos para sua auto-indutância e

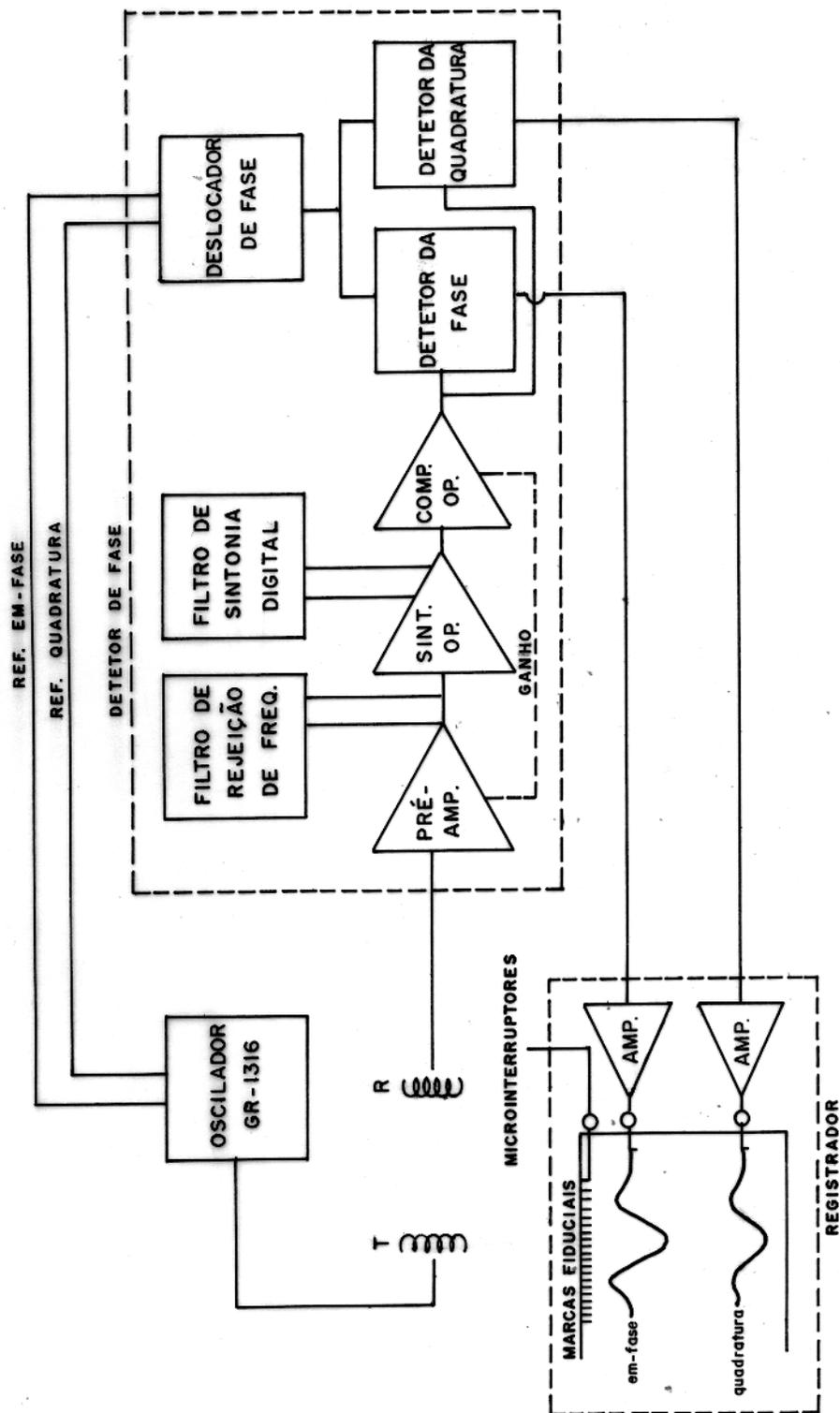


Fig. 9 - Diagrama em blocos dos sistemas de energização e recepção.

| M O D E L O | | Condutividade elétrica, σ^t (10^7 S/m) | Espessura da folha, t (10^{-3} m) | Condutância, $\sigma^t t$ (10^4 S) | "Skin - depth", δ (10^{-3} m) | | | | | | | | | |
|-------------|-----------|--|--|---------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| | | | | | Frequência (Hz) | | | | | | | | | |
| | Material | | | | 250 | 500 | 1 k | 3 k | 5 k | 10 k | 20 k | 35 k | | |
| Corpo 1 | Alumínio | 3,148 | 0,514 | 1,6181 | 5,637 | 4,017 | 2,837 | 1,138 | 1,268 | 0,897 | 0,634 | 0,479 | | |
| Corpo 2 | Alumínio | 3,3529 | 1,008 | 3,3797 | 5,497 | 3,887 | 2,75 | 1,59 | 1,23 | 0,87 | 0,675 | 0,465 | | |
| Corpo 3 | Alumínio | 3,4376 | 2,135 | 7,3393 | 5,429 | 3,84 | 2,714 | 1,567 | 1,214 | 0,86 | 0,607 | 0,46 | | |
| Manto 1 | Aço Inox. | 0,1538 | 0,48 | 0,0738 | 25,00 | 18,00 | 12,00 | 7,409 | 5,739 | 4,058 | 2,87 | 2,169 | | |
| Manto 2 | Aço Inox. | 0,2009 | 0,40 | 0,0804 | 22,00 | 16,00 | 11,00 | 6,483 | 5,022 | 3,551 | 2,511 | 1,898 | | |
| Manto 3 | Aço Inox. | 0,1397 | 0,812 | 0,1134 | 27,00 | 19,00 | 13,00 | 7,774 | 6,022 | 4,258 | 3,011 | 2,276 | | |

Tabela 4. Características das folhas metálicas utilizadas no modelamento.

resistência foram de $583 \mu\text{H}$ e $0,425 \text{ ohm}$, respectivamente.

4.2.2. Sistema de recepção

Este sistema compõe-se de uma bobina receptora, um detector de fase e um registrador gráfico.

A bobina receptora, com um núcleo de ferrite, é semelhante à bobina transmissora e contém 680 espiras de fio nº 36 SWG.

A f.e.m. induzida na bobina receptora é analisada por um detector de fase, modelo 1233 da General Radio. Este detector é sintonizável e de alto ganho, possui amplificação linear na faixa de frequências de 10 Hz a 100 kHz e usa um par de detectores sensíveis à fase. Sua sensibilidade é $< 50 \text{ nVrms}$ entre a faixa de frequências entre 200 Hz a 500 Hz e 35 nVrms entre 500 Hz a 100 kHz. Este também possui um delocador de fase que pode girar entre 0° a 360° ambos os sinais de referências (em-fase e quadratura) com um ajuste fino de 10° controlado por dois verniers.

Os resultados obtidos no detector são registrados em um papel de largura 250 mm com um registrador de dois cansis, modelo RB-102 da ECB (Brasil). A velocidade de arraste do papel pode variar entre 1 cm/h a 60 cm/min e a sensibilidade do registro, entre 1 mV a 2 V, de $\pm 0,1\%$ (10 faixas). A impedância de entrada é potenciométrica até 500 mV e para 1 V e 2 V é constante e igual a 1 Mohm.

O registrador possui ainda um marcador de eventos que relaciona as leituras com as posições das bobinas em relação à dos modelos.

4.2.3. Sistema de disposição dos modelos

É constituído por duas estruturas de madeira de tamanhos diferentes. Na estrutura menor, $2 \text{ m} \times 1,10 \text{ m}$, o corpo pode ser colocado a várias profundidades e a qualquer inclinação. O corpo é colocado em uma prancha de madeira que é presa à estrutura por meio de parafusos de acrílico em furos existentes na parte central dos lados da estrutura, formada por duas placas grossas de acrílico. O corpo pode ser inclinado a qualquer ângulo e preso à estrutura por meio de parafusos de acrílico ou por um fio rígido de nylon fixado no centro da parte mais inferior da prancha até um ponto da estrutura maior. O ângulo de mergulho pode ser medido com uma bússola ou através de um transferidor. O manto é

colocado em cima da estrutura menor.

A estrutura maior que envolve a menor, contém dois trilhos horizontais de madeira, ao longo dos quais se desloca um carrinho de acrílico, movido por um motor passo-a-passo, contendo as bobinas na altura desejada. A cada 0,05m do trilho estão dispostos dezenove microinterruptores que são ligados ao registrador gráfico. Uma pequena peça de acrílico, presa ao lado do carrinho em uma posição que corresponde ao centro do sistema transmissor-receptor, aciona os microinterruptores quando o sistema é posto em movimento, permitindo, deste modo, posicionar o perfil obtido através do marcador de eventos do registrador.

4.3. Processo de medição

4.3.1. Calibração

As voltagens em-fase e em quadratura fornecidas pelo oscilador ao detetor de fase são calibradas de modo a ficarem iguais a f.e.m. produzida pelo campo primário, da seguinte maneira: primeiramente a componente em-fase do sinal de referência é colocada em quadratura com o campo primário por meio de deslocador de fase. Neste caso a caneta do registrador que corresponde à componente em-fase é deslocada para a posição zero no papel de registro. Em seguida gira-se o sinal de referência de 90°, de modo que, o sinal em-fase do oscilador fique em fase e igual em amplitude com o do campo primário. Isto é conseguido levando-se a caneta do registrador, através de ajuste potenciométrico, a uma posição correspondente a 100%. Analogamente faz-se a calibração para a componente em quadratura de modo que esta fique 90° fora-de-fase com o campo primário.

Depois dessas operações o sinal de referência passa a corresponder à f.e.m. produzida pelo campo primário. Então as canetas são levadas para uma posição escolhida como base, onde as componentes serão nulas na ausência de um campo secundário, ou seja, quando houver apenas o campo primário o sinal de referência não sofrerá alterações.

Neste trabalho as calibrações foram feitas na ausência do manto. Isto é equivalente a calibração feita sobre rocha resistiva no campo. Os efeitos devido a qualquer condutor devem estar ausentes na calibração.

4.3.2. Medições

Os perfis foram tomados para cada combinação de um corpo vertical do tipo semi-plano e um manto de intemperismo, sendo que foram utilizados três corpos e três mantos diferentes, cujas características encontram-se na Tabela 4. Para cada conjunto corpo-manto, foram realizadas medidas utilizando as bobinas nos arranjos horizontal coplanar, vertical coplanar e vertical coaxial, colocadas em linha e caminhando transversalmente ao corpo. Foram utilizadas três separações entre as bobinas de $L = 0,15\text{ m}$; $0,20\text{ m}$ e $0,25\text{ m}$ e oito frequências na faixa de 250 Hz a 35 kHz. As profundidades do corpo e do manto foram mantidas constantes em todos os perfis, sendo respectivamente, $0,2L$ e $0,1L$. Segundo Silva (1981), os resultados obtidos para essas profundidades mostram-se aproximadamente com a mesma fase para calibrações tanto sobre o manto quanto na ausência dele. As profundidades foram medidas desde o topo do corpo ou manto até a linha que passa pelo centro das bobinas. Neste trabalho o corpo foi considerado sem contato elétrico com o manto.

4.4. Fontes de erros

Enquanto em métodos analíticos se pode obter resultados exatos, no caso de modelos experimentais a precisão dos resultados é limitada. As seguintes fontes de erros foram consideradas na elaboração deste trabalho.

4.4.1. Erros sistemáticos

- a) Tamanho físico inadequado da bobina transmissora: de acordo com a teoria de modelamento o tamanho dessa bobina deveria ser na ordem de 10^{-3} m para um fator de escala em torno de 500. Praticamente é difícil construir bobinas nessa dimensão, mas desde que $L > 7R$ ($R =$ raio das bobinas), o campo produzido pela bobina transmissora poderá ser considerado como dipolar e os erros ficam em $\leq 3,0\%$ (Telford, 1976);
- b) O tamanho excessivamente grande da bobina receptora: isto pode causar deslocamento do centro efetivo da bobina receptora correspondente aos campos primário e secundário;
- c) Desvios na frequência em torno de $\pm 1,0\%$ (precisão do oscilador);

- d) Erros nas medidas das dimensões lineares, tais como:
- erros na profundidade do corpo e do manto, estimados em $\pm 2,0\%$ e $\pm 4,0\%$ respectivamente;
 - erros nas distâncias entre as bobinas, estimados em $\pm 3,0\%$;
- e) Erros nas medidas da condutividade do material modelado, estimado em $\pm 2,5\%$ devido a possíveis variações de temperatura no laboratório;
- f) Efeitos de perdas capacitivas em componentes do sistema de medidas;

4.4.2. Erros não-sistemáticos

Estes erros podem ocorrer devido a:

- a) Inexatidão nas leituras tomadas durante as medidas, estimada em $\pm 0,3\%$;
- b) Variações nas posições das penas e no traçado das componentes em-fase e quadratura, devido ao desgaste nas pontas das mesmas. Estes erros foram estimados em $\pm 0,4\%$.

Foram comparados alguns perfis padrões com trabalhos publicados e pôde-se estimar que os erros neste trabalho ficam em menos de 4%.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As respostas eletromagnéticas de um corpo vertical semi-plano são apresentadas em forma de perfis em-fase e quadratura em percentagem do campo primário. Esses perfis mostram as mudanças na resposta EM do corpo pela presença do manto de intemperismo variando as frequências, separações e sistemas de bobinas.

Para análise dos resultados, os valores pico-a-pico das anomalias foram plotados por serem considerados os mais apropriados (Parasnis, 1971). É importante notar também que os valores pico-a-pico não são afetados pelos deslocamentos verticais dos perfis em relação à base de referência, devido à presença do manto de intemperismo, quando a calibração é feita na ausência deste.

5.1. Modificações nos perfis devido ao manto de intemperismo

As Fig. 10 a 15 mostram as respostas obtidas nas várias frequências e separações transmissor-receptor (L) utilizadas em todos os sistemas de bobinas para o corpo 1 (C_1) e conjunto corpo 1 - manto 1 (C_1M_1).

5.1.1. Efeito da frequência

Os perfis (c) e (d) nas Fig. 10, 11 e 12 mostram as respostas obtidas com a presença do manto de intemperismo para o conjunto C_1M_1 . A presença do manto afeta significativamente a resposta do corpo. Em todos os sistemas ocorre o deslocamento das bases dos perfis em relação à base de referência, a redução da amplitude da componente em-fase e a reversão da componente em quadratura conforme a frequência aumenta. Esses efeitos foram também observados por Lowrie e West (1965) utilizando o sistema horizontal coplanar. Em altas frequências a resposta do corpo é quase que totalmente blindada pela presença do manto de intemperismo. A reversão da componente em quadratura ocorre mais rapidamente no sistema horizontal coplanar do que nos outros dois. Em altas frequências ($f > 5\text{kHz}$) os perfis no sistema horizontal coplanar deslocam-se abaixo da base de referência enquanto nos sistemas vertical coplanar e vertical coaxial os deslocamentos são sempre acima da base.

Uma comparação dos três sistemas mostra que a maior res-

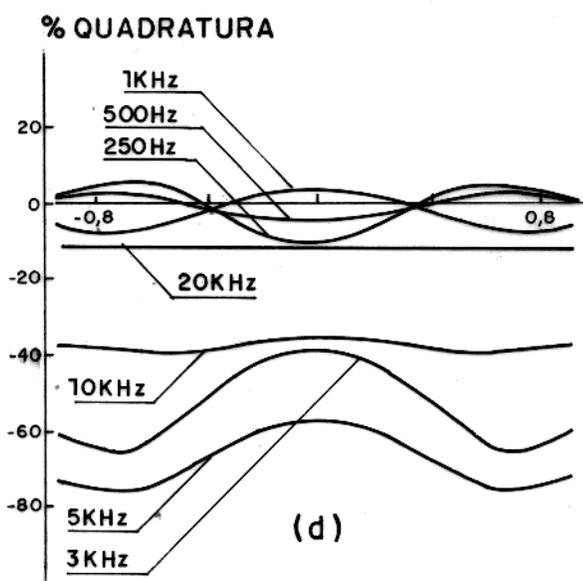
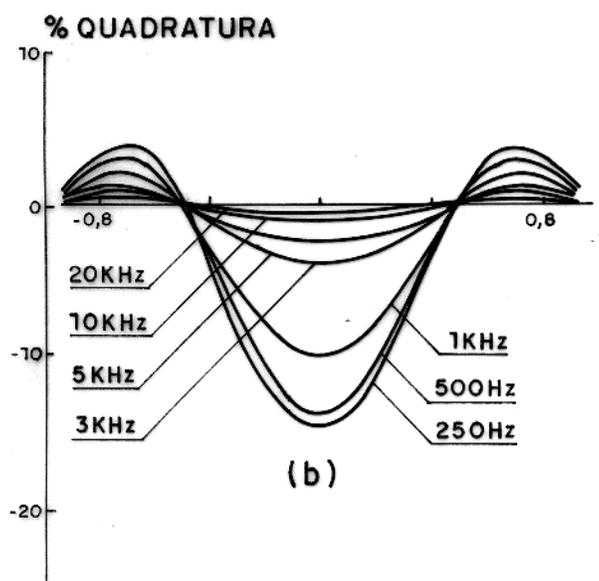
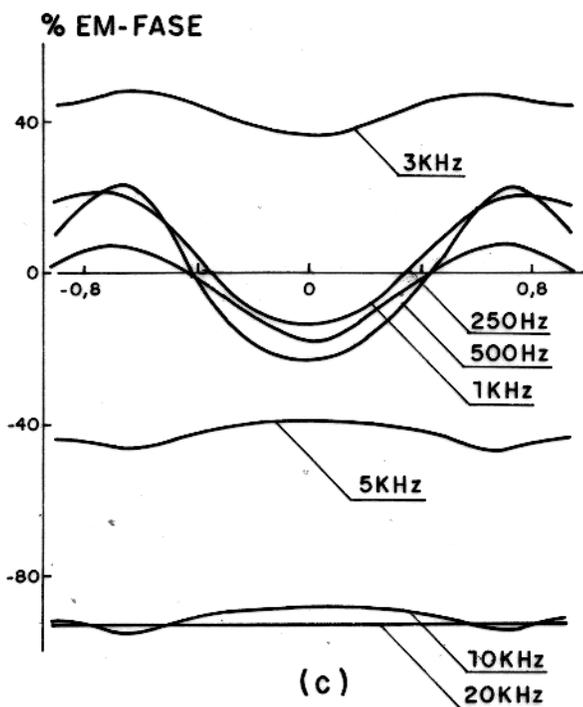
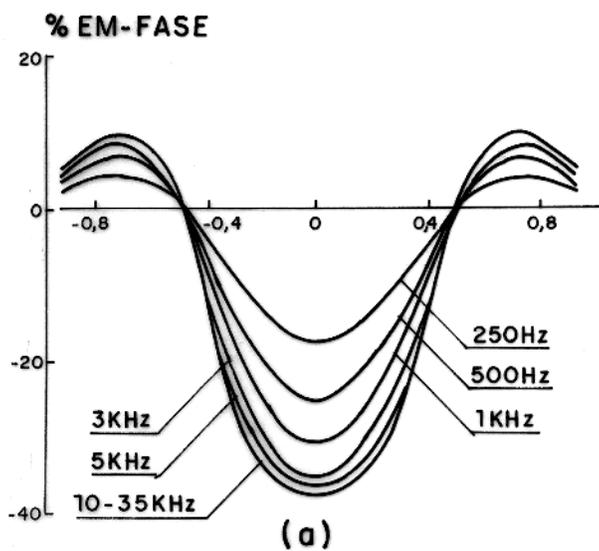
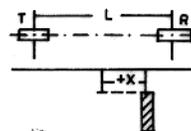
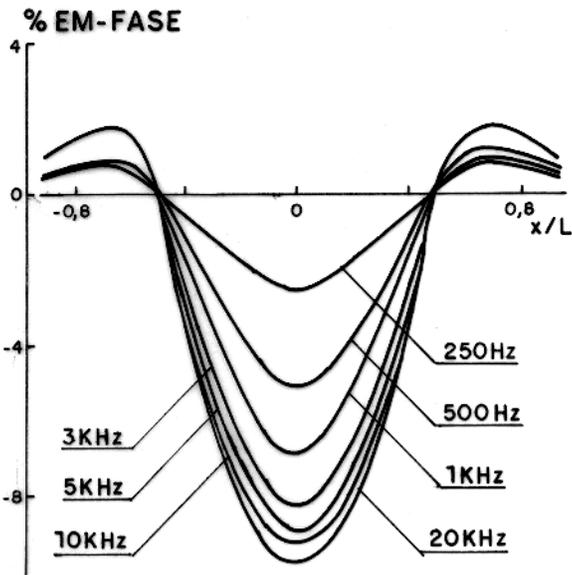
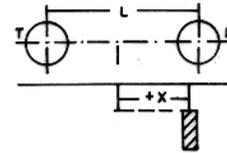
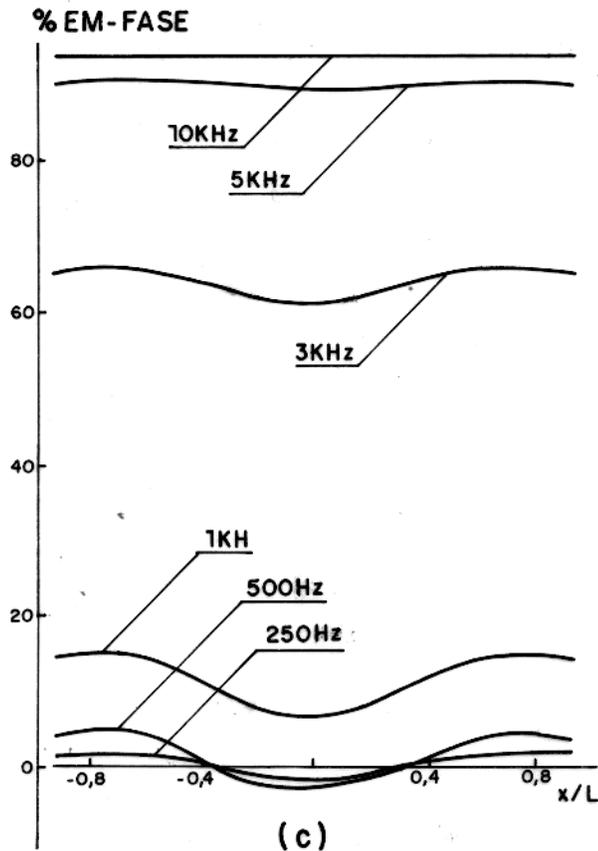


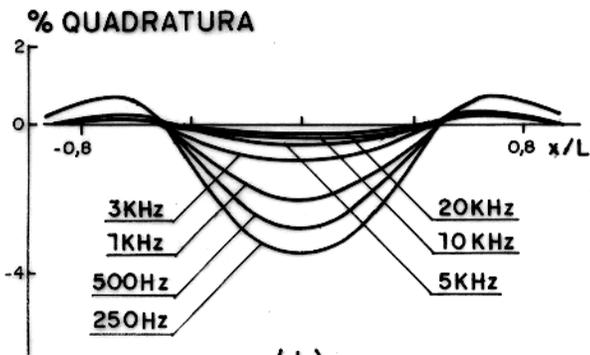
Fig.10 - Mudança dos perfis com a variação da frequência; Sistema horizontal coplanar; conjunto C_1M_1 ; $L = 0,25m$.



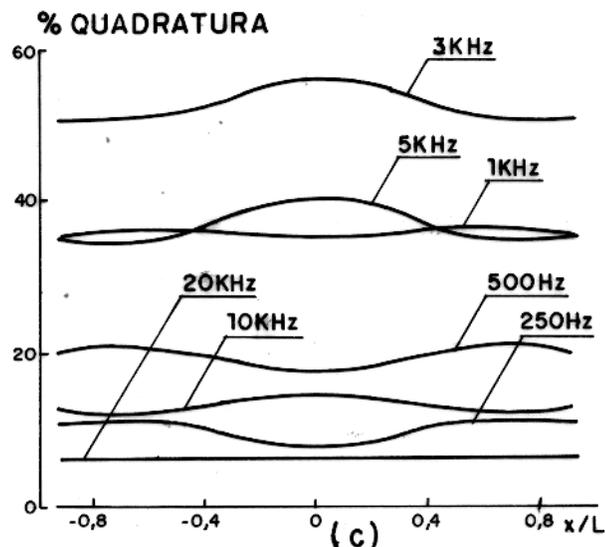
(a)



(c)



(b)



(c)

Fig. 11 - Mudança dos perfis com a variação da frequência; sistema vertical coplanar; conjunto C_1M_1 ; $L = 0,25m$.

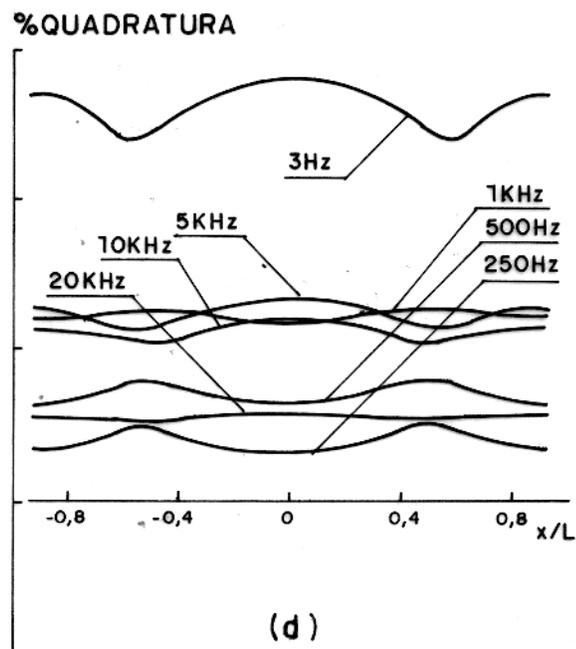
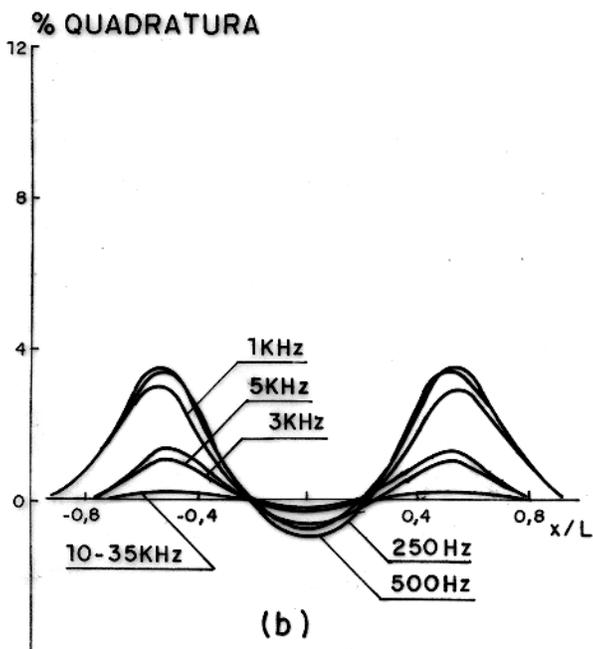
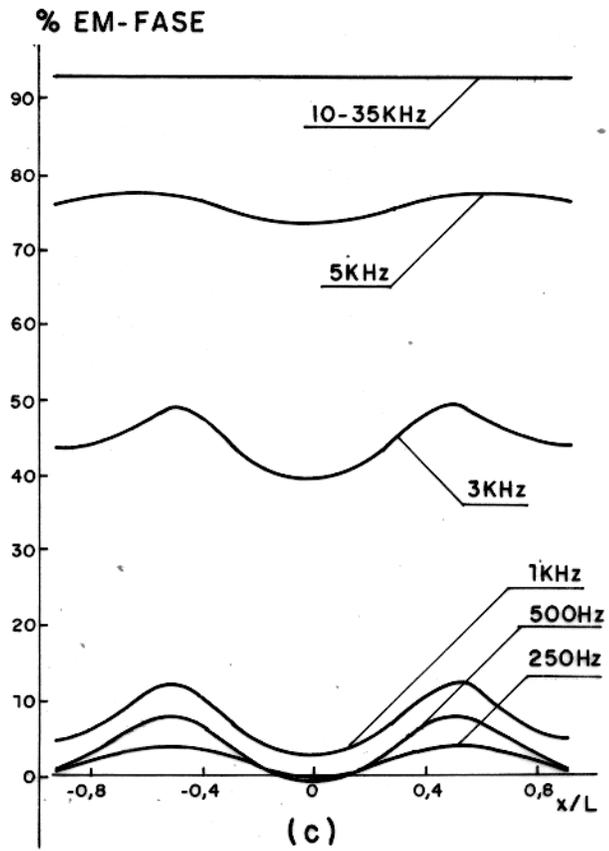
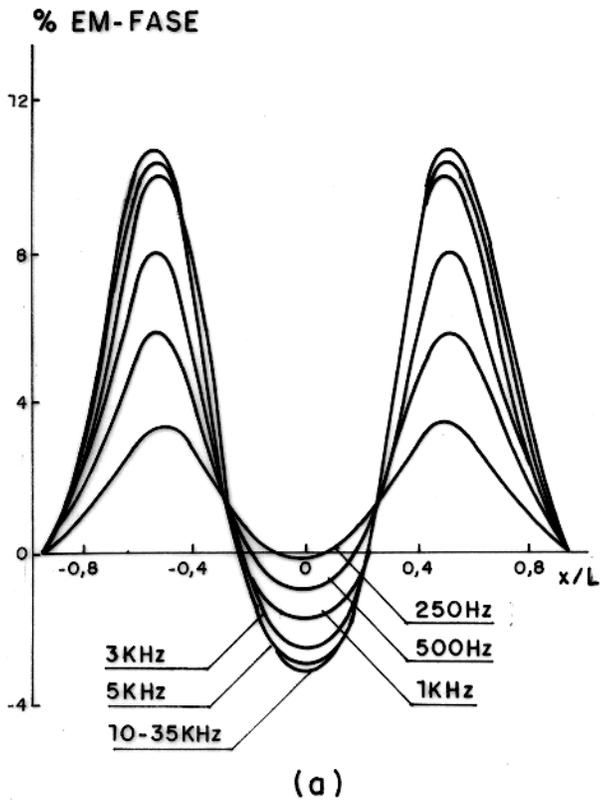
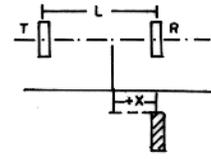


Fig. 12 - Mudança dos perfis com a variação da frequência; sistema vertical coaxial; conjunto C_1M_1 ; $L=0,25m$.

posta pertence ao sistema horizontal coplanar e a menor ao vertical coplanar.

5.1.2. Efeito da separação transmissor-receptor

As Fig. 13, 14 e 15 mostram o efeito das separações transmissor-receptor sobre as respostas EM nas frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz e 3 kHz, onde, embora a presença do manto já seja marcante sobre a resposta obtida, pode-se ainda notar a anomalia devido ao corpo condutor. Em todos os perfis verifica-se que os dois picos positivos afastam-se do centro ($x = 0$ cm) conforme aumenta a separação transmissor-receptor. Até a frequência de 1 kHz a componente em-fase apresenta, nos três sistemas, menor valor pico-a-pico na menor separação de bobinas, isto é, 0,15 m. Em 3 kHz a menor separação ($L = 0,15$ m) apresenta maior valor pico-a-pico. A reversão da componente em quadratura ocorre mais cedo se a separação transmissor-receptor é aumentada.

As observações feitas mostram que as respostas obtidas com os vários sistemas de bobinas, são afetados de diversas maneiras e em diferentes graus pela presença do manto de intemperismo.

5.2. Análise das respostas

As Fig. 16 a 39 foram plotadas utilizando os valores pico-a-pico das componentes em-fase e quadratura para a análise das respostas com o objetivo de conhecer a posição e largura da banda de frequência que dá a resposta diagnóstica do corpo na presença do manto. Essa informação é necessária para o planejamento de sistemas de prospecção EM, onde o manto existe.

Pode-se notar que as componentes em-fase sofrem um pequeno acréscimo em baixas frequências na presença do manto para todos os modelos e sistemas de bobinas estudados (Fig. 16, 18 e 20). Esses valores vão crescendo até atingir um valor máximo de determinada frequência e em seguida, diminuem bruscamente até zero ou próximo de zero, em altas frequências. Nesta região de alta frequência a resposta do corpo está totalmente encoberta pela presença do manto e, conseqüentemente acusando somente o manto. Enquanto na quadratura, os valores pico-a-pico vão diminuindo, mudam de sinal, atingem um valor máximo negativo, em seguida diminuem até se anularem.

Na presença do manto, os picos máximos positivos das com

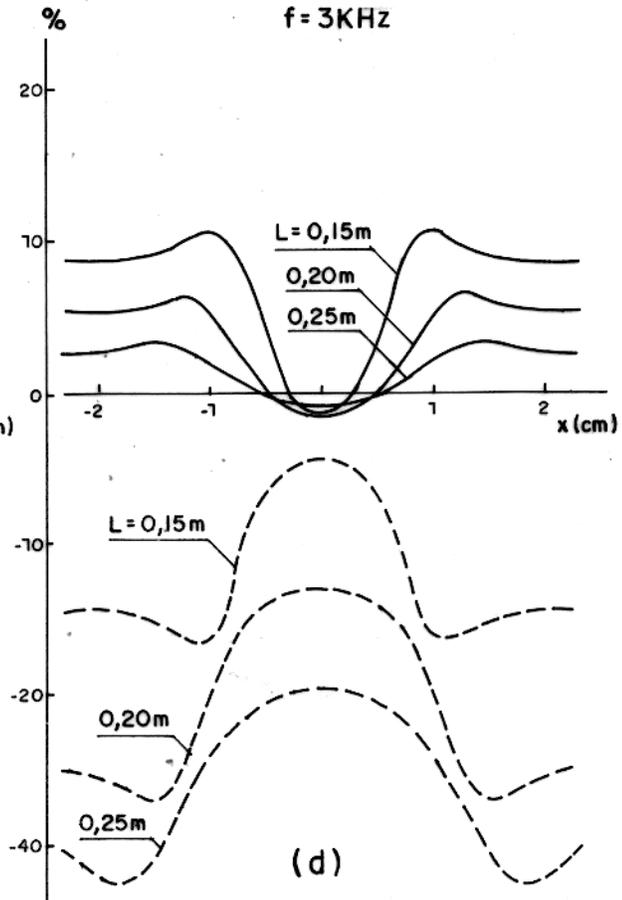
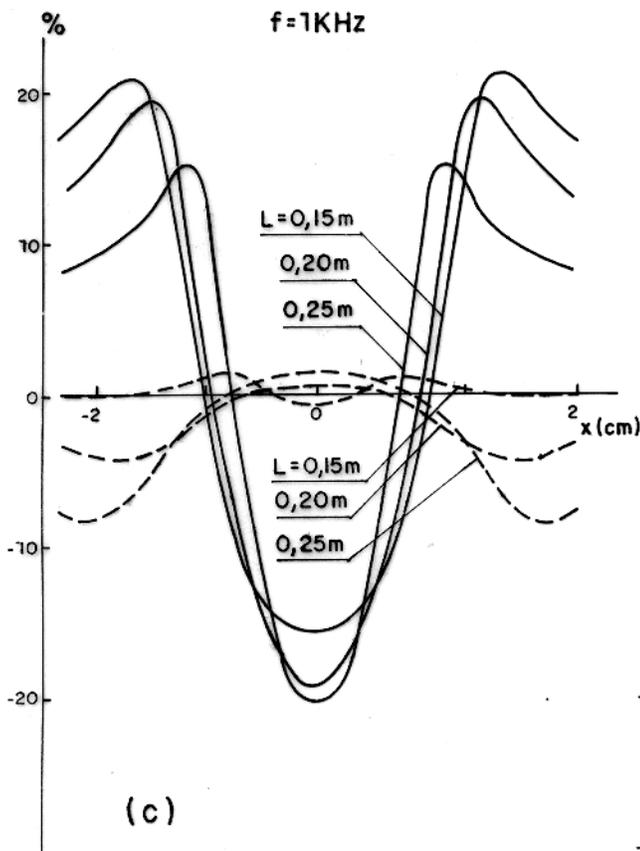
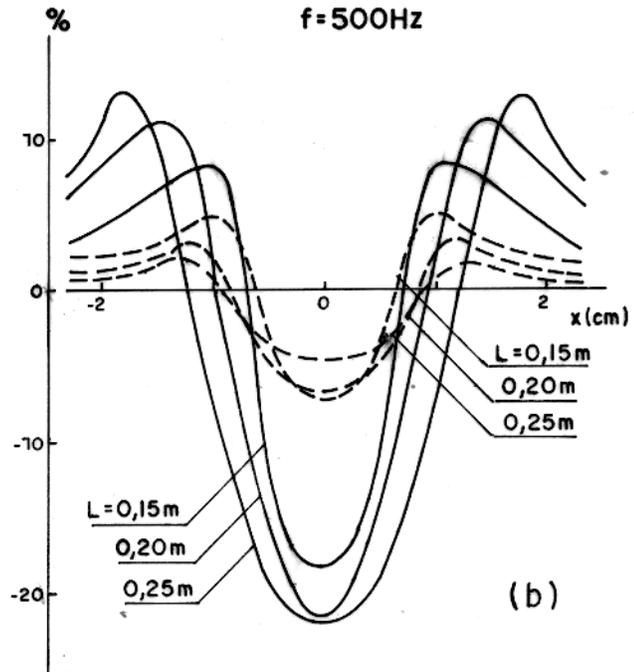
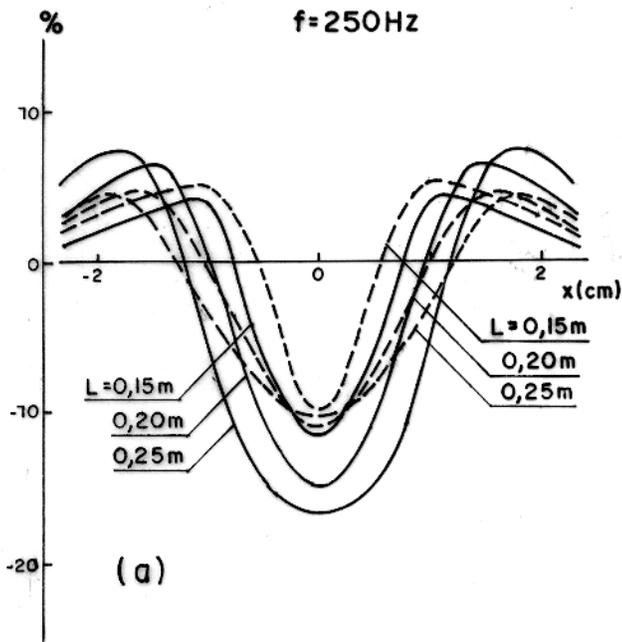
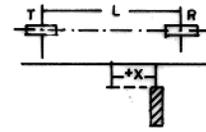


Fig. 13-Mudança dos perfis com a variação da separação T-R; sistema horizontal coplanar; conjunto C₁M₁.

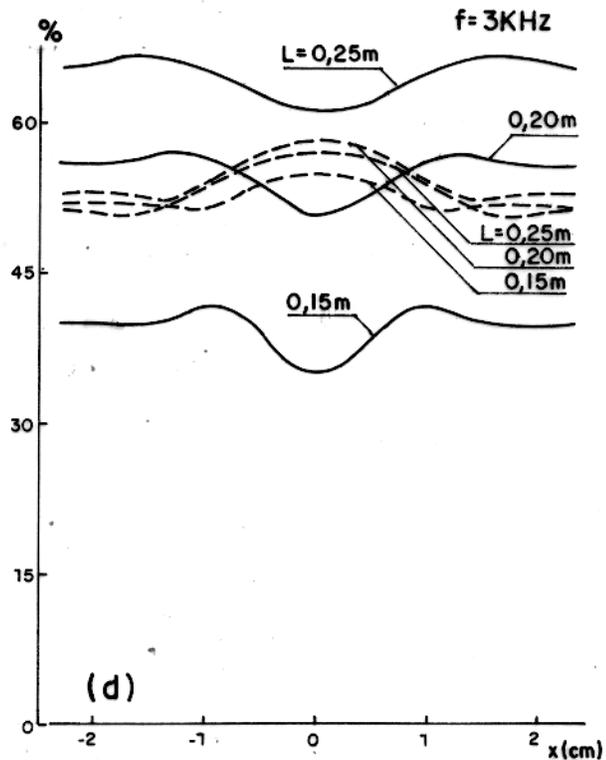
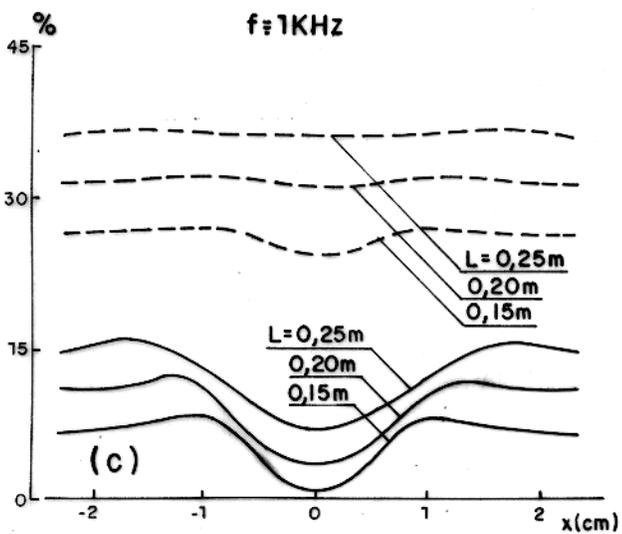
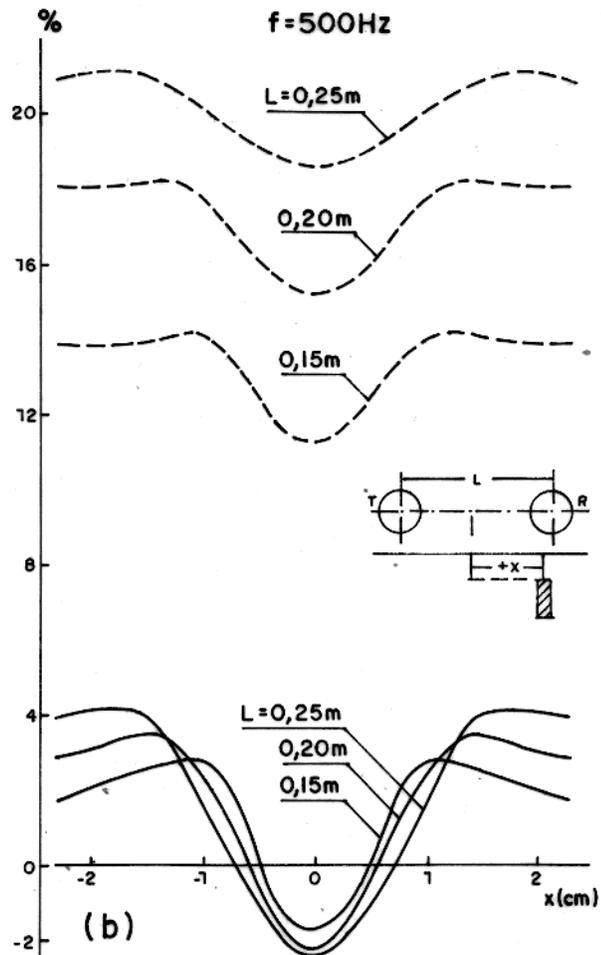
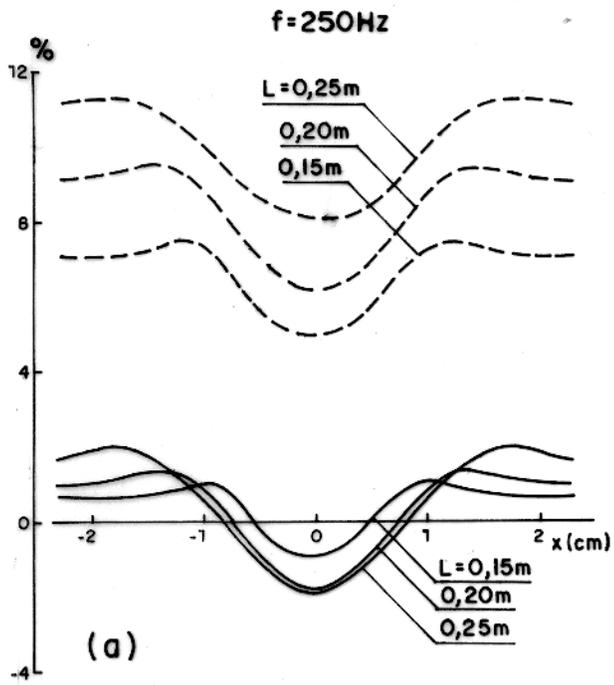


Fig. 14- Mudança dos perfis com a variação da separação T-R; sistema vertical coplanar; conjunto C_1M_1 .

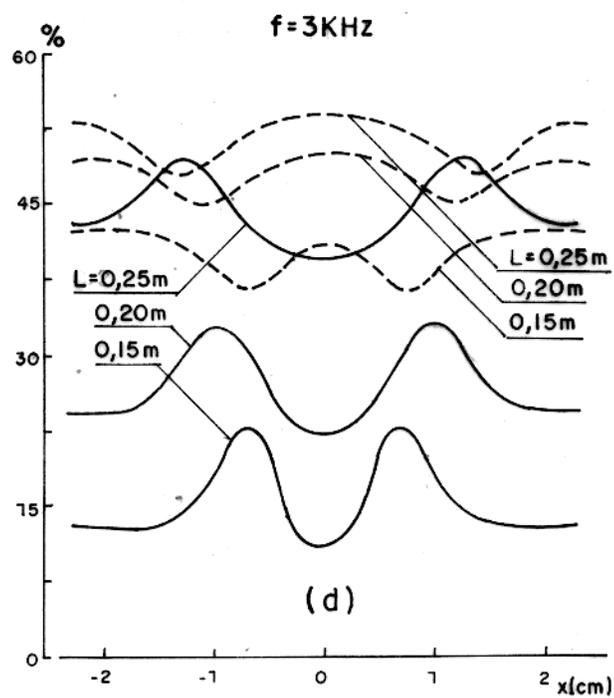
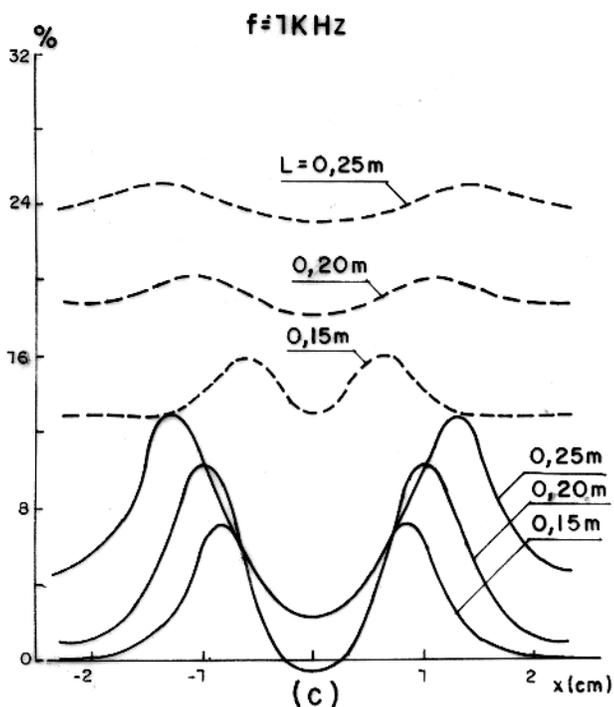
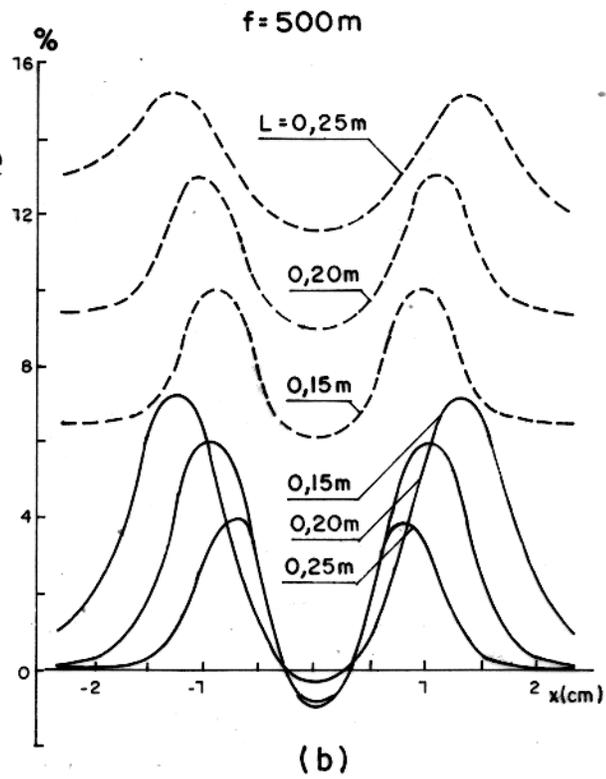
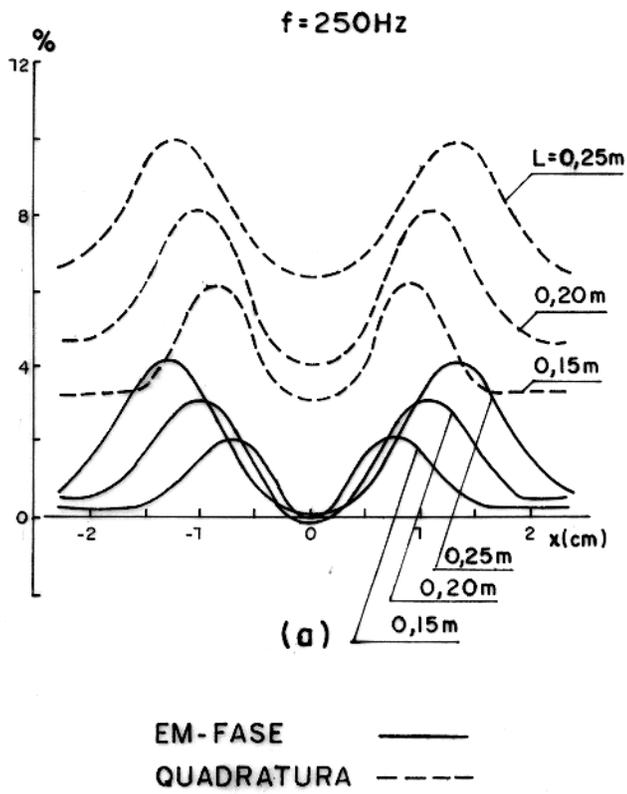
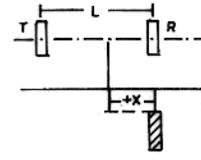


Fig.75 - Mudança dos perfis com a variação da separação T-R; sistema vertical coaxial; conjunto C_1M_1 .

ponentes em-fase se situam aproximadamente na frequência onde a quadratura se anula, e os picos máximos negativos da quadratura ocorrem aproximadamente onde a componente em-fase, após brusca diminuição, atinge um mínimo em altas frequências.

5.2.1. Efeito da condutância dos corpos

As Fig. 16 a 21 mostram como a variação das condutâncias (σt) dos corpos afetam os valores pico-a-pico das anomalias. Conforme era esperado, o corpo de maior condutância, C_3 , apresenta maior pico máximo na presença do manto.

Para as componentes em-fase, verifica-se que os valores pico-a-pico da resposta EM do corpo com e sem o manto, caminham próximos um do outro até determinada frequência. Um aumento na condutância do corpo (ou do manto) produz um deslocamento no pico máximo da anomalia para baixa frequência, conseqüentemente, é diminuída a faixa de frequências onde o manto tem pouca influência sobre o corpo. Isto é, onde os valores pico-a-pico, na presença e na ausência do manto tem pouca diferença. Por exemplo, na Fig. 16, as respostas do conjunto C_1M_1 e de C_1 caminham próximos um do outro até aproximadamente 900 Hz e quando a condutância do corpo é aumentada para C_3 esta frequência diminui para 600 Hz (veja as curvas C_3M_1 e C_3 na mesma Figura).

Na quadratura, na presença do manto, o corpo de maior condutância apresenta maior pico máximo negativo (Fig. 17, 19 e 21). Enquanto a resposta EM do corpo em quadratura na presença e na ausência do manto tendem a se aproximar um do outro somente nas baixíssimas e nas altíssimas frequências.

5.2.2. Efeito da condutância do manto

As Fig. 16 a 21 mostram os efeitos da condutância do manto sobre as respostas do corpo. Com o aumento da condutância do manto, as curvas de respostas tanto em-fase quanto em quadratura deslocam-se para baixas frequências, em todos os sistemas de bobinas estudados. Por exemplo, na Fig. 16 as respostas do conjunto C_1M_1 e C_1 estão próximos um do outro até frequências em torno de 900 Hz e quando a condutância do manto é aumentada para M_3 (C_1M_3 e C_3) esta frequência cai para 700 Hz. Os conjuntos com valores moderados de condutância do manto, M_2 , em geral apresentam

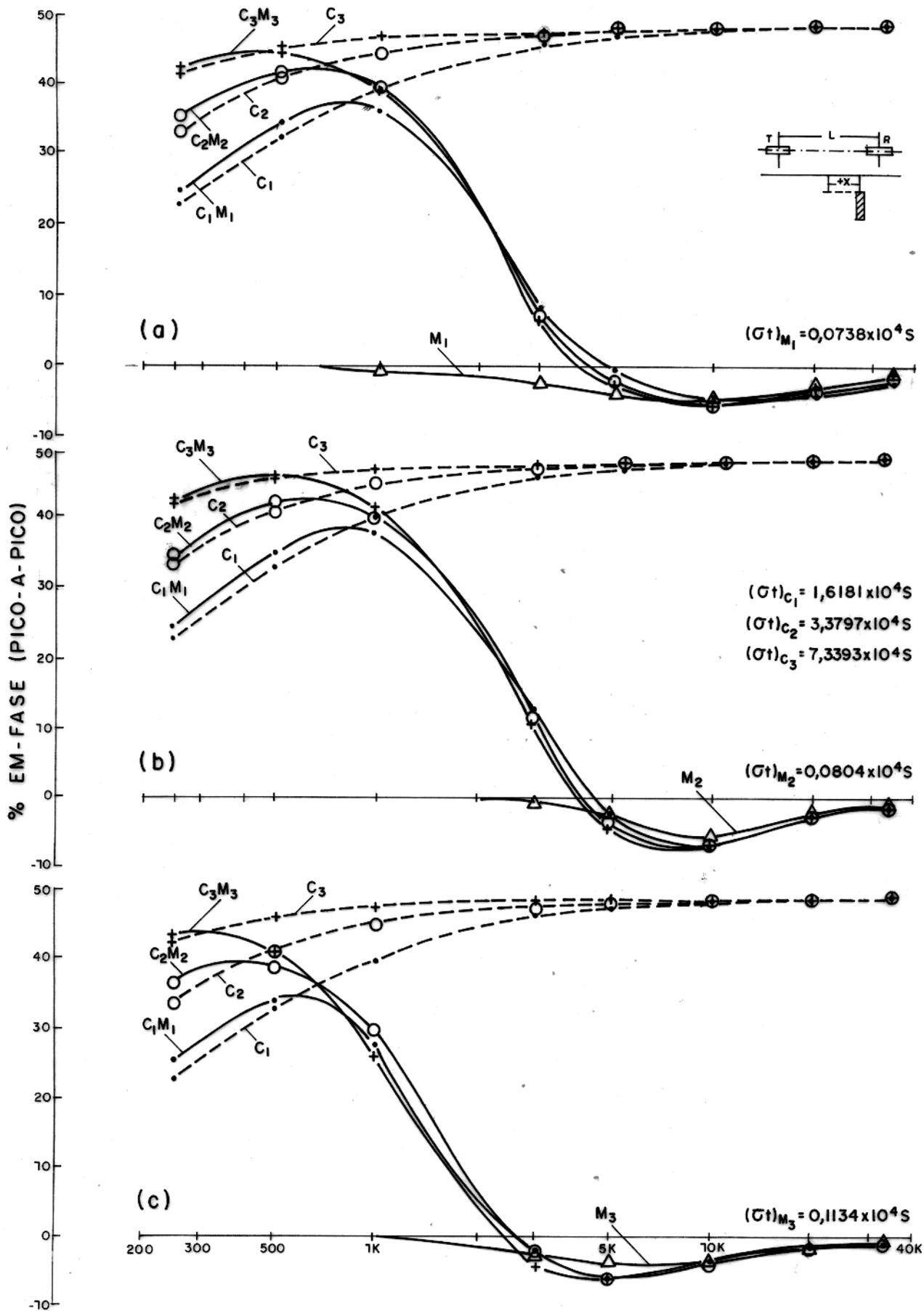


Fig.16 - Variação da componente em fase com a condutância do corpo; Sistema horizontal coplanar; $L = 0,25\text{m}$.

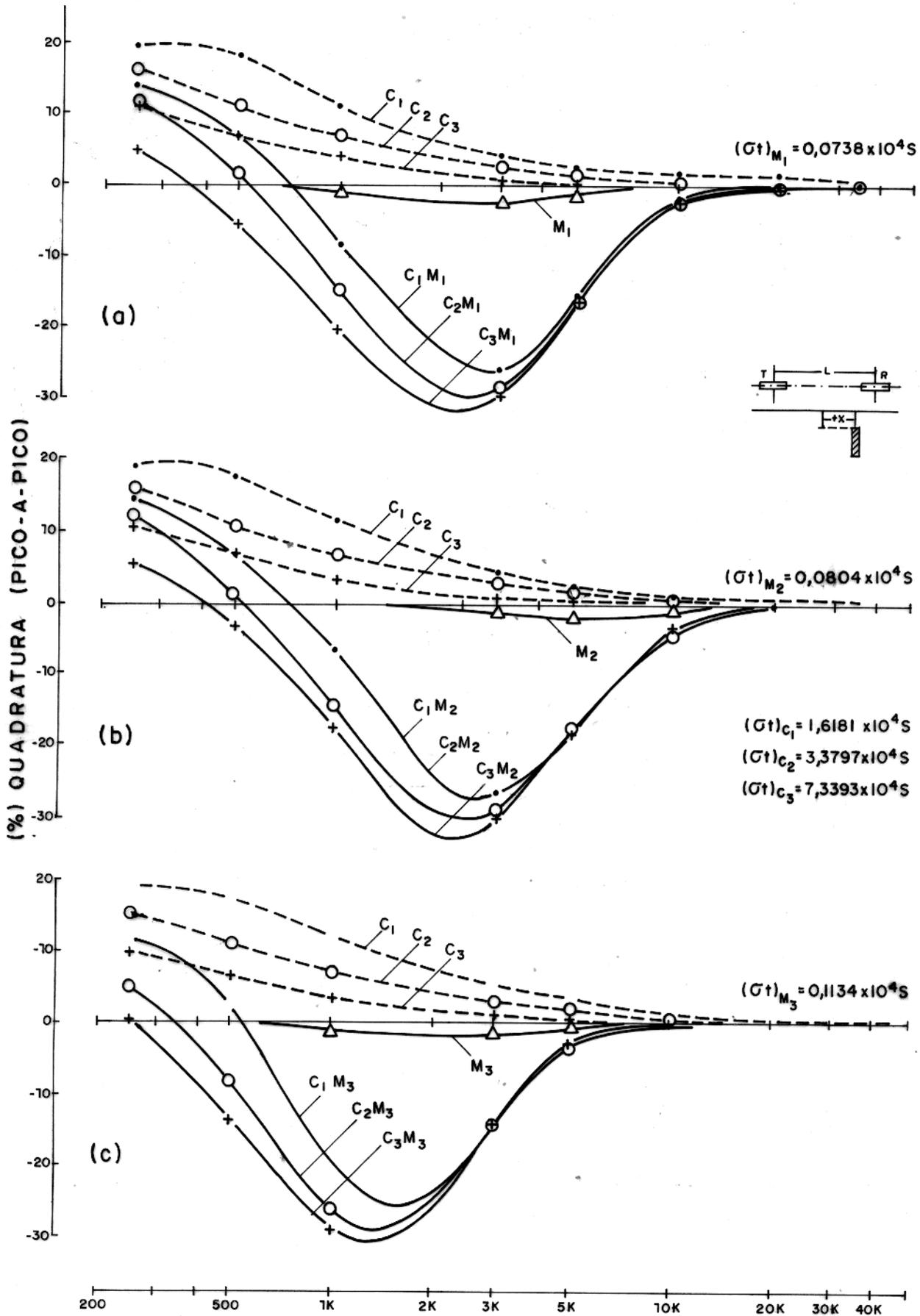


Fig. 17 - Variação da componente em quadratura com a condutância do corpo; Sistema horizontal coplanar; $L=0,25\text{m}$.

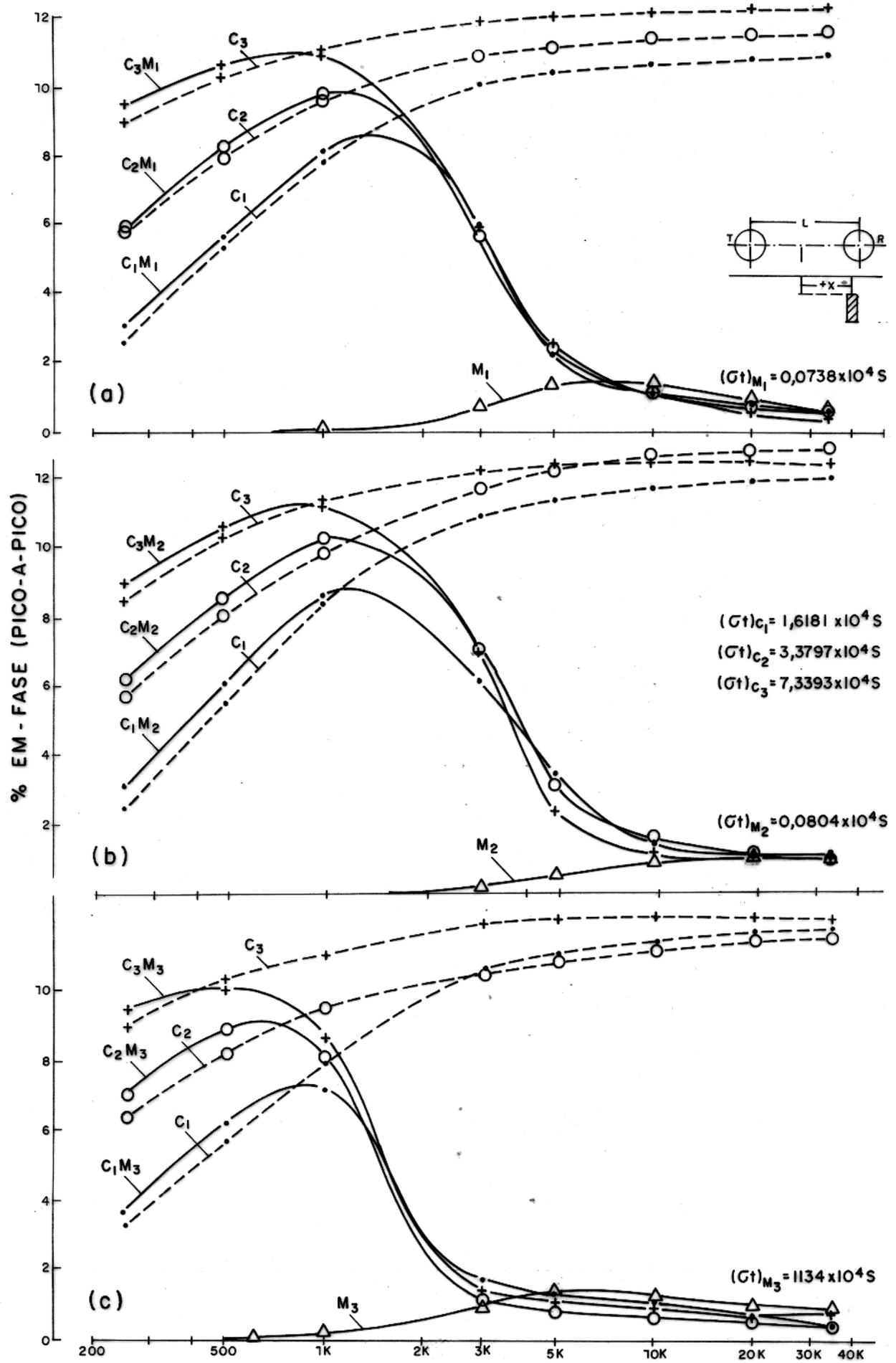


Fig.18 - Variação da componente em fase com a condutância do corpo; sistema vertical coplanar; L = 0,20m.

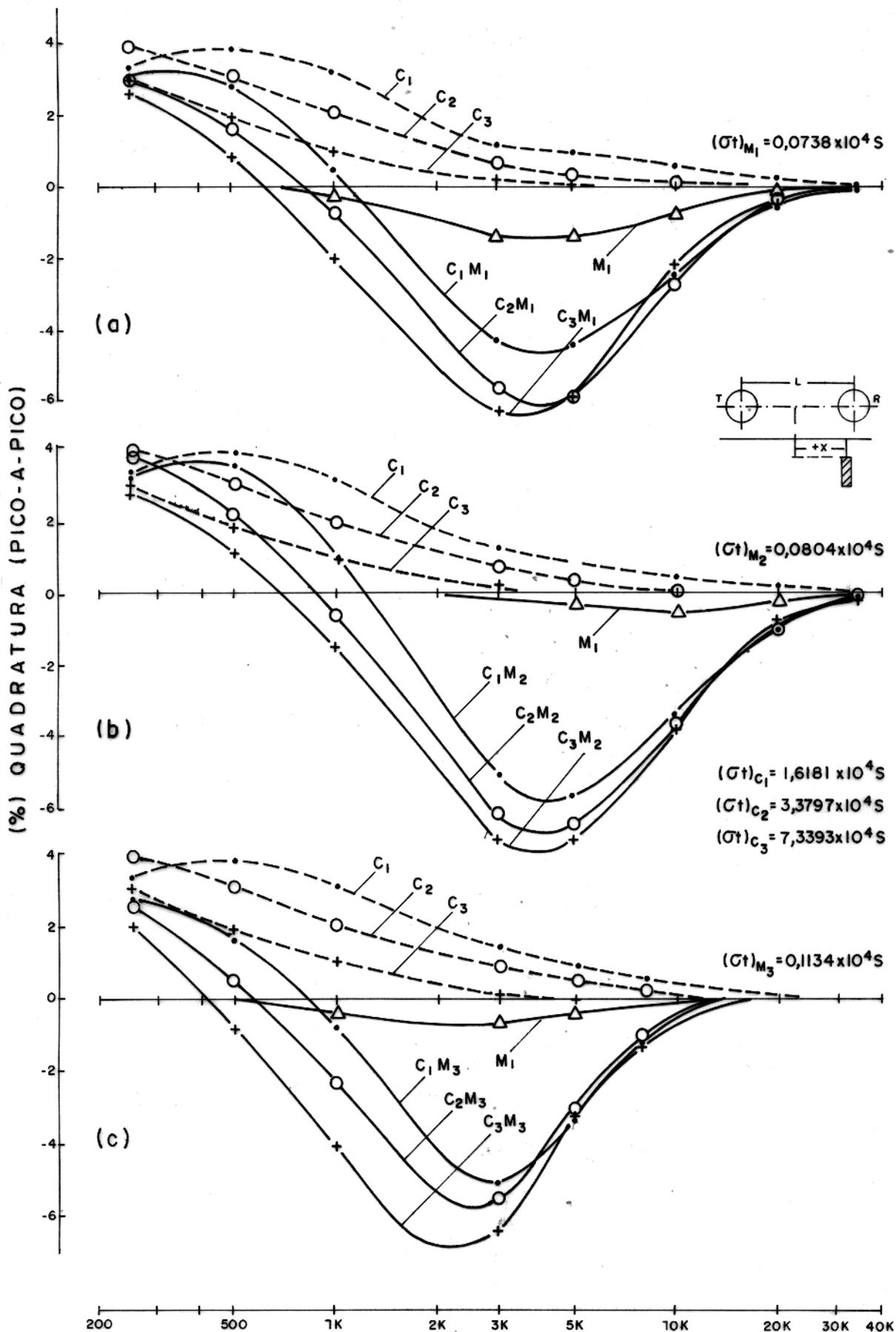


Fig.19- Variação da componente em quadratura com a condutância do corpo;
 Sistema vertical coplanar; $L = 0,20m$.

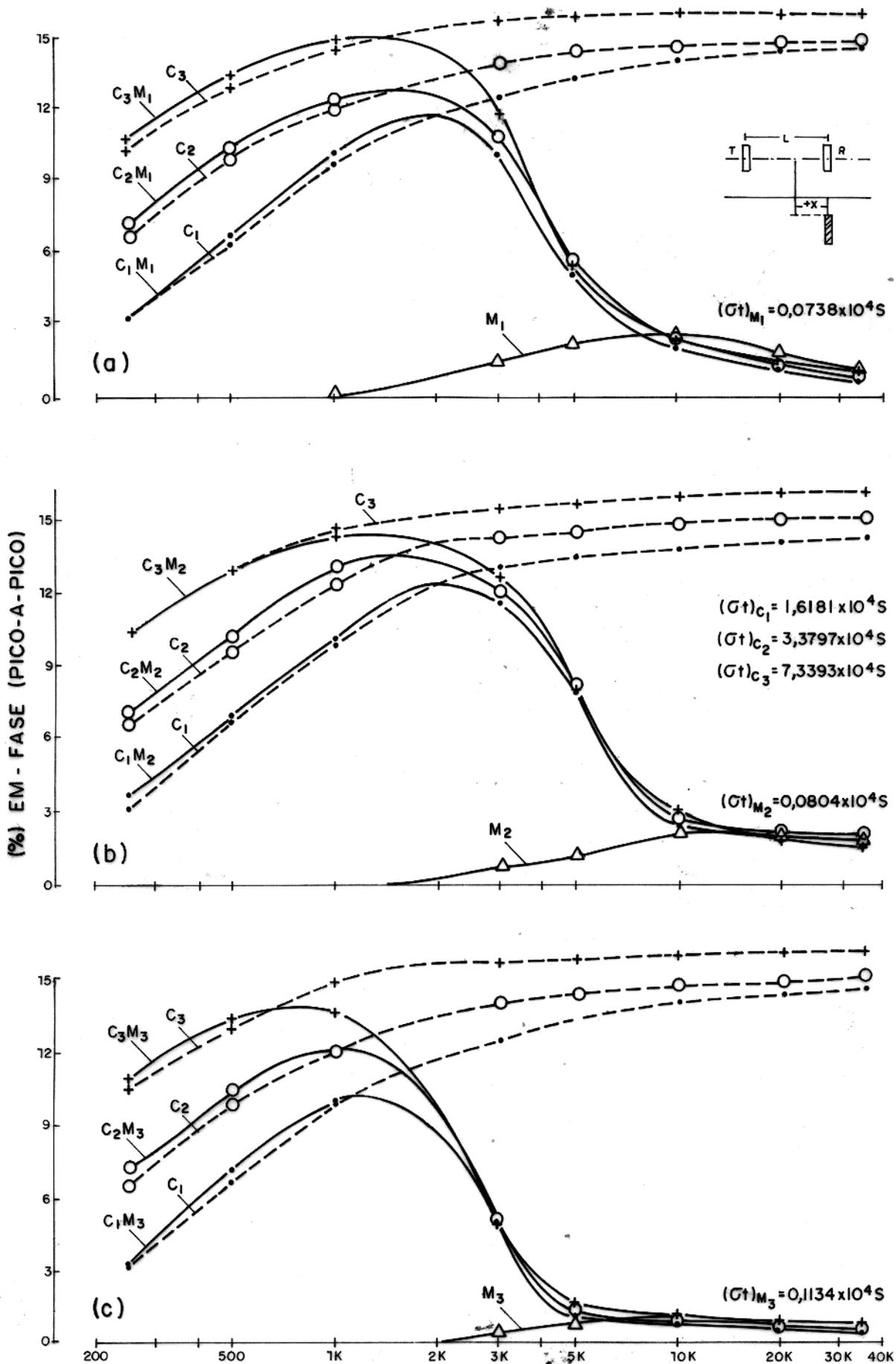


Fig.20 - Variação da componente em fase com a condutância do corpo; sistema vertical coaxial, $L=0,20m$.

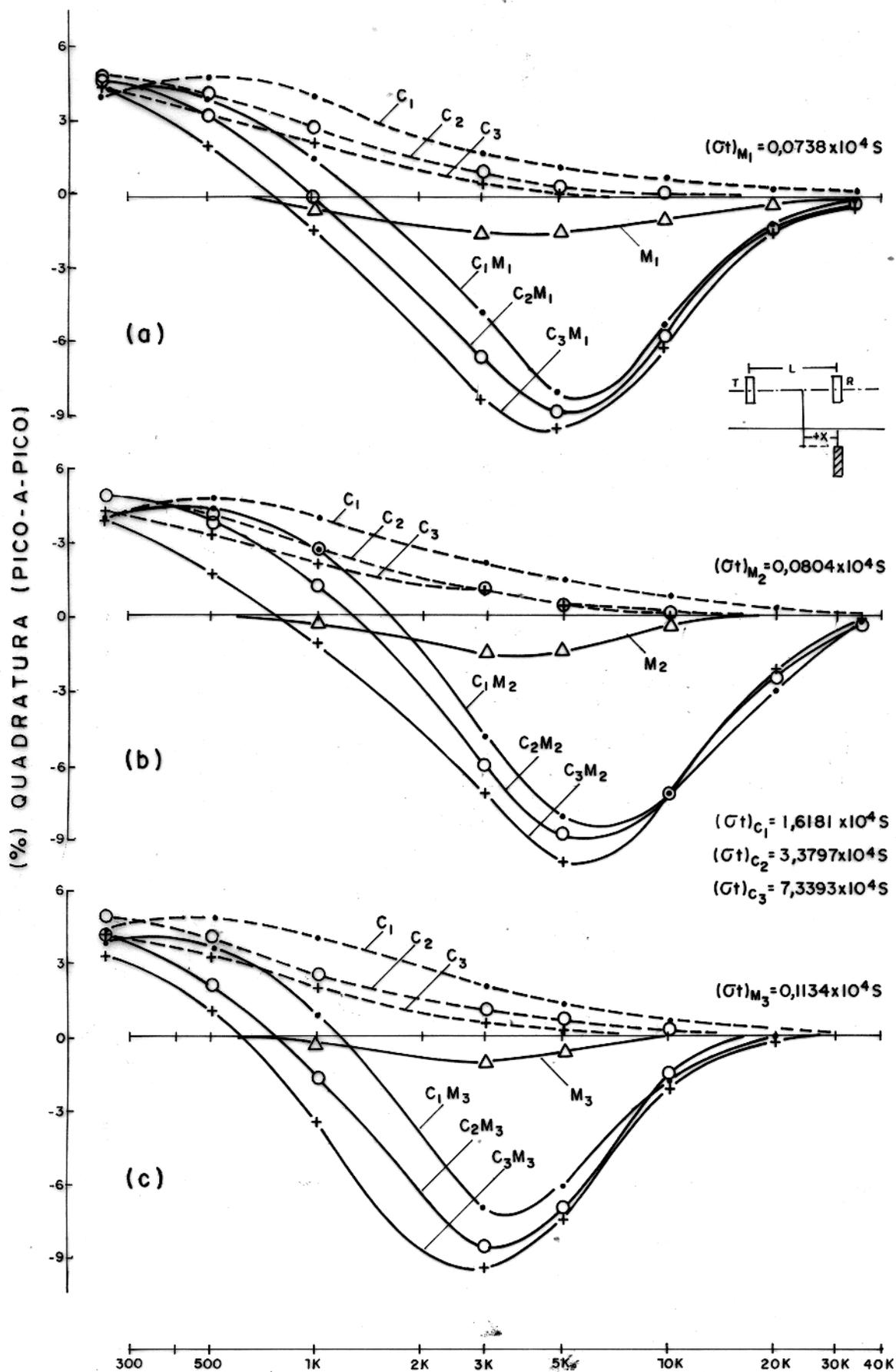


Fig.21- Variação da componente em quadratura com a condutância do corpo;
 Sistema vertical coaxial; $L = 0,20m$.

as maiores amplitudes, enquanto as menores amplitudes pertencem aos corpos sob o manto de maior condutância, M_3 .

5.2.3. Efeito das separações entre as bobinas

Um aumento na separação entre as bobinas com conseqüente aumento no parâmetro de resposta, provoca um deslocamento das anomalias do corpo para baixas frequências (Fig. 22 a 39). Com isto, a faixa de frequências, na componente em-fase, onde as respostas do corpo sofrem pouca influência do manto diminui com aumento da separação. Por exemplo, na Fig. 22 em $L = 0,15\text{ m}$ a faixa de frequências de pouca influência do manto sobre o corpo vai até $1,5\text{ kHz}$ para o conjunto C_1M_1 e quando esta separação é aumentada para $0,25\text{ m}$, esta faixa cai para 900 Hz .

5.2.4. Efeito de diferentes sistemas de bobinas

A influência do manto de intemperismo é mais fortemente sentida no sistema horizontal coplanar do que nos sistemas verticais coplanar e coaxial. Isto pode ser visto, por exemplo, comparando-se as Fig. 18a, 20a e 22b. Considerando o conjunto C_3M_1 e C_3 , a faixa de frequências mencionada acima vai até aproximadamente $1,5\text{ kHz}$ para o sistema vertical coaxial, 1 kHz para o sistema vertical coplanar e 700 Hz para o horizontal coplanar. Isto ocorre porque os sistemas que utilizam bobinas horizontais medem a componente vertical do campo magnético, por isso corpos condutivos com pequena inclinação ou horizontais, como manto, fornecem excelente acoplamento neste tipo de sistema. Por outro lado, nos sistemas de bobinas verticais, que medem a componente horizontal do campo magnético, o melhor acoplamento é conseguido para corpos com grande inclinação ou verticais.

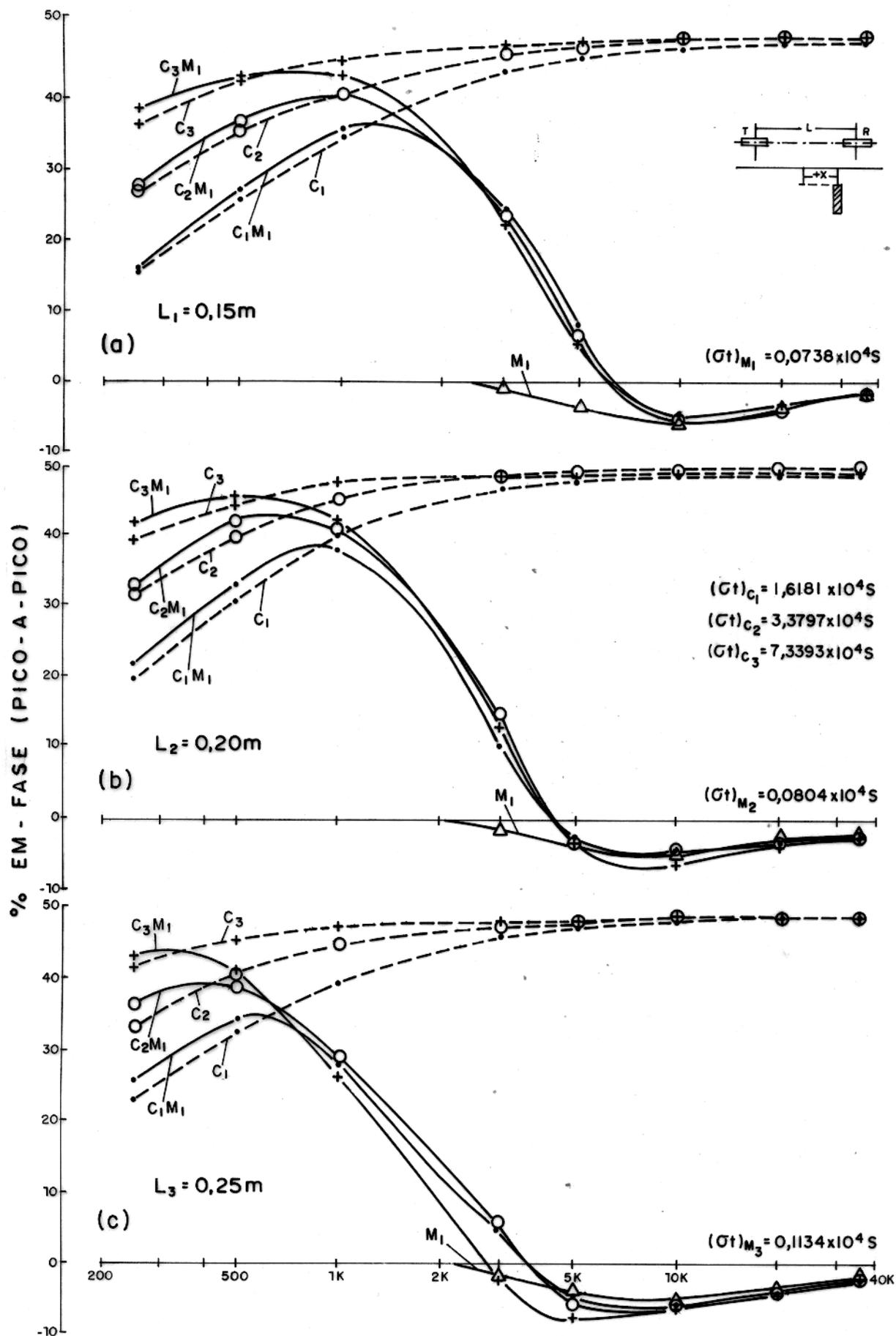


Fig.22- Variação da componente em-fase com a separação de bobinas; Sistema horizontal coplanar. Manto M_1

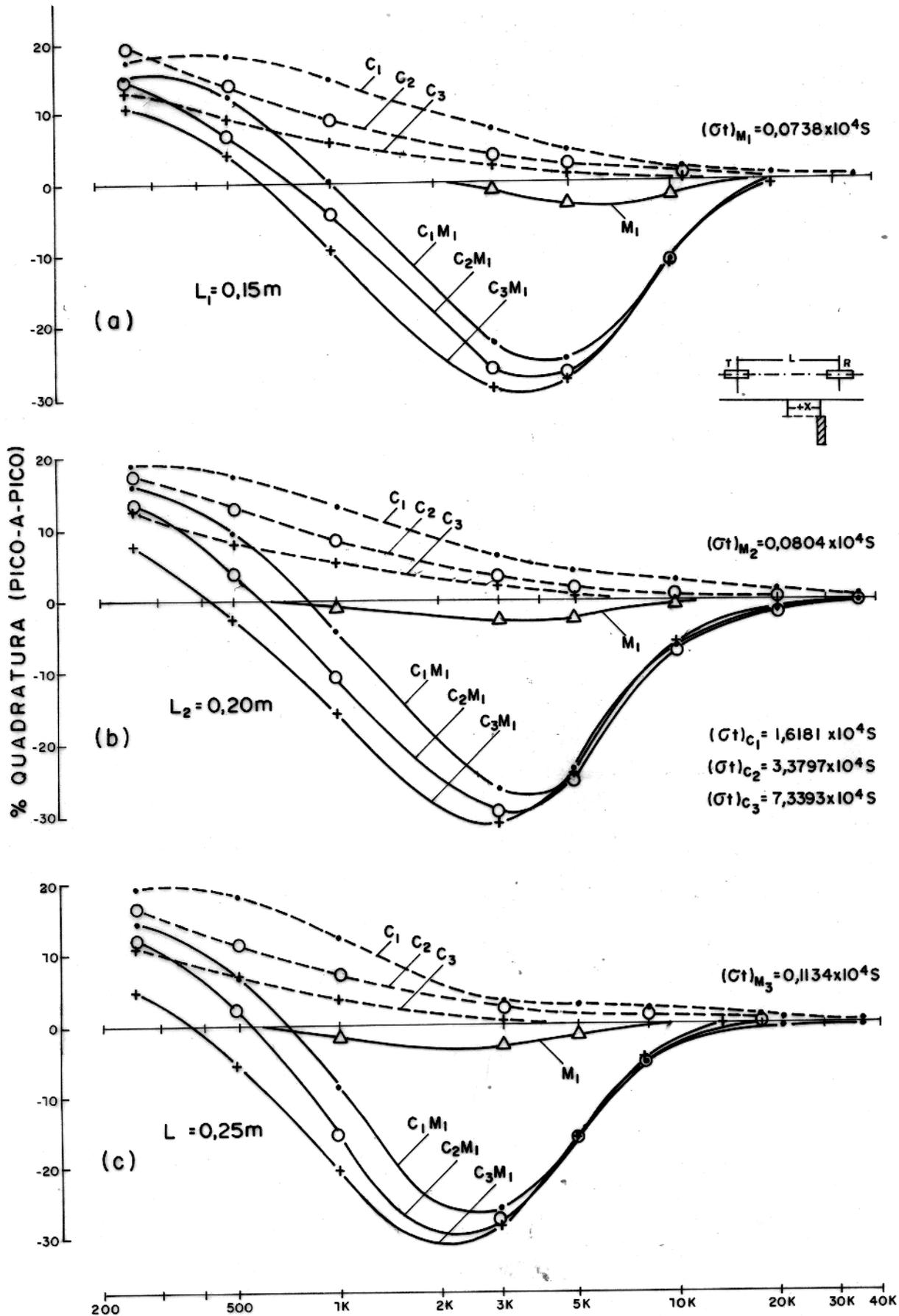


Fig.23 - Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; sistema horizontal coplanar. Manto M_1

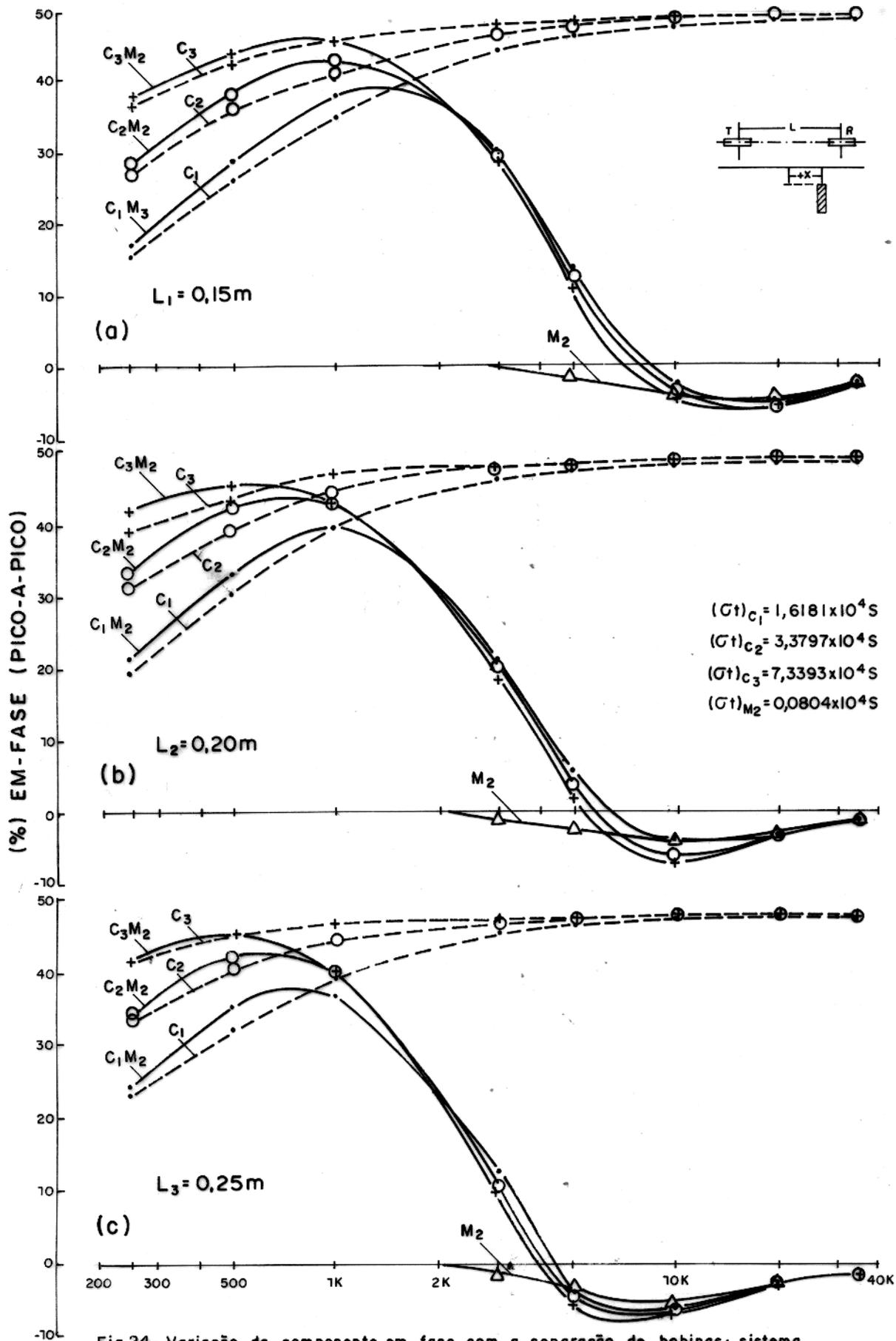


Fig.24- Variação da componente em fase com a separação de bobinas; sistema horizontal coplanar. Manto M_2

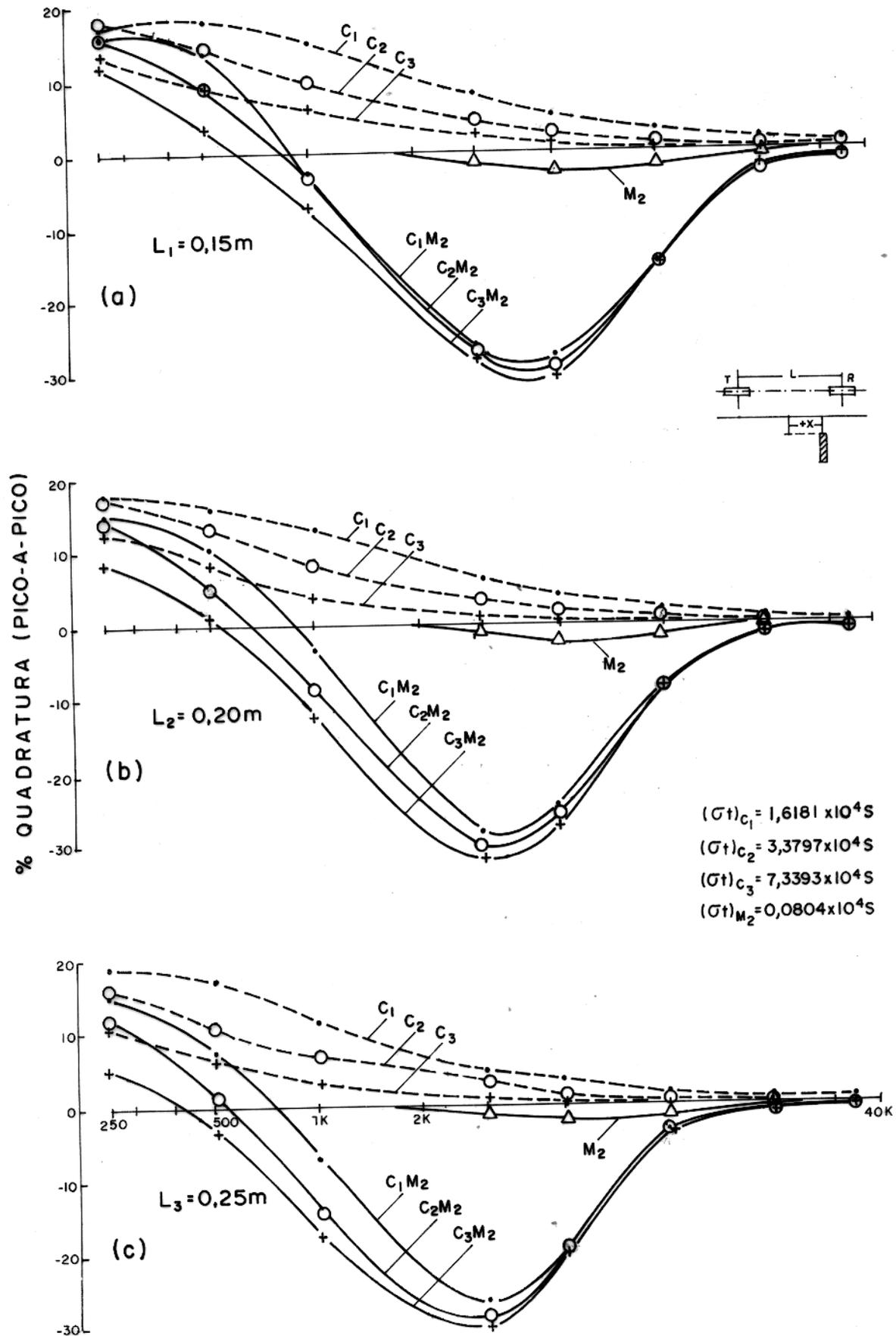


Fig.25 - Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas;
Sistema horizontal coplanar. Manto M_2

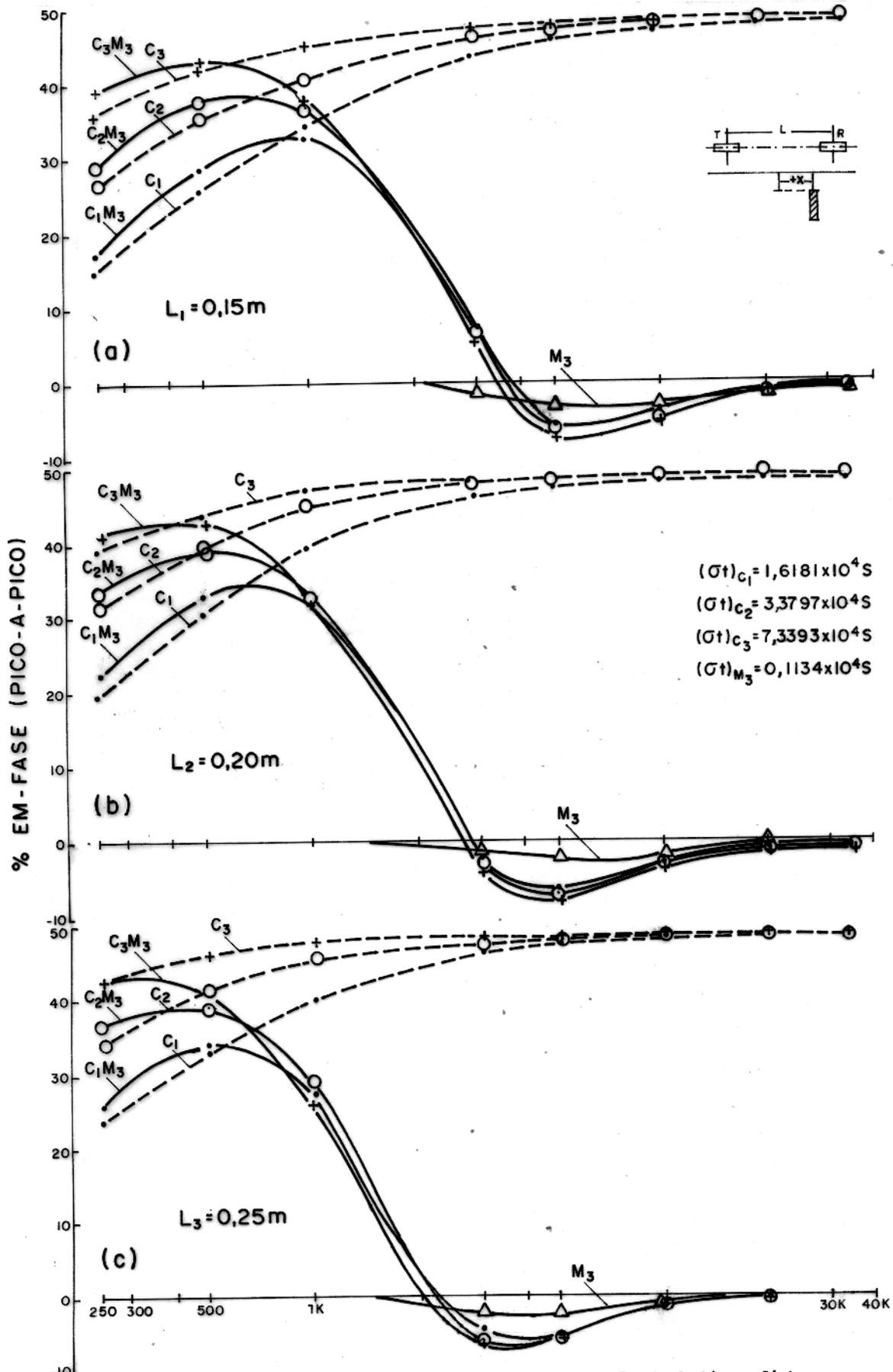


Fig.26 - Variação da componente em fase com a separação de bobinas; Sistema horizontal coplanar. Manto M_3

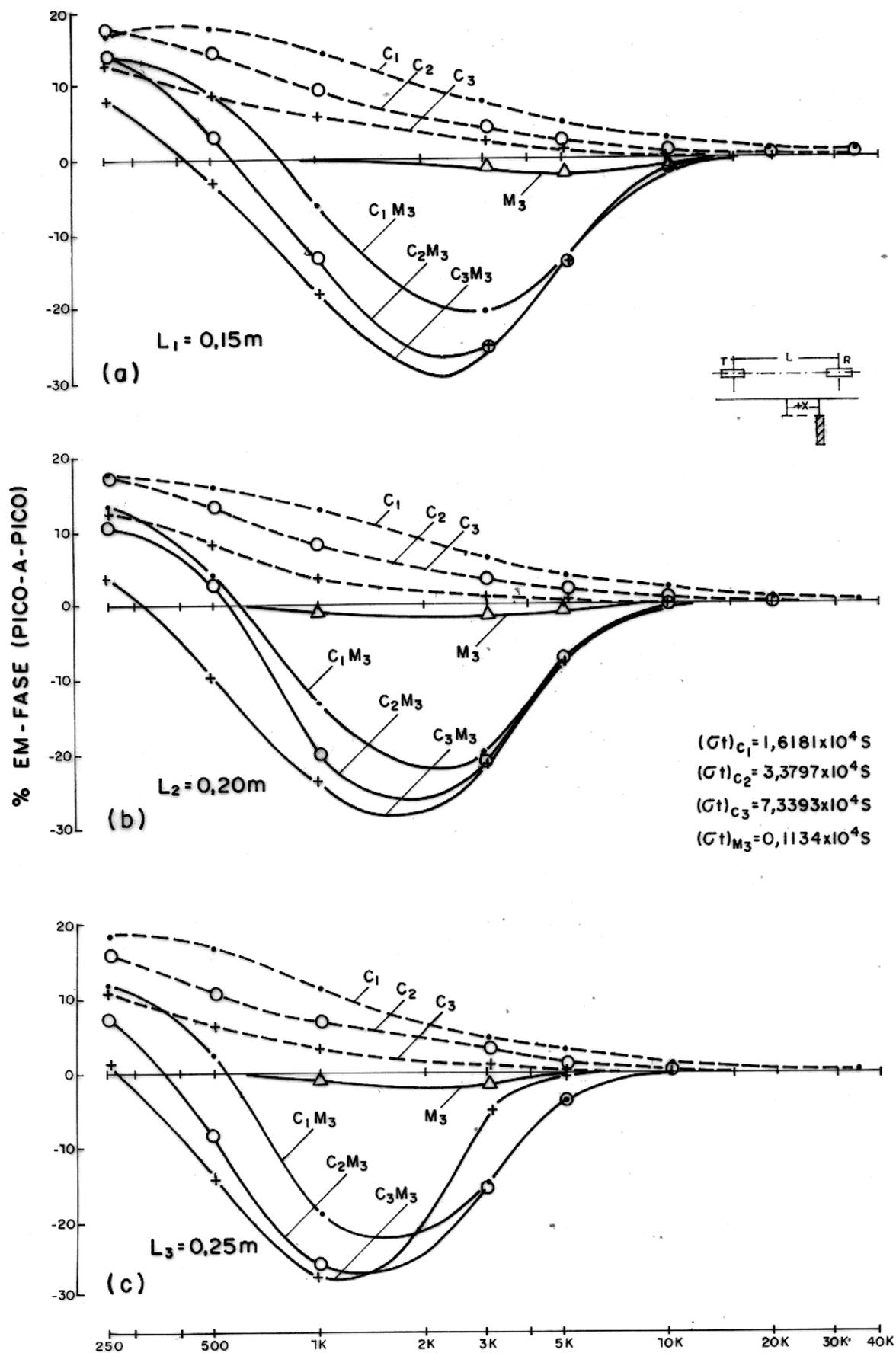


Fig. 27 - Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas sistema horizontal coplanar. Manto M_3

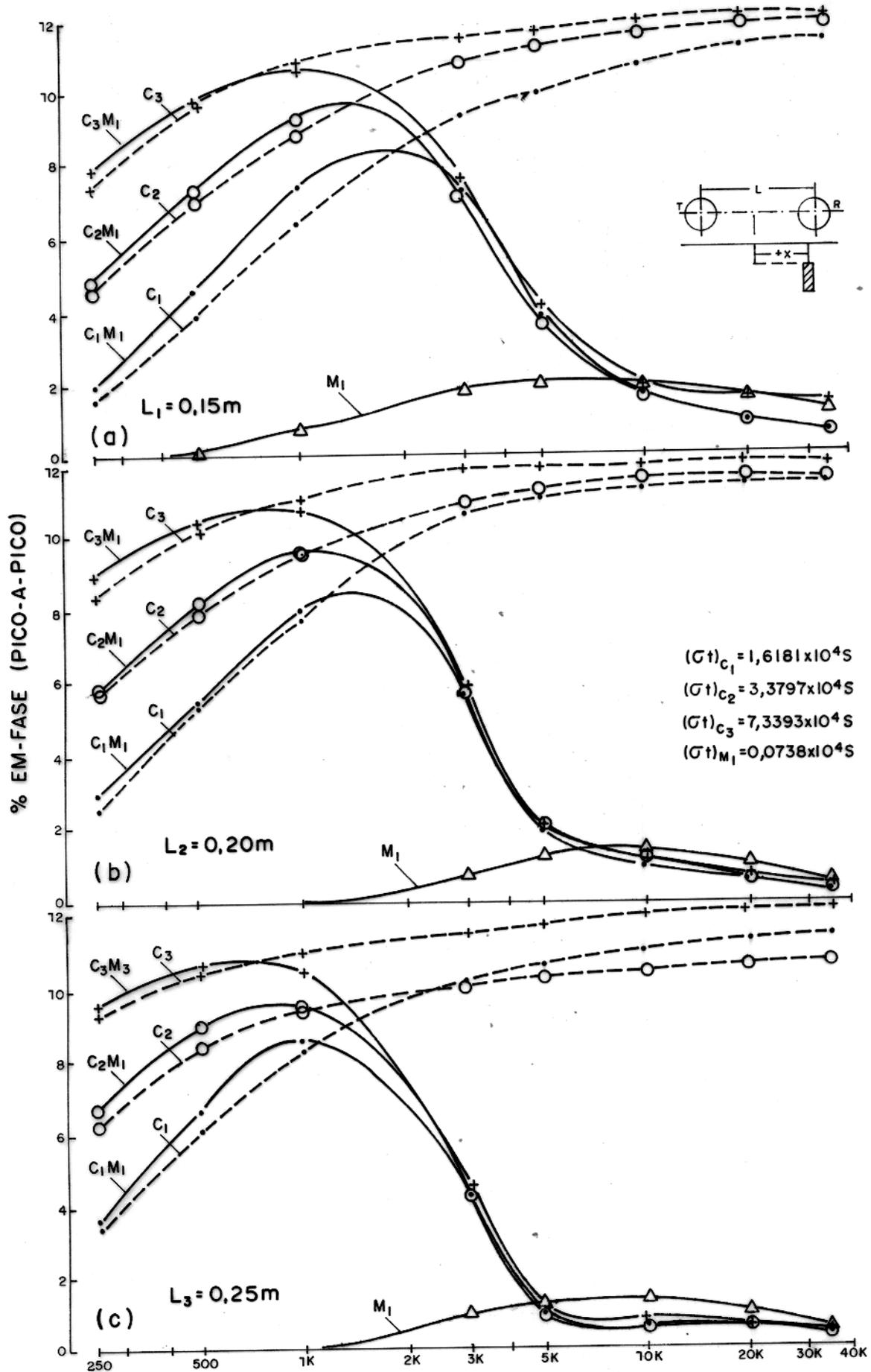


Fig. 28 - Variação da componente em-fase com a separação de bobinas; sistema vertical coplanar. Manto M_1

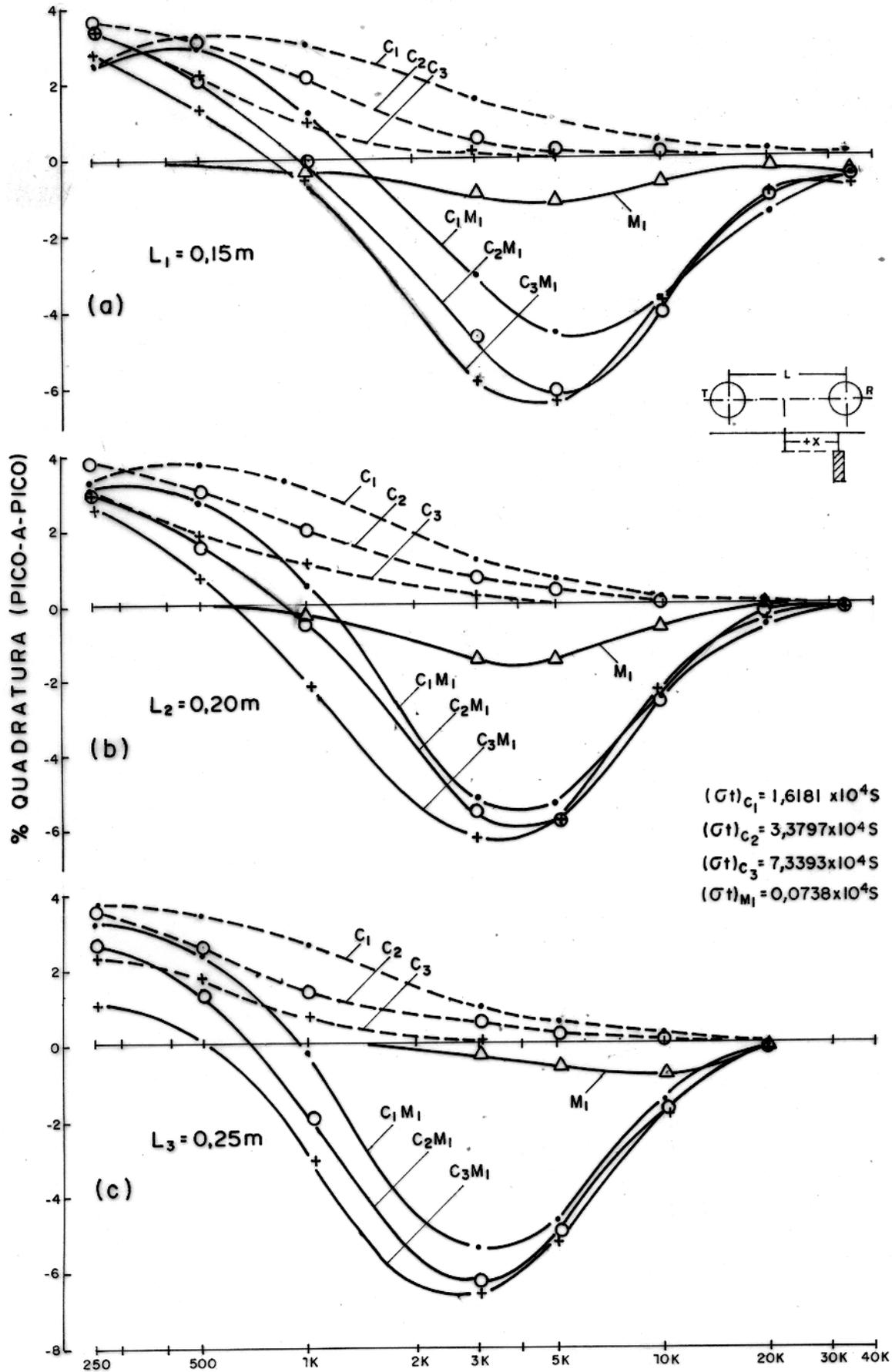


Fig.29 - Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas;
 Sistema vertical coplanar. Manto M_1

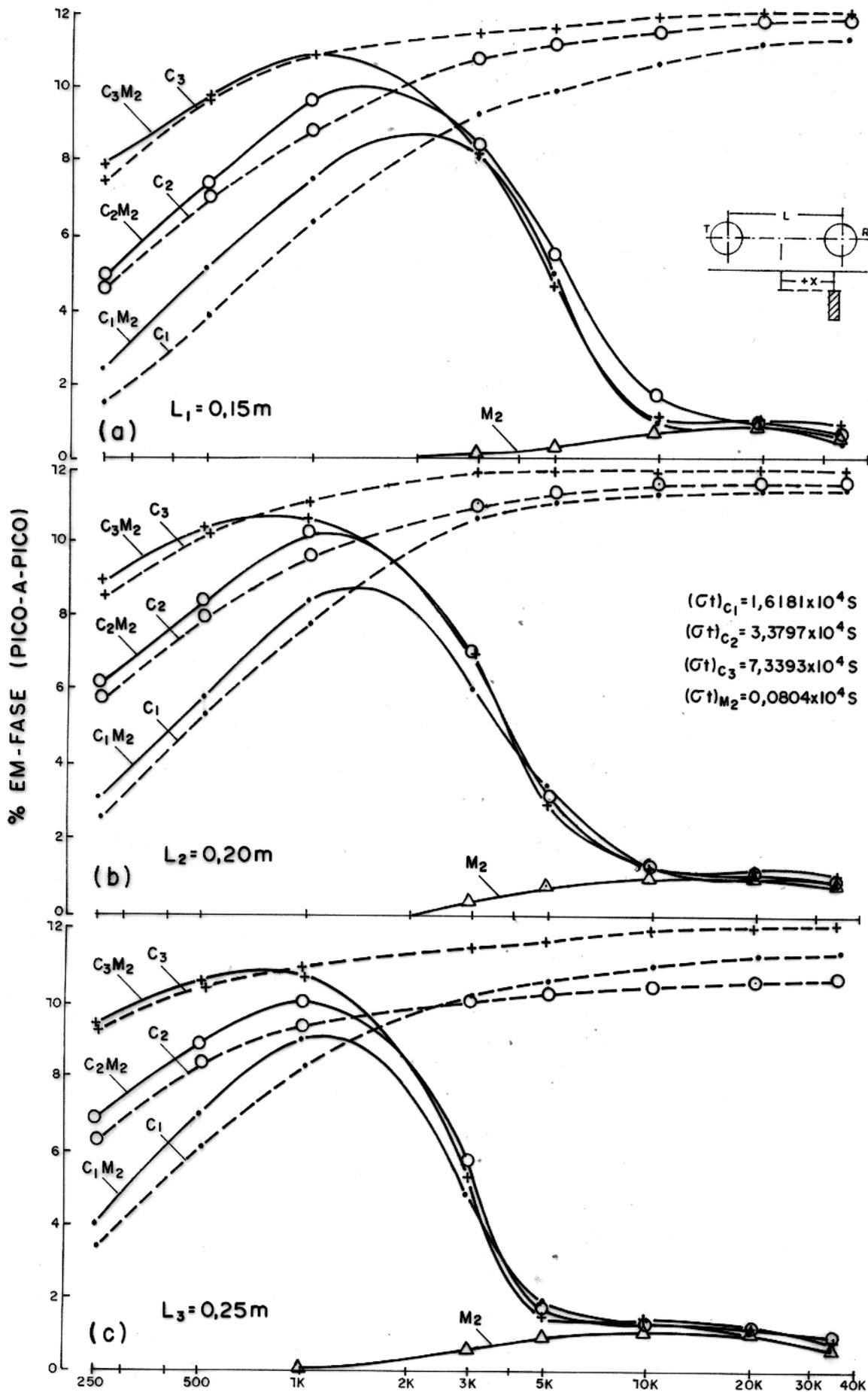


Fig. 30 - Variação da componente em-fase com a separação de bobinas; sistema vertical coplanar. Manto M_2

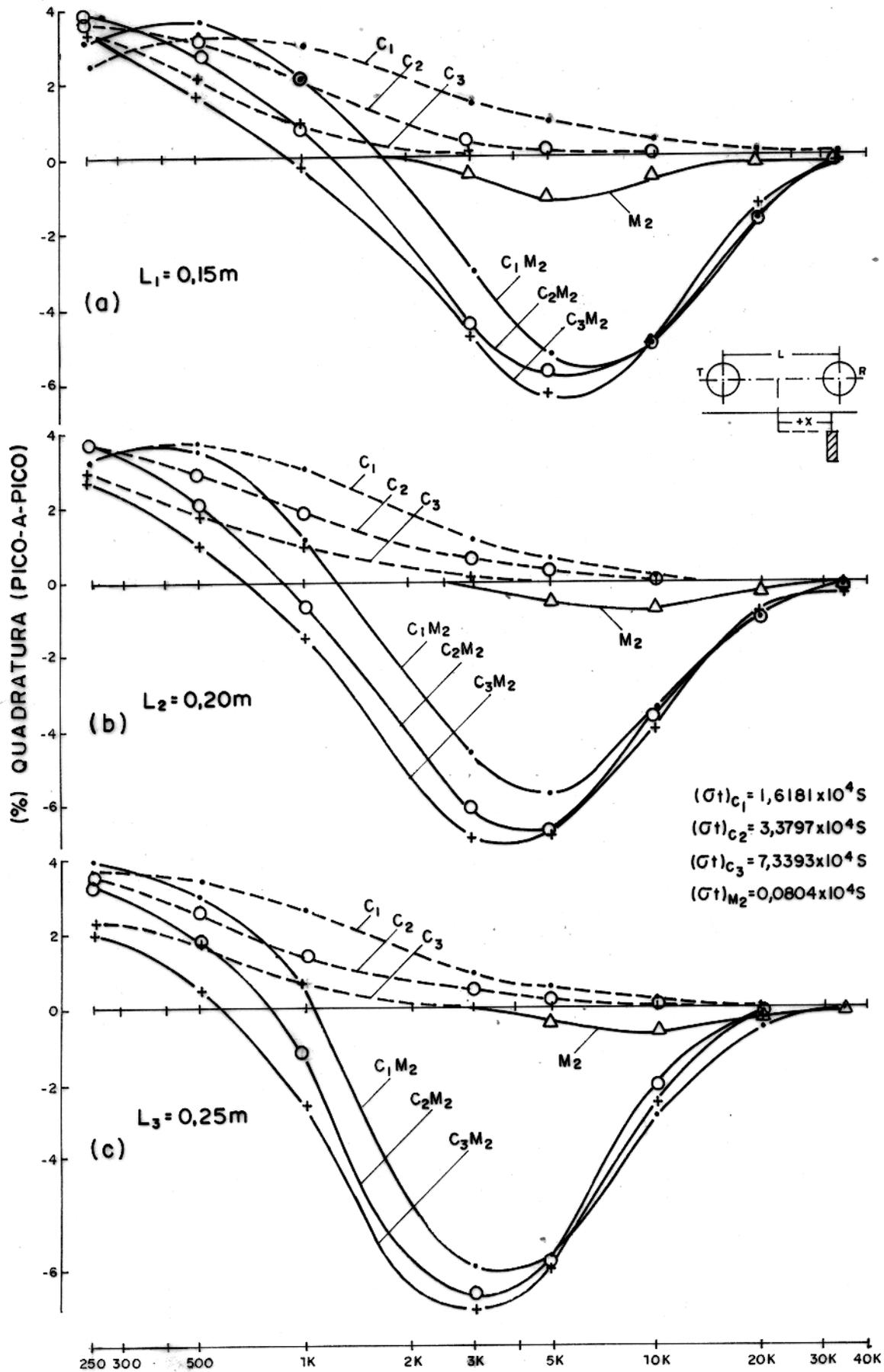


Fig.31- Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; sistema vertical coplanar. Manto M_2

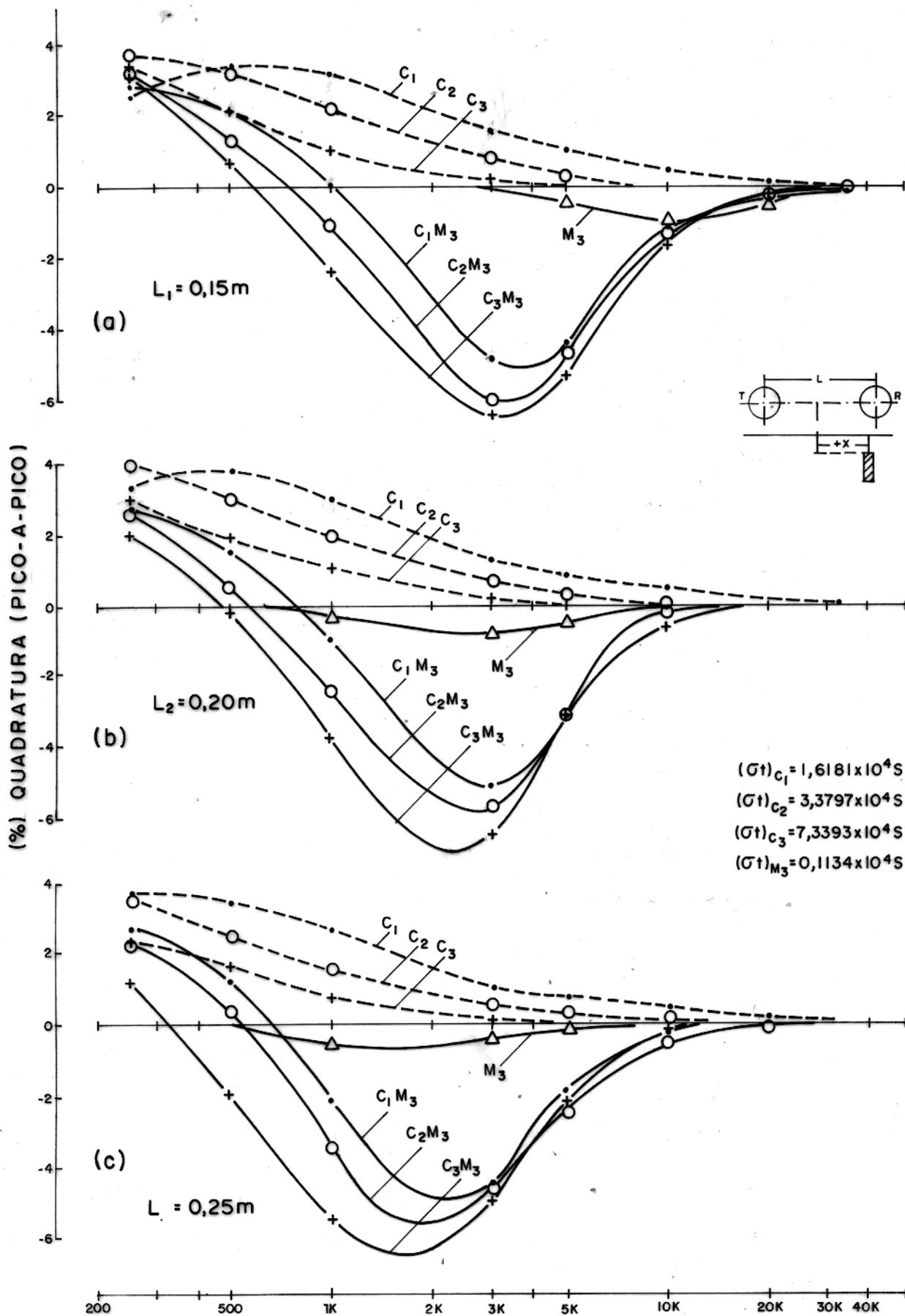


Fig.32- Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; Sistema vertical coplanar. Manto M_3

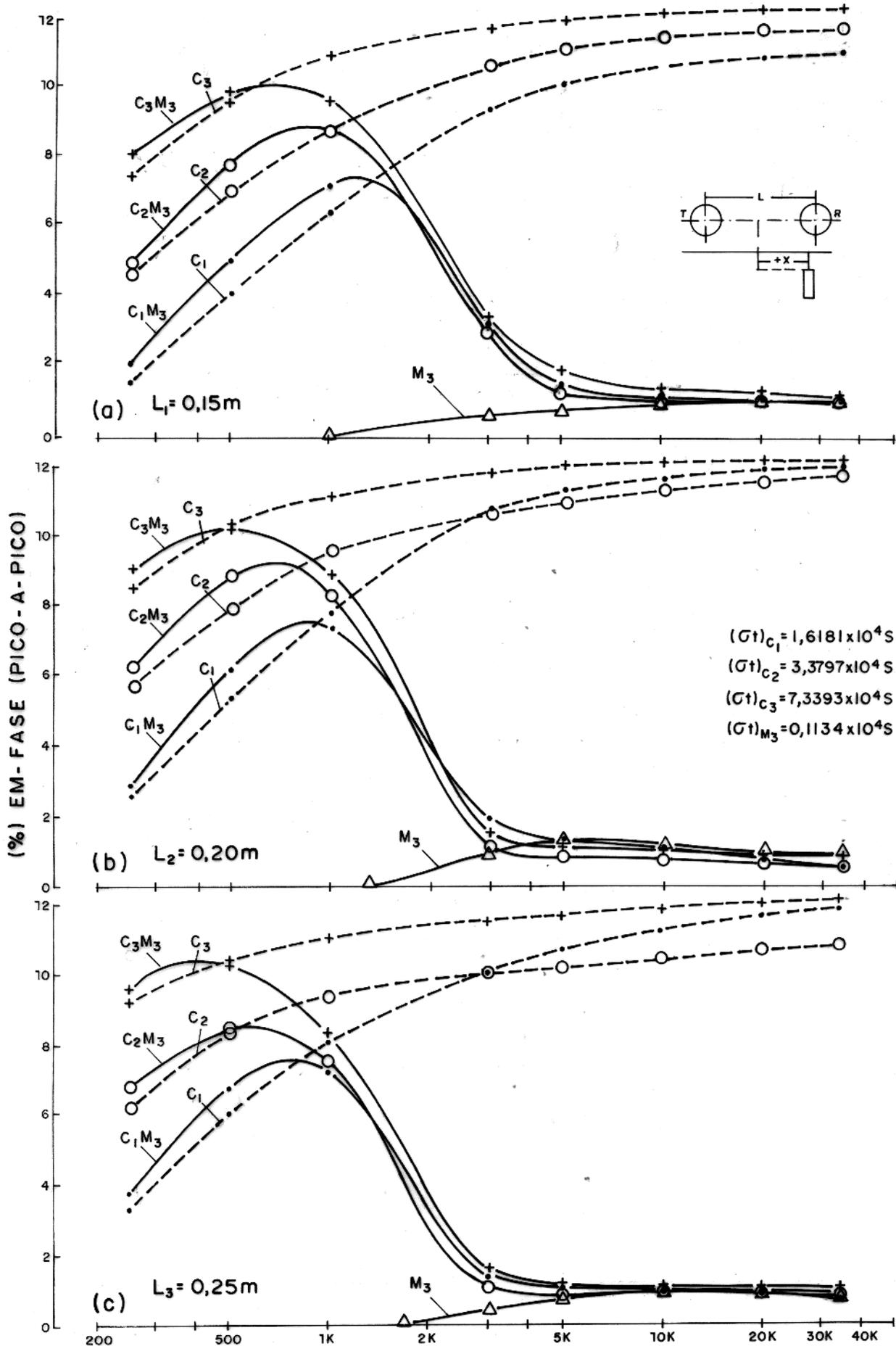


Fig.33 - Variação da componente em fase com a separação de bobinas; Sistema vertical coplanar. Manto M_3

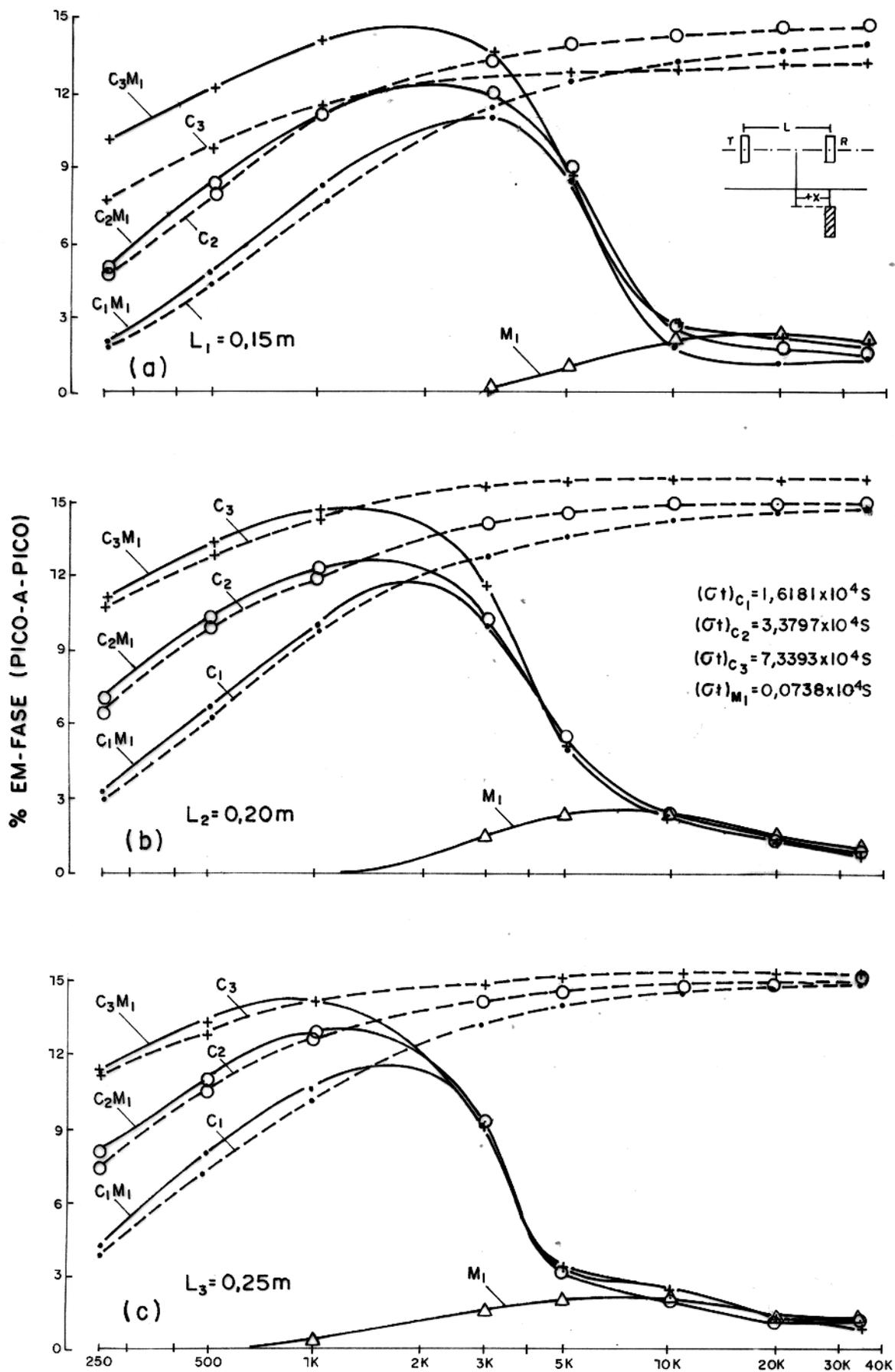


Fig. 34 - Variação da componente em-fase com a separação de bobinas; sistema vertical coaxial. Manto M_1

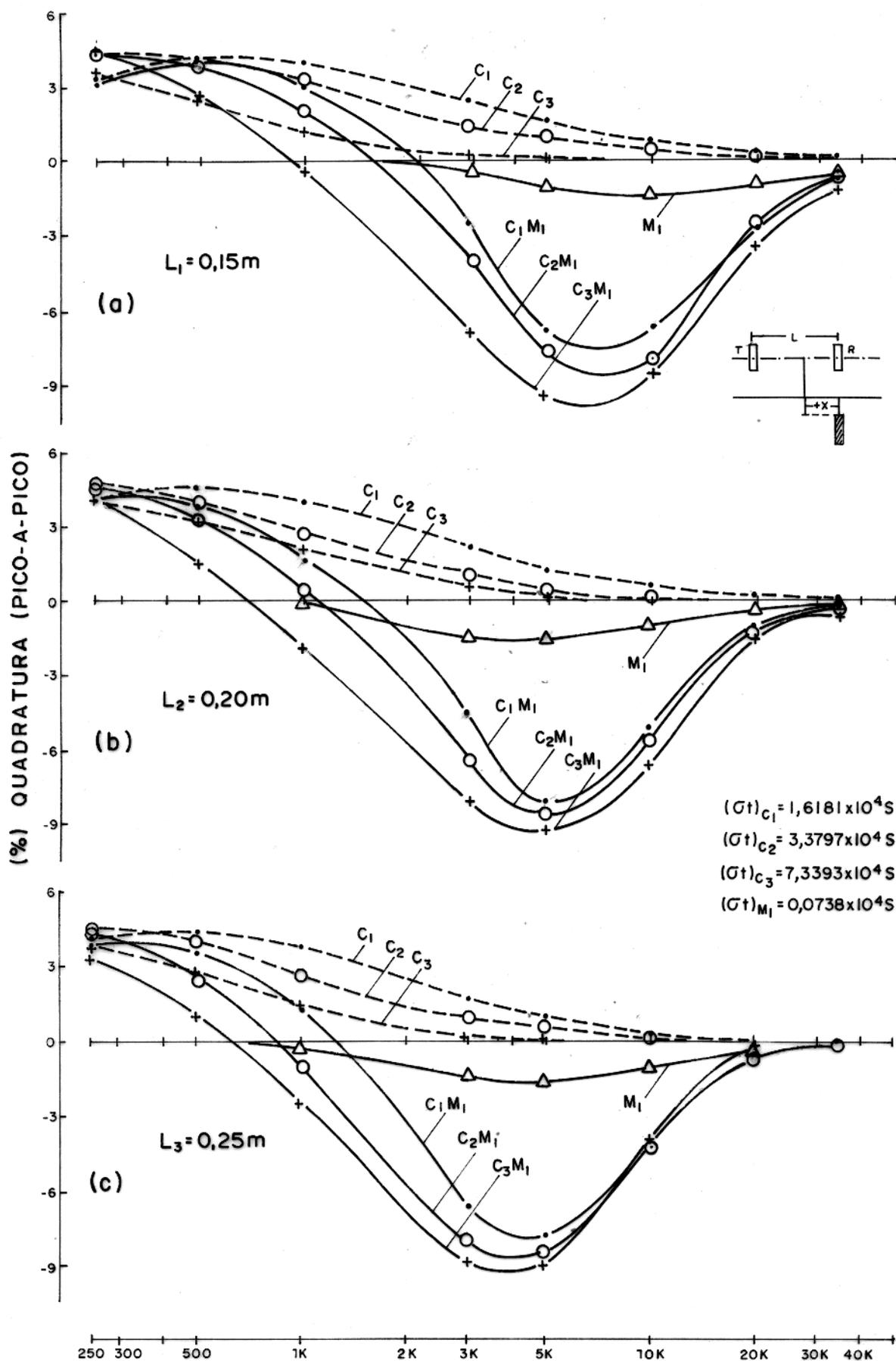


Fig.35- Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; sistema vertical coaxial. Manto M_1

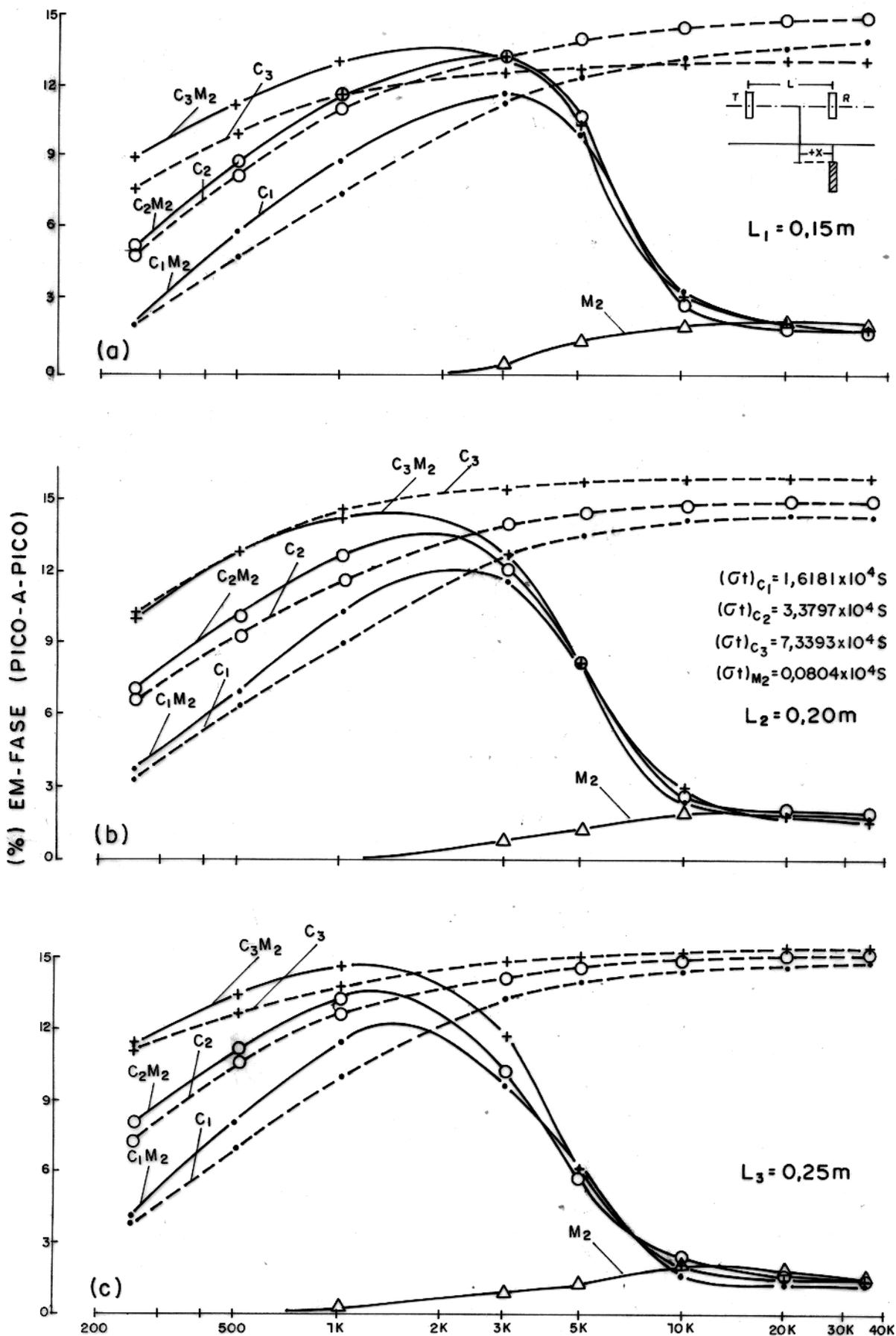


Fig.36- Variação da componente em-fase com a separação de bobinas; Sistema vertical coaxial. Manto M_2

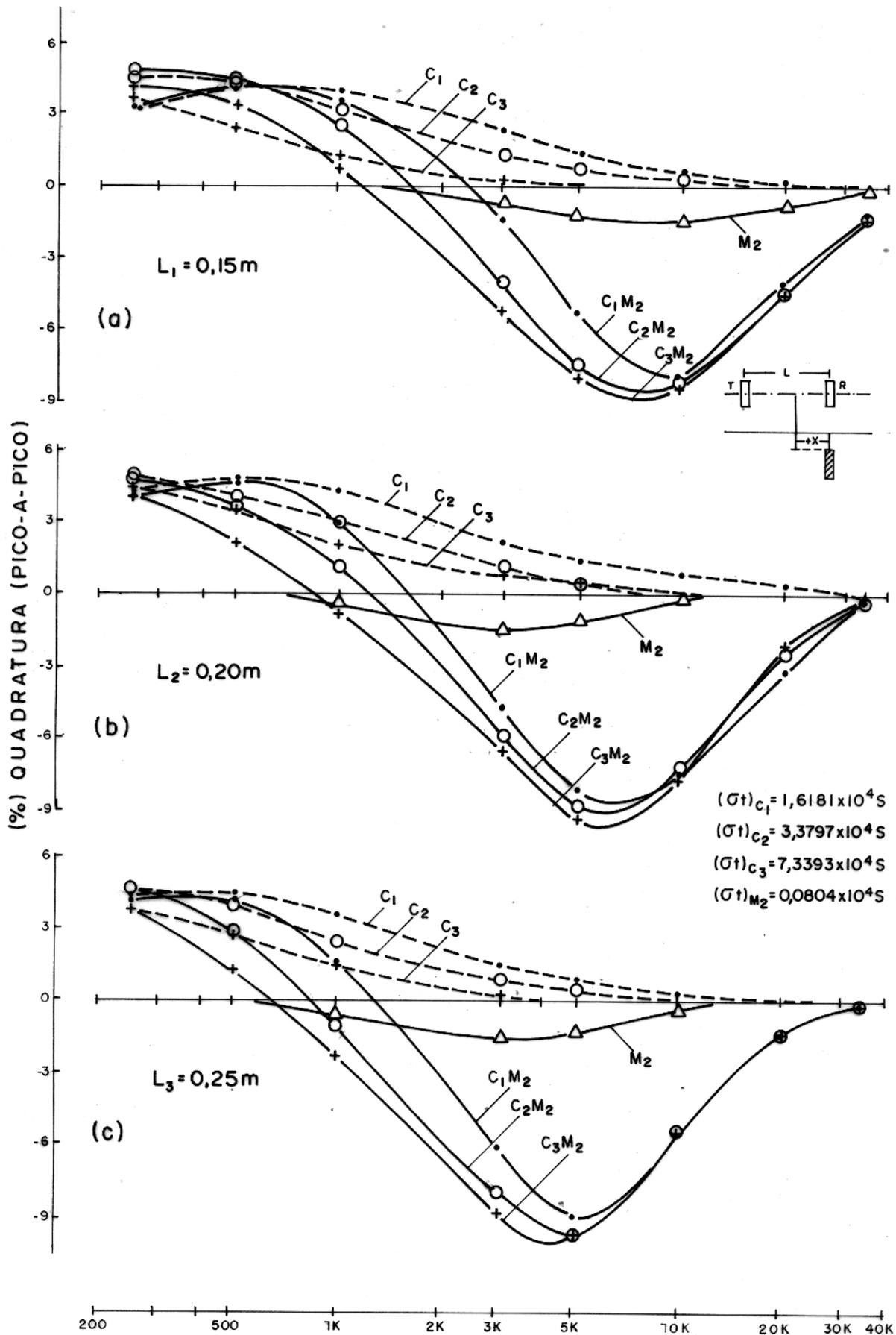


Fig.37- Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas; sistema vertical coaxial. Manto M_2

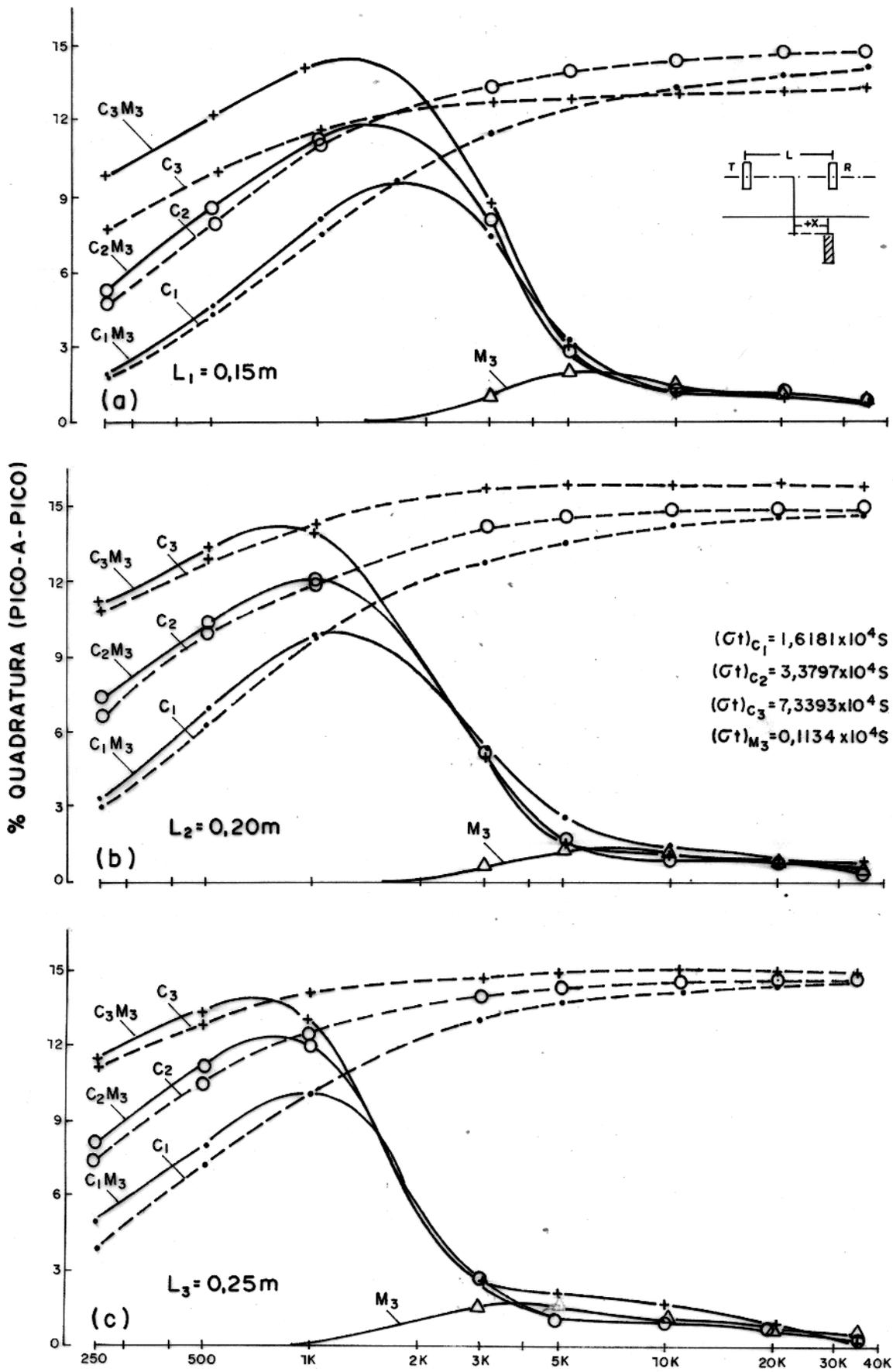


Fig. 38 - Variação da componente em fase com a separação de bobinas; sistema vertical coaxial. Manto M_3

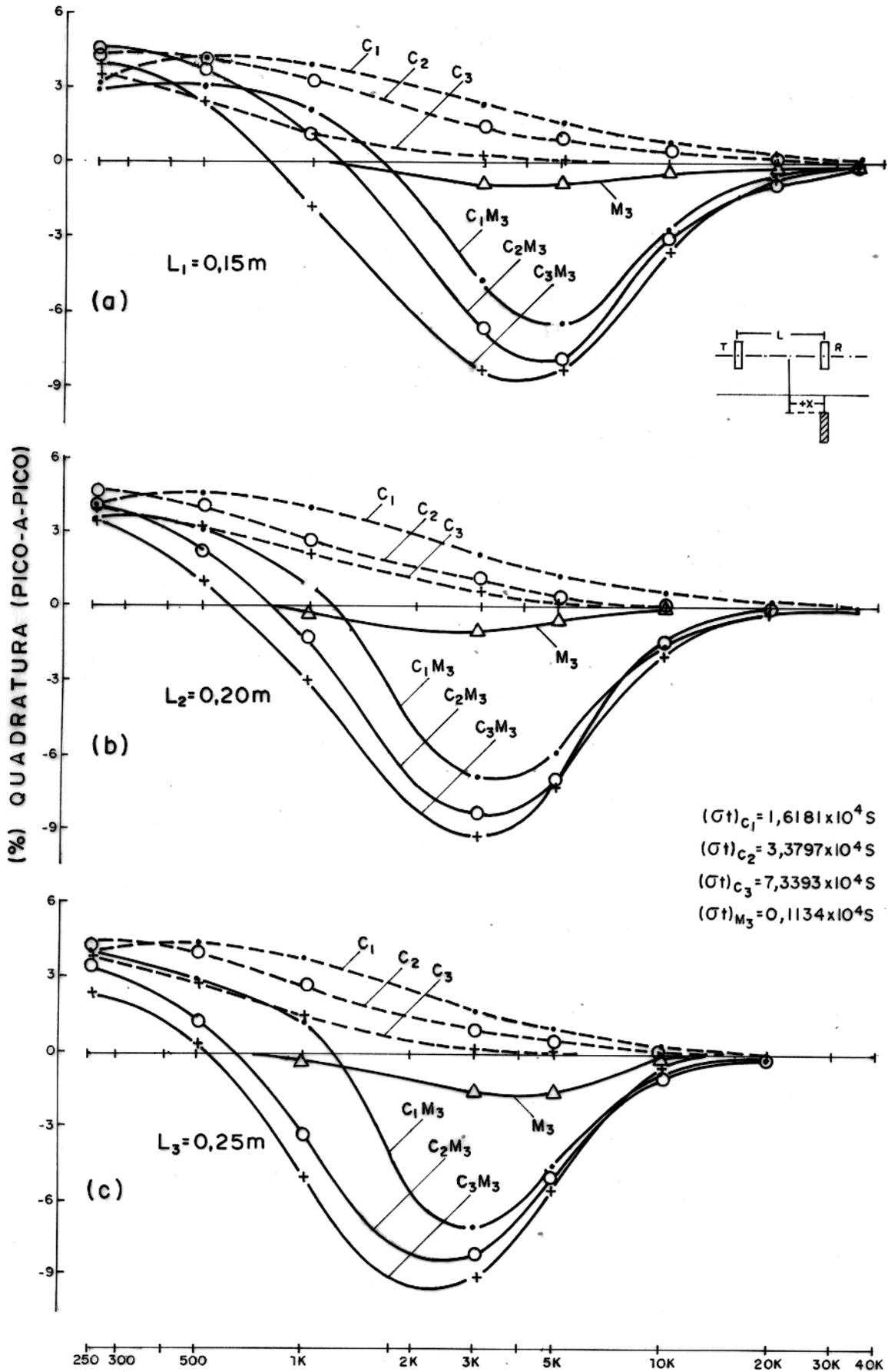


Fig.39- Variação da componente em quadratura com a separação de bobinas;
sistema vertical coaxial.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos mostraram o comportamento da resposta EM de um corpo condutor vertical do tipo semi-plano sob manto de intemperismo, na faixa de frequências de 250 Hz a 35kHz em três separações transmissor-receptor para os sistemas de bobinas horizontal coplanar, vertical coplanar e vertical coaxial.

Com o objetivo de analisar os resultados foram plotados as amplitudes máximas para cada frequência correspondente das componentes do campo secundário nas Fig. 40, 41 e 42, para todos os conjuntos de corpo-manto nos vários sistemas de bobinas e separações T-R utilizados neste trabalho. A amplitude máxima da componente em-fase ocorre quando a quadratura tem valor próximo de zero em frequências relativamente baixas. Do mesmo modo, a amplitude máxima na quadratura é conseguida quando a componente em-fase atinge um valor mínimo em altas frequências.

As amplitudes maiores pertencem ao sistema horizontal coplanar seguindo-se o vertical coaxial e vertical coplanar. Um aumento na separação provoca um deslocamento das anomalias para a esquerda, isto é, para baixas frequências. Isto pode ser visto nas figuras mencionadas onde os eixos das abcissas para as separações L_2 (0,20 m) e L_3 (0,25 m) foram deslocadas em relação ao eixo L_1 (0,15 m) pelas razões constantes 1,333 (0,20/0,15) e 1,666 (0,25/0,15) respectivamente. Portanto esses valores de amplitudes máximas podem ser controladas por uma variação tanto na separação entre as bobinas como na frequência.

Em uma mesma separação e sobre um mesmo corpo, em geral a maior amplitude é devida ao manto M_2 . Um aumento na condutância tanto do corpo quanto na do manto, desloca os picos máximos das anomalias para baixas frequências.

A resposta EM do corpo condutor se encontra o mínimo afetada pela presença do manto até próximo ao pico máximo da componente em-fase. Assim, dos três sistemas de bobinas, o que apresenta uma maior faixa de frequências onde o manto tem pouca influência na resposta do corpo é o vertical coaxial, cujos picos máximos ocorrem numa faixa de 600 Hz a 3 kHz para as componentes em-fase e 2,2 kHz a 9 kHz para a quadratura. No sistema vertical coplanar esta faixa é de 400 Hz a 2 kHz para a componente em-fase e 1,6 kHz a 6,5 kHz para a quadratura e no horizontal coplanar a

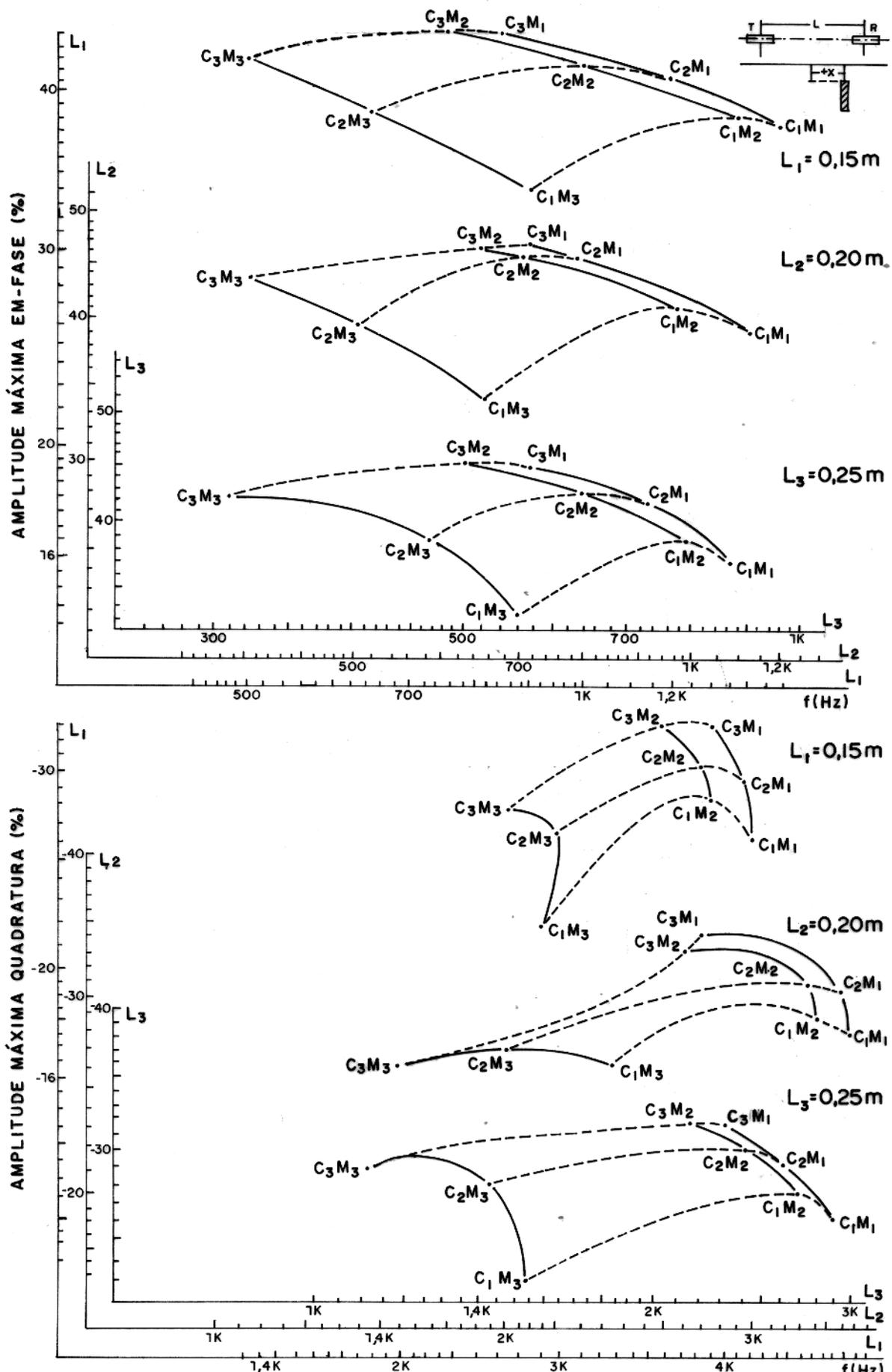


Fig.40- Variação da amplitude das anomalias com a frequência nas várias separações de bobinas; Sistema Horizontal coplanar.

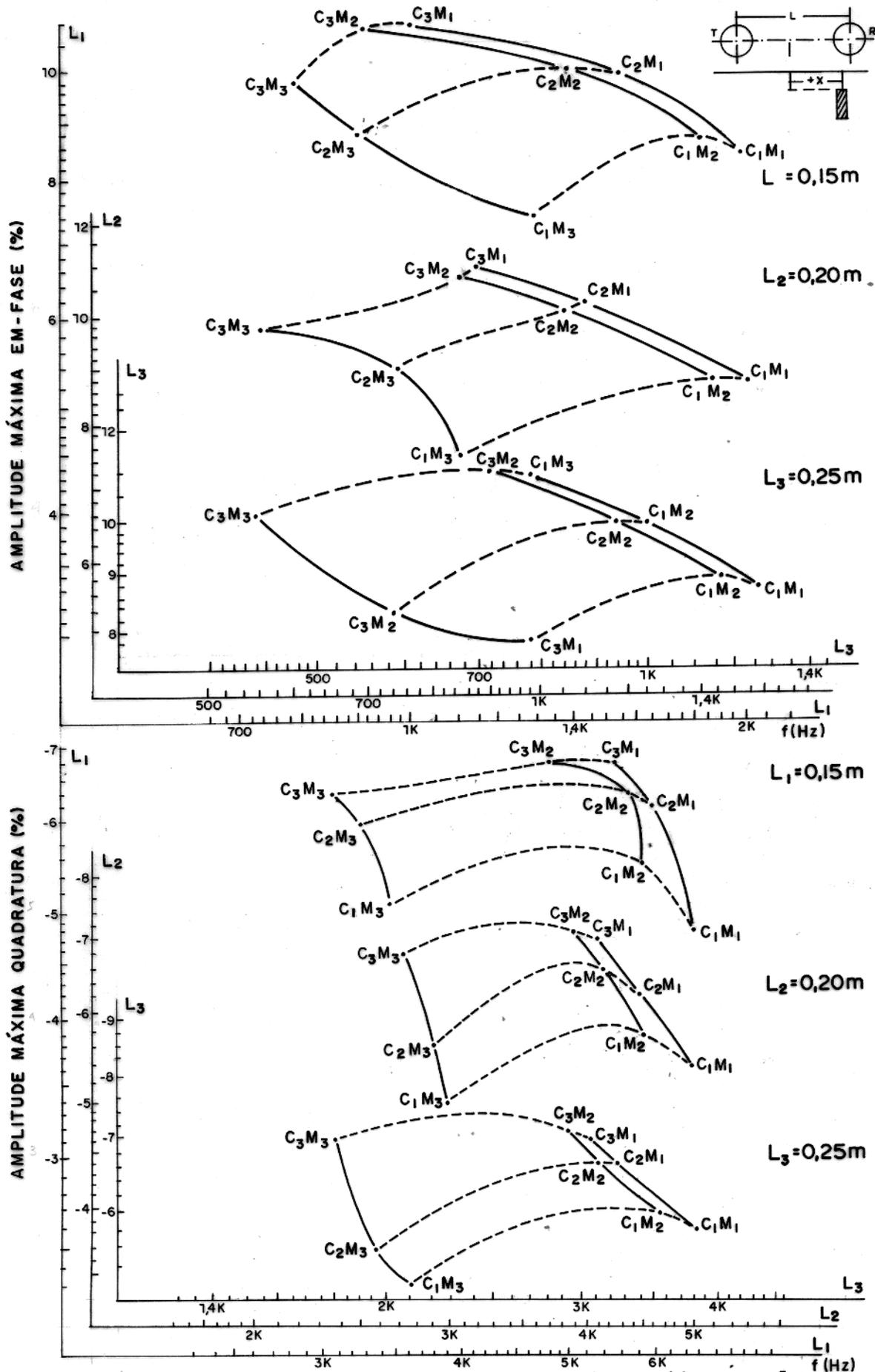


Fig.41-Variação das amplitude das anomalias com a frequência nas várias separações de bobinas; Sistema vertical coplanar.

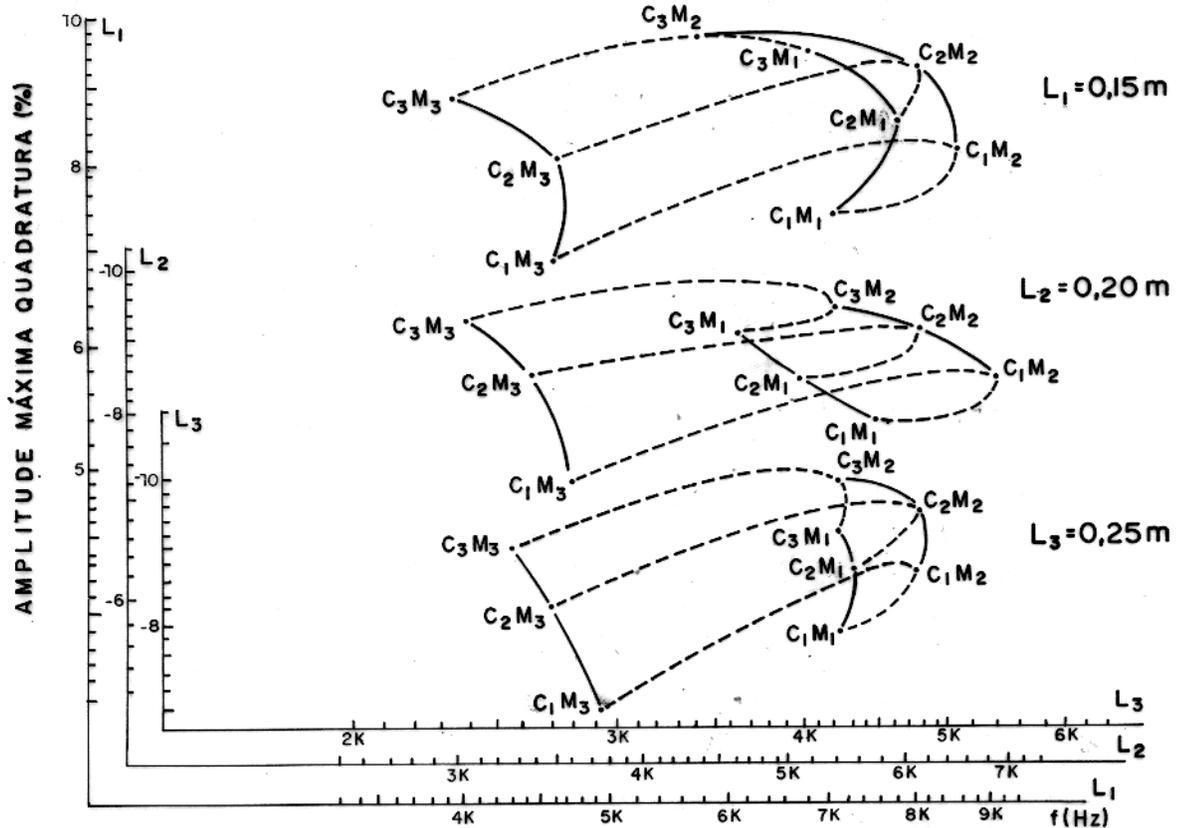
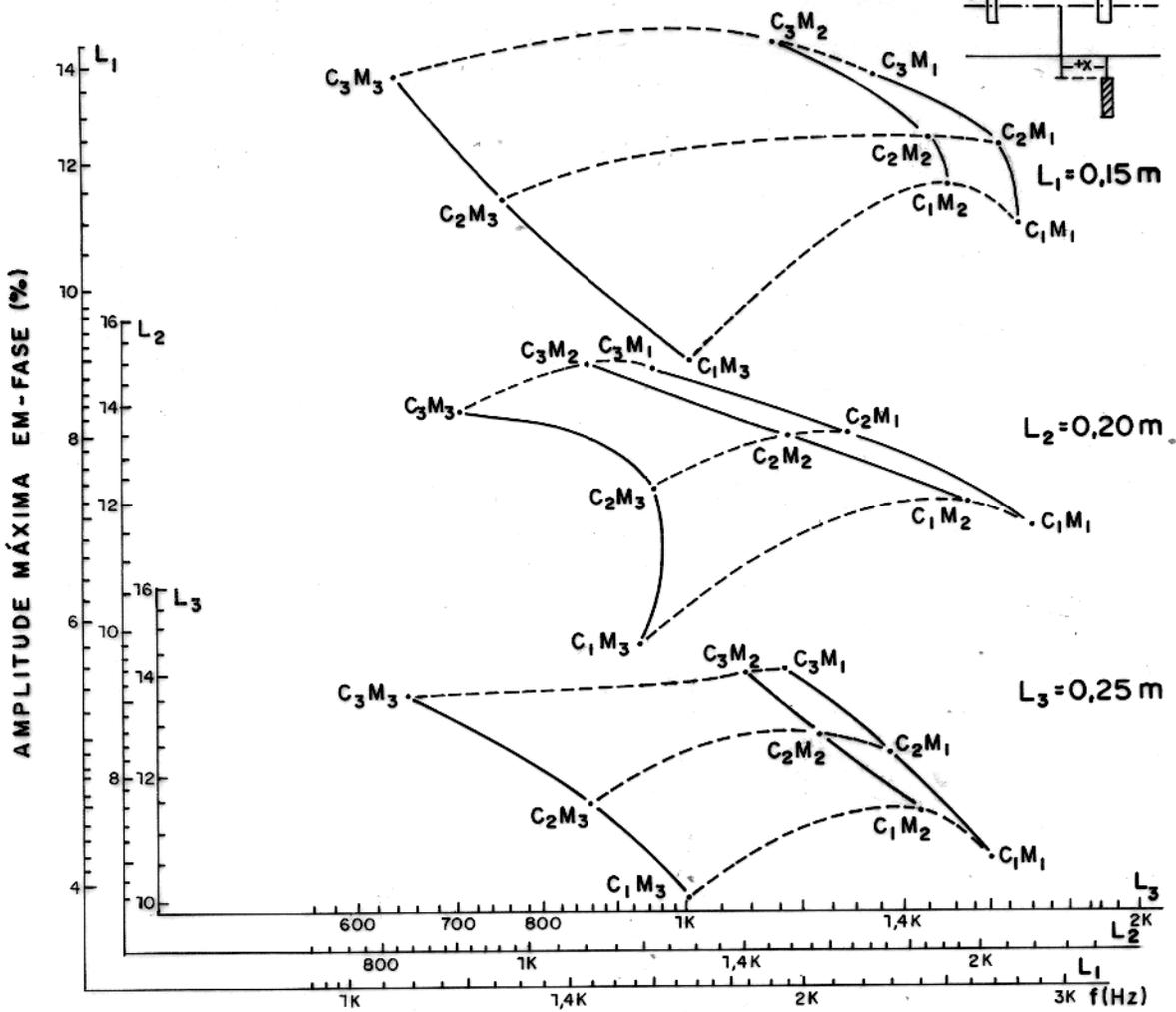
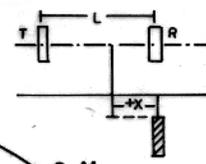


Fig.42- Variação da amplitude das anomalias com a frequência nas várias separações de bobinas; Sistema vertical coaxial.

faixa é de 300 Hz a 1,6 kHz para a componente em-fase e 1 kHz a 4 kHz para a quadratura.

O campo magnético quando atravessa um condutor, a uma profundidade de $503,3(1/f)^{1/2}$ m, chamada de "skin-depth", δ , sofre uma rotação de 180° e sua amplitude é atenuada de $1/e$ de seu valor original. Deste modo, tanto o campo primário quanto o campo secundário, ao atravessarem o manto antes de chegarem ao receptor, sofrem uma rotação de $180^\circ\delta$ e uma atenuação de $1/e^\delta$ de seu valor original para cada metro de espessura do manto. Comparando-se as Fig. 16 a 21 e de acordo com a Tabela 4, verifica-se que, para frequências constantes, a maior atenuação está associada ao manto de maior condutância, M_3 .

As Fig. 43, 44 e 45 são as respostas obtidas nos três sistemas quando somente o manto está presente. As rotações e atenuações sofridas pelo campo primário ao atravessar o manto, são responsáveis pelos deslocamentos dos perfis em relação à base de referência. Esses deslocamentos correspondem à resposta do manto. Pode-se verificar nas figuras acima mencionadas, que o sistema horizontal coplanar é o mais afetado pelo manto. Observa-se neste sistema, que para altos valores do parâmetro de resposta do manto em frequências > 5 kHz, a rotação na fase é grande e os deslocamentos das bases dos perfis em-fase e quadratura são negativos, isto é, abaixo da base de referência. Além disso, devido a grande interação entre o corpo e o manto nesta situação, ambas as componentes em-fase e quadratura tornam-se reversas.

$$(\sigma t)_{M_3} = 0,1134 \times 10^4 S$$

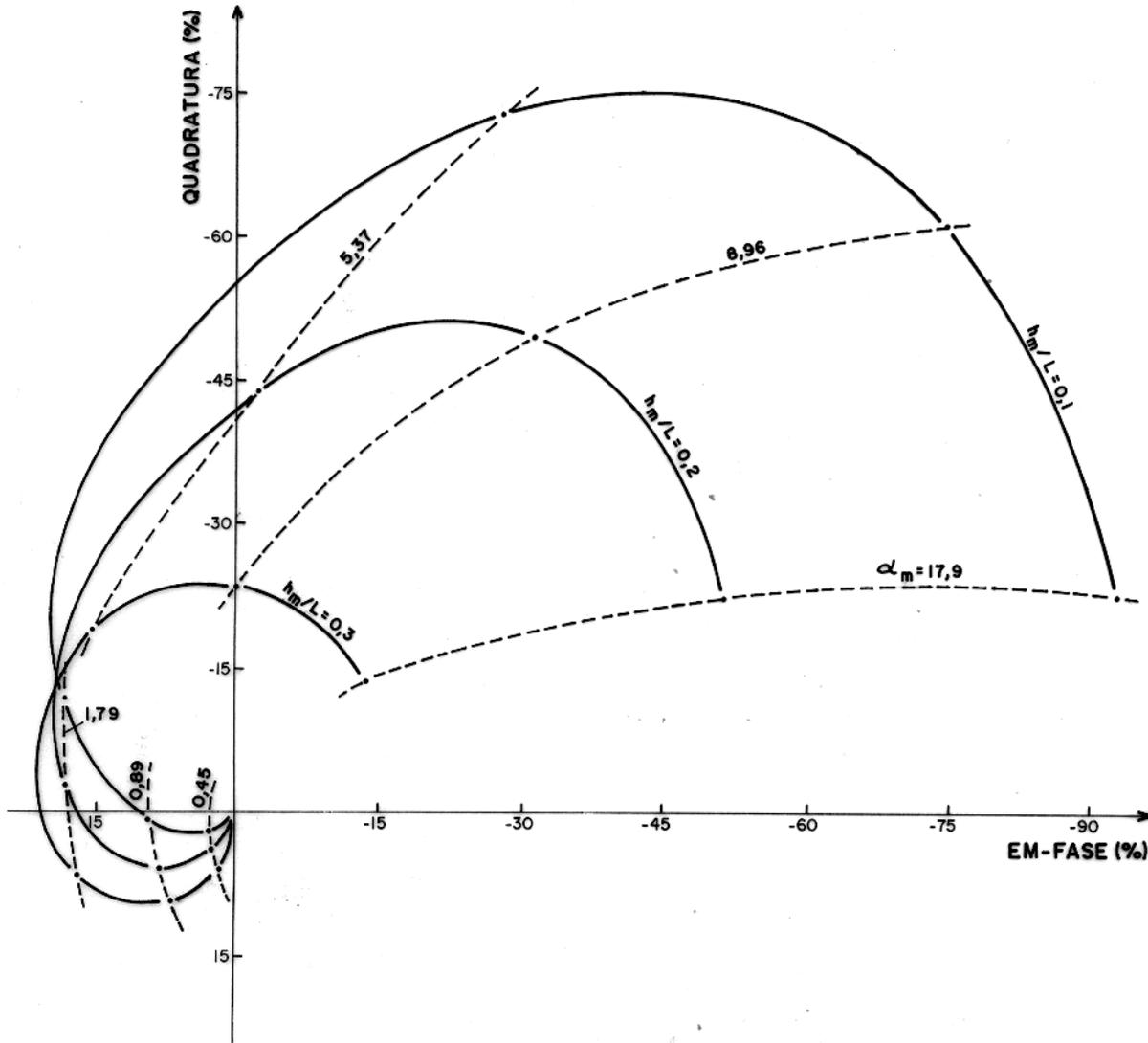
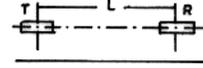


Fig.43- Respostas obtidas para o manto M_3 variando a frequência. Sistema horizontal Coplanar; $L = 0,20m$.

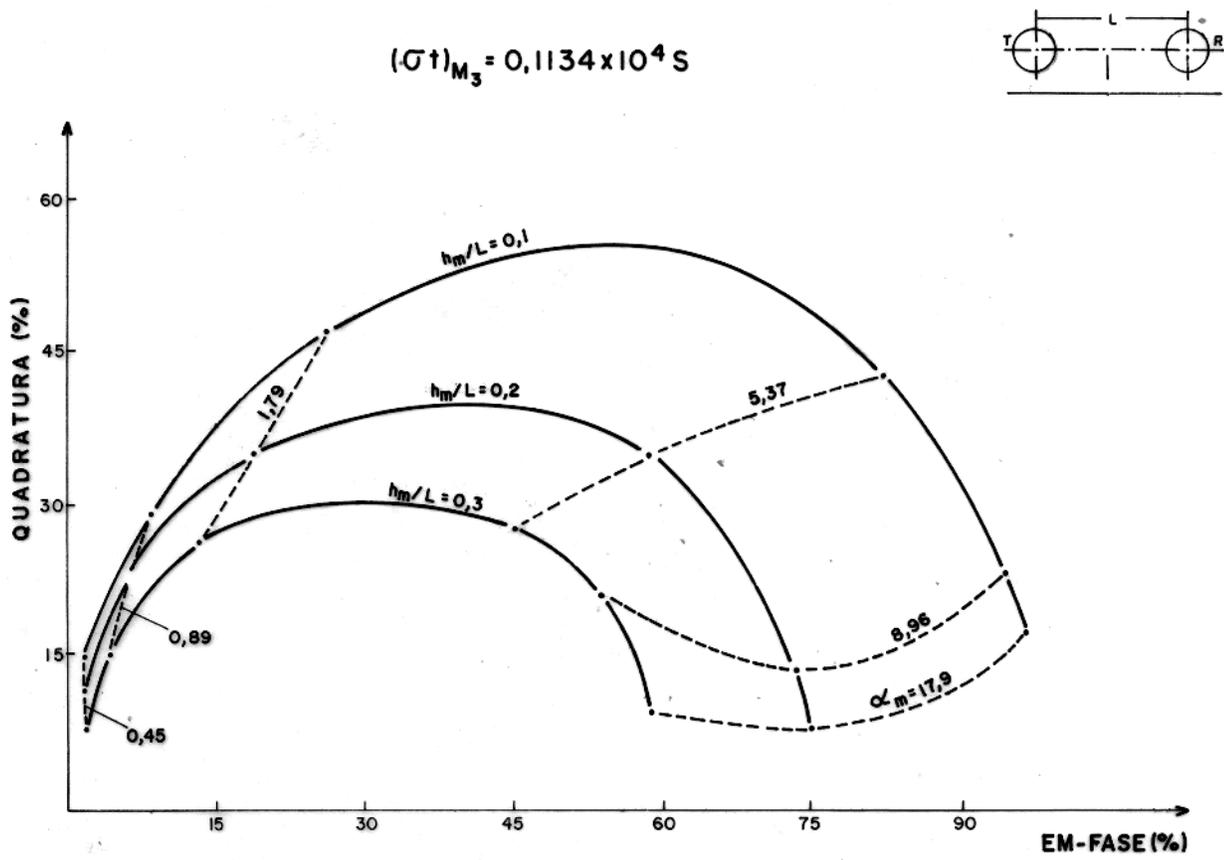
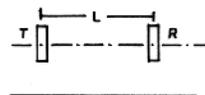


Fig.44- Respostas obtidas para o manto M variando a frequência. Sistema vertical coplanar; $L = 0,20m$.



$$(\sigma f)_{M_3} = 0,1134 \times 10^4 S$$

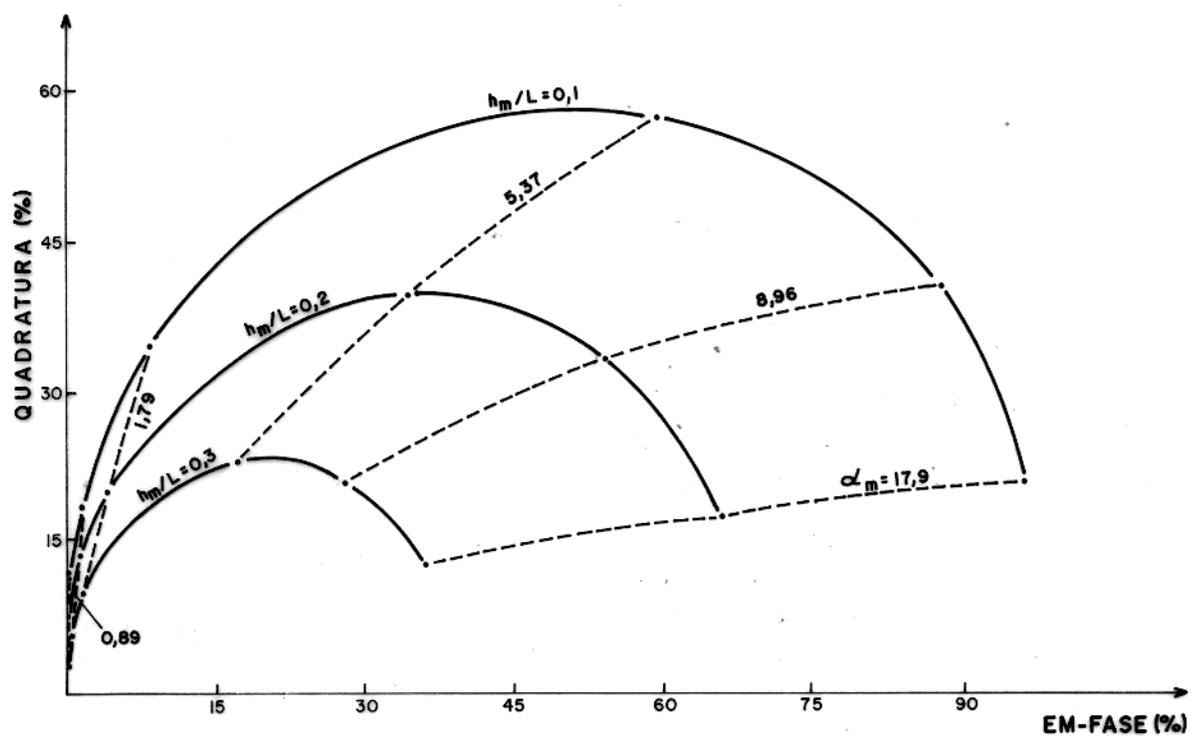


Fig. 45 - Respostas obtidas para o manto M_3 variando a frequência. Sistema vertical Coaxial; $L = 0,20$ m.

7. CONCLUSÕES

A partir dos resultados conhecidos pode-se verificar que a resposta EM de corpos condutores em regiões com manto de intemperismo, são afetadas em maior ou menor intensidade dependendo do sistema de prospecção e das frequências e/ou separações de bobinas utilizados. Deste modo, a escolha do sistema com as frequências e separações deve ser feita com critério, pois isto pode fazer diferença entre uma anomalia reconhecível e não-reconhecível.

Entre os três sistemas de bobinas estudados o que apresenta a menor faixa de frequências onde a resposta do corpo é pouco influenciada pela presença do manto é o horizontal coplanar e a faixa mais larga pertence ao vertical coaxial. Para os corpos de condutância no intervalo de 30 S a 150 S e os mantos entre 1,3 S a 2,3 S simulados neste trabalho, a influência do manto será fortemente sentida no sistema horizontal coplanar para frequências maiores de 900 Hz na maior separação T-R utilizada de 125m aproximadamente (para um fator de escala em torno de 500). Enquanto que esta influência no sistema vertical coplanar será verificada em depois de aproximadamente 1,3 kHz e no vertical coaxial depois de 1,7 kHz.

Assim em trabalhos de campo, a partir do conhecimento da condutância do manto por meio de um outro método, por exemplo, eletrorresistividade, para o uso de sistemas de bobinas horizontais coplanares, recomenda-se que sejam utilizadas frequências abaixo de 1 kHz em caso de manto com condutância correspondente a M_3 , ou seja, $\sigma t \approx 2,27 S$, para uma separação T-R em torno de 75m (neste caso, $L_1 \approx 0,15 m$). Até esta frequência obtém-se uma melhor razão em-fase/quadratura com pouca influência do manto. Se for necessário aumentar (ou diminuir) a separação T-R para um valor L_2 qualquer, basta diminuir (ou aumentar) a frequência pela razão L_2/L_1 que a amplitude máxima sofrerá pouca alteração. No caso de mantos com condutância em torno de M_1 ($\sigma t \approx 1,4 S$), frequências abaixo 1,6 kHz são aconselháveis para a mesma separação T-R acima.

No sistema vertical coplanar, a melhor resposta EM, na presença de mantos com condutância M_3 ($\sigma t \approx 2,27 S$), se obtém em frequências abaixo de 1,4 kHz para separações em torno de 75m. Uma diminuição na condutância do manto para M_1 ($\sigma t \approx 1,4 S$), au-

menta esta faixa de frequências para abaixo de 2 kHz , na mesma separação acima.

Em sistemas verticais coaxiais, nas mesmas situações acima, isto é, sobre mantos com condutância M_3 , a melhor resposta se obtém para frequências abaixo de 1,3 kHz e sobre mantos com condutância M_1 , a melhor resposta foi conseguida para frequências abaixo de 3 kHz, para separações em torno de 75 m. No caso de aumento (ou diminuição) na separação, o mesmo critério utilizado para o sistema horizontal coplanar poderá ser usado nos sistemas verticais.

As respostas obtidas no sistema horizontal coplanar podem ser qualitativamente confrontadas com o trabalho apresentado por Lajoie e West, 1977 (Fig. 46), onde foram realizados perfis em quatro diferentes frequências e separação T-R de 150m sobre um corpo condutivo vertical sob manto de intemperismo com condutância de 0,7 S, localizado em Abitibi Clay Belt, Canadá. Pode-se verificar em relação a este trabalho que o aumento na separação T-R (150m) é compensado pela diminuição na condutância do manto ($\sigma t \approx 0,7 S$) e a amplitude máxima conseguida pela componente em-fase, onde a quadratura tem amplitude próxima de zero, é para frequências em torno de 1777 Hz.

Como os sistemas de bobinas verticais apresentam um difícil problema de alinhamento dos eixos T-R no campo, são raros os trabalhos apresentados em levantamentos EM terrestres nestes tipos de sistemas. A maioria dos trabalhos publicados são direcionados a levantamentos EM aéreos, onde o problema do alinhamento entre as bobinas é contornado. Devido a este fato, não foi possível comparar os resultados de laboratório com os resultados de campo nestes sistemas. Espera-se que, com o desenvolvimento de técnicas de campo, este problema seja resolvido e os resultados deste trabalho possam ser úteis para o planejamento de tais sistemas.

É aconselhável ainda que este trabalho seja ampliado considerando-se o corpo e o manto em contato elétrico e, para maior conhecimento de resposta EM nos vários sistemas de bobinas é necessário considerar o corpo em várias inclinações. Corpos de outras formas geométricas, como por exemplo, esferas ou cilindros, também deveriam ser utilizados em trabalhos tanto no domínio da frequência como no domínio do tempo.

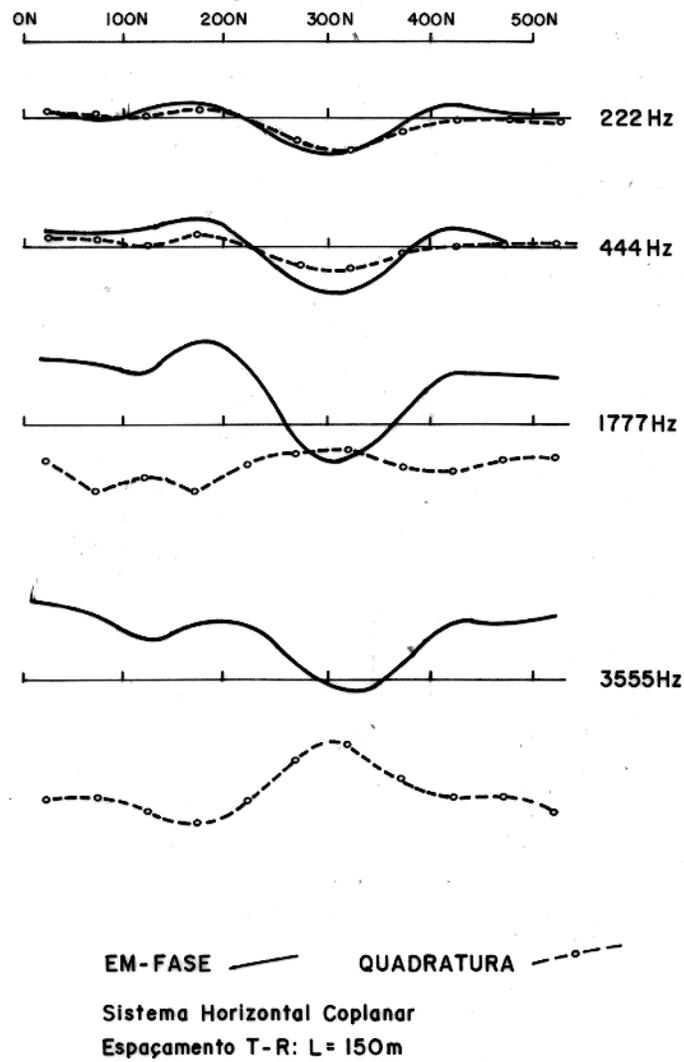


Fig.46- Perfis de campo obtidos sobre um corpo vertical de sulfetos sob manto de intemperismo (Abitibi Clay Belt, Canadá).
(Segundo Lajoie e West, 1977)

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEST, M.E.; DUNCAN, P.; JACOBS, F.J.; SCHEEN, W.L. - 1985 - Numerical modeling of response three-dimensional conductors in a layered earth. *Geophysics*, 50: 665-676.
- CABALLERO, A. - 1983 - Resposta HLEM de um cilindro horizontal em volta por um halo condutor obtido por modelamento analógico. Belém - UFPA/NCGG, 1983. 77 p.
- COGGON, J.H. - 1971 - Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. *Geophysics*, 36: 132-155.
- CONEY, D.P. - 1977 - Model studies of the VLF-EM method of geophysical prospecting. *Geoexploration*, 15: 19-35.
- FRISCHKNECHT, F.C. - 1971 - Electromagnetic scale modeling. In: *Electromagnetic 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. Ph.D. Thesis - University of London. 189 p.
- GRANT, F.S.; WEST, G.F. - 1965 - Interpretation Theory in Applied Geophysics. New York, Mc Graw-Hill Book. 584 p.
- 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. Ph.D. Thesis - University of Toronto. 180 p.
- HOHMANN, G.W. - 1971 - Electromagnetic scattering by conductors in the earth near a line source of current. *Geophysics*, 36: 101-131.
- HOHMANN, G.W. - 1975 - Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling. *Geophysics*, 40: 309-324.
- HOHMANN, G.W. - 1982 - Numerical modeling for electrical Geophy-

- sics methods: Presented in the International Symposium on Applied Geophysics in Tropical Regions - Belém - Brazil, sept. 1-8.
- HOOD, Peter; WARD, S. H. - 1969 - Airborne geophysical methods. In: Advances in Geophysics, New York, Academic Press. p. 2-111.
- HURLEY, D. G. - 1977 - The effect of a conductive overburden on the transient electromagnetic response of a sphere. Geoexploration, 15: 77-85.
- JEPSEN, A. F. - 1969 - Numerical modeling in a resistivity prospecting. Ph. D. Thesis - University of California, Berkeley, 98p.
- JONES, F. W.; PRICE, A. T. - 1971 - Geomagnetic effects of sloping and shelving discontinuities of earth conductivity. Geophysics, 36: 58-66.
- 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. - 1973 - The Electromagnetic response of a conductive inhomogeneity in a layered earth. Ph. D. Thesis - University of Toronto. 170 p.
- LAJOIE, J. J.; WEST, G. F. - 1977 - Short note: Two selected field examples of EM anomalies in a conductive environment. Geophysics, 42(3): 655-660.
- LAMONTAGNE, Y. - 1975 - Applications of wideband, time-domain EM measurements in mineral exploration. Ph. D. Thesis - University of Toronto. 182 p.
- LEE, K. H.; PRIDMORE, D. F.; MORRISON, H. F. - 1981 - A hybrid three-dimensional electromagnetic scheme. Geophysics, 46: 796-805.
- LOWRIE, W.; WEST, G. F. - 1965 - The effect of a conducting overburden on electromagnetic prospecting measurements. Geophysics, 30(4): 624-632.
- 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*, 23: 269-282.
- NEGI, J.G. - 1967 - Electromagnetic screening due to a disseminated spherical zone over a conducting sphere. *Geophysics*, 32 (1): 69-87.
- NEGI, J.G.; GUPTA, C.P. - 1963 - Models in applied electromagnetics. *Earth Science Review*, 4(3): 219-241.
- NEGI, J.G.; RAVAL, U. - 1969 - Negative electromagnetic screening by a cylindrical 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.
- PALACKY, G.J. - 1975 - Interpretation of INPUT AEM measurements in areas of conductive overburden. *Geophysics*, 40(3): 490-502.
- PALACKY, G.J.; KADEKARU, K. - 1978 - Efeito do intemperismo tropical nos levantamentos eletromagnéticos. In: *Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia*. Recife, Sociedade Brasileira de Geologia. V. 5, p. 2323-2330.
- PALACKY, G.J.; SENA, F.O. - 1979 - Conductor identification in tropical terrains - Case histories from the Itapecuru greenstone belt, Bahia, Brazil. *Geophysics*, 44(12): 1941-1962.
- PARASNIS, D.S. - 1966 - *Mining Geophysics*. Amsterdam, Elsevier Publishing, 373 p.
- PARASNIS, D.S. - 1971 - Analysis of some multi-frequency, multi-separation electromagnetic surveys. *Geophysical Prospecting*, 19(2): 163-179.
- PARRY, J.R.; WARD, S.H. - 1971 - Electromagnetic scattering from cylinders arbitrary cross-section in a conductive half-space. *Geophysics*, 36: 67-100.
- PATRICK, F.W.; BOSTICK, F.X. - 1969 - Magnetotelluric modeling techniques. *Electrical geophysics Research Laboratory Technical, Department of Physics, University of Toronto*. 52 p.
- PEMBERTON, R.H. - 1962 - Airborne EM in Review. *Geophysics*, 27: 695-713.

- PODDAR, M. - 1975 - Some experimental studies on the effect of a screen on the EM response of a cylinder. *Geoexploration*, 13: 57-68.
- PODDAR, M; BHATTACHARYA, P.K. - 1966 - On the response of conductors in the inductive method of prospecting. *Geophysical Prospecting*, 14: 470-486.
- PRESTON, B. - 1975 - Review - Difficulties for the electromagnetic method in Australia, *Geoexploration*, 13: 29-43.
- RIJO, L. - 1977 - Modeling of electric and electromagnetic data. Ph.D. Dissertation - University of Utah. 242 p.
- SILVA, L.M. - 1981 - Efeitos do manto de intemperismo sobre anomalias EM provocadas por corpos tabulares inclinados - um estudo através de modelamento reduzido. Tese de Mestrado - Belém, Universidade Federal do Pará/Centro de Geociências. 115 p.
- SINCLAIR, G. - 1948 - Theory of Electromagnetic System. *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.
- SWIFT, C.M.Jr. - 1971 - Theoretical magnetotelluric and Turam responses from two-dimensional inhomogeneities. *Geophysics*, 36(1): 38-52.
- TELFORD, W.M. - 1976 - *Applied Geophysics*. London, 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. - 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-Pará-Brazil*, p. 208-234.
- VILLEGAS-GARCIA, C.J. - 1979 - On the electromagnetic response of non-uniform overburden layers: Scale model Experiment. *Research in Applied Geophysics, Department of Physics, University of Toronto*, 44 p.
- WAIT, J.R. - 1955 - Mutual EM coupling of loops over a homogeneous ground, *Geophysics*, 20: 630-637.

- WAIT, J.R. - 1969 - EM induction in a solid conducting sphere enclosed by a thin conducting spherical shell. *Geophysics*, 34 (5): 753-759.
- WARD, S.H. - 1967 - The electromagnetic method. In: *Mining Geophysics*. Tulsa, S.E.G. v.II (C), p. 224-372.
- WARD, S.H.; RYU, J.; GLENN, W.E.; HOHMANN, G.W.; DEY, A.; SMITH, B.D. - 1974 - Electromagnetic methods in conductive terrains. *Geoexploration*, 12: 121-183.
- WON, J. - 1980 - A wide-band electromagnetic exploration method - some theoretical and experimental results: *Geophysics*, 45 : 928-940.