

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

RESPOSTA HLEM DE UM CILINDRO HORIZONTAL ENVOLTO POR UM HALO
CONDUTOR OBTIDO POR MODELAMENTO ANALÓGICO

Tese Apresentada por

ALBERTO CABALLERO

como requisito parcial à obtenção do grau em

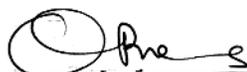
MESTRE EM CIÊNCIAS

Na área de

GEOFÍSICA

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

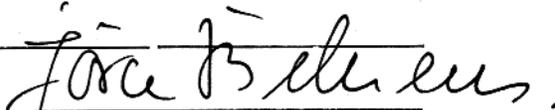
Aprovado: 22.12.83



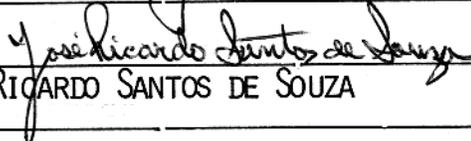
OM PRAKASH VERMA

(ORIENTADOR)

JÖRN BEHRENS



JOSÉ RICARDO SANTOS DE SOUZA



Comitê de Tese

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO E CULTURA DO ESTADO DO PARÁ

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO E CULTURA DO ESTADO DO PARÁ

T.217 CABALLERO, Alberto

Resposta hlem de um cilindro ho
rizontal envolto por um halo condu
tor obtido por modelamento analôgi
co. Belém, UFPa/NCGG, 1983.

77 p.

Tese apresentada ao Núcleo de
Ciências Geofísicas e Geológicas da
Universidade Federal do Pará, para
obter o grau de Mestre em ciências
na área de Geofísica.

1. Geofísica - 2. Prospecção Ele
tromagnética - 3. Modelamento Ele
tromagnético.

I. Universidade Federal do Pará/
Núcleo de Ciências Geofísicas e
Geológicas. II. Título.

A memória de Enrique Campbell

A Nancy, Arlene e a minha Mãe

AGRADECIMENTO

Ao Dr. Om Prakash Verma (NCCGG/UFPa) pela orientação dada durante o desenvolvimento desta Tese.

Ao Dr. José Ricardo S. de Souza, Co-Orientador deste trabalho, pelas sugestões oferecidas.

Ao Dr. Jörn Bherens (Convênio GTZ/UFPa) pelas valiosas recomendações feitas.

Ao Dr. Luiz Rijo pelas valiosas recomendações feitas no capítulo 5.

Ao programa Unipan-BID da Universidade de Panamá, pelas bolsas de estudos concedidas no período de 01.81 a 12.82.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelas bolsas de estudo concedidas no período de 03.81 a 12.83.

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

Ao Senhor Antonio Candido pela colaboração na montagem dos modelos.

As bibliotecárias Srta. Leila Maria, Sra. Judite Macambira, Sra. Lourdes Marcia, Sra. Eletice Couto e Sra. Maria Helena.

Sra. Aracilda da Costa Santos e Sra. Bernadete de Lourdes Bessa da Cunha Gonçalves pela datilografia da versão final.

E a todos os que colaboram direta e indiretamente na conclusão deste trabalho.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<u>FIGURAS</u>	Pag.
1	Modelo Geológico generalizado de ocorrência de sulfetos maciços 7
2	Diagrama de bloco do sistema de modelamento, energização, recepção e registro gráfico 24
3	Seção vertical do cilindro e halo horizontais num campo de dipolo, representando a situação modelada 28
4	Resposta do halo a variação da distância (L') entre as bobinas 34
5	Efeito da variação da espessura do halo na resposta do mesmo 35
6	Efeito do raio do halo na resposta do mesmo .. 36
7	Efeito da separação entre bobinas na resposta do corpo cilíndrico 38
8	Resposta de corpos cilíndricos de diferentes raios 39
9	Forma do sinal de entrada que origina o transiente 42
10	Perfis e.m. do corpo cilíndrico 6 e da combinação A6. 46
11	Efeito de mudança da condutância do halo, para $R_H/R_C = 1,3$ 47
12	Efeito da condutância do halo para $\alpha_c = 2,0 \times 10^6$ S/m e $R_H/R_C = 1,5$ 50
13	Efeito da condutância do halo para $R_H/R_C = 1,5$ e $\alpha_c = 0,06 \times 10^6$ S/m 51

14	Efeito da variação do raio do halo (R_H). Para $\sigma_T = 520$ siemens, $\sigma_c = 20 \times 10^6$ S/m e $H'/L' = 0,3$...	52
15	Efeito do halo com a variação do raio do corpo para $R_H = 0,05m$, $\sigma_T = 520$ siemens e $H'/L' = 0,3$.	54
16	Efeito da condutividade do corpo com $R_H/R_C = 1,5$	56
17	Efeito da profundidade do corpo	57
18	Efeito da magnitude do raio do corpo no decaimento do campo secundário, em ausencia do halo	58
19	Efeito da condutividade do corpo no decaimento do campo secundário em ausencia do halo ...	59
20	Efeito da condutância do halo para o corpo 6 e $R_H/R_C = 1,3$	61
21	Efeito da condutância do halo para o corpo 1 e $R_H/R_C = 2$	62
22	Efeito da variação do raio do halo para uma condutância = 520 siemens e $R_C = 0,025m$	64
23	Efeito da mudança do raio do halo sobre um corpo de condutividade média no domínio do tempo.	65

TABELAS

1	Raios e condutividades dos cilindros metálicos utilizados nos experimentais	21
2	Raios e Espessuras dos halos de alumínio utilizados nos Experimentais ($\sigma^* = 20 \times 10^6$ S/m).....	23
3	Freqüências e seus correspondentes "Skin Depth" para o alumínio ($\sigma_H = 20 \times 10^6$ S/m e $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)	29

SUMÁRIO

	Pag.
DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	iii
RESUMO	1
ABSTRACT	3
1 INTRODUÇÃO	5
2 A SIMILITUDE ELETRODINÂMICA	12
2.1 Equações de Maxwell	12
2.2 Princípio de Similitude Eletrodinâmica	13
3 CONJUNTO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA	20
3.1 Aproximação Física	20
3.2 Materiais Utilizados	20
3.3 Conjunto Experimental	22
3.3.1 Unidade Fonte	22
3.3.2 Unidade Receptora	25
3.3.3 Unidade de Posicionamento do Modelo	26
3.4 Medições	26
3.4.1 Calibração do Conjunto	26
3.4.2 Metodologia das Medidas	27
3.5 Fontes de Erros	30
3.5.1 Erros Sistemáticos	30
3.5.2 Erros Aleatórios	31
4 PARÂMETROS DE RESPOSTA DE HALO E CORPO	33
5 TRANSFORMAÇÃO AO DOMÍNIO DO TEMPO	40
5.1 Introdução	40
5.2 Pulso Primário	41
5.3 Cálculo da Função no Domínio do Tempo	41
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	45
6.1 Introdução	45

	Pag.
6.2 Perfil Eletromagnético	45
6.3 Efeitos da Condutância (σ_T)	45
6.4 Efeitos da Mudança na Relação R_H/R_C	49
6.5 Efeitos do Halo com a Mudança do Raio do tor po	53
6.6 Efeito do Halo, com a Mudança da Condu ^t i dade do Corpo	55
6.7 Efeito da Profundidade	55
6.8 Efeitos no Dominio do Tempo	55
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	66
8 BIBLIOGRAFIA	68
APÊNDICE 1	76

RESUMO

A resposta eletromagnética de indução de um corpo condutor, imerso num meio altamente resistivo, pode diferir da obtida pelo mesmo, quando rodeado por um meio de condutividade finita.

Com o objetivo de pesquisar os efeitos do halo condutor, na resposta e.m. de indução produzida por um corpo cilíndrico condutor, foi realizado um estudo numa banda de frequência entre 100 Hz e 55 KHz utilizando modelamento analógico e.m.. O campo energizador foi constituído por uma fonte de dipolo vertical ou HLEM.

Foram utilizados corpos cilíndricos de aço-inoxidável, grafite e de alumínio, representando o corpo condutor. E, para o halo, foi usado um tubo de PVC envolvido por folhas de papel de alumínio.

Analisou-se os parâmetros que influenciam as respostas do halo e do corpo cilíndrico, num campo de dipolo. Os resultados obtidos sugerem: a). Duas equações paramétricas diferentes, uma para o halo e outra para o corpo, e b). Que as respostas e.m. do corpo e halo cilíndrico não dependem da separação entre bobinas.

Os resultados deste trabalho mostram que quando um corpo condutor está envolto por um halo de condutividade finita, a resposta do corpo pode ser afetada a tal ponto, que a interpretação das medidas pode tornar-se dificultada.

A combinação de um corpo de baixo número de indução, com um halo de alto número de indução produz uma resposta e.m. que faz o corpo envolvido parecer mais condutor.

Devido a presença de dois picos de saturação nas respostas de combinação halo-corpo, a componente em quadratura demonstrou ser mais sensível ao efeito do halo que a componente em fase. Estes picos se apresentam um em baixa frequência, devido a influência do corpo e outro em alta, devido a influência do halo.

Quando a razão entre o raio do halo e o raio

do corpo se aproxima da unidade, a resposta de um corpo bom condutor, na presença do halo, apresenta uma ótima resolução.

Com o objetivo de analisar os efeitos do halo no domínio do tempo, os valores das medições realizadas no domínio da frequência, foram transformados para o domínio do tempo, utilizando o método das séries de Fourier.

As curvas no domínio do tempo, são caracterizadas pela presença de dois estágios no decaimento. O primeiro devido a influência do halo na resposta e, o último devido a do corpo. Em alguns casos houve a presença de um terceiro estágio intermediário devido as influências conjuntas do corpo e halo. Os resultados no domínio do tempo mostram que a combinação de um corpo bom condutor envolto por um halo de baixa condutância, pode-se comportar como um corpo só e, a resposta do sistema corpo-halo aumenta nos instantes finais do decaimento.

A presença do halo produz um aumento na superfície de condução. Consequentemente, há um aumento na magnitude das correntes induzidas.

Também, o halo introduz mudanças na fase do campo e, a maior interação indutiva se produz quando a razão entre os raios do halo e o corpo é próxima de um.

Espera-se que os resultados obtidos neste trabalho, ofereçam critérios para distinguir a presença de zonas de halo e corpo.

ABSTRACT

Inductive Electromagnetic response of a conductor in a resistive medium may be much different from that when surrounded by a partially conductive ambiente.

Electromagnetic analog model experiments have been carried out in the frequency range of 100 Hz to 55 KHz with the objective to study the halo effects of a horizontal cylindrical system.

The central massive body was represented in the model by aluminium, non-magnetic stainless steel and graphite cylinders whilst the halo by thin aluminium foils wrapped on PVC tubes.

Response parameters of a halo and of a cylinder in a dipolar field were analysed and found that a). their response is independent of the separation between transmitting and receiving coils; and b). two different response functions are found, one for a halo and the other for a cylinder.

This study demonstrate that presence of a conductive halo adversely effect the response of the main body therefore may complicate the interpretation of the e.m. data.

The combination of a central body of low induction number with a halo of high induction number produce the total e.m. response such that the main body looks more conducting than in the absence of the halo.

Because of the presence of two peaks of saturation in case of the combination of halo and body, quadrature component is found to be more sensitive to halo effects than the inphase component. The peak in the low frequency region correspond to the body whilst at high frequency to the halo.

Optimum resolution in the response of a good main conductor is obtained when the ratio of the radius of halo to that of the body approaches unity.

In order to study the halo effects in time domain, the data measured in the frequency domain were transformed into the former using Fourier series method.

Normally, the time domain curves are characterised by two stages of decay. The first or initial stage response is influenced by the halo and the second or later stage by the main body. However, in some cases a third intermediate stage, due to the combined effect of halo-body, is also observed. The results of time domain demonstrate that combination of a good main conductor with a halo of low conductance behave as a single body. Consequently, an enhancement takes place in final stages of their response.

The response of a combination is found to be higher than that of the main body, It is due to the introduction of the halo which effectively increases the total area for the currents to be induced. Also, the e.m. field suffer phase lags due to the presence of the halo.

It is expected that this study would offer the criteria to distinguish the presence of halo from the ore-body in multifrequency e.m. prospecting for massive sulphide bodies.

1 INTRODUÇÃO

Os métodos de prospecção geoeétrica, podem ser classificados, segundo as fontes que produzem os campos. Estas fontes podem ser de origem natural ou artificial.

Os métodos geoeétricos que utilizam fontes controladas, de campos variáveis no tempo, são popularmente conhecidos como métodos eletromagnéticos. Os campos produzidos por estas fontes, são capazes de induzir correntes num corpo condutor, as quais circulam em direções normais a direção do campo magnético indutor. Estas correntes por sua vez, geram seu próprio campo magnético, de forma que, em qualquer ponto do espaço o campo magnético total consiste de duas porções: um campo magnético primário, devido a fonte e outro secundário, devido as correntes induzidas no condutor. Estes campos resultantes podem ser medidos, fornecendo informações sobre a distribuição de condutividade e inhomogeneidade em subsuperfície.

A prospecção geofísica pelo método eletromagnético, tem sido realizada com êxito, tanto no domínio de frequência como no de tempo, por mais de 50 anos, para delinear estruturas geológicas e localizar corpos de alta condutividade elétrica. Frequentemente a expectativa é de que os corpos condutores sejam representados por sulfetos maciços de cobre, chumbo ou níquel (Ward, 1971; Ward et al., 1974b; Spies, 1975), com significativo interesse econômico.

Na prospecção de minérios é muito comum encontrar corpos mineralizados em ambientes geológicos complexos. Estes corpos podem estar localizados sob um manto de intemperismo, numa rocha encaixante ou rodeados por um halo de disseminação, com um alto contraste de condutividade com o corpo considerado. A isto pode adicionar-se uma base de topografia irregular.

Um sulfeto maciço é uma ocorrência densa, tipicamente muito condutora e frequentemente magnética (Ward, 1966; Ward et al., 1974a). Um modelo geoeétrico comumente aceito para a configuração em subsuperfície, de um sulfeto maciço

ço, é apresentado na Fig. 1, onde σ é a condutividade, μ a permeabilidade magnética e ϵ a permissividade elétrica. Nele os índices 0, 1, 2, 3 e 4 indicam os meios: ar, manto de intemperismo, rocha encaixante, halo de disseminação e o corpo condutor, respectivamente.

A interpretação quantitativa de dados eletromagnéticos é feita através da comparação de valores medidos no campo, com valores obtidos de modelos físicos ou matemáticos, que representam a subsuperfície, (Luiz, 1980; Parasnis, 1971). Até o final da década de 50 a interpretação sempre foi baseada em modelos simplificados, que situam o corpo num meio altamente resistivo. Isto produziu bons resultados em alguns países do norte da Europa e América do Norte, onde estas condições são aproximadamente verdadeiras (Ward, 1971). A utilização destes modelos na interpretação de dados eletromagnéticos em regiões onde as condições geológicas não permitem esta simplificação, podem levar a graves erros de interpretação, (Parasnis, 1971; Preston, 1975; Palacky e Kadkaru, 1978).

O problema de exploração eletromagnética neste caso pode ser descrito como a busca de procedimentos para separar o sinal devido a depósitos de sulfeto maciço ou concentrado, do ruído do manto de intemperismo da rocha hospede, do halo e outros ruídos geológicos (Ward et. al., 1974a; Ward, 1982). Para isto são necessárias técnicas de levantamento e interpretação que levem em consideração os diferentes efeitos do ambiente geológico.

Até a metade da década dos 70, o desenvolvimento dos equipamentos de prospecção e.m. foi influenciado pelas necessidades dos geofísicos do Canadá e Escandinávia. Desta maneira a operação destes instrumentos em terrenos onde o ambiente físico é radicalmente diferente ao daqueles países, ficou muito limitada. Por este motivo, recentemente pesquisadores australianos desenvolveram equipamentos, capazes de trabalhar nas condições geológicas da Austrália (Palacky, 1982).

Efeitos do Meio Condutor

Nos últimos vinte e cinco anos, foram realiza

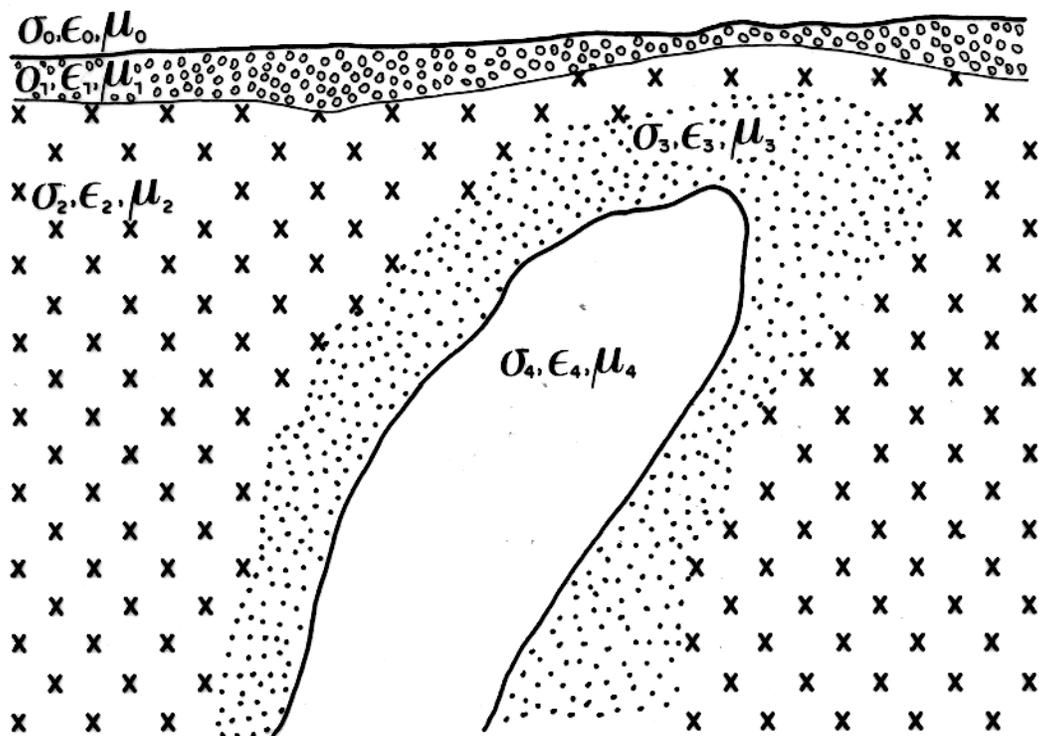


FIG. 1 - MODELO GEOLÓGICO GENERALIZADO DE OCORRÊNCIA DE SULFETOS MACIÇOS.

das pesquisas, com o objetivo de estabelecer os efeitos de um meio circundante na resposta de um corpo condutor. Tais pesquisas, têm dado uma contribuição valiosa na interpretação de problemas geológicos complexos.

Em regiões onde as condições climáticas são extremamente diferentes daquelas do Hemisferio Norte, por exemplo, no Brasil e em especial na Região Amazônica, se desenvolveu uma espessa camada condutora próxima à superfície (Palacky e Kadokaru, 1979). Na Austrália esta camada é frequentemente salina e inhomogênea (McCracken, 1982). Em ambos os casos a utilização dos métodos eletromagnéticos têm sido dificultada, (Palacky e Kadokaru, 1978; Preston, 1975).

Estudos dos efeitos produzidos pelo manto sobre anomalias eletromagnéticas foram realizados por Hedström e Parasnis (1958), Lowrie e West (1965), Lajoie e West (1976) e recentemente por Silva e Verma (1982), Villegas-Garcia e West (1983). Destes, apenas Lajoie e West (1976) utilizaram modelo digital no domínio da frequência; enquanto que os outros utilizaram modelamento analógico.

Os resultados de Lowrie e West (1965), Lajoie e West (1976) e Silva e Verma (1982), podem ser assim resumidos:

O manto de intemperismo produz;

- a) deslocamento da base da anomalia.
- b) diminui a amplitude da anomalia.
- c) rotação da fase do vetor das anomalias, no sentido anti-horário.
- d) reversão do sinal da quadratura; e
- e) aparecimento de um pico extra na quadratura para semiplano com mergulho pequenos.

Hedström e Parasnis (1958), simulando um manto de intemperismo em contato com o corpo, não detetaram efeitos do mesmo. Villegas-Garcia e West (1983) concluíram que, sob certas condições de frequência e separação de bobinas horizontais, as descontinuidades de um modelo de manto de intemperismo em forma de rampa ou de crista podem ser confundidas com um modelo de camada condutora inclinada. No caso de um manto com forma de vale, a anomalia pode ser confundida com a anomalia

eletromagnética de um semiplano vertical.

Os efeitos produzidos pela rocha encaixante moderadamente condutora, nas anomalias e.m. de corpos condutores, foram estudados por Gaur (1959), Gupta Sarma e Maru (1971), Verma (1972), Verma e Gaur (1975), Won e Kuo (1975a,b), Lajoie e West (1976), Won (1980) e outros.

Utilizando modelamento analógico, em campo de dipolo, Gupta Sarma e Maru (1971) observaram que o efeito da condutividade da rocha encaixante, nas anomalias e.m. devido a corpos condutores é substancialmente dependente da geometria do corpo. Quando um corpo condutor altera a geometria das correntes induzidas na rocha hospede, ocorre um aumento da magnitude da anomalia. Nestes casos as correntes resultantes no corpo podem ser maiores que as induzidas no mesmo na ausência da rocha encaixante.

Num estudo mais completo, em condições similares, Verma (1972), Verma e Gaur (1975) obtiveram resultados análogos a Gupta Sarma e Maru (1971). Nestes trabalhos evidenciou-se que, dependendo da condutividade da rocha hospedeira um corpo inclinado parece mais vertical. A baixos valores da referida condutividade a quadratura é mais sensível a variações na condutividade que a componente em-fase. No entanto para altos valores da condutividade a componente em-fase é mais sensível. As bobinas horizontais coplanares são mais sensíveis ao efeito da condutividade da rocha encaixante, que outros arranjos de bobinas.

Won e Kuo (1975a,b), Lajoie e West (1976) simularam numericamente os efeitos da rocha encaixante e do manto de intemperismo, obtendo resultados similares aqueles obtidos por modelamento analógico. A canalização das correntes do meio moderadamente condutor para o corpo condutor em contato com o mesmo, produz um aumento na densidade de corrente no corpo resultando num aumento da anomalia e.m. deste.

O efeito do halo condutor, objeto deste trabalho, tem motivado varios estudos; Negi (1967), Negi e Raval (1969), Wait, (1969), Fuller (1971), Hjelt (1971), Nabighian (1971), Negi et al., (1972b), Negi et al., (1973), Gupta et.

al., (1973), Poddar (1975), Guedes (1979) e outros.

Hjelt (1971) e Nabighian (1971), investigando um modelo de esfera condutora, rodeado por uma casca condutora, no domínio do tempo, concluíram que a medida que a condutividade da casca aumenta a resposta e.m. da esfera é mais afetada, tornando difícil a distinção entre esfera e casca. Resultados similares foram obtidos por Negi e Verma (1972) e Nagnendra et. al., (1980), os quais observaram, na curva de decaimento da anomalia, diferentes estágios onde se distinguem claramente a resposta da casca e da esfera condutora.

Estudando um modelo esférico com a casca no domínio da frequência, Fuller (1971), Negi et. al., (1973) e Guedes (1979), mostraram que se a razão entre as condutividades da casca e do corpo é baixa, as respostas da esfera e da casca, poderiam ser separadas a uma determinada frequência. Estes resultados são evidentes tanto na quadratura como na componente em-fase. Negi et. al., (1972a,b), Poddar (1975) e Preston (1977), analisando a resposta de um modelo cilíndrico chegaram aos mesmos resultados, concluindo-se que estes não dependem do modelo utilizado. Esses autores observaram que quando o parâmetro de resposta da casca é muito alto, as respostas do corpo e halo não podem ser analisadas separadamente. Em geral, é sugerido que o halo de um corpo condutor pode aumentar a circulação de correntes induzidas, elevar a resposta e.m. e girar a fase do campo induzido.

Negi (1967) e Negi et. al., (1972b), modelaram digitalmente as respostas e.m. de modelos esféricos e cilíndricos, envoltos por uma casca condutora e, determinaram que em algumas condições a resposta de indução de um corpo seria sensivelmente aumentada. Negi denominou este efeito de "blindagem eletromagnética negativa", concluindo que um corpo pouco condutor poderia em algumas circunstâncias parecer mais condutor. Como resultado disto as medidas de campo poderiam ser interpretadas de forma errada. Esta ideia foi compartilhada por Wait (1969), Poddar (1975), Preston (1977) e outros.

Roy (1970) e Nabighian (1971), sugeriram que a questão de blindagem negativa é simplesmente, um produto da

escolha de definição. Além disso Nabighian (1971) e Fuller (1971), opinaram que o efeito do aumento da resposta e.m. é simplesmente o efeito da existência de outro corpo condutor. Kamenetiskiy e Timofeev (1978), desenvolvendo elegante formulação matemática mostraram que o efeito observado por Negi (1967) é um erro conceitual e não uma verdade física.

O presente trabalho, tem por objetivo determinar o efeito do halo condutor na anomalia e.m. de um corpo cilíndrico horizontal. Através de modelamento analógico, estuda-se o efeito da variação dos parâmetros envolvidos. A fonte dos sinais e.m. constitui-se de um dipolo magnético vertical, que é comumente utilizado na prospecção de minerios, pelo método Slingram (ou HLEM). Este modelo é motivado pela ocorrência de alguns depósitos minerais, com concentração de mineralização disseminada ou em veios de considerável abundância, em relação ao corpo que rodeiam (Lowell e Guilbert, 1970, Rose 1970). Existem também outros depósitos minerais que contêm concentrações de minerios que vão diminuindo gradativamente em direção da rocha matriz (Goldie et. al., 1979), os quais apresentam semelhanças com o modelo selecionado para este trabalho. Este tipo de ocorrências verificam-se em quase todos os distritos mineiros do mundo entre os quais se destacam, as minas de Cornwall (Inglaterra), Bingham e Utah (USA), os Kurokos no Japão, (Park e Mac Diarmid, 1975; Baumann, 1976; Tatsumi et. al., 1970) e Carajás no Brasil, Hooker (1980).

Para complementar este estudo efetuou-se uma tentativa de analisar os efeitos do halo, no domínio de tempo, mediante a transformação dos dados, do domínio da frequência para o domínio de tempo.

Os resultados deste trabalho representam mais uma contribuição aos estudos em multifrequência que começam a se popularizar (Ward, 1959, Ward et. al., 1974a; Pridmore et. al., 1979; Won, 1980; Poddar, 1981). Na prospecção eletromagnética eles poderão servir de base para estudos posteriores a esse respeito, já que tratam de técnicas de interpretação geofísica, adequadas a meios geológicos de regiões tropicais da Terra.

2. A SIMILITUDE ELETRODINÂMICA

2.1 Equações de Maxwell

Os campos eletromagnéticos obedecem as equações de Maxwell, que na sua forma diferencial são (Harrington 1961):

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q_v \quad (4)$$

onde: \vec{E} = campo elétrico (V/m)

\vec{B} = indução magnética (Wb/m²)

\vec{H} = campo magnético (A/m)

\vec{D} = densidade de fluxo elétrico (C/m²)

\vec{J} = densidade de corrente elétrica induzida (A/m)

t = tempo (seg)

q_v = densidade de carga elétrica (C/m³)

é importante anotar as seguintes relações:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}; \vec{J} = \sigma \vec{E}; \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (5)$$

onde

μ = permeabilidade magnética (H/m)

ϵ = permissividade elétrica (F/m)

σ = condutividade elétrica (S/m)

As quantidades μ , ϵ e σ no vácuo adquirem os seguintes valores:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\sigma_0 = 0$$

2.2 Princípio de Similitude Eletrodinâmica

De acordo com o princípio de similitude eletrodinâmica é possível modelar em dimensões reduzidas um corpo de dimensões maiores. O princípio de similitude eletrodinâmica foi descrito por Stratton (1941), Sinclair (1948), Ward (1967), Negi e Gupta (1968), Frischknecht (1971) e outros.

A possibilidade de construir um modelo de um determinado sistema eletromagnético, vem da linearidade das equações de Maxwell. Para que um modelo seja possível, é necessário excluir do sistema, meios não lineares, tais como meios ferromagnéticos e/ou ionizados. Não é necessário excluir meios não homogêneos, porque as equações de Maxwell são válidas, para os mesmos. Os meios considerados devem ser lineares e os parâmetros que os descrevem, independentes do tempo.

Os modelos podem ser absolutos ou geométricos. No primeiro caso se requer que a fonte e o modelo estejam em escala. No último só é necessário modelar a geometria do corpo e as linhas de força e não os níveis de potencia da fonte.

O modelo geométrico, previamente mencionado, dá informações sobre as propriedades do sistema que não dependem do nível de potencia (tais como impedância, polarização, padrões relativos de antena, etc.), Sinclair (1948).

Os parâmetros físicos do corpo geológico a modelar, serão designados por um símbolo determinado e os parâmetros do modelo em escala; pelo mesmo símbolo, acompanhado de um apóstrofo. Desta forma temos, por exemplo, o campo magnético no corpo e H e no modelo em escala é H' .

Seja um ponto P no espaço, com coordenadas x , y , e z e P' um ponto no modelo a escala com coordenadas x' , y' e z' , então os dois sistemas estarão relacionados por:

$$x = Px'; \quad y = Py'; \quad e \quad z = Pz' \quad (6)$$

onde P é um fator de escala mecânico. As condições impostas por (6) representam o principal requisito para um modelo mecânico.

As equações de Maxwell a serem utilizadas com os parâmetros de campo podem ser expressas como:

$$\nabla \times H(x,y,z,t) = \sigma(x,y,z)E(x,y,z,t) + \epsilon(x,y,z) \frac{\partial E(x,y,z,t)}{\partial t} \quad (7)$$

$$\nabla \times E(x,y,z,t) = -\mu(x,y,z) \frac{\partial H(x,y,z,t)}{\partial t} \quad (8)$$

Quando se considera um modelo e.m. absoluto, é necessário que se adicionem as seguintes condições àquelas já mencionadas em (6).

$$t = \gamma t' \quad (9)$$

$$E(x,y,z,t) = \alpha E'(x',y',z',t') \quad (10)$$

$$H(x,y,z,t) = \beta H'(x',y',z',t') \quad (11)$$

onde

γ = fator de escala para o tempo.

α = fator de escala para a intensidade elétrica, e

β = fator de escala para a intensidade magnética.

Quando os fatores de escala P , α , β e γ são conhecidos, as condições (6), (10) e (11), representam as condições que devem ser satisfeitas num modelo absoluto. Se as quantidades P , γ e a razão α/β são conhecidas, o modelo em escala reduzida é geométrica.

No modelo reduzido, as equações de Maxwell ficam:

$$\nabla' \times E'(x', y', z', t') = \mu'(x', y', z') \frac{\partial H'(x', y', z', t')}{\partial t} \quad (12)$$

e

$$\begin{aligned} \nabla' \times H'(x', y', z', t') = & \sigma'(x', y', z') E'(x', y', z', t') + \\ & + \epsilon'(x', y', z') \frac{\partial E'(x', y', z', t')}{\partial t} \end{aligned} \quad (13)$$

Se o modelo em escala é uma simulação precisa do corpo geológico, a partir das equações (6), (9), (10) e (11), as equações (12) e (13) podem ser transformadas nas equações (7) e (8). Desta maneira obtemos as transformações que relacionam os parâmetros ϵ , σ e μ nos dois sistemas.

Tomando em consideração que:

$$\frac{\partial H'_{z'}}{\partial y'} = \frac{\partial H'_{z'}}{\partial y} \frac{dy}{dy'} = \frac{P \partial H'_{z'}}{\partial y} \quad (14)$$

da mesma maneira para as outras componentes. Destes resultados é evidente que:

$$\nabla' \times H' = \frac{P}{\beta} \nabla \times H \quad (15)$$

Da mesma forma é possível mostrar que:

$$\nabla' \times E' = \frac{P}{\alpha} \nabla \times E \quad (16)$$

Utilizando as relações em

(9), (10) e (11) temos que:

$$\frac{\partial E'}{\partial t'} = \gamma \frac{\partial E'}{\partial t} = \frac{\gamma}{\alpha} \frac{\partial E}{\partial t} \quad (17)$$

e

$$\frac{\partial H'}{\partial t'} = \frac{\gamma}{\beta} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (18)$$

Substituindo os resultados de (10), (15), (16), (17) e (18) nas equações (12) e (13) obtemos:

$$\frac{P}{\alpha} \nabla \times E(x,y,z,t) = -\mu'(x',y',z') \frac{\gamma}{\beta} \frac{\partial H(x,y,z,t)}{\partial t} \quad (19)$$

$$\frac{P}{\beta} \nabla \times H(x,y,z,t) = \sigma'(x',y',z') \frac{E}{\alpha}(x,y,z,t) + \epsilon'(x',y',z') \frac{\gamma}{\alpha} \frac{\partial E}{\partial t}(x,y,z,t) \quad (20)$$

Para simulações precisas, as equações (19) e (20), deverão ser equivalentes as equações (7) e (8) de acordo com o princípio de similitude eletrodinâmica. Por isto as seguintes relações:

$$\frac{\beta}{P\alpha} \sigma'(x',y',z') = \sigma(x,y,z) \quad (21)$$

$$\frac{\beta\gamma}{P\alpha} \epsilon'(x',y',z') = \epsilon(x,y,z) \quad (22)$$

$$\frac{\alpha\gamma}{P\beta} \mu'(x',y',z') = \mu(x,y,z) \quad (23)$$

Desta maneira as propriedades elétricas do modelo em escala, são dadas pelas propriedades elétricas do corpo a modelar e dos fatores de escala α , β , γ , e P da seguinte maneira:

$$\sigma' = \frac{P\alpha}{\beta} \sigma \quad (24)$$

$$\epsilon' = \frac{P\alpha}{\beta\gamma} \epsilon \quad (25)$$

$$\mu' = \frac{P\beta}{\alpha\gamma} \mu \quad (26)$$

Os modelos que obedecem as equações (24), (25) e (26) são denominados "absolutos". Nestes os valores de α e β são conhecidos separadamente e não apenas a razão entre eles.

Em muitos problemas geofísicos, a permeabilidade magnética do meio difere muito pouco da permeabilidade no ar. Por outro lado a condutividade elétrica, pode variar por várias ordens de magnitude. Conseqüentemente, a atribuição do valor da permeabilidade magnética do ar (μ_0), tanto para o corpo geológico como para o seu modelo em escala reduzida, é uma aproximação razoável. Desta forma (26) torna-se:

$$\frac{P\beta}{\gamma\alpha} = 1 \quad (27)$$

Devido as medidas serem feitas no mesmo ambiente (geralmente ar), tanto no campo como no modelo é possível supor que:

$$\epsilon' (x', y', z') = \epsilon (x, y, z) \quad (28)$$

desta forma:

$$\frac{P\alpha}{\beta\gamma} = 1 \quad (29)$$

Para que (27) e (29) sejam satisfeitas simultaneamente é necessário que

$$\alpha = \beta \quad (30)$$

$$P = \gamma \quad (31)$$

de (9) temos que

$$\omega' = P\omega \quad (32)$$

onde ω e ω' , são a frequência angular da fonte no campo e da fonte no modelo em escala respectivamente.

Substituindo a equação (30) na equação (24) as condutividades no modelo e no campo se relacionam por:

$$\sigma' (x', y', z') = P\sigma(x, y, z) \quad (33)$$

Se o fator de escala mecânica P é conhecido e os valores para α e β são desconhecidos (mas a sua razão é igual a um), o modelo em escala é denominado geométrico. O fator P que determina a escala do modelo é arbitrariamente escolhido, para obter um modelo de tamanho conveniente.

Quando as correntes de deslocamento não são importantes, condições menos restritas que as dadas por (32) e (33), podem ser usadas. Desta maneira as condições impostas por (25), podem ser ignoradas e somente as condições dadas por (18) e (26) precisam ser satisfeitas. Fazendo $t/t' = \omega'/\omega$ e substituindo (26) em (24), obtemos

$$\sigma' \mu' \omega' = P^2 \sigma \mu \omega \quad (34)$$

Conforme exposto anteriormente na justificativa da equação (27) temos $\mu' = \mu$, assim sendo podemos escrever.

$$\sigma' \omega' = P^2 \sigma \omega \quad (35)$$

Se designamos pelo símbolo L uma dimensão linear característica do corpo geológico em estudo, e L' a correspondente dimensão no modelo em escala, a equação (34) pode ser reescrita como:

$$\sigma' \mu' \omega' L'^2 = \sigma \mu \omega L^2 \quad (36)$$

A grandeza $\sigma \mu \omega L^2$ na equação (36), é denominada "parâmetro de condutividade" ou número de indução. Esta grandeza determina a resposta de corpos condutores em presen

ça de fontes indutoras, quando as correntes de deslocamento podem ser desprezadas.

3 CONJUNTO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

3.1 Aproximação Física

Com o objetivo de estudar os efeitos do halo, neste trabalho, foi preciso supor que, o manto de intemperismo e a rocha encaixante são altamente resistivas e não existe contato entre o halo e o corpo. (vide Fig. 1).

No campo, as condutividades dos sulfetos mineralizados variam de 10^{-3} a 10^4 S/m (Parasnis, 1956; Ward, 1966). As configurações geológicas mencionadas no primeiro capítulo, apresentam um contraste de condutividade elétrica entre halo e o corpo central; este contraste é variável de um depósito a outro. Geralmente é difícil conseguir no mercado, materiais apropriados para simular em laboratório, todas as condições geoeletricas. Por esta razão, o presente estudo viu-se limitado ao análise de uma razão entre as condutividades elétricas do corpo e halo menor ou igual que um. Desta maneira as condições modeladas, são geoeletricamente equivalentes, àque las que prevalecem por exemplo no caso de um halo de mineralização disseminada e em alguns depósitos zoneados. Estes últimos devido ao seu capeamento de óxido, o qual pode ter um conteúdo de minerais condutores menor que o corpo central, o qual é enriquecido por processos supergênicos (Poddar et al., 1976).

3.2 Materiais Utilizados

Para simular o corpo geológico condutor, foram utilizados vários cilindros, de diferentes raios e condutividades.

Os raios dos cilindros utilizados variaram entre $1,1 \times 10^{-2}$ e $3,8 \times 10^{-2}$ m, enquanto as condutividades estiveram na faixa de 10^5 a 10^7 S/m. Na Tabela 1 existe uma relação dos materiais, dimensões físicas e condutividades de cada cilindro.

Tabela 1: Raios e condutividades dos cilindros metálicos utilizados nos experimentos.

Cilindro	Material	R_c ($10^{-2} m$)	σ^* ($10^6 S/m$)	σ^{**} ($10^6 S/m$)
1	Alumínio	2,5	12,2 - 36,0	20
2	Alumínio	1,9	12,2 - 36,0	20
3	Alumínio	1,6	12,2 - 36,0	20
4	Grafite	2,5	0,01- 0,12	0,06
5	Aço-Inoxidável	2,5	1,35- 2,34	2,0
6	Alumínio	3,8	12,2 - 36,0	20
7	Aço-Inoxidável	1,9	1,35- 2,34	2,0
8	Alumínio	1,1	12,2 - 36,0	20
9	Alumínio	1,3	12,2 - 36,0	20
10	Aço-Inoxidável	1,3	1,35- 2,34	20

R_c = raio do cilindro circular

σ^* = faixa de condutividade do material fornecido por Frischknecht (1971).

σ^{**} = valor da condutividade escolhida neste trabalho.

O halo foi construído envolvendo um tubo de PVC rígido com folhas de alumínio de $2,6 \times 10^{-5}$ m de espessura. Assim sendo a cobertura do cilindro por duas folhas de alumínio resultam num halo com espessura igual a $5,2 \times 10^{-5}$ m, e assim por diante. Para variar o raio interno foram utilizados três tubos diferentes de PVC rígido. Na tabela 2 são apresentadas as características e as denominações dos halos utilizados.

As espessuras das folhas de alumínio foram medidas utilizando-se um micrometro com uma precisão de 10^{-6} m.

O comprimento preestabelecido dos modelos ("Corpo" e "Halo") foi de 0,95m. Isto foi julgado suficiente para considerar esta dimensão equivalente a um "Strike" infinito, tendo em vista que a distancia entre as bobinas foi fixada em 0,20m.

3.3 Conjunto Experimental

Os experimentos foram realizados com o conjunto para modelamento reduzido, composto das seguintes partes: unidade fonte, unidade receptora e unidade de posicionamento do Modelo. O conjunto se esquematiza na figura 2.

3.3.1 Unidade Fonte

Esta unidade é constituída por uma bobina transmissora horizontal de $2,5 \times 10^{-2}$ m de diâmetro, contendo 137 espiras de fio de cobre esmaltado de 20 S.W.G. com núcleo de ferrite. A bobina é montada num molde de acrílico e fixada com parafina para garantir a sua posição. Esta bobina (B_T) é alimentada por um gerador de ondas senoidal G.R. 1361 da General Radio (USA). Este gerador é capaz de fornecer sinais na faixa de 10Hz a 100KHz com uma distorção menor que 0,2% em frequências menores que 10KHz. Quando bem casadas as impedancias de saída do oscilador com a da bobina emissora esta é capaz de oferecer até 1,5 watts.

Do gerador saem dois sinais de referencia, da

Tabela 2: Raios e Espessuras dos halos de alumínio Utilizados nos Experimentos. ($\sigma^* = 20 \times 10^6$ S/m)

TUBO	R_H (10^{-2} m)	T_H (10^{-5})
A	5	2,6
B	5	5,2
C	5	7,8
D	5	10,4
F	4,25	5,2
H	3,75	5,2
I	4,25	10,4
J	3,75	10,4
K	4,25	7,8
L	4,25	2,6
M	3,75	2,6

R_H = raio interno do cilindro de PVC

T_H = espessura do halo

σ^* = condutividade do alumínio escolhida neste trabalho

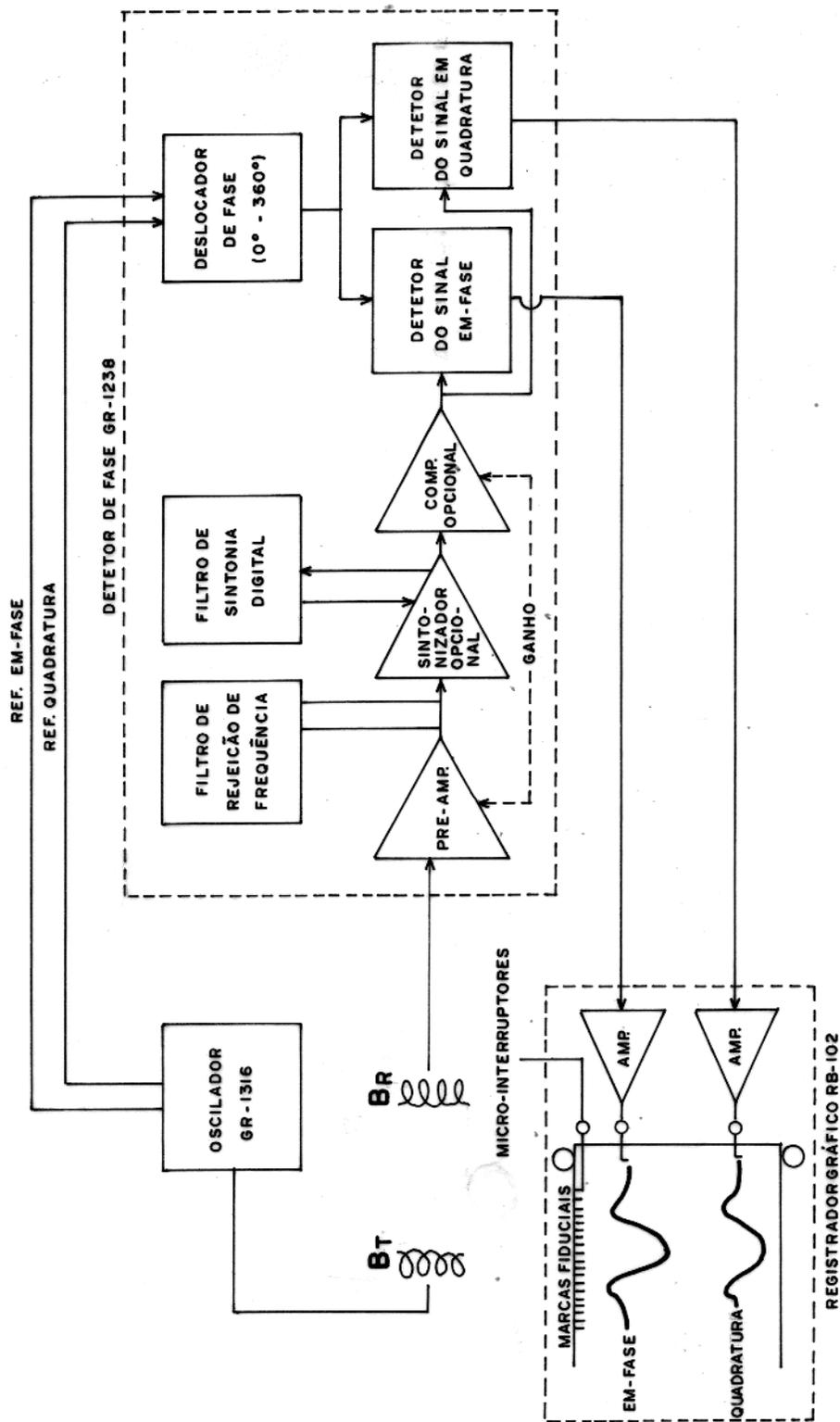


FIG. 2 - DIAGRAMA DE BLOCO DO SISTEMA DE MODELAMENTO, ENERGIZAÇÃO, RECEPÇÃO E REGISTRO GRÁFICO.

componente em-fase e a em quadratura. Estas componentes estão, em fase e a 90 graus fora de fase, com relação a corrente fornecida pelo gerador a bobina. As voltagens dos sinais de referências são de $1,25 \pm 0,2 V_{rms}$.

A ausência de distorção do sinal de saída do gerador foi verificada, efetuando-se o monitoramento por meio de um osciloscópio.

3.3.2 Unidade Receptora

Os componentes desta unidade são: uma bobina horizontal, um detetor de fases e um graficador de sinais.

A bobina receptora também de $2,5 \times 10^{-2}$ m de diâmetro, contém 680 espiras de fio de cobre esmaltado de 36 S.W.G. com um núcleo de ferrite. Ela está também montada num molde de acrílico.

Esta bobina está ligada através de um fio blindado, com um detetor de fases G.R.-1238, da General Radio (USA); sintonizado com a frequência de emissão do gerador de sinais da unidade fonte. Na faixa de frequência utilizadas, o detetor tem amplificação linear. A sensibilidade do detetor é de $35 nV_{rms}$, na faixa de 500Hz a 100KHz. O detetor utiliza dois circuitos sensíveis a fase, os quais são capazes de medir os sinais induzidos pelo campo na bobina receptora (B_R) e compará-los com os sinais de referência. Estes sinais de referência são ajustados ao valor do campo primário durante a calibração do sistema.

Do detetor de fases, saem dois sinais de corrente direta, para um graficador de 2 canais. Este graficador nos permite ter um registro automático dos sinais em-fase e quadratura do campo secundário, assim como da posição do centro das bobinas, por meio de marcas fiduciais ao longo do perfil.

No papel registrador de 0,25m de largura, movimentado a velocidade de 0,01m/s, obtém-se um registro otimizado do perfil.

3.3.3 Unidade de Posicionamento do Modelo

Os modelos são colocados numa estrutura de madeira montada sem o uso de metais. Essa estrutura é constituída de duas armações.

A menor (2,00m x 1,10m) sustenta um par de dispositivos de acrílico em forma de "V", que não permitem rotações ou oscilações do modelo.

A maior conta com dois trilhos horizontais de madeira, ao longo dos quais desloca-se um carrinho de acrílico contendo as bobinas. Este carrinho permite posicionar as bobinas na altura desejada.

O carrinho é atado a um contrapeso por um fio de nylon que passa por uma polia. Um motor passo-a-passo, fixo a armação maior, movimenta o fio e conseqüentemente o carrinho.

Para definir o posicionamento do ponto médio entre as bobinas, foram distribuídos ao longo do perfil de deze nove micro-interruptores a intervalos de 0,05m os quais são acionados por uma pequena peça de acrílico, indicativa daquela posição. Estes micro-interruptores por sua vez acionam o grafi cador que então registra as marcas fiduciais.

Mais detalhes do conjunto de modelo reduzido podem ser achados em Verma (1981) e Silva (1981).

Para realizar as diferentes combinações de raio e espessura do halo versus raio do corpo parafusou-se uma pe çã circular de acrílico, com um parafuso do material deste aos extremos do cilindro. Esta peça é capaz de manter por press ão o "halo" concentricamente ao "corpo".

3.4 Medições

3.4.1 Calibração do Conjunto

Para efetuar uma perfilagem a uma frequ ência

determinada, é necessário calibrar a fase e amplitude do vetor de referencia com respeito ao campo primário, na bobina receptora (B_R). Para calibrar a fase, é necessário rotar o vetor de referencia até obter um sinal em-fase com o campo primario, verificandou-se a cancelação da componente em quadratura. Para calibrar a componente em quadratura é necessário rotar o vetor de referencia noventa graus e obter a anulação da componente em-fase.

Para obter uma calibração na amplitude dos sinais, no graficador se ajusta ao valor "0" da escala a componente que se esta anulando e ao valor "100" a componente cuja fase é ajustada. Uma vez que as escalas de amplitude estão calibradas, o zero de referencia, em ambas as componentes é deslocado para o centro do papel, no graficador. Ajustando-se a esta posição é possível obter as partes positiva e negativa da anomalia.

3.4.2 Metodologia das Medidas

Nesta tese, os efeitos do halo foram estudados variando-se a espessura (T_H) e o raio (R_H) deste, bem como o raio e a condutividade (σ_c) do corpo, sob indução num intervalo de freqüências.

A faixa de freqüências utilizada foi de 100Hz a 55KHz. Na Tabela 3 estão indicadas as freqüências utilizadas e os correspondentes "SKIN DEPTH", ($\delta_s = 501 \sqrt{\frac{.1}{\sigma f}}$), onde σ é a condutividade elétrica do aluminio.

Foram realizados 2500 perfis perpendiculares ao eixo do corpo objetivando as análises das respostas das diferentes combinações do sistema corpo-halo. Estes perfis foram feitos a uma profundidade (H') de 0,06m, medida do ponto médio entre as bobinas ao centro do modelo. A separação entre as bobinas (L') é de 0,2m, consequentemente $H'/L' = 0,3$. Além desta profundidade foram efetuados alguns perfis a 0,08m. Na Fig. 3 são apresentados esquematicamente os parâmetro envolvidos no estudo.

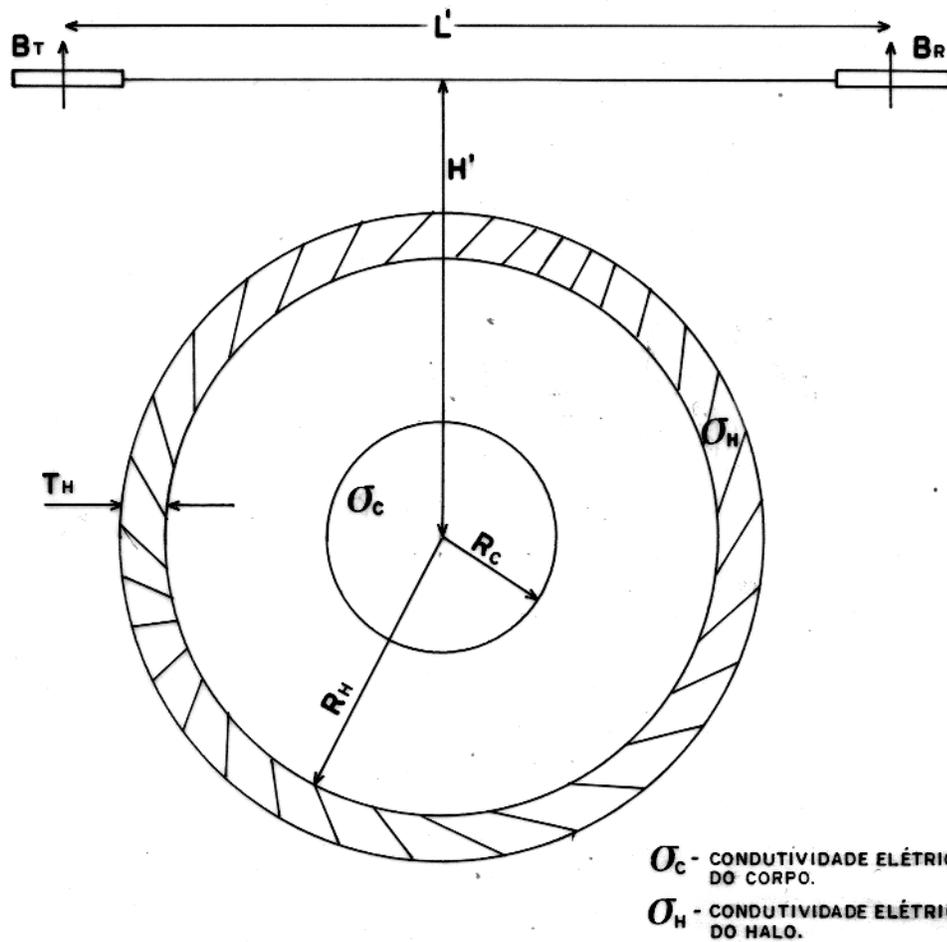


FIG. 3 - SEÇÃO VERTICAL DO CILINDRO E HALO HORIZONTAIS NUM CAMPO DE DIPOLO, REPRESENTANDO A SITUAÇÃO MODELADA.

Tabela 3: Freqüências e seus correspondentes "Skin Depth" para o alumínio ($\sigma_H = 20 \times 10^6$ S/m e $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

Freqüência F (KHz)	δ_s (10^{-3} m)	F (KHz)	δ_s (10^{-3} m)
0,1	11,2	10	1,1
0,2	7,9	12	1,0
0,5	5,0	15	0,91
0,8	4,0	20	0,79
1,0	3,5	25	0,71
1,5	2,9	35	0,59
2,5	2,2	40	0,56
5	1,6	45	0,53
7	1,3	55	0,48
9	1,2		

A partir dos perfis foram obtidas as componentes em fase e quadratura do campo induzido na bobina receptora, as quais foram registradas separadamente no papel diagrama

Os valores pico-a-pico das componentes em fase e quadratura serviram para, as diferentes análises realizadas.

Os valores pico-a-pico daquelas componentes, obtidos a cada frequência para os diferentes modelos, foram também gravadas digitalmente em fita magnética, para processamento por um micro-computador HP9825A. Estes dados foram utilizados no cálculo da função resposta em percentagem, do campo primário, no domínio do tempo.

Os resultados no domínio da frequência e no domínio do tempo foram traçados num graficador HP-9862A, o qual tem um erro nominal de 0,3% da escala total utilizada. Para obter curvas contínuas no domínio de frequência os valores experimentais foram suavizados, ajustando-se um polinômio através do critério dos mínimos quadrados, com um desvio máximo de 1. Nos casos em que esta última condição não foi satisfeita, as medidas foram interpoladas utilizando-se um interpolador SPLINE.

No Apêndice 1 é apresentada uma relação dos coeficientes obtidos para cada perfil.

3.5 Fontes de Erros

Desvio a simplicidade do modelo e do tipo de estudo realizado o erro máximo dos experimentos foi estimado em +3,5%, levando em consideração os possíveis erros sistemáticos e aleatórios, como segue:

3.5.1 Erros Sistemáticos

Os erros sistemáticos, se repetem ao longo de cada perfil. Assim sendo, seu efeito nas medidas constante. Foram considerados os seguintes erros sistemáticos experimen

tais:

a) Desvio nas determinações de profundidade do corpo, medidas do centro deste ao centro das bobinas. Estimados em 0,5%.

b) Erros na medição dos raios de corpos e halos, e na espessura dos últimos. Estimados em 0,3%.

c) Possíveis deslocamentos das medidas devido ao aquecimento dos instrumentos. Estimados em 0,1%.

d) Erros de registro associados a sensibilidade do graficador de sinais. Estimados em 0,1%.

e) O efeito Capacitativo entre o modelo e as bobinas, pode trazer mudanças na fase do sinal que se mede. Estimado em 0,5%.

Convém mencionar também que o tamanho das bobinas utilizadas não esteve de acordo com o fator de escala. Não obstante, o uso de bobinas não reduzidas na proporção da escala, é uma prática comum em modelamento. Tecnicamente, bobinas muito pequenas são de difícil construção e o acoplamento entre as espiras é grande. Além disso considerando-se o fato de que por elas passam altos valores de correntes, o ruído produzido poderia ser excessivo (Negi e Gupta, 1968; Silva, 1981). Apesar das bobinas utilizadas terem sido maiores do que o previsto pelo fator de escala elas ainda se comportam como dipolos magnéticos, ou seja, a separação entre elas é muito maior que seu raio ($L \gg R$) (Lorrain e Carson, 1970). O erro máximo estimado é de 1% para $L > 15R$.

3.5.2 Erros Aleatorios

Entre as causas aleatorias podemos mencionar:

a) Um deslocamento temporal da frequência.

b) Variações da condutividade do corpo e halo, devido a variação na temperatura ambiente.

c) Erros nas aproximações das leituras dos registros analógicos.

Os erros sistemáticos acumulados foram avaliados em função das precisões dos aparelhos, $\pm 2,5\%$. Devido ao fato de não se dispor de um estudo estatístico dos diferentes parâmetros envolvidos, supõe-se um erro estatístico de $\pm 1\%$. Assim sendo estimou-se o erro total acumulado em cerca de $\pm 3,5\%$.

4 PARÂMETROS DE RESPOSTA DE HALO E CORPO

No capítulo 2 foi definida a equação paramétrica como sendo uma relação que depende especificamente de algumas características do condutor, e do sistema indutor. Em geral, a equação paramétrica é definida pelo produto $\mu \omega \sigma L_1 L_2 = \text{constante}$, onde μ é a permeabilidade magnética, ω a frequência angular, σ a condutividade elétrica, L_1 e L_2 são dimensões lineares características do condutor e do sistema indutor. No caso do campo de dipolo considerado, L_1 é a separação entre as bobinas (Frischknecht, 1971; Verma, 1981). Os parâmetros de resposta de corpos condutores simples podem ser obtidos através de simulação digital ou por modelamento analógico. Alguns parâmetros de resposta são apresentados por Poddar e Battacharya (1966); Ward (1967) e outros.

Poddar e Battacharya (1966) entre outros, mostraram que dependendo da definição da equação paramétrica, a curva de resposta pode ser diferente. A forma do condutor e o tipo de fonte do campo primário também influem nesta resposta. Por isto uma definição adequada da equação pode evitar erros de interpretação na utilização de diagramas de Argand.

Na literatura existem equações paramétricas para corpos cilíndricos em campo uniforme; no entanto a equação para a mesma geometria em campo de dipolo, ainda não tem sido proposta. Neste sentido efetuou-se uma tentativa de definição das equações paramétricas para halos e corpos cilíndricos.

Para isto verificou-se em cada caso, os parâmetros físicos que influem na resposta do halo a um campo de dipolo. Na Fig. 4 mostram-se o efeito de mudança da separação entre bobinas (L'). Os resultados indicam que dentro do erro experimental, a separação entre as bobinas não afeta a resposta do halo. Na Fig. 5 mostra-se o efeito da variação da espessura do halo na resposta do mesmo.

Rara que as respostas coincidam é preciso deslocar o eixo horizontal das frequências. Este deslocamento na frequência equivale a razão das espessuras dos halos considerados. No nosso caso o halo teve seu raio interno fixado em

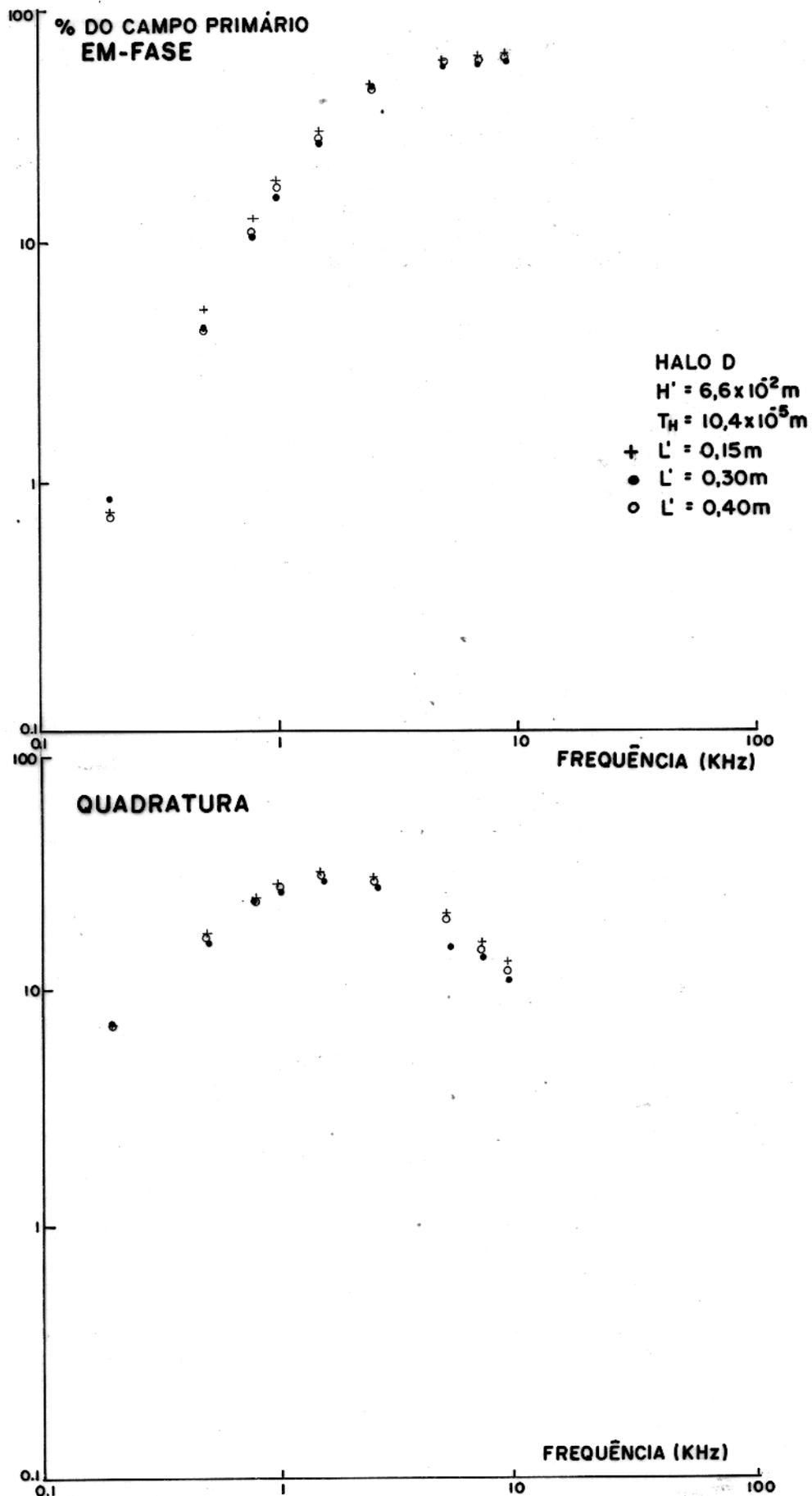


FIG.4 - RESPOSTA DO HALO A VARIACÃO DA DISTÂNCIA (L') ENTRE AS BOBINAS.

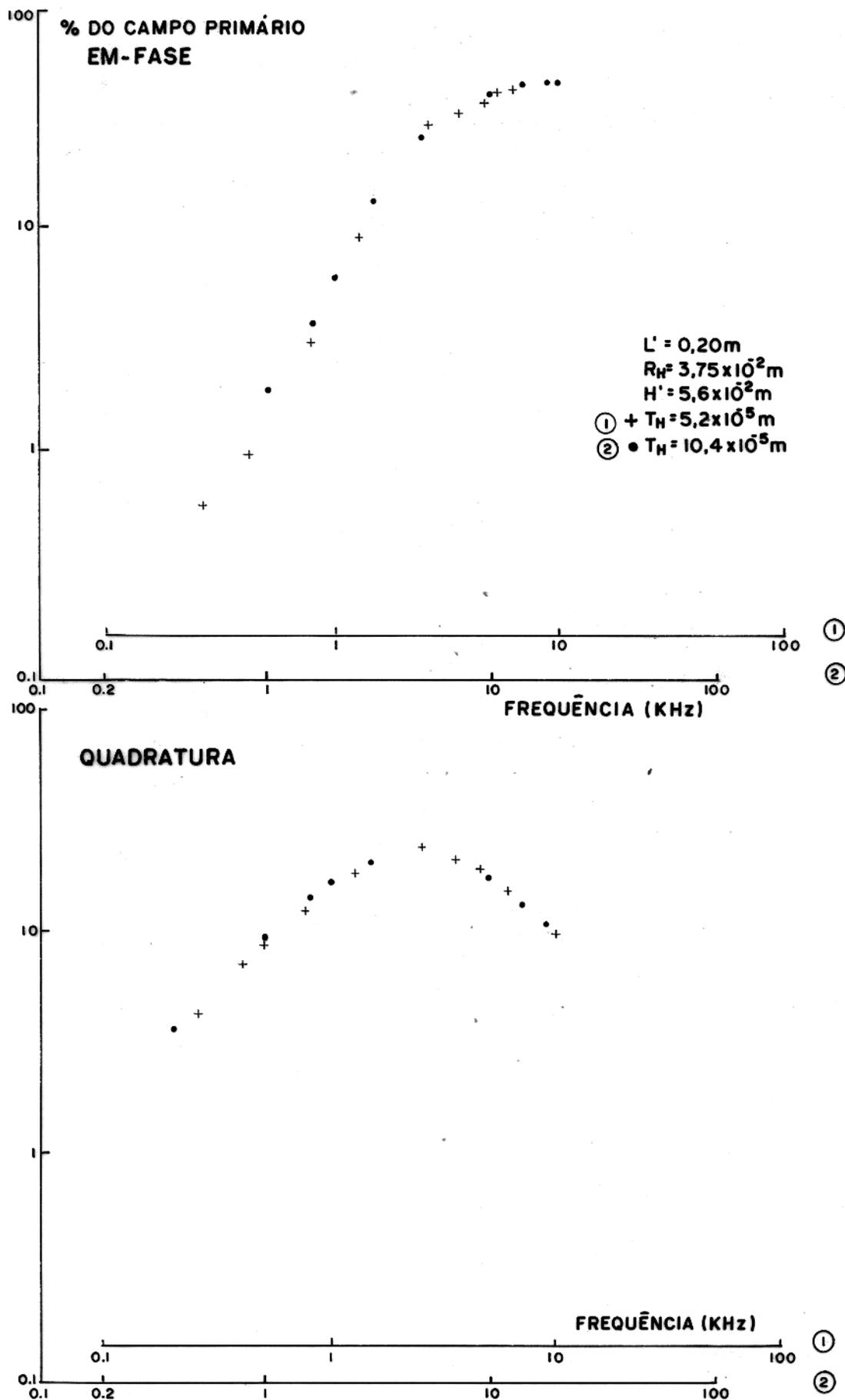


FIG.5 - EFEITO DA VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO HALO NA RESPOSTA DO MESMO.

$3,75 \times 10^{-2}$ m, enquanto as espessuras utilizadas foram de $5,2 \times 10^{-5}$ m e $10,4 \times 10^{-5}$ m. Por sua vez a distância entre as bobinas foi mantida em 0,20m.

A variação do raio (R_H) do halo, afeta a resposta deste, conforme mostrado na Fig. 6. A superposição das curvas é obtida deslocando os eixos vertical e horizontal, da resposta com o raio maior ($R_H = 4,25 \times 10^{-2}$ m) sobre a resposta com o raio menor ($R_H = 3,75 \times 10^{-2}$ m). Estes deslocamentos equivalem a razão entre os raios.

As 3 experiências anteriores nos mostram então que a resposta do halo é afetada, dentro dos resultados experimentais, tanto pela sua espessura como pelo seu raio interno. Considerando os resultados anteriores sugerimos uma definição da equação paramétrica do halo cilíndrico condutor com a seguinte expressão:

$$\alpha_H = \mu_0 \omega \sigma T_H R_H \quad (37)$$

onde o produto σT_H será definido como a condutância do halo, dentro da faixa de frequência estudadas (0.1-55KHZ).

Para o corpo cilíndrico, analogamente aos resultados obtidos com o halo, observou-se que a separação entre bobinas não afeta a sua resposta. Este fato é mostrado na Fig. 7, para separação entre bobinas de 0,20m, 0,30m e 0,40m. Na Fig. 8 mostra-se que um deslocamento dos eixos horizontal e vertical do gráfico da resposta do corpo com raio maior ($R_c = 2,5 \times 10^{-2}$ m), sobre o gráfico do corpo com raio menor ($R_c = 1,9 \times 10^{-2}$ m) equivale a um fator de 1,7 ou seja a razão entre os quadrados destes raios. Isto indica que a equação paramétrica depende do quadrado do raio, em corpos cilíndricos.

Com base nestes resultados sugere-se como equação paramétrica para corpos cilíndricos em campo de dipolo:

$$\alpha_c = \mu_0 \omega \sigma R_c^2 \quad (38)$$

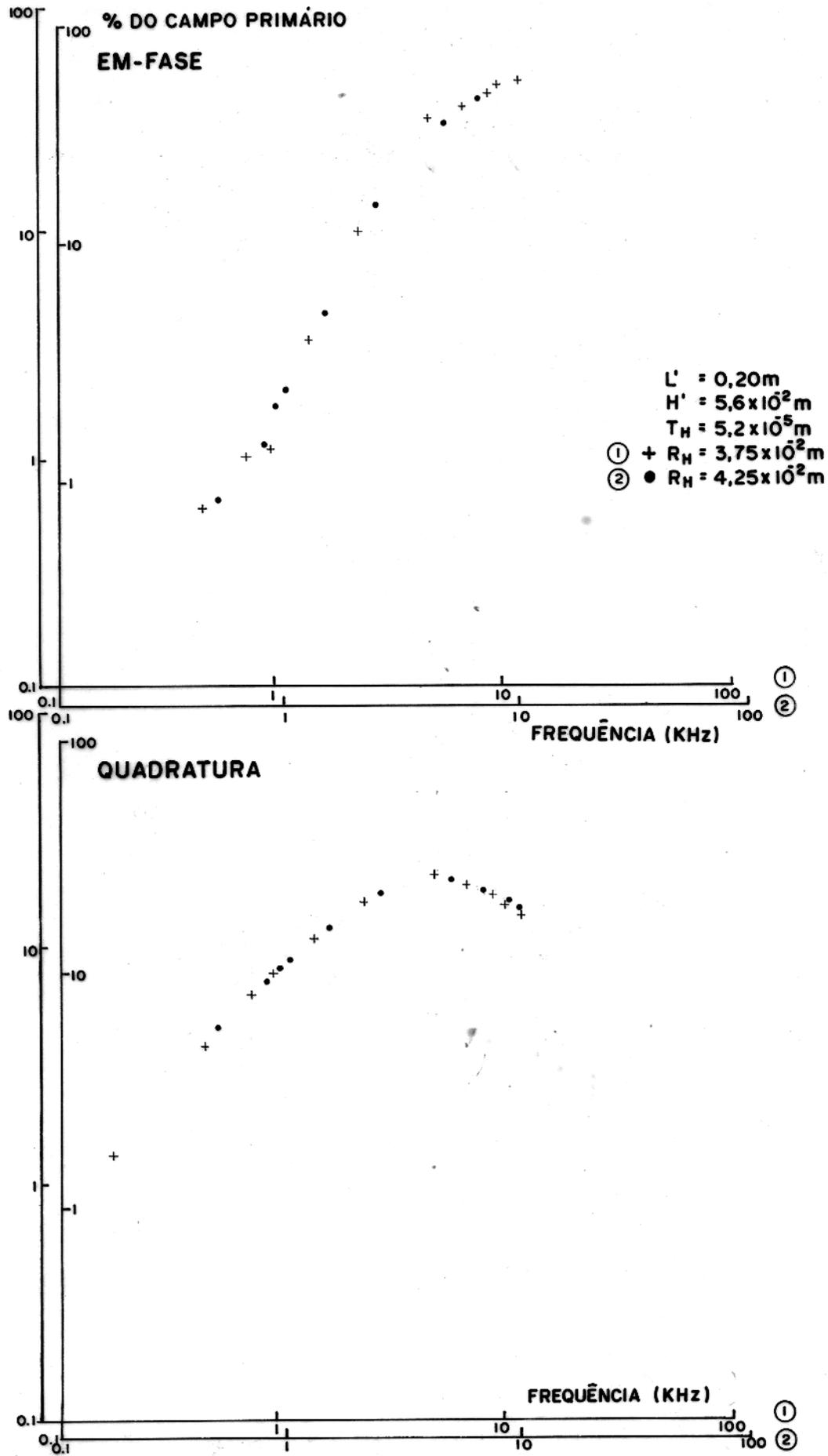


FIG. 6 - EFEITO DO RAI DO HALO NA RESPOSTA DO MESMO.

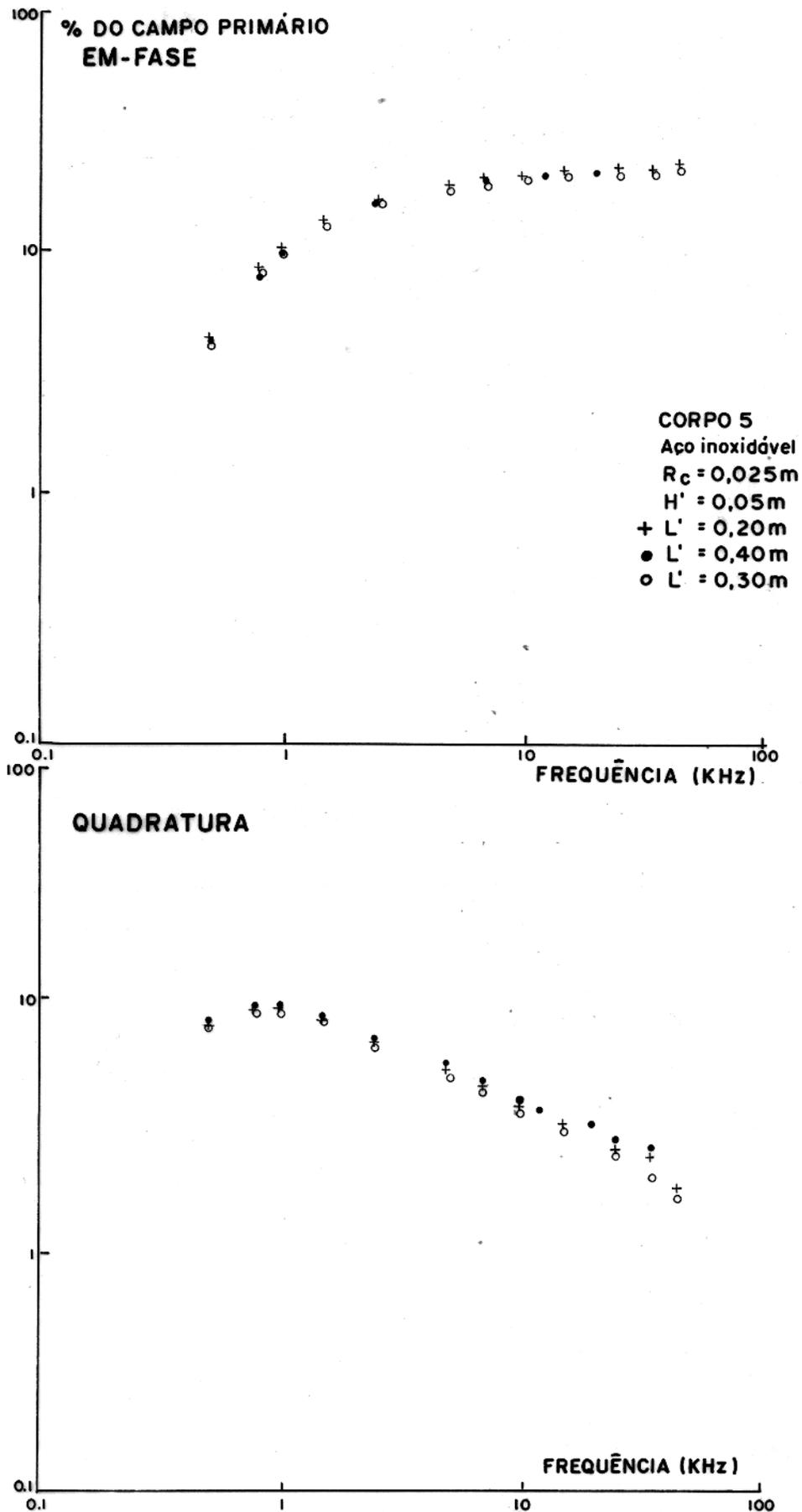


FIG.7- EFEITO DA SEPARAÇÃO ENTRE BOBINAS NA RESPOSTA DO CORPO CILÍNDRICO.

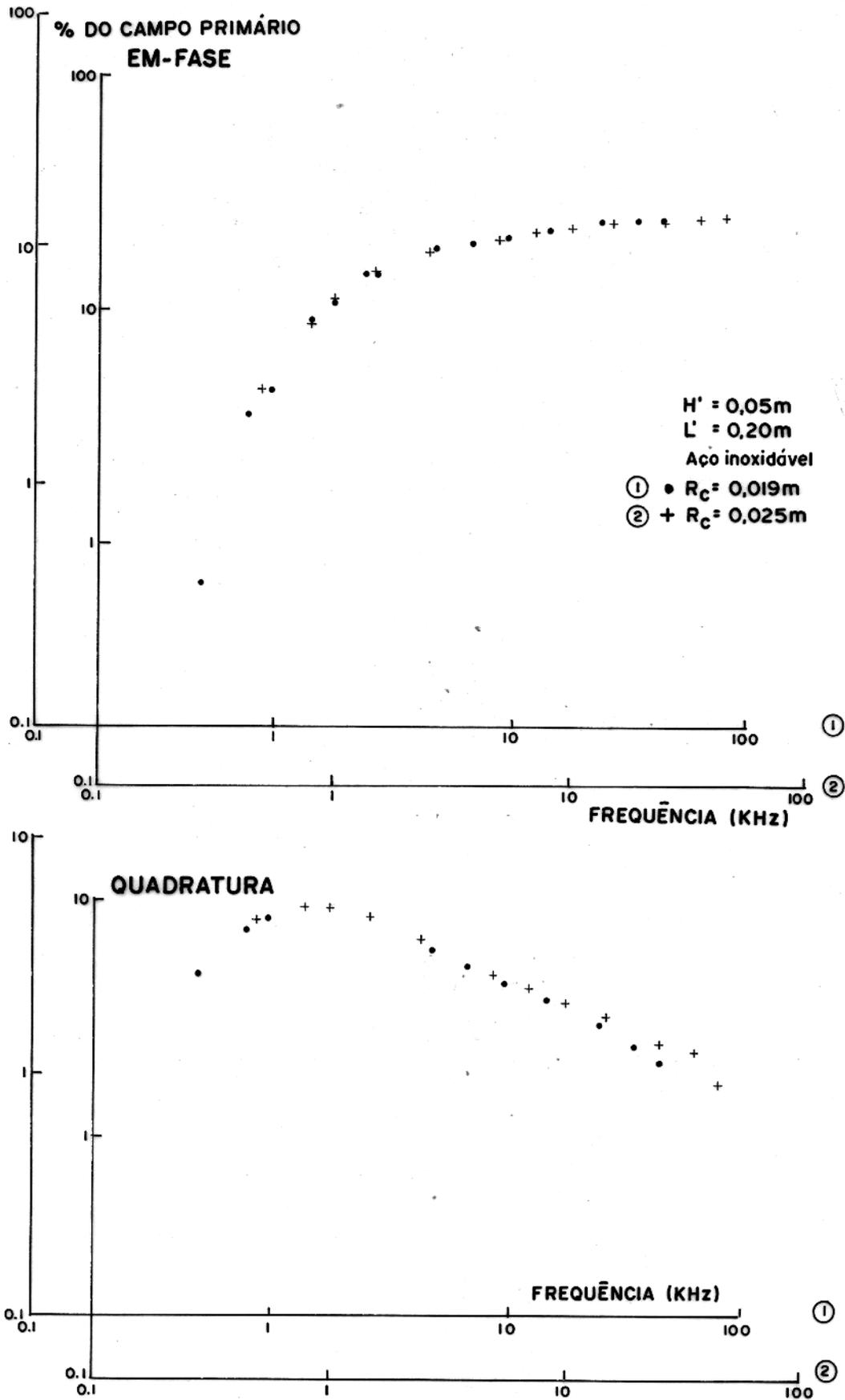


FIG. 8 - RESPOSTA DE CORPOS CILÍNDRICOS DE DIFERENTES RAIOS.

5 TRANSFORMAÇÃO AO DOMÍNIO DO TEMPO

5.1 Introdução

Este capítulo discute as técnicas utilizadas na transformação das respostas e.m. do halo e corpo cilíndrico, no domínio de frequência para o domínio do tempo.

Quando, um sinal alternado formado pelo produto de um sinal periódico e uma onda quadrada se propaga sobre uma inhomogeneidade condutora em subsuperfície, nela se induzem correntes, as quais geram um campo eletromagnético, que durante os períodos de ausência do sinal estimulador, decai com o tempo. Este decaimento com o tempo vai depender principalmente das características físicas e geométricas do condutor. O estudo desse decaimento em ausência do campo indutor, é a base dos métodos e.m. no domínio do tempo (Nelson e Morris, 1969; Nelson, 1973; Palacky e West, 1973; Verma, 1975; Palacky, 1976; Mishra et al., 1978; Nabighian, 1982).

A resposta transiente de um modelo geoeletrico pode ser obtida via das equações de Maxwell no domínio do tempo (Hjelt, 1971), ou transformando as soluções dessas equações do domínio da frequência para o domínio do tempo, mediante o uso das series de Fourier, transformadas de Fourier ou transformadas de Laplace (Morrison et al., 1969; Mallick, 1972, 1973; Lee e Lewis, 1974; Asten e Verma, 1978; Mallick e Verma, 1979; Tsubota e Wait, 1980; e outros). Algumas estruturas geológicas foram modeladas analógicamente no domínio do tempo por Ramaprasada e Bhimasamkaran (1973), Palacky (1975, 1976) e Spies (1976) entre outros. As respostas de algumas estruturas simples, podem também ser obtidas, simulando seus equivalentes em circuitos eletrônicos (Becker, 1969).

No presente trabalho utilizamos o método das series de Fourier, para calcular a resposta transiente do nosso modelo.

Este método foi utilizado entre outros por Nelson e Morris (1969), Nelson (1973), Mallick e Verma (1978, 1979).

5.2 Pulso Primário

O sinal primário considerado, consiste de uma série de pulsos semi-senoidais definido por:

$$\begin{aligned}
 F(t) &= H_0 \cos pt & -0,5 \leq t \leq 0,5 \text{ ms} \\
 F(t) &= 0 & 0,5 \leq t \leq 2,5 \text{ ms} \\
 F(t) &= -H_0 \cos p(t-3) & 2,5 \leq t \leq 3,5 \text{ ms} \quad (39) \\
 F(t) &= 0 & 3,5 \leq t \leq 5,5 \text{ ms}
 \end{aligned}$$

onde H_0 é a amplitude, neste caso igual a unidade, e $p = \frac{2\pi}{T}$. A largura do pulso é de 1,0ms, seguido por um intervalo de silêncio de 2ms o que dá um período de 6ms ou uma frequência de repetição de 166,66Hz. A Fig. 9, ilustra o comportamento desse tren de pulsos.

O desenvolvimento em série de Fourier dessa função é dado por:

$$F(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} F_n \cos(n\omega_0 t) \quad (40)$$

onde ω_0 é 2π vezes a frequência fundamental de repetição (166,66 Hz), e os coeficientes de Fourier F_n são fornecidos por:

$$F_n = \frac{8\xi \cos(n\pi\xi)}{\pi(1-4n^2\xi^2)} \quad \text{para } 2n\xi \neq 1 \quad (41)$$

Quando $2n\xi = 1$, resulta

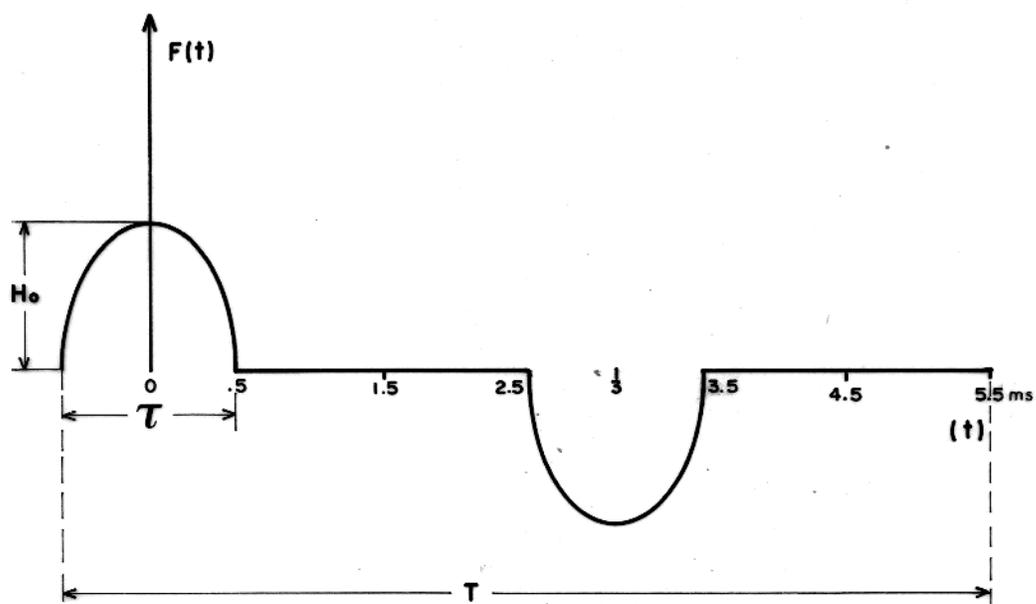
$$F_n = 2\xi \quad (42)$$

onde $\xi = \frac{\tau}{T}$ é a duração de meio senoide, e τ é a duração do pulso como mostra a Fig. 9 (Patra e Mallick, 1980)

5.3 Cálculo da Função no Domínio do Tempo

A convolução do sinal primário $F(t)$ e a função de transferência do modelo $Z(t)$, nos dá o valor da resposta do modelo no domínio do tempo $G(t)$, isto é:

$$G(t) = F(t) * Z(t) \quad (43)$$



T: PERÍODO DE REPETIÇÃO DO PULSO
 τ : MEIO PERÍODO DE ONDA SENOIDAL
 H_o : AMPLITUDE DO CAMPO PRIMÁRIO

FIG.9 - FORMA DO SINAL DE ENTRADA QUE ORIGINA O TRANSIENTE.

onde o simbolo * indica a convolução, Utilizando-se o teorema da convolução, a expressão (43) torna-se

$$G(\omega) = F(\omega) \cdot Z(\omega) \quad (44)$$

onde $G(\omega)$, $F(\omega)$ e $Z(\omega)$ são as transformadas de Fourier de $G(t)$, $F(t)$ e $Z(t)$ respectivamente.

A função $F(\omega)$ é nada mais do que os coeficientes, F_n , de Fourier dados por (41); a função $Z(\omega)$ são exatamente as respostas e.m. no domínio da frequência obtidas no modelo analógico para cada frequência, correspondente a cada coeficiente F_n .

Finalmente, a resposta no domínio do tempo é obtida através da transformada inversa de Fourier de (44). Portanto tem-se:

$$G(t) = \text{Re} \left[\sum_{n=1,3,5,\dots}^N F(\omega) Z(\omega) \exp(jn\omega_0 t) \right] \quad (45)$$

onde o segundo membro da equação é representado pela parte real da função. A equação (45) pode ser reescrita como:

$$G(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^N F(\omega) \left(Z_{(\omega)}^r \cos(n\omega_0 t) - Z_{(\omega)}^i \sin(n\omega_0 t) \right) \quad (46)$$

onde $Z_{(\omega)}^r$ e $Z_{(\omega)}^i$ são respectivamente, as partes real e imaginária das respostas do modelo analógico no domínio da frequência. Para otimizar o número de harmônicos F_n no cálculo de $G(t)$, foram testadas varias quantidades de coeficientes, por exemplo 50, 100, 150, 200 e 300, sendo que 200 coeficientes foram suficientes para fornecer ótimos resultados. Para calcu

lar 100 valores de $G(t)$, espaçados 0,025ms, sendo para cada um empregados 200 coeficientes F_n , foi utilizado 5 minutos de computação no microcomputador HP-9825A. Os resultados em forma de figuras são apresentados no Capítulo 6 deste trabalho.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Introdução

Ao se fazer a análise dos resultados, levou-se em consideração os vários efeitos observados nas diferentes combinações halo-corpo.

Na apresentação desses resultados, convencionou-se denominar a resposta, devido a uma combinação de halo e corpo, com uma letra maiúscula seguida de um número. A letra corresponde a um halo de determinada espessura e raio, e o número a um corpo de determinado raio e condutividade. Desta maneira o halo A e o corpo 1 fariam uma combinação que denominamos A1. Os corpos foram denominados de alta condutividade, no caso dos corpos de alumínio, meia no caso do corpo de aço-inoxidável e de baixa quando se utiliza o grafite.

6.2 Perfil Eletromagnético

Na Fig. 10 apresentam-se os perfis e.m. obtidos para o corpo 6 a diferentes profundidades. A pouca profundidade, o perfil A tem dois lóbulos negativos simétricos: entretanto, a profundidade maior (no perfil B) eles tendem a desaparecer. Estes lóbulos são explicados pela maior interação que existe entre as bobinas e o corpo quando este se encontra a pouca profundidade. O halo em nenhum dos casos modifica a forma dos perfis, porém ele gira a fase no sentido anti-horário aumentando sensivelmente a resposta em quadratura e diminuindo o valor da componente em fase. Estes resultados indicam que a mudança de profundidade não modifica os efeitos do halo acima mencionados.

6.3 Efeitos da Condutância (σT_H)

Na Fig. 11 mostra-se o efeito na variação da condutância do halo em combinação com o corpo 6 ($R_{\alpha} = 0,038$ alu

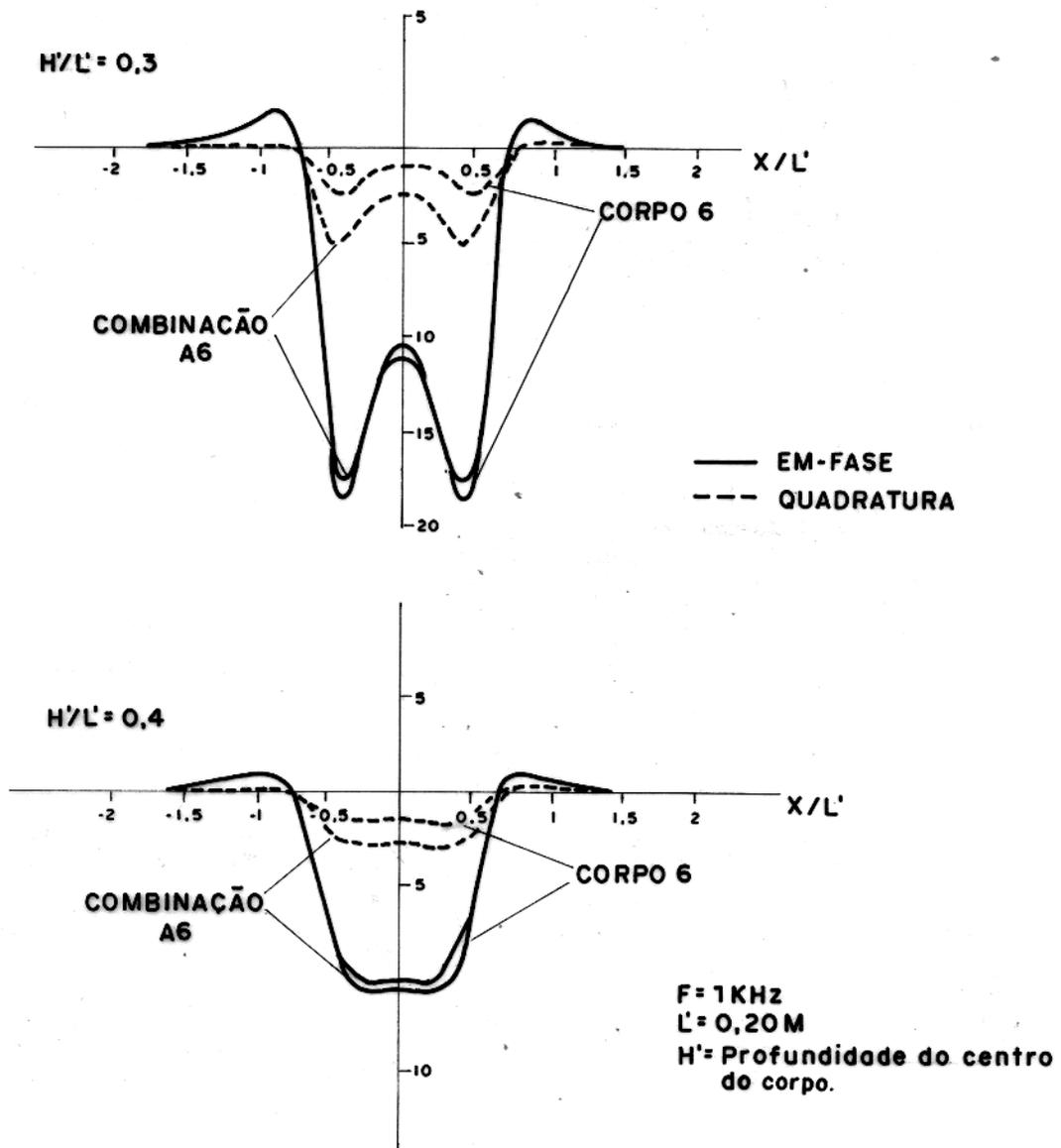


FIG.10 - PERFIS E.M. DO CORPO CILÍNDRICO, 6 E DA COMBINAÇÃO A6.

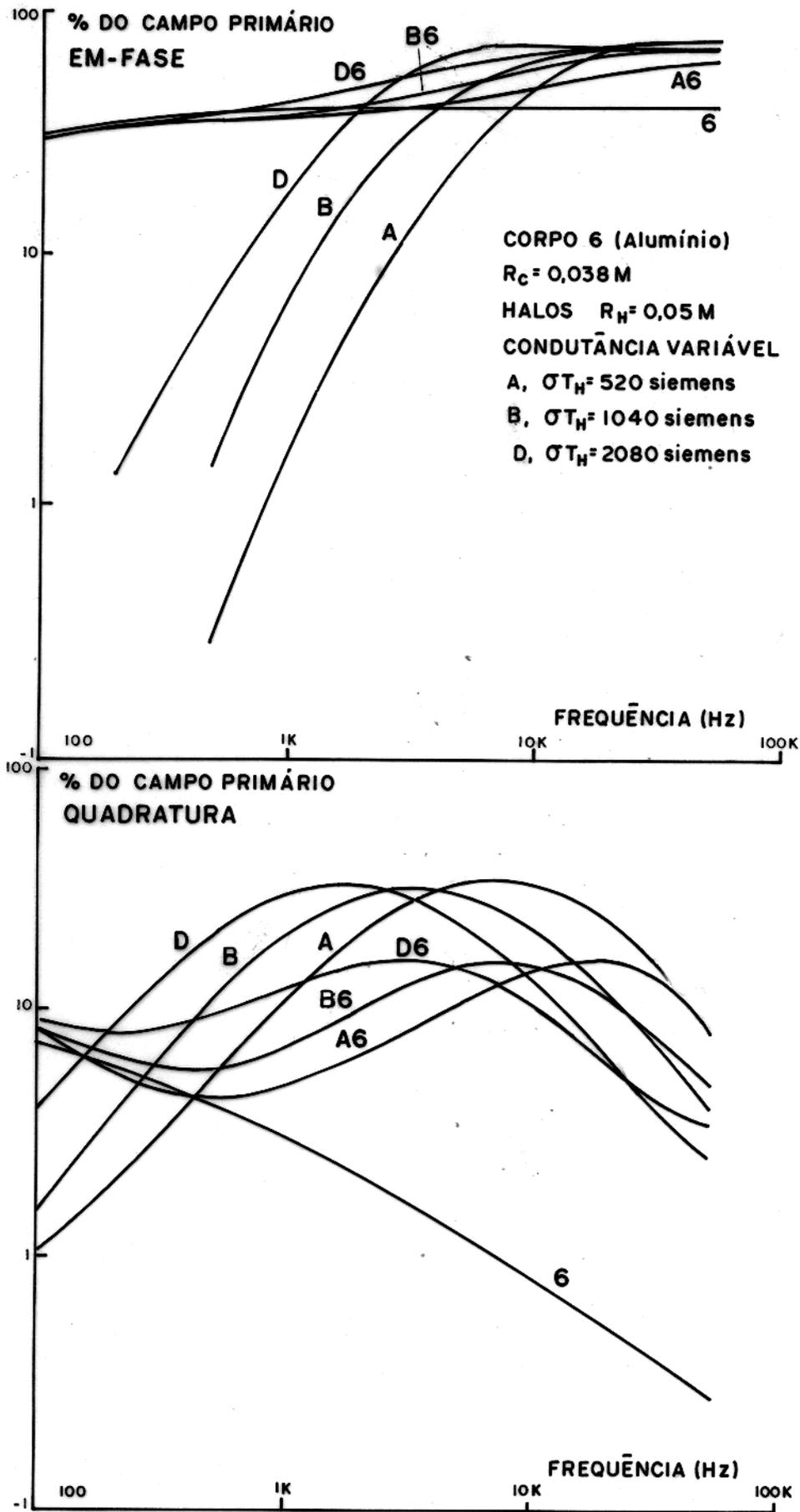


FIG.11 - EFEITO DE MUDANÇA DA CONDUTÂNCIA DO HALO PARA $R_H/R_C = 1,3$.

mínio).

Na componente em-fase, comparamos as respostas das diferentes combinações com as respostas do halo e corpo isoladamente. A resposta em baixa frequência para todas as combinações pertence ao corpo. A medida que aumenta a frequência, a resposta tende a ser do halo. Observe-se que ainda nas altas frequência a resposta da combinação A6 não pertence ao halo. No entanto, a tendência é nesse sentido. É interessante observar em todas as respostas de combinações, que existe uma faixa de frequência na qual a resposta não pertence ao halo nem ao corpo. Esta zona de transição se desloca para as baixas frequências na medida em que aumenta a condutância do halo. Esta zona pode ser devida ao fato de que ainda nesta faixa de frequência existe maior influência do corpo. Tal afirmação parece estar apoiada pelos resultados da combinação A6.

Para as diversas combinações, a componente em quadratura das respostas apresenta dois picos; um em baixa frequência seguido de uma queda devido à influência do corpo, e outro em alta frequência devido a influência do halo. Na medida em que a condutância do halo cresce, o pico correspondente ao corpo aumenta a sua amplitude com respeito ao corpo isoladamente, e a queda desloca-se para frequências ainda mais baixas. Conseqüentemente, como efeito do halo o corpo aparece mais condutor do que é na realidade. O segundo pico, correspondente ao halo, encontra-se deslocado para as altas frequências. Além disso ele apresenta sua amplitude reduzida com respeito ao halo só; e por isso o halo parece menos condutor.

A redução da amplitude da quadratura no caso do halo isoladamente, pode ser devida à interação indutiva entre o corpo e o halo. Qualitativamente, pode-se dizer que a redução da amplitude é constante, ou seja, que deslocando a resposta da combinação A6, os picos devidos à influência do halo em B6 ou D6 coincidiram.

Os resultados das componentes em-fase e quadratura indicam que, na medida em que aumenta a condutância do halo, a resposta do corpo se veria afetada a tal ponto que a separação da resposta deste com a do halo seria mais complicada.

da.

Em corpos de condutividade média como no caso do corpo 5 (aço-inoxidável) e utilizando uma razão $R_H/R_C=1,5$, o efeito de variação da condutância é bem mais interessante (Fig. 12). Na combinação J5 e H5 a resposta em-fase para baixas frequências, tende a ser a resposta do corpo por si só. No entanto, quando aumenta σT_H como em J, a resposta é o produto da conjugação das respostas individuais do corpo e halo. Isto é indicativo de que a zona de transição mencionada anteriormente na Fig. 11, é deslocada para baixas frequências. Este efeito faz o corpo parecer mais condutor. Tal efeito, que a princípio parece negativo, ajudaria a detecção de corpos com baixa condutividade.

Em quadratura para todas as combinações, a presença do halo aparentemente aumenta a resposta do corpo. Observa-se que nas combinações M5 e H5, onde a condutância é menor, as respostas do corpo e halo podem ser identificadas pelo aparecimento de dois picos, um em baixa e outro em alta frequência, separados por um ligeiro declínio da resposta em frequências intermediárias. Na combinação J5 este efeito não é perceptível, estando o único pico de saturação deslocado para as baixas frequências com respeito ao halo. Isto ajudaria na detecção do corpo, pois o faz parecer mais condutor.

Nas altas frequências todas as respostas das combinações convergem para aquelas dos respectivos halos.

Na Fig. 13 apresenta-se a resposta do corpo 4 (grafite). A tendência nas respostas combinadas é predominar a parcela devida ao halo, ou seja, o efeito do halo em qualquer dos casos apresentados é de blindar a resposta do corpo.

6.4 Efeito da Mudança na Releção R_H/R_C

Fixando-se a condutância, analisou-se o efeito do halo com a mudança da relação R_H/R_C no corpo 1. Os resultados são apresentados na Fig. 14 para as componentes em-fase e quadratura.

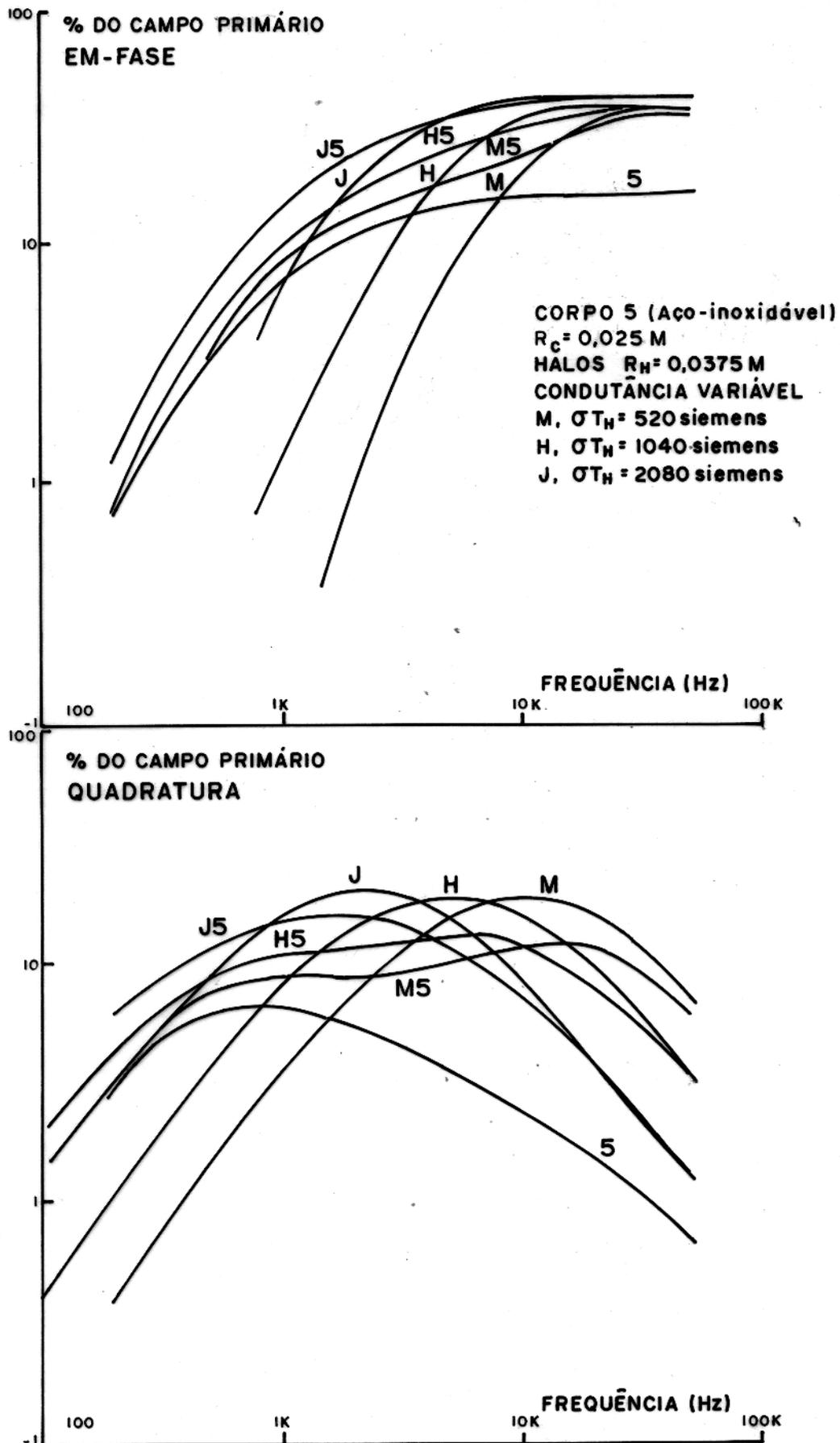


FIG.12 - EFEITO DA CONDUTÂNCIA DO HALO PARA $\sigma_c = 2 \times 10^6 \text{ S/M}$ E $H'/L' = 0,3$.

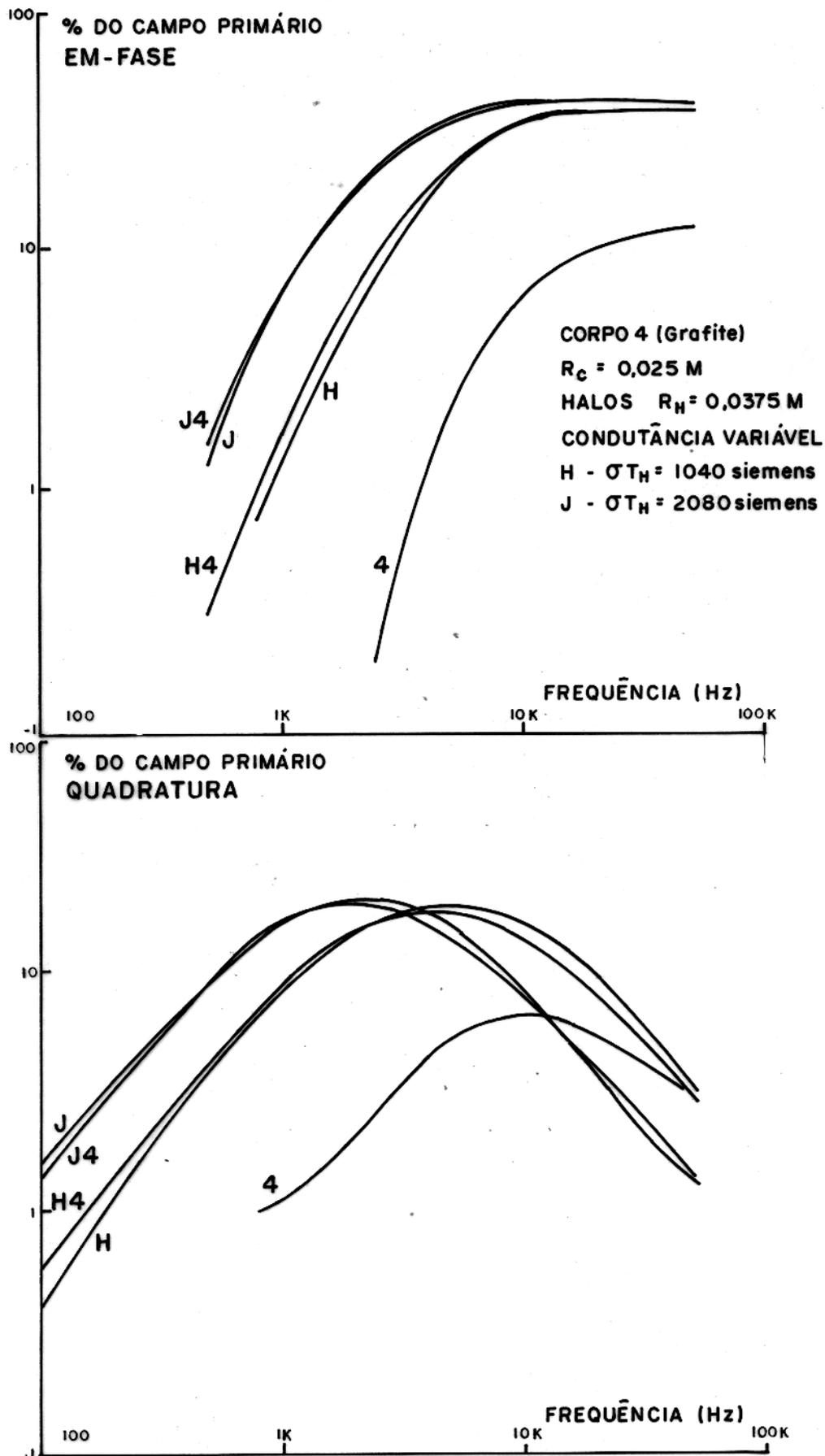


FIG.13- EFEITO DA CONDUTÂNCIA DO HALO PARA $R_H/R_C = 1,5 \text{ M}$ E $\sigma_c = 0,06 \times 10^6 \text{ S/M}$.

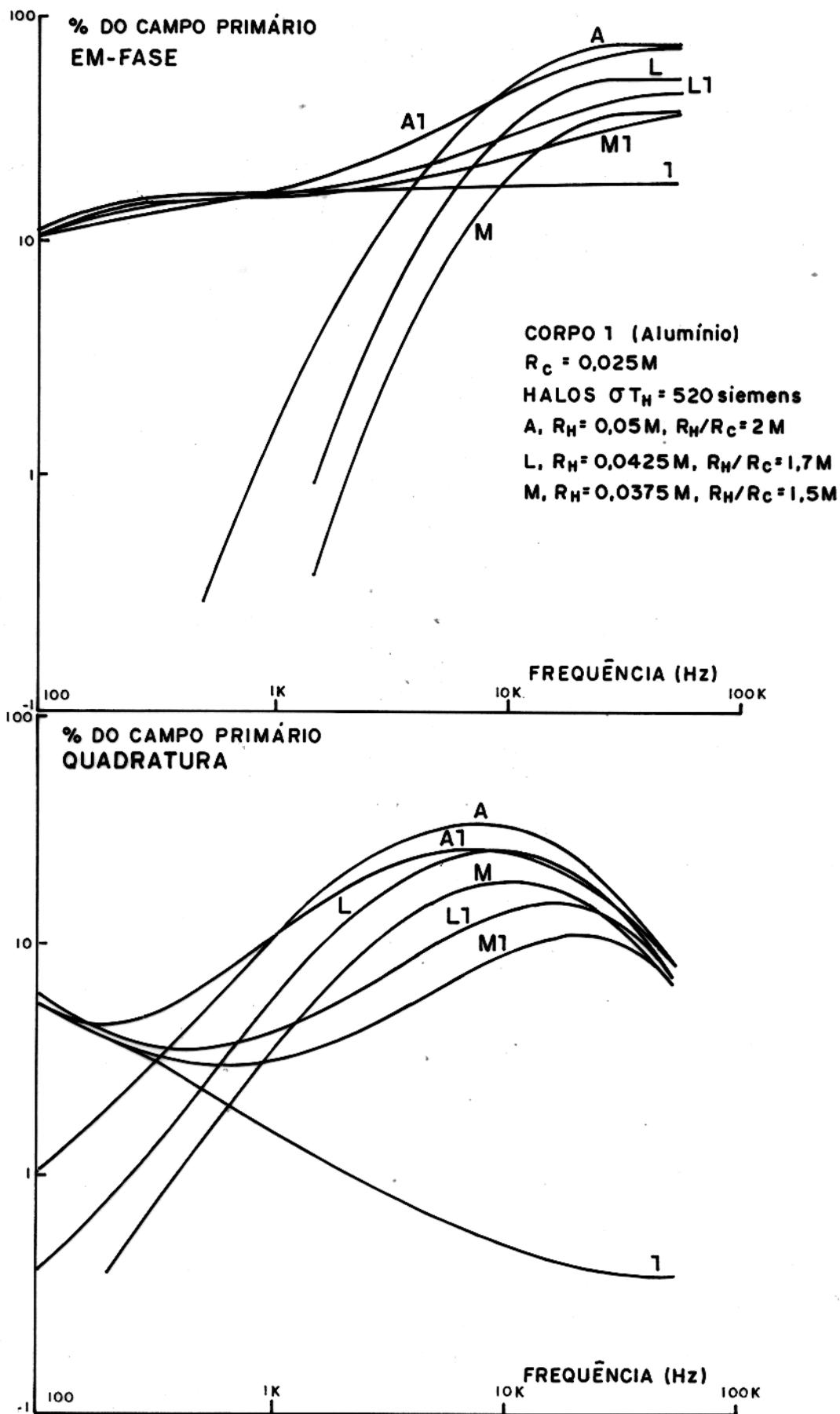


FIG. 14 - EFEITO DA VARIAÇÃO DO RAIO DO HALO (R_H) PARA $\sigma_{TH} = 520$ siemens, $\sigma_c = 20 \times 10^6$ S/M, E $H'/L' = 0,3$.

Na resposta em-fase observa-se que a medida que a razão R_H/R_C diminui, as respostas das combinações são mais influenciadas pelo corpo. Isto é indicativo de que a razão R_H/R_C é importante na separação das respostas corpo-halo. A comparação das componentes em-fase das figuras 11 e 14, indica que o efeito do aumento de R_H/R_C é equivalente a aumentar a condutância do halo.

Na quadratura temos a existência das respostas devidas a corpo e halo separadas na frequência, efeito similar ao mostrado na Fig. 11. observa-se que a queda é mais pronunciada na medida em que a razão R_H/R_C diminui. O pico devido ao halo desloca-se mais à direita quando as razões R_H/R_C são menores. Porém, em frequências, a posição do pico devido ao halo na combinação A1, coincide com a do pico máximo do halo A.

Os resultados sugerem que quanto mais perto do corpo estiver o halo, maior será a interação entre eles, obtendo-se uma separação das respostas numa banda de frequência determinada. Efeitos similares foram encontrados por Fuller (1971), Negi et al., (1972), Negi et al., (1973), Poddar (1975) e outros.

6.5 Efeitos do Halo com a Mudança do Raio do Corpo

Mantendo-se a condutância e o raio do halo, analisou-se o efeito da variação do raio de um corpo de condutividade fixa.

Na Fig. 15, mostram-se os resultados da combinação dos corpos 1, 2 e 6 com o halo A. A resposta em-fase indica que à medida que o raio do corpo diminui sua influência é menor. A zona de transição desloca-se para as baixas frequências e aumenta a tangente da resposta. Os resultados sugerem que um condutor fino de alta condutividade poderia ser detectado pelo aparecimento de uma saturação em baixas frequências, seguido de um crescimento rápido da resposta.

A resposta em quadratura não indica nada de novo, pois os resultados poucos ou nada diferem daqueles da

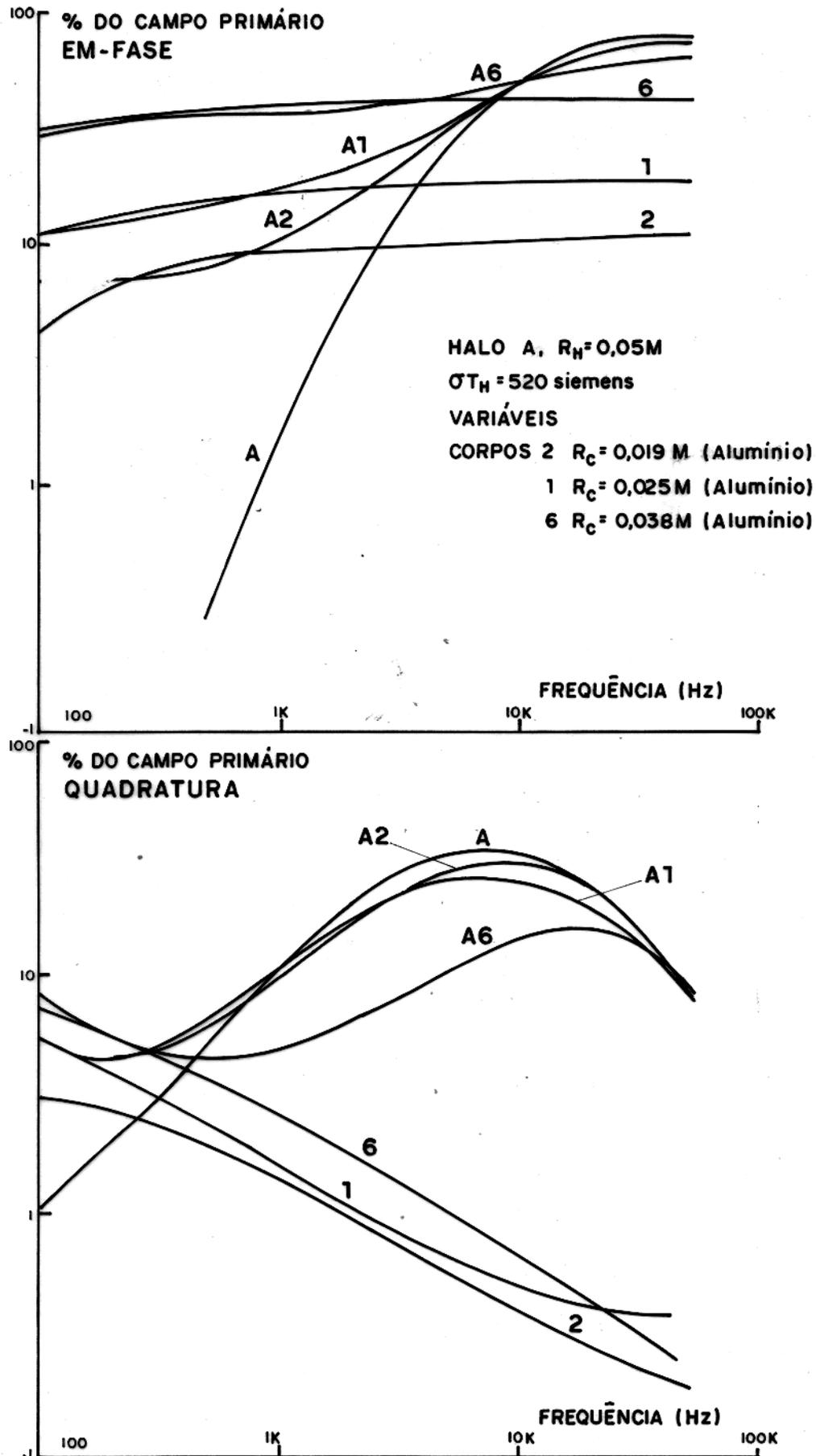


Fig. 14.

6.6 Efeito do Halo, com a Mudança da Condutividade do Corpo

Aumentando-se a razão entre as condutividades de corpo e do halo, ressalta-se a presença do corpo, tal como se observa na Fig. 16.

A resposta em-fase é aumentada pela presença do halo nos casos dos corpos 4 e 5. Conseqüentemente o corpo parece mais condutor principalmente no caso do corpo 4.

Em quadratura, para a condutância utilizada, a presença do corpo se evidencia nos casos em que este tem maior condutividade, como nas combinações M1 e M5 onde estão presentes os picos devidos as influencias do corpo e do halo.

No caso do corpo 4, menos condutor, o efeito do halo é similar ao observado na componente em-fase, isto é, aumenta a resposta total.

6.7 Efeito da Profundidade

Na Fig. 17 observa-se que com o aumento da profundidade o efeito da presença do halo é o mesmo para as duas componentes. Isto era de se esperar pelos resultados observados nos perfis e.m. da Fig. 10.

6.8 Efeitos no Dominio do Tempo

Nas figuras 18 a 23 se apresentam os gráficos obtidos da transformação dos dados do dominio de frequência ao dominio do tempo. Tal como é mostrado na Fig. 18, a resposta dos corpos 1, 3 e 6 apresentam um decaimento lento após 1 milisegundo.

Na Fig. 19 é comparado o efeito da condutividade do corpo, no decaimento da resposta. Nela o corpo 5 (aço-inoxidável) apresenta um decaimento rápido para intervalos me

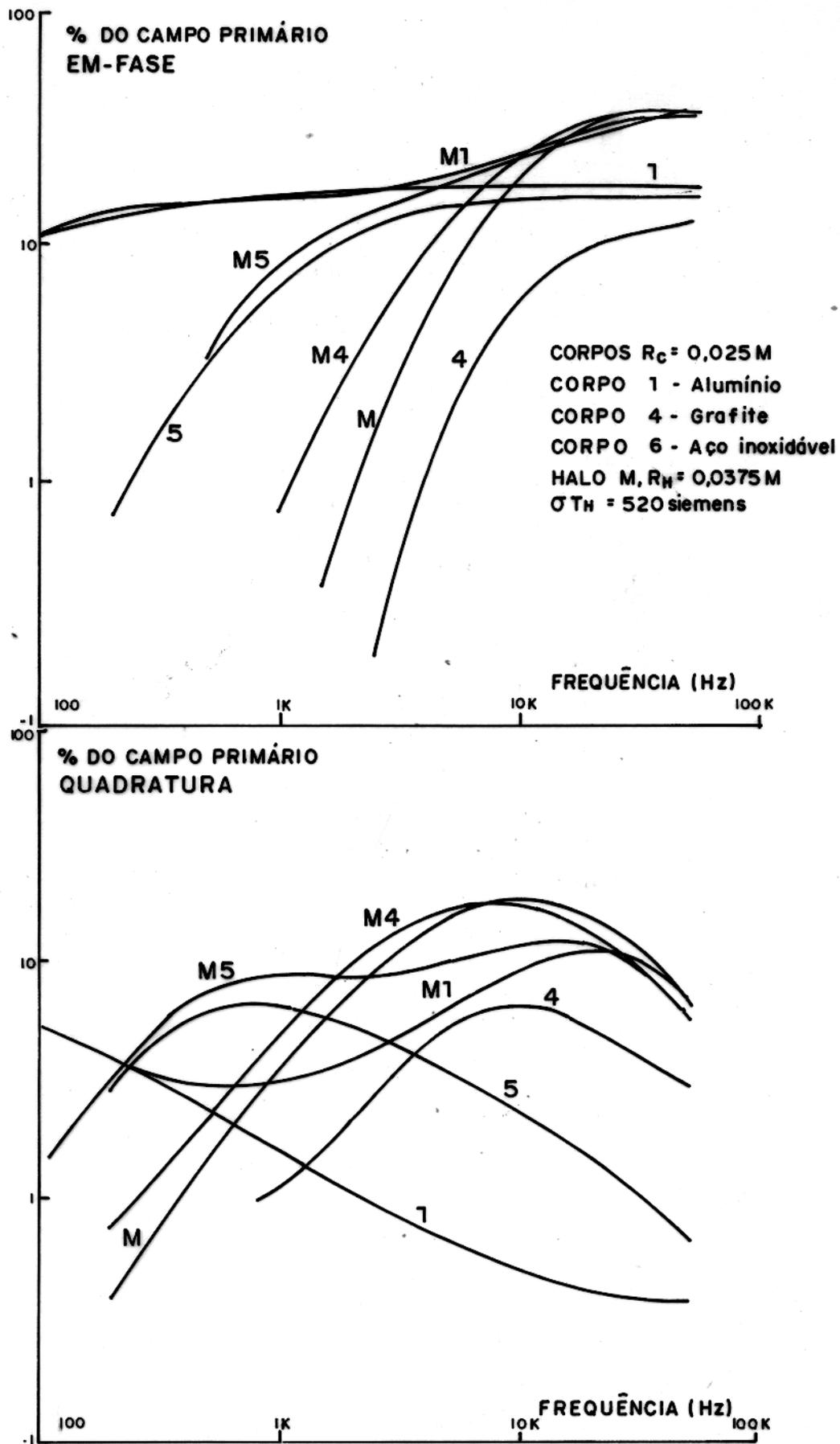


FIG. 16 - EFEITO DA CONDUTIVIDADE DO CORPO COM $R_H/R_c = 1,5$.

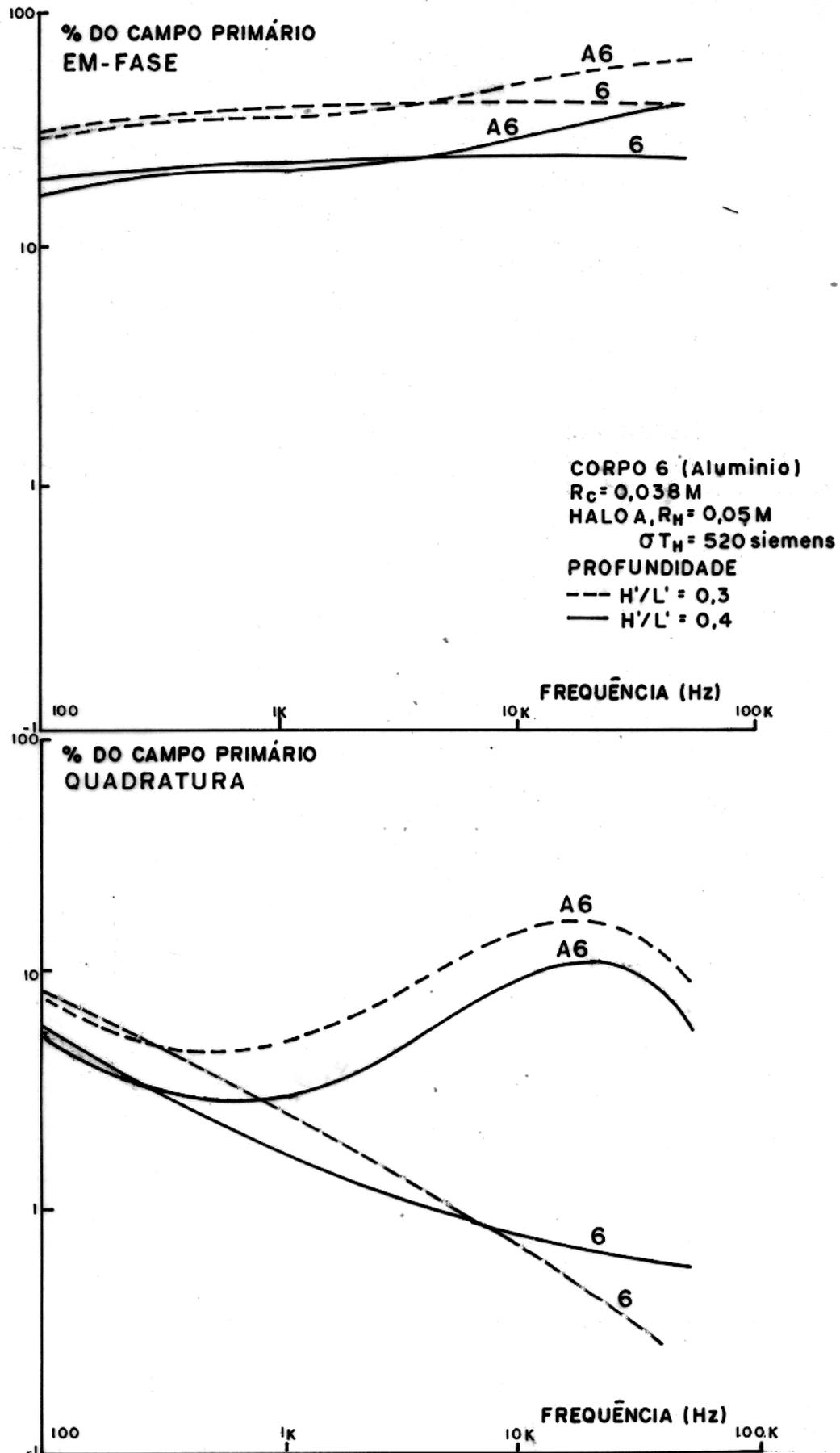


FIG. 17 - EFEITO DA PROFUNDIDADE DO CORPO.

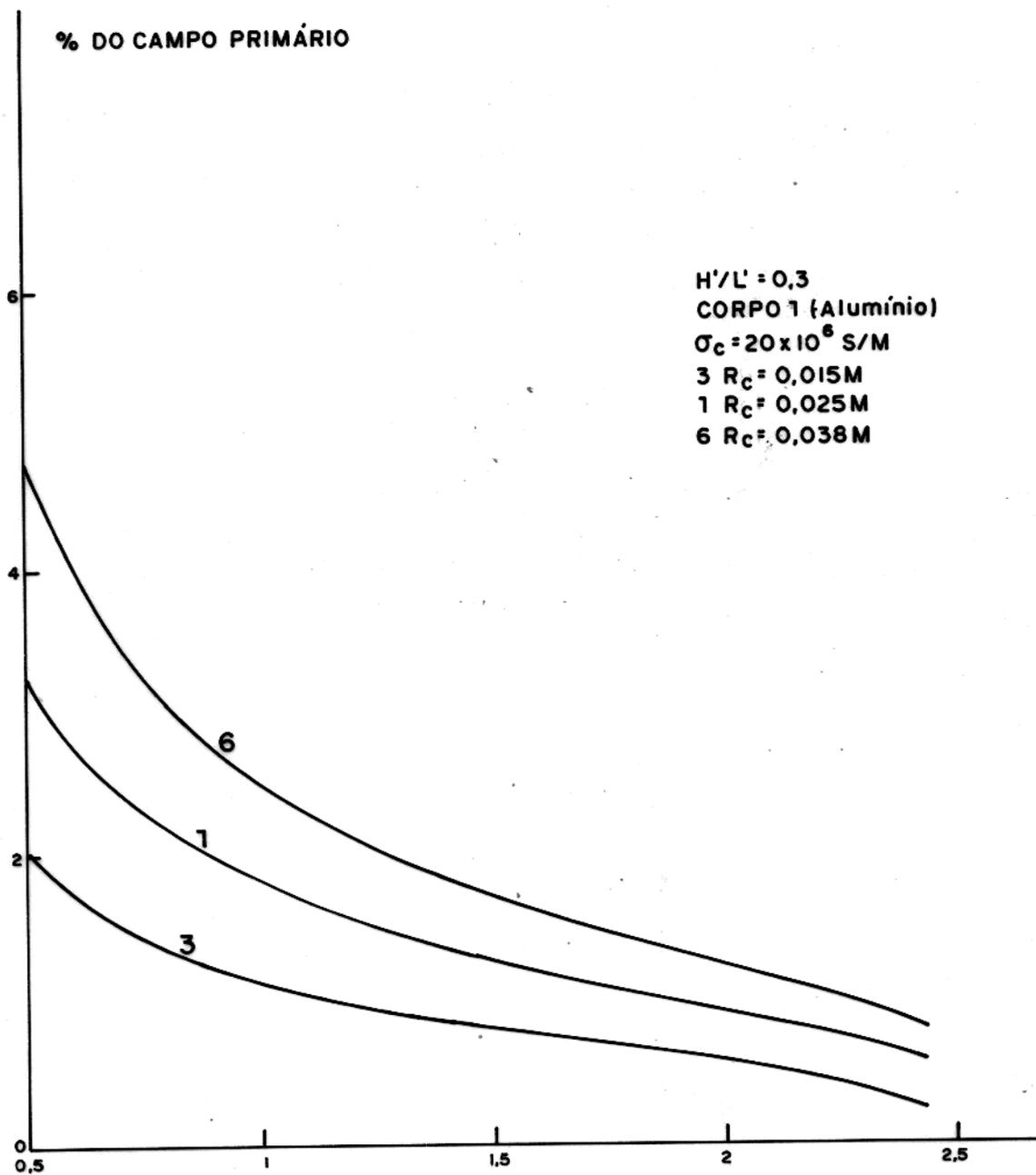


FIG. 18.- EFEITO DA MAGNITUDE DO RAIO DO CORPO NO DECAIMENTO DO CAMPO SECUNDÁRIO, EM AUSÊNCIA DO HALO.

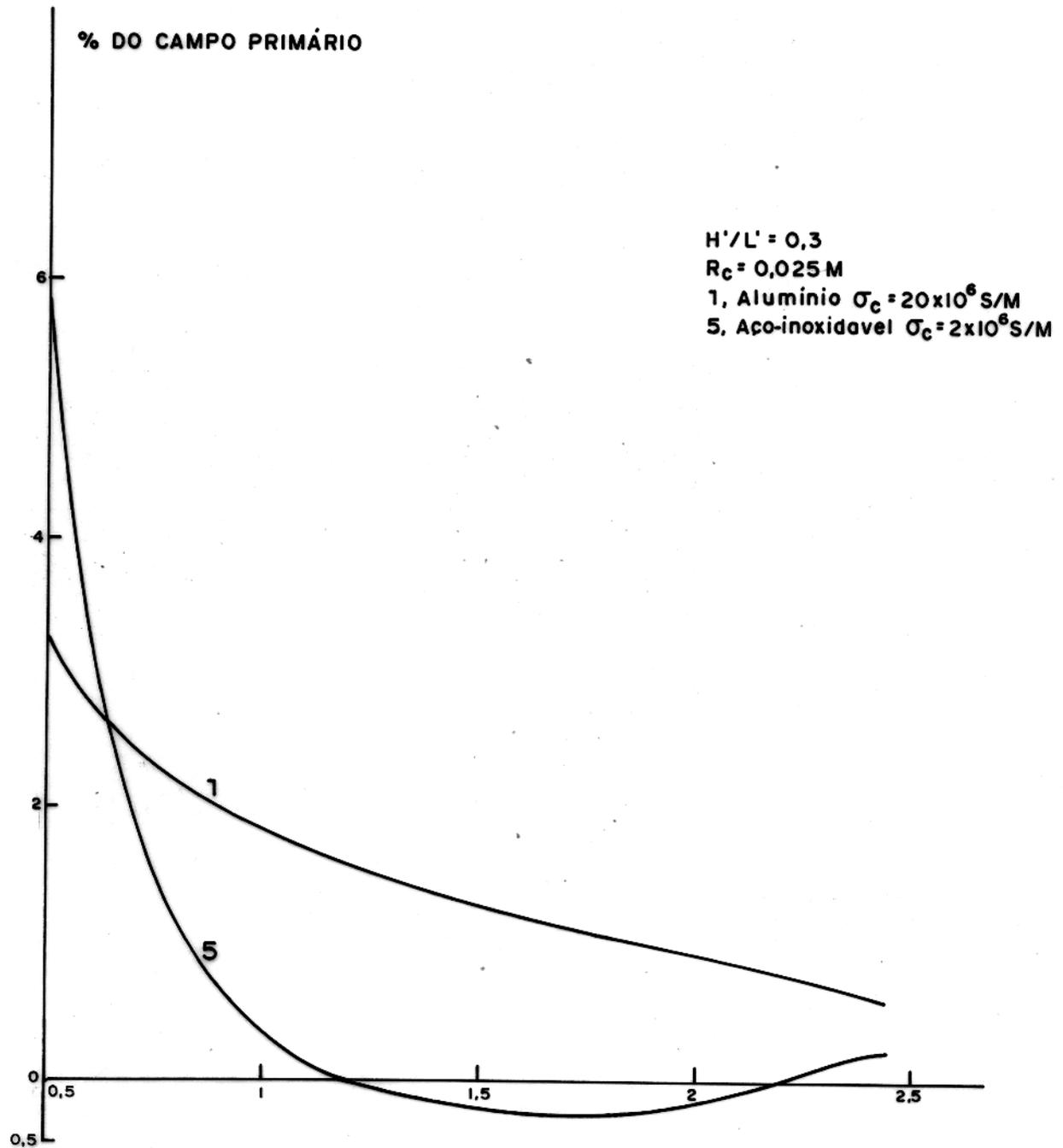


FIG.19 - EFEITO DA CONDUTIVIDADE DO CORPO NO DECAIMENTO DO CAMPO SECUNDÁRIO, EM AUSÊNCIA DO HALO.

nores que ms. Após 1,2ms a resposta sofre uma inversão do sinal do campo e.m. Para intervalos superiores a 2ms ocorre uma nova inversão do sinal.

A reversão do sinal do campo e.m. também foi observada por Marrison et al., (1969), Lee (1975 b) e Spies (1980). em meios polarizáveis.

A Fig. 20 mostra o efeito da condutância do halo no corpo 6. Na combinação A6, se observam 3 estágios no decaimento. O primeiro apresenta um decaimento rápido, devido a influência do halo, em tempos menores que 1ms. O segundo estágio entre 1ms e 2ms, com um decaimento lento devido a influência do corpo e no último em tempos maiores que 2,1ms, se observa um aumento da resposta com respeito ao corpo sem halo. O aumento da resposta no último estágio, pode-se dever ao fato de que a combinação A6, nesse intervalo, se comporta como um corpo só.

Na combinação D6, também temos a existência de 3 estágios no decaimento. Para tempos menores que 1ms. a resposta da combinação D6 decai rapidamente e é maior que a do corpo isoladamente. Isto indica que nesta faixa a influência do halo é maior. No intervalo entre 1 e 2,1ms ocorre um decaimento lento. Este intervalo mostra um ligeiro aumento do sinal o que parece indicar que halo e corpo estão influenciando a resposta. Por último, para tempos maiores que 2,1ms, a resposta da combinação D6 é influenciada pelo corpo. Negi e Verma (1972), obtiveram resultados similares aos apresentados na Fig. 20, estudando um modelo de camadas esféricas.

Comparando as respostas de A6 e D6 no domínio do tempo com as correspondentes no domínio da frequência, poder-se-ia sugerir que em ambos os casos a resposta em A6 apresenta uma melhor resolução.

O efeito de variar a condutância para corpo 1 ($R_c = 0,025m$) é analisado na Fig. 21. Na combinação A1, observa-se 2 estágios no decaimento. No primeiro, em tempos menores que 0,7ms, a resposta devida ao halo decai rapidamente. No segundo, para tempos maiores que 1ms. a resposta decai lentamente e

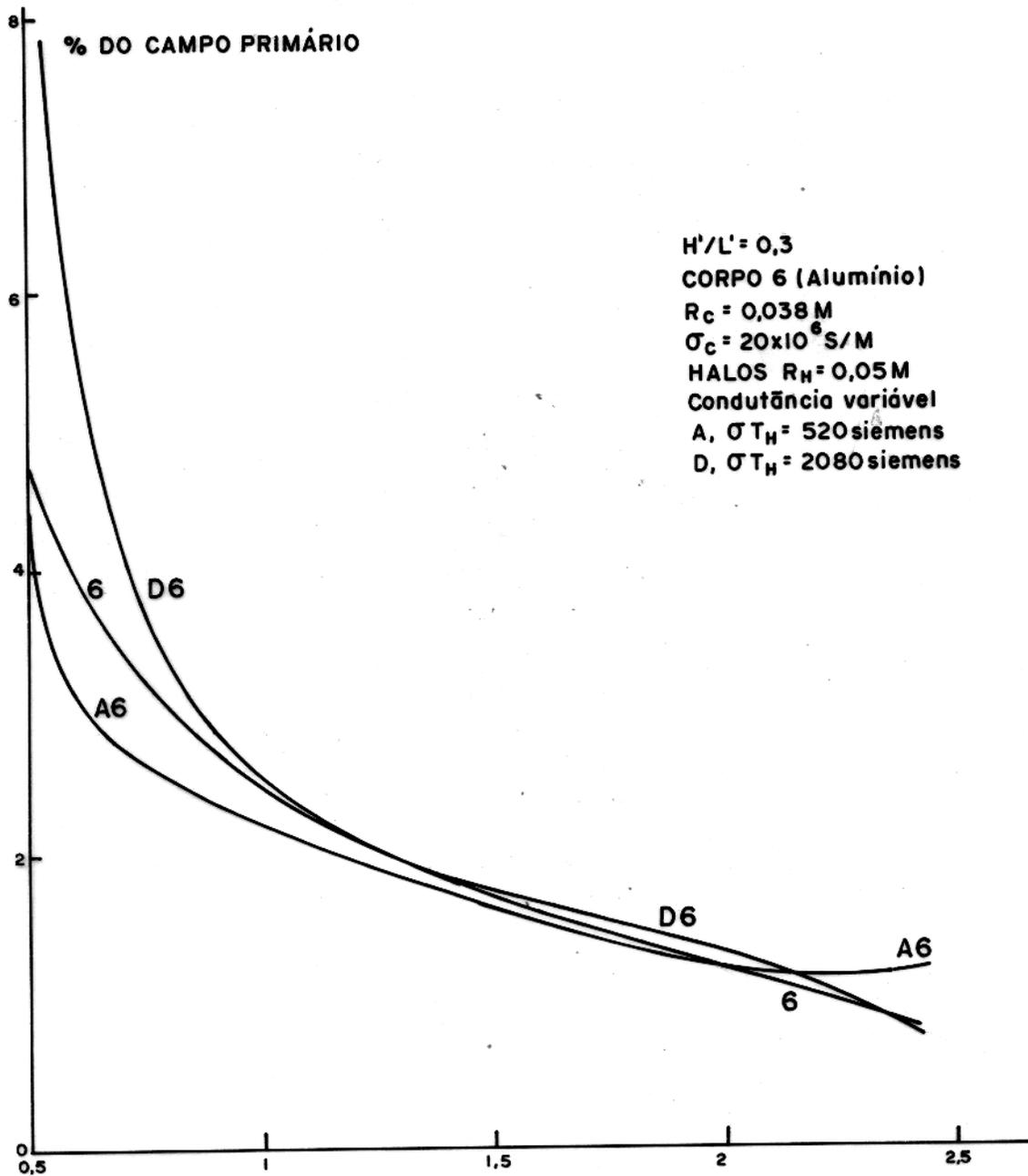


FIG. 20 - EFEITO DA CONDUTÂNCIA DO HALO PARA O CORPO 6 E $R_H/R_c = 1,3$.

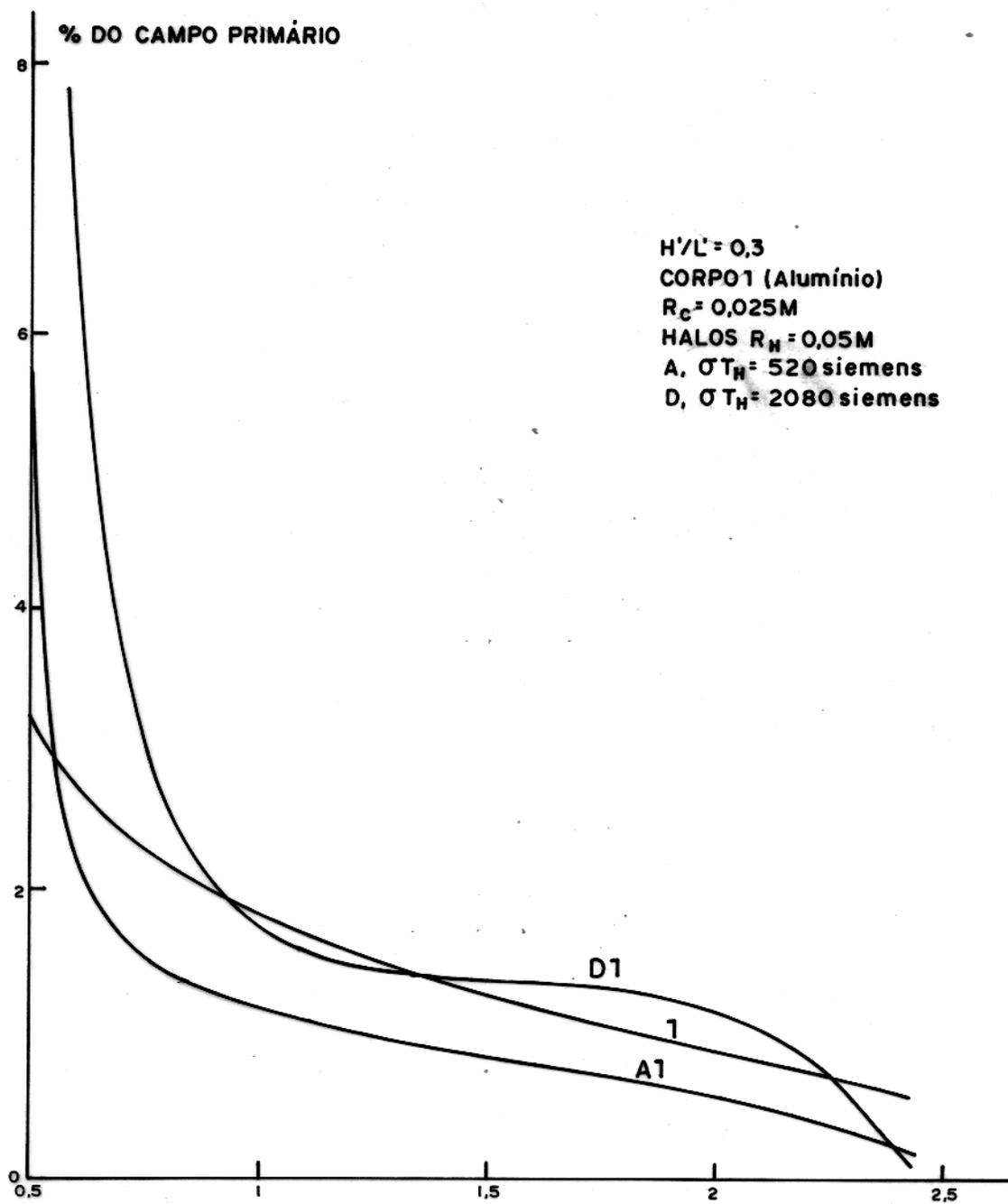


FIG. 21 - EFEITO DA CONDUTÂNCIA DO HALO PARA O CORPO 1, COM $R_H/R_C = 2$.

se observa que o halo blinda a resposta do corpo. Na combinação D1, se apresentam 3 estagios no decaimento. O primeiro o corre em tempos menores que 1ms, nele a resposta decai rapida mente e é devida a influência do halo. Entre 1,20ms e 2ms exis te uma zona de transição caracterizada por um decaimento lento e pelo aumento da resposta com respeito a do corpo sem halo. Para tempos maiores que 2ms a presença do halo tende a blindar a resposta devida ao corpo.

Os resultados da Fig. 21 sugerem que a relação entre R_H e R_C também é importante no efeito da presença do ha lo na resposta de indução de corpos cilíndricos. Tais resulta dos já foram sugeridos no princípio deste capítulo.

Para estudar a interação entre o halo e o corpo efetuou-se um análise da variação de R_H/R_C , utilizando o corpo 1. Os resultados são apresentados na Fig. 22. Comparando as combinações A1 e L1, se observa que na medida em que R_H aumen ta para um valor de condutância dada, a resposta devida ao corpo é mais atenuada. Estes resultados são compatíveis com os obtidos por Nabighian (1971) e Lee (1975 a) para um mode lo esférico.

Comparando o resultado de L1 com o de A6 na Fig. 21, pode-se inferir que quanto mais perto do corpo esti ver o halo, maior será a interação entre eles, resultando num sinal maior que a do corpo no último intervalo. Isto indica que a dissipação das correntes nesses casos é mais lenta.

Na Fig. 23. também é analisada a mudança na relação R_H/R_C para o corpo 5. Os resultados indicam que o au mento de R_H modifica o comportamento da resposta, obtendo-se uma reversão no sinal do campo e.m.v.

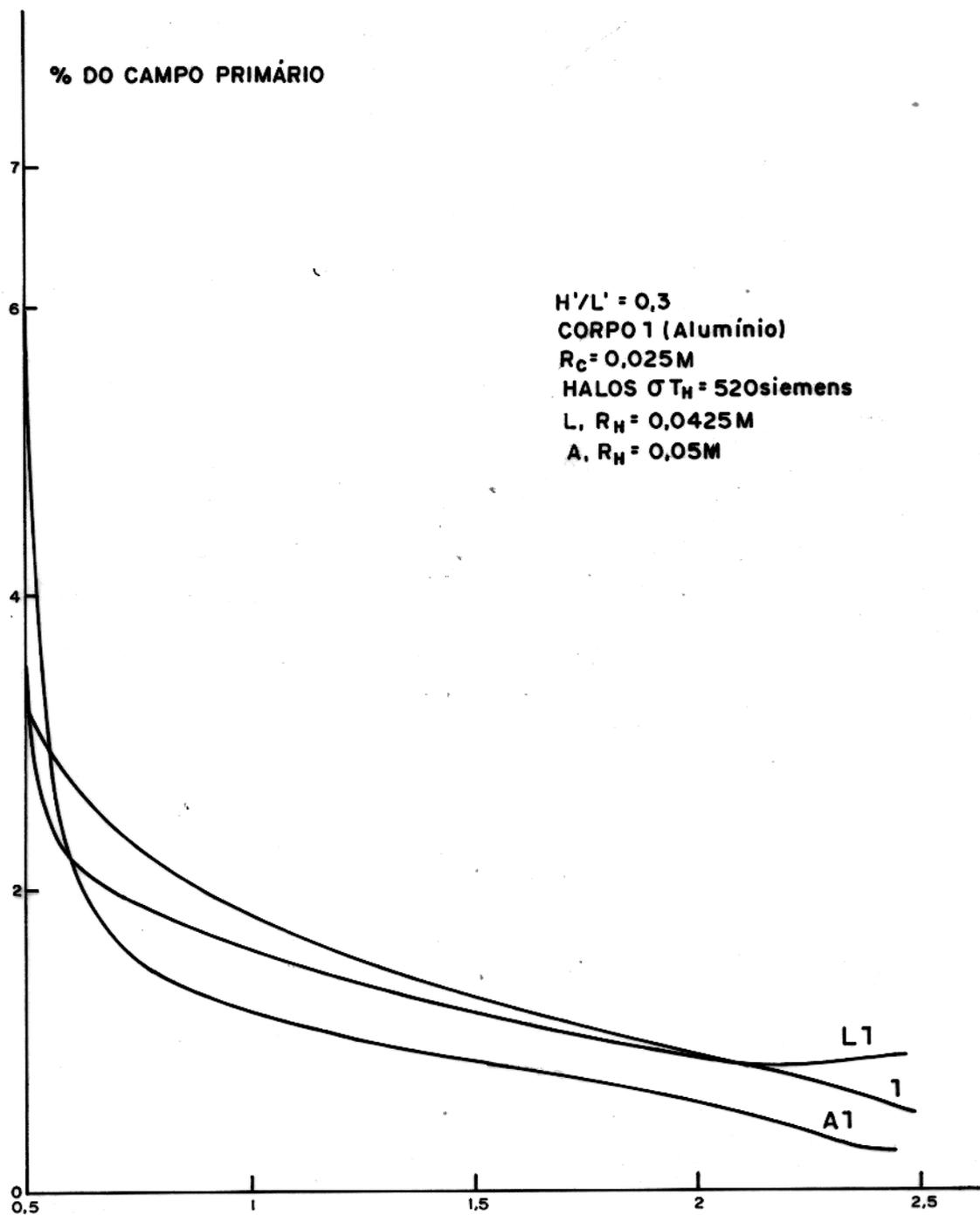


FIG. 22 - EFEITO DA VARIAÇÃO DO RAIO DO HALO PARA UMA CONDUTÂNCIA IGUAL A 520siemens E $R_c = 0,025M$.

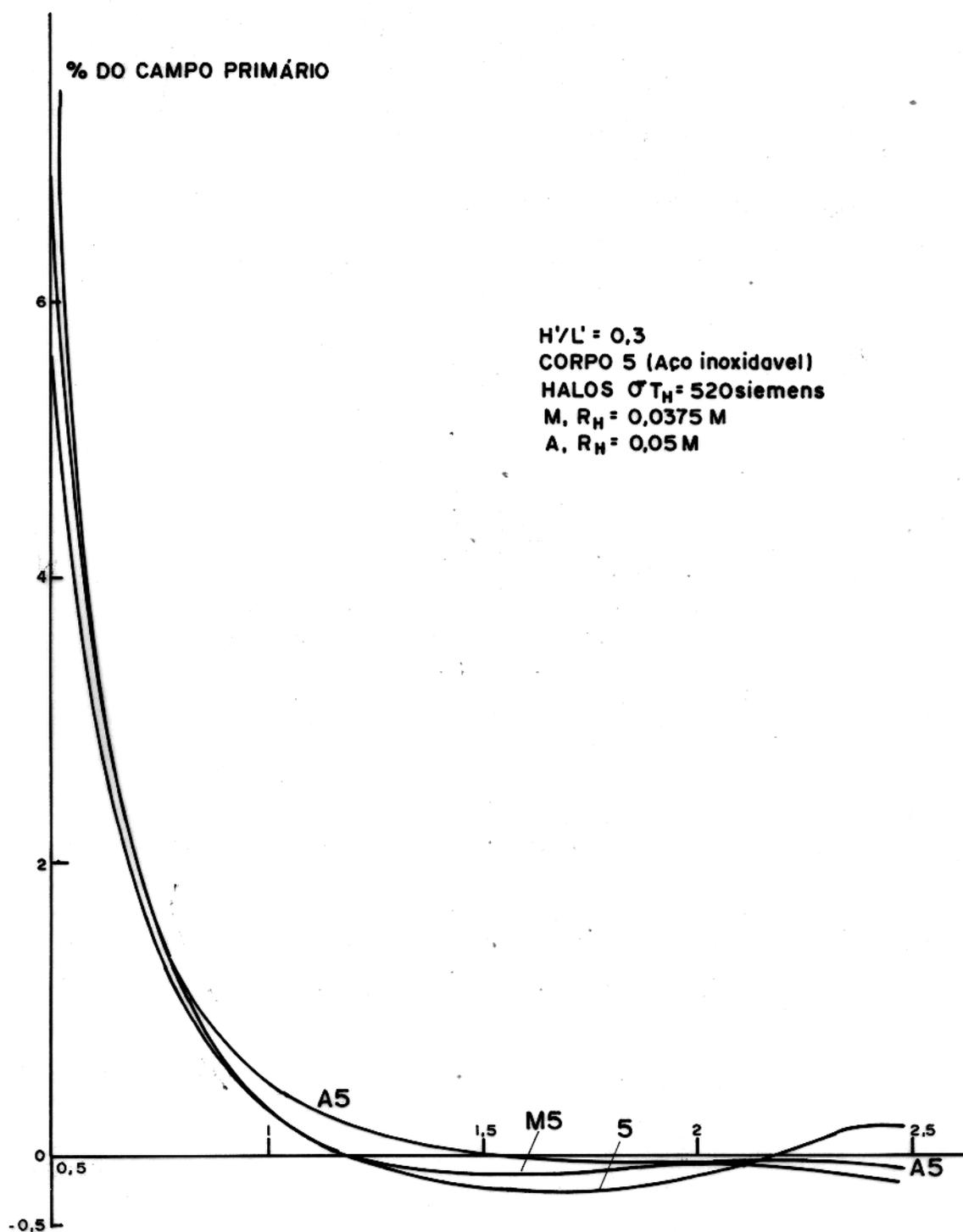


FIG. 23- EFEITO DA MUDANÇA DO RAI DO HALO SOBRE UM CORPO DE CONDUTIVIDADE MÉDIA NO DOMÍNIO DO TEMPO.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados deste estudo multifreqüência, utilizando modelamento analógico, demonstraram como uma fina camada cilíndrica e condutora, afeta a resposta eletromagnética de um corpo condutor cilíndrico, num campo de dipolo. Os mesmos sugerem que o comportamento da resposta de indução a um campo de dipolo, é similar ao observado num campo uniforme por outros autores.

O presente modelo ainda que simples, têm sido útil para estudar a influência do halo condutor, na resposta de indução de corpos condutores cilíndricos. Os resultados obtidos nos previnem do uso de técnicas de interpretação que não levem em consideração as mudanças introduzidas pela presença do halo.

No estudo dos parâmetros de respostas ficou evidente que a separação das bobinas (L') não afeta as respostas individuais do corpo e halo cilíndricos.

Devido a presença de dois picos de saturação nas respostas de combinações halo-corpo, a componente em quadratura demonstrou ser mais sensível ao efeito do halo que a componente em-fase. Estes picos se apresentam um na baixa freqüência devido a influência do corpo e outro na alta devido a influência do halo. Em razão disso, sugere-se que numa prospecção multifreqüência de sulfetos, onde se tem as condições geolétricas adequadas, a resposta de um corpo condutor, pode-se separar da devida ao halo, pelo aparecimento destes picos na quadratura. Por outro lado o aparecimento de uma saturação na componente em-fase, seguida de um rápido aumento podem ser vir de guia para a deteção destes corpos.

Da mesma maneira verificou-se que, quando ocorrem condições de condutância e raio do halo apropriadas, um corpo de condutividade média ou baixa pode aparecer mais condutor. Considerando nossos resultados experimentais, este efeito pode ser interpretado análogamente a superposição de um corpo sobre o outro, conforme sugerido por Nabighian (1971).

Num corpo de determinado raio e condutividade,

o aumento da condutância e/ou do raio (R_H) do halo diminui a influência do corpo na resposta e.m. das combinações. Fazendo difícil a separação das respostas, devido as influências individuais do corpo e halo.

Os resultados no domínio do tempo, mostram que o decaimento das respostas das combinações halo-corpo, esta caracterizado pela presença de dois estágios. O primeiro devido a influência do halo na resposta e o segundo pela devida ao corpo.

Nos casos em que a razão R_H/R_C é próxima de um, a combinação de um condutor cilíndrico com um halo de condutância baixa, pode-se comportar como se for um só condutor, produzindo uma resposta maior que a do corpo em tempos finais do decaimento.

A presença do halo condutor afeta a resposta e.m. de um corpo condutor, devido a que aumenta a superfície de condução, produzindo um aumento na magnitude das correntes. O halo introduz mudanças na fase do campo. A maior interação indutiva halo-corpo se produz quando a razão entre os raios do halo e corpo é próxima de um.

Os resultados obtidos nesta pesquisa, forneceram uma ampla visão da interação entre o corpo condutor e o meio que o rodeia. De qualquer maneira ainda existem muitos fatores a serem analisados. Por exemplo é preciso estudar o efeito do halo em contato com o corpo, e estender estas análises a meios mais complexos que incluam os efeitos simultâneos da rocha encaixante e do halo condutor ou do halo juntamente com o manto de intemperismo. Uma outra possibilidade seria o estudo de sistema rocha encaixante-halo-corpo condutor sob um manto de intemperismo condutor. É recomendável estudar com mais detalhes os efeitos do halo no domínio do tempo com objeto de construir diagramas de interpretação.

8 BIBLIOGRAFIA

- ASTEM, M.W.; VERMA, S.K. - 1978 - Short Note: Conversion of wideband ~~EM~~ frequency response to transient response using segmented transformation. *Geophysics*. 43 (1): 189-193.
- BAUMANN, L. - 1976 - Introduction to ore deposits. New York, John Wiley and Sons. 131 p.
- BECKER, A. - 1969 - Simulation of time domain, airborne, electromagnetic system response. *Geophysics*. 34 (5): 739-752.
- FRISCHKNECHT, F.C. - 1971 - Electromagnetic scale modeling. In: Wait, J.R. *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*. 36 (1): 9-24.
- GAUR, V.K. - 1959 - Model experiments simulating conditions en countered in airborne electromagnetic prospecting. Ph.D. thesis. London, University of London. 189 p.
- GOLDIE, R.; KOTILA, B.; SEWARD, D. - 1979 - The Don Rouyn Mine: An Archean porphyry copper deposit near Noranda, Quebec. *Economic Geology*. 74 (7): 1680-1684.
- GUEDES, C.D. - 1979 - Indução eletromagnética em um sistema de multi-camadas esféricas condutoras e permeáveis separadas entre si pelo vácuo. Tese de mestrado. Salvador, Universidade Federal da Bahia. 111 p.
- GUPTA, C.P.; RAVAL, U.; NEGI, J.G. - 1973 - Induced current distribution in a conductive two layer spherical body. *Geophysics*. 38 (3): 530-544.
- 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.
- HARRINGTON, R.F. - 1961 - Time-harmonic electromagnetic fields. New York, Mc-Graw Hill. 480 p.
- HEDSTRÖM, E.H.; PARASNIS, D.S. - 1958 - Some model experiments relating to electromagnetic prospecting with special reference

- to airborne work. Geophysical Prospecting. 6:322-336.
- HJELT, S. E. - 1971 - The transient electromagnetic field of a two-layer sphere. Geoexploration. 9:213-229.
- HOOKE, E. C. - 1980 - Métodos geofísicos aplicados à prospeção de cobre na serra dos Carajas-Pará. Tese de mestrado. Belém, UFFa-NCGG. 79 p.
- KAMENETSKIY, F. M.; TIMOFEEV, V. M. - 1978 - Negative electromagnetic screening. IZVESTIYA. Academy Science USSR. Physics of the Solid Earth. 14 (3): 226-230.
- LAJOIE, J. J.; WEST, G. F. - 1976 - The electromagnetic response of a conductive inhomogeneity in a layered earth. Geophysics 41(6A): 1133-1156.
- LAJOIE, J. J.; WEST, G. F. - 1977 - Short note: Two selected field examples of e.m. anomalies in a conductive environment. Geophysics. 42 (3): 655-660.
- LEE, T. - 1975 a- Transient electromagnetic response of a sphere in a layered medium. Geophysical Prospecting. 23:492-512.
- LEE, T. - 1975 b- Sign reversals in the transient method of electrical prospecting (One-loop version). Geophysical Prospecting. 23: 453-462.
- LEE, T.; LEWIS, R. - 1974 - Transient e.m. response of a large loop on a layered ground. Geophysical Prospecting. 22: 430-444.
- LORRAIN, P.; CARSON, D. R. - 1970 - Electromagnetic fields and waves. San Francisco. W. H. Freeman. 706 p.
- LOWELL, J. D.; GUILBERT, J. M. - 1970- Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore Deposits. Economic Geology. 65 (4): 373-406.
- LOWRIE, W.; WEST, G. F. - 1965- The effect of a conducting overburden on electromagnetic prospecting measurements. Geophysics. 30 (4): 624-632.
- LUIZ, J. G. - 1980- Efeitos produzidos por camadas condutoras de cobertura e rocha encaixante condutora em medidas geofísicas com métodos eletromagnéticos. Revista Brasileira de Geociências. 10:63-67.

- MALLICK, K.- 1972- Conducting sphere in electromagnetic input field. Geophysical Prospecting. 20:293-303.
- MALLICK, K.- 1973- Conducting infinite horizontal cylinder in electromagnetic input field. Geophysical Prospecting. 21: 102-108.
- MALLICK, K.; VERMA, R. K.- 1978- Time-domain electromagnetic sounding with horizontal and vertical coplanar loops on a multilayered earth. Geoprospection. 16:291-302.
- MALLICK, K.; VERMA, R. K.- 1979- Time-domain electromagnetic sounding computation of multi-layer response and the problem of equivalence in interpretation. Geophysical Prospecting. 27: 137-155.
- MCCRACKEN, K. G.- 1982- Electrical geophysics in the arid and tropical zones of Australia. In: Lourenço, J. S.; Rijo, L. Ed. Proceedings of the International Symposium on Applied Geophysics in Tropical Regions. Belém, 1-8 set. p.87-109.
- MISHRA, D. C.; MURTHY, K.S.R.; NARAIN, H.- 1978- Interpretation of time-domain airborne electromagnetic (Input) anomalies. Geoprospection. 16:203-222.
- MORRISON, H. F.; PHILLIPS, R. J.; O'BRIEN, D. P.- 1969- Quantitative interpretation of transient electromagnetic fields over a layered half-space. Geophysical Prospecting. 17:82-108.
- NABIGHIAN, M. N.- 1971- Quasi-static transient response of a conducting permeable two-layer sphere in a dipolar field. Geophysics. 36 (1): 25-37.
- NABIGHIAN, M. N.- 1982- A review of time-domain electromagnetic exploration. In: Lourenço, J. S.; Rijo, L. Ed. Proceedings of the International Symposium on Applied Geophysics in Tropical Regions. Belém, 1-8 set. p.385-429.
- NAGENDRA, R.; RAMAPRASADA RAO, I. B.; BHIMASANKARAN, V. L. S.- 1980- Influence of a conducting shield in the one-loop version of the transient pulse induction method. Geophysical Prospecting. 28:269-282.

- 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.- 1968- Models in applied geo-electromagnetics. *Earth-Science Reviews*. 4:219-241.
- NEGI, J.; GUPTA, C. P.; RAVAL, U.- 1972 a- Induction anomaly due to an elongated covered ore-zone excited by a long current carrying cable. *Geophysical Prospecting*. 20:193-211.
- NEGI, J. G.; GUPTA, C. P.; RAVAL, U.- 1972 b- Turam response of a permeable inhomogeneous cylindrical conductor surrounded by a thin shell. *Pure and Applied Geophysics*. 97 (5):137-145.
- NEGI, J. G.; GUPTA, C. P.; RAVAL, U.- 1973- Electromagnetic response of a permeable inhomogeneous conducting sphere. *Geophysical Prospecting*. 11:120.
- 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.
- NELSON, P. H.- 1973- Model results and field checks for a time-domain, airborne e.m. system. *Geophysics*. 38 (5):845-853.
- NELSON, P. H.; MORRIS, D. B.- 1969- Theoretical response of a time-domain airborne electromagnetic system. *Geophysics*. 34 (5): 729-738.
- PALACKY, G. J.- 1975- Interpretation of input AEM measurements in areas of conductive overburden. *Geophysics*. 40 (3):490-502.
- PALACKY, G. J.- 1976- Use of decay patterns for the classification of anomalies in time-domain AEM measurements. *Geophysics*. 41 (5): 1031-1041.
- PALACKY, G. J.- 1982- Electromagnetic prospecting in tropical regions. In: Lourenço, J. S.; Rijo, L. Ed. *Proceedings of*

- the International Symposium on Applied Geophysics in Tropical Regions. Belém, 1-8 set. p. 173-207.
- PALACKY, G. J.; KADEKARU, K.- 1978- Efeito do intemperismo tropical nos levantamentos eletromagnéticos. In: Congresso Brasileiro de Geologia. 30, Recife. Sociedade Brasileira de Geologia. v. 5, p. 2323-2330.
- PALACKY, G. J.; KADEKARU, K.- 1979- Effect of tropical weathering on electrical and electromagnetic measurements. Geophysics. 44: 69-88.
- PALACKY, G. J.; WEST, G. F.- 1973- Quantitative interpretation of input AEM measurements. Geophysics. 30 (6):1145-1158.
- PARASNIS, D. S.- 1956- The electrical resistivity of some sulphide and oxide minerals and their ore. Geophysical Prospecting, 4:249-278.
- PARASNIS, D. S.- 1971- Analysis of some multi-frequency, multi separation electromagnetic surveys. Geophysical Prospecting. 19 (2): 163-179.
- PARCK, C. F.; MAC DIARMID, R. A.- 1975- Ore deposits. San Francisco, W. H. Freeman. 522 p.
- PATRA, H. P.; MALLICK, K.- 1980- Geosounding principles, 2. Time-varying geoelectric soundings. Amsterdam, Elsevier. 419 p.
- PODDAR, M.- 1975- Some experimental studies on the effect of a screen on the electromagnetic response of a cylinder. Geop exploration. 13: 57-67.
- PODDAR, M.- 1981- Multifrequency turam measurements over a sulfide deposit. Geophysics. 46 (9): 1269-1277.
- PODDAR, M.; BHATTACHARYA, P. K.- 1966- On the electromagnetic response of conductors in the inductive method of prospecting (Model Studies). Geophysical Prospecting. 14 (4): 470-486.
- PODDAR, M.; LAHIRI, A. K.; DEB, B. K.- 1976- Electromagnetic response of a broken ore-vein (Model Studies). Geophysical Prospecting. 24: 255-264.

- PRESTON, B. C.- 1975--Review-difficulties for the electromagnetic method in Australia. *Geoexploration*. 13: 29-43.
- PRESTON, B. C.- 1977- The electromagnetic response of a conducting cylinder in the presence of a thin conducting concentric shell. *Geoexploration*. 15: 99-110.
- PRIDMORE, D. F.; WARD, S. H.; MOTTER, J. W.- 1979- Broadband electromagnetic measurements over a massive prospect. *Geophysics*. 44 (10): 1677-1699.
- RAMAPRASADA RAD, I. B.; BHIMASANKARAN, V. L. S.- 1973- Electromagnetic modelling of asheet-like bodies by the combined-loop version of the transient pulse induction method. *Geoexploration*. 11: 87-95.
- ROSE, A. W.- 1970- Zonal relations of wallrock alteration and sulfide distribution at porphyry copper deposits. *Economic Geology*. 65 (8): 920-936.
- ROY, A.- 1970- On the effect of overburden on electromagnetic anomalies-A review. *Geophysics*. 35 (4): 646-659.
- SILVA, L. M.- 1981- Efeitos do manto de intemperismo sobre anomalias electromagnéticas provocadas por corpos tabulares inclinados; -um estudo através de modelamento reduzido. Tese de mestrado. Belém, UFPa-NCGG. 115 p.
- SILVA, L. M.; VERMA, O. P.- 1982- The effect of a conductive overburden on ^{e.m.} response of tilted conductive half planes. Apresentado em: International Symposium on Applied Geophysics in Tropical Regions. Belém-Brazil, set. 1-8.
- SINCLAIR, G.- 1948- Theory of models of electromagnetic systems. *Proc. I.R.E.* 36: 1364-1370.
- SPIES, B. R.- 1975- The dual loop configuration of the transient electromagnetic method. *Geoexploration*. 40 (6): 1051-1057.
- SPIES, B. R.- 1976- The derivation of absolute units in electromagnetic scale modeling. *Geophysics*. 41 (5): 1042-1047.
- SPIES, B. R.- 1980- A field occurrence of sign reversals with the transient electromagnetic method. *Geophysical Pros*

- pecting. 28: 620-632.
- STRATTON, J. A.- 1941- Electromagnetic theory. New York, McGraw Hill. 615 p.
- TATSUMI, T.; SEKINE, Y.; KANEHIRA, K.- 1970- Mineral deposits of volcanic affinity in Japan: Metallogeny. In: Tatsumi, T. Volcanism and ore genesis. Tokyo, University of Tokyo press. p. 3-47.
- TSUBOTA, K.; WAIT, J. R.- 1980- The frequency and the time-domain response of a buried axial conductor. Geophysics. 45 (5): 941-951.
- VERMA, P. O.- 1972- Electromagnetic model experiments simulating conditions encountered in geophysical prospecting. Ph.D. Thesis. Roorkee, University of Roorkee, India. 143 p.
- VERMA, D. P.- 1981- Electromagnetic response of fold models in a uniform field. Geophysical Prospecting. 29: 451-461.
- VERMA, D. P.; GAUR, V. K.- 1975- Transformation of electromagnetic anomalies brought about by a conducting host rock. Geophysics. 40 (3): 473-489.
- VERMA, S. K.- 1975- Resolution of response due to conductive overburden and orebody through time-domain electromagnetic measurements. -A field example. Geophysical Prospecting. 23: 292-299.
- VILLEGAS-GARCIA, C. J.; WEST, G. F.- 1983- Recognition of electromagnetic overburden anomalies with horizontal loop electromagnetic survey data. Geophysics. 48 (1): 42-51.
- WAIT, J. R.- 1969- Electromagnetic induction in a solid conducting sphere enclosed by a thin conducting spherical shell. Geophysics. 34 (5): 753-759.
- WARD, S. H.- 1959- Unique determination of conductivity, susceptibility, size, and depth in multifrequency electromagnetic exploration. Geophysics. 24 (3): 531- 546.
- WARD, S. H.- 1966- The search for massive sulfides: Introduction In: Mining geophysics. Tulsa, S.E.G. v. 1, p. 117-129.

- WARD, S. H.- 1967- The electromagnetic method. In: Mining Geophysics. Tulsa, S.E.G. v. 2, p. 224-372.
- WARD, S. H.- 1971- Foreword and introduction. Geophysics. 36 (1): 1-8.
- WARD, S. H.- 1982- State of the art and perspective for mining geophysics. In: Lourenço, J. S.; Rijo, L. Ed. Proceedings of the International Symposium on Applied Geophysics in Tropical Regions. Belém, 1-8 set. p.3-86.
- WARD, S. H.; PRIDMORE, D. F.; RIJO, L.; GLENN, E. E.- 1974 a- Multispectral Electromagnetic Exploration for sulfides. Geophysics. 39 (5): 666-682.
- WARD, S. H.; RYU, J.; GLENN, W. E.; HOHMANN, G. W.; DEY, A.; SMITH, B. D.- 1974 b- Electromagnetic methods in conductive terranes. Geoexploration. 12: 121-183.
- WON, I. J.- 1980- A wide band electromagnetic exploration method-some theoretical and experimental results. Geophysics. 45 (5): 928-940.
- WON, I. J.; KUO, J. T.- 1975 a- Representation theorems for multiregional electrodynamic diffraction: Part I. Theory. Geophysics. 40 (1): 106- 109.
- WON, I. J.; KUO, J. T.- 1975 b- Representation theorems for multiregional electrodynamic diffraction: Part II. Applications. Geophysics. 40 (1): 109- 115.

Apêndice 1:

Coeficiente dos polinômios das curvas ajustadas

Polinômio ajustado: $aX^0 + bX^1 + cX^2 + dX^3 + eX^4 + fX^5 + \dots$

Curvas da componente EM-FASE;

 $H'/L' = 0,3$

DENOMINAÇÃO	GRAU DO POLINOMIO	a	b	c	d	e
1	4	-1,56	2,85	-1,10	0,19	-0,01
2	4	-6,17	7,66	-3,07	0,55	-0,04
4	3	-92,72	61,29	-13,39	0,98	-----
5	3	-11,97	9,19	-2,14	0,17	-----
6	3	0,79	0,61	-0,15	0,01	-----
A	2	-13,03	6,61	-0,73	-----	-----
B	3	-21,53	15,17	-3,28	0,24	-----
D	4	14,46	-23,37	12,54	-2,67	0,20
H	4	61,21	-76,18	33,45	-6,20	0,42
J	3	-25,93	18,92	-4,32	0,33	-----
L	3	-29,24	17,21	-3,07	0,17	-----
M	3	-31,26	17,91	-3,11	0,17	-----
A1	4	-5,64	9,08	-4,55	1,00	-0,08
A2	4	-1,09	4,00	-2,73	0,75	-0,07
A6	4	-3,24	6,01	-2,79	0,56	-0,04
B6	4	-3,25	6,28	-3,06	0,65	-0,05
D6	4	0,96	0,83	-0,52	,15	-0,01
H4	4	20,39	-32,49	16,22	-3,22	0,22
H5	4	-25,17	25,03	-9,15	1,53	-0,10
J4	3	-22,06	15,97	-3,58	0,27	-----
J5	4	-15,62	13,69	-4,09	0,55	-0,03
L1	4	-8,44	12,28	-5,77	1,18	-0,09
M1	4	-6,61	9,62	-4,37	0,86	-0,06
M4	3	-14,12	7,27	-0,91	0,02	-----
M5	4	-58,91	62,35	-24,41	4,26	-0,28
$H'/L' = 0,4$						
6	2	1,08	0,15	-0,02	-----	-----
A6	4	-4,34	7,07	-3,25	0,65	-0,05

Curvas da componente Quadratura

H'/L'=0,3		GRAU DO					
DENOMINAÇÃO	POLINOMIO	a	b	c	d	e	f
1	3	0,24	1,18	-0,60	0,07	----	----
2	3	-1,05	1,92	-0,70	0,07	----	----
4	4	108,98	-119,90	48,24	-8,40	0,54	----
5	4	-22,30	24,42	-9,47	1,61	-0,10	----
6	2	1,41	-0,14	-0,06	-----	----	----
A	4	6,83	-10,15	4,97	-0,90	0,05	----
B	4	4,55	-8,68	5,17	-1,12	0,08	----
D	4	6,48	-11,04	6,61	-1,51	0,12	----
H	4	4,14	-8,90	5,16	-1,06	0,07	----
J	4	15,98	-23,63	12,36	-2,62	0,19	----
L	4	6,96	-11,02	5,37	-0,96	0,06	----
M	5	-21,61	30,15	-18,21	5,69	-0,87	0,05
A1	5	-0,12	8,22	-9,59	4,22	-0,79	0,05
A2	4	16,31	-18,16	7,30	-1,17	0,06	----
A6	4	1,74	1,74	-2,28	0,77	-0,08	----
B6	5	-25,66	48,38	-33,53	11,04	-1,73	0,10
D6	5	-9,62	22,94	-18,42	6,91	-1,22	0,08
H4	4	8,61	-14,36	7,72	-1,59	0,11	----
J4	5	37,50	-61,84	38,34	-11,12	1,54	-0,08
J5	4	1,54	-3,67	2,69	-0,65	0,05	----
L1	4	2,29	0,89	-1,95	0,71	-0,08	----
M1	4	-3,31	7,99	-5,15	1,30	-0,12	----
M4	4	12,22	-17,45	8,33	-1,57	0,10	----

H'/L'=0,4

6	2	2,31	-0,95	0,09	----	----	----
A6	4	-4,24	9,32	-5,87	1,49	-0,13	----