

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

EFEITOS DO MANTO DE INTEMPERISMO SOBRE ANOMALIAS ELETROMAGNÉTICAS PROVOCADAS

POR CORPOS TABULARES INCLINADOS

- UM ESTUDO ATRAVÉS DE MODELAMENTO REDUZIDO -

Tese Apresentada por

LÚCIA MARIA DA COSTA E SILVA

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: 18.09.1981

*Om Prakash Verma*  
OM PRAKASH VERMA (ORIENTADOR)  
*Moyses Bentes*  
MOYSÉS BENTES  
*Jürgen H. Bischoff*  
JÜRGEN H. BISCHOFF

Comitê de Tese

I S.586 Silva, Lúcia Maria da Costa e

Efeitos do Manto de Intemperismo sobre Anomalias Eletromagnéticas provocadas por Corpos Tabulares Inclinados; - Um Estudo através de Modelamento Reduzido. Belém - UFPa/NCGG, 1981.

115 p.

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

1. Geofísica. 2. Manto de Intemperismo. 3. Modelamento Reduzido. 4. Bobinas Horizontais - Slingram. 5. Diagramas de Interpretação e.m. para Corpos Condutivos do Tipo Tabular inclinado. I. UFPa/NCGG. II. Título.

À minha queridíssima mãe.

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Om Prakash Verma (NCGG/UFPa) pela prestimosa ori entação dada durante o desenvolvimento desta tese.

Ao Dr. Jürgen Bischoff (Convênio GTZ/UFPa) pelo apoio, críticas e discussões valiosas.

Aos Geofísicos Brígida Ramati (NCGG/UFPa), co-orientado- ra deste trabalho, e Moyses Bentes (CPRM/RJ) pelas sugestões ofe- recidas.

Ao Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas da Univer- sidade Federal do Pará (NCGG/UFPa) pela infraestrutura colocada a meu dispor, sem a qual seria impossível a realização do pre sente estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tec- nológico (CNPq) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo suporte financeiro dado à esta pesquisa.

Ao Programa Nuclear (PRONUCLEAR) pela bolsa de estudo con cedido no período 03.79 a 07.81.

Ao Netuno Villas, pela revisão do texto, à minha mãe Sra. Dorothy da Costa e Silva, pela organização da 1a. versão desta tese, e a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA		Pág.
1	Seção geológica esquemática de corpo de sulfetos maciços possíveis de ser encontrado na natureza e que constituem problemas de exploração e.m. típico.	6
2	(a) e (b) Adição dos vetores campos primário e secundário. (c) Polarização elíptica.	21
3	(a) Circuito das três espiras. (b) Partes real e imaginária da função $f(Q)$ .	24
4	Sistemas básicos de orientação das bobinas para levantamentos e.m. com exemplos de arranjos utilizados para os mesmos.	34
5	Frequência das condutâncias obtidas para vários depósitos de sulfetos. (a) Distribuição total. (b) Distribuição no intervalo de 0 a 60 S	41
6	Bloco diagrama dos sistemas de energização e recepção.	47
7	Croqui da situação modelada.	52
8	Variação dos valores pico-a-pico para corpos verticais, obtidos com calibrações sobre o manto e na ausência do manto com (a) $h_c/\ell$ e (b) $\alpha_m$ e $\alpha_c$ .	54
9	Perfil típico sobre um semi-plano inclinado ( $\theta=60^\circ$ , $\alpha_c=13,91$ , $h_c/\ell=0,2$ e $\alpha_m=0$ ).	59
10	Deslocamento da base dos perfis devido à presença do manto. (a) Perfis da em-fase. (b) Perfis das quadratura.	61
11	Reversão da quadratura gerada pela presença do manto, (a) $\alpha_m = 0$ . (b) $\alpha_m = 1,00$ .	62

## FIGURA

Pág.

12. Aparecimento de um pico extra na quadratura devido à presença do manto e ao aumento de  $\alpha_c$ .  
 (a)  $\alpha_m = 0$ . (b)  $\alpha_m = 0,50$ . 62
13. Mascaramento da reversão pelo pico extra da quadratura.  
 (a) e (a<sub>1</sub>) Quadratura não reversa. 63  
 (b) e (b<sub>1</sub>) Quadratura reversa.
14. Variação dos valores pico-a-pico das componentes com o parâmetro de resposta para  $\theta = 90^0$ . 64
15. Variação dos valores pico-a-pico das componentes com o parâmetro de resposta para  $\theta = 75^0$ . 65
16. Variação dos valores pico-a-pico das componentes com o parâmetro de resposta para  $\theta = 60^0$ . 66
17. Variação dos valores pico-a-pico das componentes com o parâmetro de resposta para  $\theta = 45^0$ . 66
18. Variação dos valores pico-a-pico das componentes com o parâmetro de resposta para  $\theta = 30^0$ . 67
19. Redução da amplitude da anomalia com o aumento da profundidade. 69  
 (a)  $\alpha_c = 13,91$  e  $\alpha_m = 0$ ; (a<sub>1</sub>)  $\alpha_c = 13,91$  e  $\alpha_m = 1,00$   
 (b)  $\alpha_c = 29,66$  e  $\alpha_m = 0$ ; (b<sub>1</sub>)  $\alpha_c = 29,66$  e  $\alpha_m = 1,00$
20. Mudança da resposta com a variação do mergulho para um condutor "fraco" ( $\alpha_c = 3,19$ ). 70  
 (a) e (a<sub>1</sub>) Perfis da em-fase  
 (b) e (b<sub>1</sub>) Perfis da quadratura
21. Mudança da resposta com a variação do mergulho para um condutor "moderado" ( $\alpha_c = 8,24$ ). 71  
 (a) e (a<sub>1</sub>) Perfis da em-fase  
 (b) e (b<sub>1</sub>) Perfis da quadratura
22. Mudança da resposta com a variação do mergulho para um condutor "bom" ( $\alpha_c = 29,66$ ). 72  
 (a) e (a<sub>1</sub>) Perfis da em-fase  
 (b) e (b<sub>1</sub>) Perfis da quadratura

FIGURA		Pág.
23	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\alpha_m = 0,25$ e $\theta = 90^0$ .	75
24	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\alpha_m = 0,50$ e $\theta = 90^0$ .	76
25	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para $\alpha_m = 1,00$ e $\theta = 90^0$ .	77
26	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para o lado a favor do mergulho para $\alpha_m = 0,25$ e $\theta = 75^0$ .	78
27	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para o lado a favor do mergulho para $\alpha_m = 0,50$ e $\theta = 75^0$ .	79
28	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para o lado a favor do mergulho para $\alpha_m = 1,00$ e $\theta = 75^0$ .	80
29	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para $\alpha_m = 0,25$ e $\theta = 75^0$ .	81
30	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para $\alpha_m = 0,50$ e $\theta = 75^0$ .	82
31	Diagrama de Argand construídos com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para $\alpha_m = 1,00$ e $\theta = 75^0$ .	83
32	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para $\alpha_m = 0,25$ e $\theta = 60^0$ .	84
33	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para $\alpha_m = 0,50$ e $\theta = 60^0$ .	85
34	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para $\alpha_m = 1,00$ e $\theta = 60^0$ .	86

35	Diagrama de Argand construído com valores a-pico do lado contrário ao mergulho para $\alpha_m = 0,25$ e $\theta = 60^0$ .	pico-	87
36	Diagrama de Argand construído com valores a-pico do lado contrário ao mergulho para $\alpha_m = 0,50$ e $\theta = 60^0$ .	para	88
37	Diagrama de Argand construído com valores a-pico do lado contrário ao mergulho para $\alpha_m = 1,00$ e $\theta = 60^0$ .	pico-	89
38	Diagrama de Argand construído com valores a-pico do lado a favor do mergulho para $\alpha_m = 0,25$ e $\theta = 45^0$ .	para	90
39	Diagrama de Argand construído com valores a-pico do lado a favor do mergulho para $\alpha_m = 0,50$ e $\theta = 45^0$ .	pico-	91
40	Diagrama de Argand construído com valores a-pico do lado a favor do mergulho para $\alpha_m = 1,00$ e $\theta = 45^0$ .	para	92
41	Diagrama de Argand construído com valores a-pico do lado contrário ao mergulho para $\alpha_m = 0,25$ e $\theta = 45^0$ .	pico-	93
42	Diagrama de Argand construído com valores a-pico do lado contrário ao mergulho para $\alpha_m = 0,50$ e $\theta = 45^0$ .	para	94
43	Diagrama de Argand construído com valores a-pico do lado contrário ao mergulho para $\alpha_m = 1,00$ e $\theta = 45^0$ .	pico-	95
44	Diagrama de Argand construído com valores a-pico do lado a favor do mergulho para $\alpha_m = 0,25$ e $\theta = 30^0$ .	para	96
45	Diagrama de Argand construído com valores a-pico do lado a favor do mergulho para $\alpha_m = 0,50$ e $\theta = 30^0$ .	pico-	97

FIGURA	Pág.
46	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para $\alpha_m = 1,00$ e $\theta = 30^0$ . 98
47	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para $\alpha_m = 0,25$ e $\theta = 30^0$ . 99
48	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para $\alpha_m = 0,50$ e $\theta = 30^0$ . 100
49	Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para $\alpha_m = 1,00$ e $\theta = 30^0$ . 101
50	Ilustração do procedimento para determinação dos parâmetros de um semiplano. (a) Perfil exemplo. (b) e (c) Respectivamente, gráficos $\theta \times h_c / \ell$ e $\theta \times \alpha_c$ construídos com os valores obtidos nos diagramas de $\alpha_m = 0,50$ . 103
51	Respostas obtidas para o manto 108
52	(a) Perfis de campo sobre corpos de sulfetos ca- peado por manto de intemperismo. (b) Migração observada e teórica dos valores do pico negativo. 109

## TABELA

1	Espessuras e condutividades das folhas metálicas utilizadas na simulação 44
2	Frequências e combinação utilizadas entre as folhas com os parâmetros de resposta obtidas para o manto e o corpo. 45
3	Parâmetros do corpo extraídos dos diagramas para $\alpha_m = 0,50$ . 104

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{A}$	Vetor potencial magnético
a	Fator de escala para a intensidade do campo elétrico
$\vec{B}$	Indução magnética
b	Fator de escala para a intensidade do campo magnético
C	Condutor, corpo condutivo
C	(subscrito) Condutor, corpo condutivo
$\vec{D}$	Deslocamento ou indução elétrica
DI	Deslocamento lateral do pico negativo da em-fase
DQ	Deslocamento lateral do pico negativo da quadratura
$d\vec{v}$	Vetor elemento do volume v
$\vec{E}$	Intensidade do campo elétrico
$\vec{F}$	Vetor qualquer
F	Grandeza qualquer
f	Frequência
f(Q)	Função resposta do circuito subterrâneo
g	Fator de escala para o tempo
$\vec{H}$	Intensidade do campo magnético
h	Profundidade
I	Corrente elétrica
i	Constante, $\sqrt{-1}$
$\vec{J}$	Densidade de corrente elétrica induzida
K	Constante de propagação
$K_{FN}$	Coefficiente de acoplamento entre F e N
$K_i$	Constante de atenuação
$K_r$	Constante de fase
$L_N$	Indutância
L	Auto-indutância de uma bobina N
L	Dimensão linear característica do sistema real
L	Linha que passa por T e R
$L_1, L_2, L_3$	Cossenos diretores da linha que passa por T e R
$\ell$	Distância entre as bobinas T e R
$M_{FN}$	Indutância mútua entre F e N
m	(subscrito) Manto de intemperismo
N	Grandeza qualquer
$\vec{P}$	Campo e.m. primário
P	Ponto de coordenadas (x,y,z) do sistema real
Q	Fator de qualidade (ou parâmetro de resposta do cir

	cuito subterrâneo)
q	Densidade de carga livre
$\vec{R}$	Campo e.m. resultante
R	Receptor ou bobina receptora
R	(subscrito) Receptor ou bobina receptora
R	Dipolo gerado na bobina receptora
$R_1, R_2, R_3$	Cossenos diretores do dipolo gerado na bobina receptora
R	Resistência do condutor
r	Módulo do vetor $\vec{r}$
$\vec{S}$	Campo e.m. secundário
T	Transmissor ou bobina transmissora
T	(subscrito) Transmissor ou bobina transmissora
T	Dipolo gerado na bobina transmissora
$T_1, T_2, T_3$	Cossenos diretores do dipolo gerado na bobina transmissora
t	Tempo
$\tau$	Espessura
$U_F^N$	F.e.m. induzida em F por N
$U_R^C/U_R^T$	Resposta do sistema ou intensidade da anomalia
v	Volume definido por $\vec{r}$
v	(subscrito) vácuo
w	Frequência angular
x	Coordenada do ponto P tomada na direção do eixo dos x
x	(subscrito) componente de um dado vetor na direção do eixo dos x
Y	Soma das intensidades das componentes dos vetores campo primário $\vec{P}$ e campo secundário $\vec{S}$ na direção do eixo dos y.
y	Coordenada do ponto P tomada na direção do eixo dos y
y	(subscrito) Componente de um dado vetor na direção do eixo dos y
Z	Soma das intensidades das componentes dos vetores campo primário $\vec{P}$ e campo secundário $\vec{S}$ na direção do eixo dos z
Z	Impedância do condutor
z	Coordenada do ponto P tomada na direção do eixo dos z

$\alpha$	Número de indução (ou parâmetro de resposta)
$\beta$	Ângulo que o eixo maior da elipse de polarização faz com o eixo dos z
$\gamma$	Diferença de fase entre as componentes do vetor <u>re</u> sultante
$\delta$	Profundidade de "penetração" ("skin depth")
$\epsilon$	Capacititividade dielétrica (ou permissividade <u>elé</u> trica)
$\theta$	Mergulho do corpo condutivo
$\mu$	Permeabilidade magnética
$\xi$	Diferença de fase entre os campos primários e <u>secun</u> dário
$\xi_1$ e $\xi_2$	Diferença de fase entre as componentes do campo <u>re</u> sultante
$\Pi$	Constante, 3,1416
$\sigma$	Condutividade elétrica
$\sigma$	Condutância
$\psi$	Diferença de direção entre os campos primários e <u>se</u> cundário
'	Grandezas para o sistema modelo
0	(subscrito) Instante $t=0$

## SUMÁRIO

	Pág.
DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	II
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	VIII
<u>RESUMO</u> .....	1
<u>ABSTRACT</u> .....	3
1 INTRODUÇÃO .....	5
2 OS MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS .....	10
2.1 <u>Introdução</u> .....	10
2.2 <u>Teoria Eletromagnética</u> .....	11
2.2.1 Equações de Maxwell .....	11
2.2.2 Equações do Campo Eletromagnético .....	13
2.2.3 A Constante de Propagação .....	14
2.2.4 Aproximação para Grandes Comprimentos de Onda ...	15
2.2.5 O Vetor Potencial Magnético .....	18
2.2.6 Polarização Elíptica .....	20
2.2.7 Indutância Mútua .....	23
2.3 <u>Modelamento Eletromagnético</u> .....	27
2.4 <u>Métodos de Prospecção Eletromagnética</u> .....	30
2.4.1 Parâmetros Mensuráveis .....	30
2.4.2 Classificação .....	31
2.4.3 O Método Slingram .....	36
3 METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO .....	39
3.1 <u>Modelos Simulados</u> .....	39
3.1.1 Aproximação Física .....	39
3.1.2 Parâmetros de Resposta Escolhidos .....	40
3.1.3 Materiais Utilizados .....	42
3.2 <u>Equipamentos</u> .....	46
3.2.1 Sistema de Energização .....	46
3.2.2 Sistema de Recepção .....	46
3.2.3 Sistema de Disposição dos Modelos e das Bobinas ..	48

	Pág.
3.3 <u>Medições</u> .....	49
3.3.1 Calibração .....	49
3.3.2 Calibração em Diferentes Ambientes .....	50
3.3.3 Perfilagem .....	51
3.3.3.1 Posicionamento do Modelo-Manto .....	51
3.3.3.2 Posicionamento do Modelo-Corpo .....	55
3.4 <u>Avaliação do Desempenho do Conjunto de Modelamento</u> ....	55
3.4.1 Erros na Simulação .....	56
3.4.2 Erros no Posicionamento dos Modelos e das Bobinas...	56
3.4.3 Erros Instrumentais .....	57
3.4.4 Erros Não Sistemáticos .....	57
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	58
4.1 <u>Efeitos do Manto</u> .....	58
4.1.1 Relacionados ao Parâmetro de Resposta do Corpo .....	60
4.1.2 Relacionados à Profundidade do Corpo .....	64
4.1.3 Relacionados ao Mergulho .....	68
4.2 <u>Síntese dos Efeitos</u> .....	68
5 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORPOS DO TIPO SEMI-PLANO	102
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	106
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112

Os resultados foram reunidos em diagramas de Argand e foi dado um procedimento para através dos mesmos ser feita a interpretação de anomalias obtidas no campo.

## ABSTRACT

Electromagnetic methods have been extensively applied in the prospecting of sulphide bodies and other conducting materials.

The interpretation of e.m. data is based on the results obtained either with reduced scale or analytical modelling. In most models, the host rocks, the overburden as well as the halo of disseminated sulphides are considered highly resistive although in nature they are often weakly conductive.

Presence of a well-developed conducting overburden in tropical and sub-tropical regions and a saline rich crustal layer in semi-arid regions have been found to modify significantly the e.m. anomalies in practice. Therefore, the parameters of the target, determined on the basis of simple models where the presence of the conducting environment is neglected, are found to be in considerable error.

The effects of the overburden on the e.m. anomalies of a dipping tabular ore body were studied with reduced scale models for varying response parameters of both the overburden and the orebody, and also for different depths and dips of the target. The overburden and the orebody were represented by metallic sheets of varying thickness in the scale model developed in accordance with the law of electromagnetic similitude.

The results of these investigations show that the overburden affects the anomaly by causing:

- a) phase rotation;
- b) amplitude reduction;
- c) base level displacement;
- d) reversion of the quadrature; and
- e) appearance of an extra peak in the quadrature in the case of low dipping models.

The last two effects complicate the quantification of the anomalies but, on the other hand, provide a qualitative indication of the response parameters of both the ore body and the overburden.

The results were assembled in the form of Argand diagrams and, finally, an interpretation scheme is suggested for the e.m. field data on the basis of these diagrams.

## 1 INTRODUÇÃO

A aplicação dos métodos eletromagnéticos (e.m.) em prospecção tem aumentado enormemente nos últimos 30 anos, graças à comprovada eficiência dos mesmos na procura de corpos condutivos, principalmente de sulfetos maciços. Apesar disso, não são raras as discrepâncias encontradas entre os valores obtidos pela interpretação de dados e.m. para profundidade e condutância dos corpos de interesse e aquelas reais, constatados através de furos de sondagem.

A interpretação de dados e.m. é realizada com base em perfis e/ou diagramas de Argand construídos através de modelamento reduzido (analógico) e/ou digital.

Modelos realísticos incluem, por exemplo, depósitos de sulfetos maciços de forma irregular, freqüentemente com halos de sulfetos disseminados e capeados por manto de intemperismo (fig. 1). As condutividades do halo, da encaixante, do manto e do próprio corpo possuem certo grau de heterogeneidade e anisotropia. O modelo torna-se ainda mais complexo considerando-se o relevo topográfico e a existência de minerais magnéticos em quantidades variáveis, no corpo de sulfetos, no halo, na encaixante e mesmo no manto de intemperismo.

Até 1969, folhas metálicas não magnéticas, suspensas no ar (modelos ar-livre ou "free-air"), foram utilizadas na quase totalidade dos estudos de respostas e.m. realizados com modelos reduzidos. Representavam modelos geológicos geometricamente simples que consideravam o halo, a encaixante e o manto como regiões desprovidas de condutividade e susceptibilidade magnética.

Perfis e diagramas obtidos com esses modelos permitiram boas interpretações - algumas das quais conduziram à descoberta de várias jazidas - em um grande número de áreas, notadamente em regiões de solo congelado como, por exemplo, do Canadá e da Escandinávia onde, aliás, até então, a prospecção e.m. vinha sendo mais intensamente realizada. A prática inexistência do halo e do manto de intemperismo e a alta resistividade da encaixante naquelas regiões, não só favorecem como também explicam o sucesso de estudos considerando modelos tão simples (Ward, 1971).

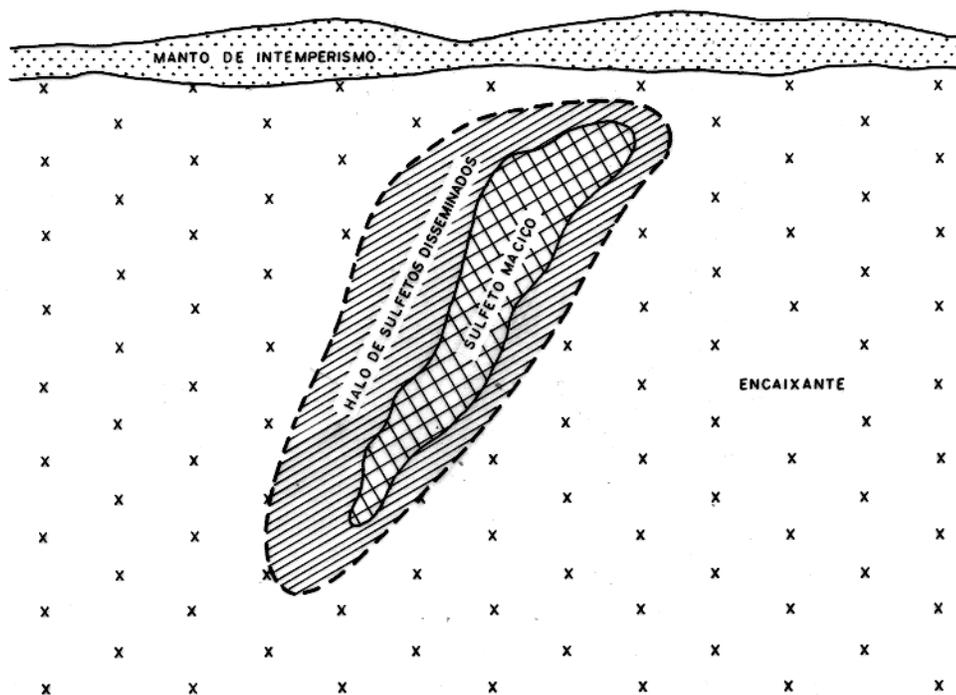


Fig. 1 - Seção geológica esquemática de corpo de sulfetos maciços possível de ser encontrado na natureza e que constitui um problema de exploração e.m. típico.

Por outro lado, em regiões tropicais e semi-áridas é comum a presença de uma cobertura condutiva e espessa. No oeste e no norte da Austrália, por exemplo, essa cobertura chega a atingir 45 m de espessura e valores relativamente altos de condutividade elétrica (Preston, 1975). Também no Brasil, é freqüente a presença de manto de intemperismo com tais características - condutância variando de 0,1 a 1,0 S segundo sondagens elétricas executadas em todas as regiões brasileiras à exceção da Amazônia - (Palacky e Kadekaru, 1978). Portanto, nessas regiões, a interpretação de dados e.m. com base nos simplistas modelos canadenses, pode e tem implicado em sérios erros (Preston, 1975; Palacky, 1975; Palacky e Kadekaru, 1978; Palacky e Sena, 1979; Lajoie e West, 1977; Parasnis, 1971).

Conseqüentemente, torna-se prioritária a investigação de respostas e.m. obtidas em ambientes complexos. Nestes, obviamente, estão incluídas não só aquelas situações cujos efeitos devidos ao manto de intemperismo precisam ser considerados, mas todas as demais, nas quais vários outros efeitos dificultam a interpretação como, por exemplo, aqueles devidos a presença de encaixante algo condutiva (Gupta Sarma e Maru, 1971; Verma e Gaur, 1975) e do halo (Negi, 1967; Negi e Raval, 1969; Wait, 1969).

Estudos sobre os efeitos produzidos pelo manto sobre anomalias e.m. foram realizados por Palacky (1975) e Hurley (1977), no domínio do tempo, e Hedström e Parasnis (1958), Lowrie e West (1965), Fraser e Ward (1967), Lajoie e West (1976) e Coney (1977), no domínio da freqüência. Destes, apenas Hurley, e Lajoie e West fizeram suas análises utilizando modelamento digital, enquanto os demais, fizeram uso de modelamento reduzido.

Palacky investigou os efeitos do manto sobre anomalias devidas a corpos do tipo semi-plano, com diferentes mergulhos, detectadas pelo sistema aero INPUT. Hurley, utilizando uma versão do método transiente na qual o pulso é enviado por uma espira retangular de grandes dimensões, trabalhou com modelos esféricos. Ambos os autores verificaram que o manto promove modificações significativas nas anomalias, dificultando bastante a interpretação das mesmas.

Hedström e Parasnis utilizaram cinco diferentes arranjos de bobinas (um dos quais refere-se a uma nova técnica conhecida

como "Rotary-Field System") empregados em aero-levantamentos e modelos do tipo semi-plano dispostos verticalmente. Lowrie e West consideraram o mesmo tipo de modelo e o método de bobinas horizontais coplanares. Fraser e Ward verificaram as vantagens da utilização de uma técnica pouco corrente, que se utiliza de um campo rotacional gerado por duas bobinas verticais dispostas ortogonalmente, e como modelo consideraram esferas. Lajoie e West empregaram semi-planos verticais e o método TURAM. Coney trabalhou também com semi-planos verticais mas fez uso da técnica VLF. De todos os trabalhos citados, apenas os de Hedström e Parasnis não indicaram modificações importantes introduzidas pelo manto sobre as anomalias e os de Fraser e Ward, em virtude da natureza do campo utilizado, registraram apenas pequena redução da amplitude das anomalias. Lowrie e West encontraram modificações bastante significativas tais como a rotação da fase e a alteração da amplitude da anomalia. Como conseqüências diretas desses efeitos, que podem promover a inversão da componente em quadratura, a profundidade e a condutância do corpo serão maiores do que as reais quando a anomalia é interpretada à luz dos diagramas convencionais. Em que pese a utilização de diferentes técnicas, Lajoie e West chegaram a resultados qualitativamente semelhantes aos de Lowrie e West.

O presente trabalho tem como objetivo o estudo dos efeitos do manto de intemperismo sobre anomalias devidas a corpos do tipo semi-plano. Sua importância advém do fato que esses efeitos têm sido apontados como os principais responsáveis por interpretações e.m. errôneas, realizadas com base em dados e.m. obtidos em terrenos brasileiros. O modelo escolhido para o corpo simula adequadamente filões, fraturas e falhas preenchidas por material condutivo e, por isso mesmo, é bastante útil em prospecção. Os corpos de diferentes parâmetros de resposta foram dispostos segundo vários mergulhos e profundidades, sendo capeados por manto de intemperismo simulado por modelo do tipo plano, também com diferentes parâmetros de resposta. O estudo foi realizado através de modelamento reduzido fazendo-se uso da técnica de bobinas horizontais coplanares (também conhecida como Slingram, "loop frame" e "horizontal loop").

Cabe notar que estudos sobre semi-planos mergulhando segundo vários ângulos de inclinação foram conduzidos por Strangway

(1966) e Nair et al. (1968) em ar-livre mas, no entanto, sem considerar a presença de uma cobertura condutiva.

Com este estudo pode-se, portanto, estender o trabalho de semi-planos verticais de Lowrie e West para casos em que o semi-plano se encontra mergulhando segundo outros ângulos. E, assim, contribuir significativamente aos programas de prospeção geofísica que vem sendo conduzidos em terrenos brasileiros ou em quaisquer outros onde o manto de intemperismo não possa ser desprezado.

## 2 OS MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

### 2.1 Introdução

Campos e.m. alternados produzidos primariamente, sejam eles naturais ou artificiais, induzem, nos condutores existentes em suas proximidades, forças eletromotrizes (f.e.m.) que, por sua vez, geram correntes secundárias ("eddy currents"). Essas correntes dão origem a campos e.m. secundários que se somam aos primários. Os campos então resultantes podem ser medidos na superfície do terreno, fornecendo informações sobre os condutores subsuperficiais. Todo o fenômeno descrito é conhecido como indução e.m. e é regido pelas equações de Maxwell.

Nas últimas três décadas, os métodos e.m. têm sido largamente utilizados principalmente na prospecção de corpos condutores tais como sulfetos maciços. Têm sido também usados com sucesso na delineação de estruturas de interesse nas pesquisas de água subterrânea, materiais de construção e, bem recentemente, de petróleo; na investigação de zonas de alta condutividade dentro de depósitos de cobre porfirítico e outros depósitos do tipo disseminado; na locação de canos e vários outros materiais artificiais enterrados em zonas urbanas para fins diversos.

Na literatura, os métodos e.m. aparecem comumente como métodos indutivos quando o campo primário é aplicado no terreno prescindido de contato com o mesmo e, como métodos condutivos, quando o envio do campo gerado artificialmente é feito através de eletrodos. Destes, os últimos são bem pouco utilizados.

Uma grande vantagem dos métodos indutivos refere-se a sua fácil aplicação em terrenos onde as formações superficiais são bastante resistivas, impedindo ou dificultando bastante o emprego dos métodos elétricos (eletrorrestividade, IP e outros) e dos próprios métodos e.m. condutivos. Esse tipo de situação é bastante comum em regiões polares ou sub-polares onde o terreno se apresenta congelado e em regiões desérticas já que os solos se encontram totalmente ressequidos.

Diferentes frequências de emissão podem ser usadas com os métodos e.m. Esta prática é ainda restrita em face à complexidade e ao alto custo do instrumental exigido (instrumentos de multi-frequências). Entretanto é extremamente vantajosa já que

possibilita a adequação da(s) freqüência(s) de operação a cada caso particular de investigação e a comparação de resultados obtidos a diferentes freqüências (construção de espectro de freqüências), fornecendo uma maior quantidade de informações. Além disso, em se tratando do estudo de distribuição vertical de propriedades da subsuperfície, a profundidade de investigação pode ser controlada pela variação da freqüência de emissão e/ou pela variação do espaçamento entre as bobinas.

Por outro lado, os métodos e.m. são de difícil aplicação em terrenos onde as camadas superficiais (por exemplo, camadas argilosas) são bastante condutivas. Nestes casos, correntes secundárias são também geradas nas camadas superficiais e o campo resultante é de difícil análise, dada a influência tanto dos condutores subsuperficiais de interesse na prospecção como daquelas camadas. É justamente neste tipo de problema que o presente estudo deter-se-á.

## 2.2 Teoria Eletromagnética

Apresenta-se, a seguir, uma revisão da teoria dos métodos e.m. baseada nas seguintes fontes: Grant e West (1965), Ward (1967a), Jordan e Balmain (1971), Orellana (1974) e Telford (1976).

### 2.2.1 Equações de Maxwell

Os campos elétrico e magnético que ocorrem na natureza podem ser relacionados com suas fontes através das seguintes equações, conhecidas como equações de Maxwell:

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

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

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

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (4)$$

onde  $\vec{E}$  = campo elétrico (V/m)

$\vec{H}$  = campo magnético (A/m)

$\vec{B}$  = indução magnética (T)

$\vec{D}$  = deslocamento ou indução elétrica (C/m<sup>2</sup>)

$\vec{J}$  = densidade de corrente elétrica induzida (A/m<sup>2</sup>)

t = tempo (s)

A equação (4) poderia ser escrita de uma maneira mais geral como segue:

$$\nabla \cdot \vec{D} = q$$

onde  $q$  = densidade de carga elétrica livre (C/m<sup>2</sup>)

No entanto, como não há acúmulo apreciável de carga durante o fluxo de corrente, não há inconveniente algum de escrever essa equação (4) como foi feito.

Convém também notar que alguns autores preferem denominar  $\vec{H}$  e  $\vec{B}$ , em face às propriedades físicas dos mesmos, respectivamente de poder imanador ou força magnetizante e campo magnético ou densidade de fluxo magnético.

Uma solução para as equações de Maxwell somente é possível utilizando-se relações adicionais (relações constitutivas do meio) que ligam os vetores  $\vec{B}$  com  $\vec{H}$ , e  $\vec{D}$  e  $\vec{J}$  com  $\vec{E}$ . Assim, para um meio isotrópico linear tem-se

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (7)$$

onde  $\mu$  = permeabilidade magnética (H/m)

$\epsilon$  = capacitividade dielétrica (ou permissividade elétrica) (F/m)

$\sigma$  = condutividade elétrica (S/m)

As quantidades  $\mu$ ,  $\epsilon$  e  $\sigma$  são conhecidas como capacidades indutivas do meio. No vácuo ( $\nu$ ), elas adquirem os seguintes valores:

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

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

$$\sigma_V = 0$$

Com (5), (6) e (7) é possível reescrever as equações de Maxwell eliminando três de suas cinco variáveis como segue:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (9)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (11)$$

### 2.2.2 Equações do Campo Eletromagnético

As equações de Maxwell podem ainda ser reduzidas a apenas duas, conhecidas como equações do campo e.m. Para isto, toma-se o rotacional da equação (8) e, considerando-se as relações vistas em (9) e (11) e mais a seguinte identidade (válida apenas para coordenadas cartesianas)

$$\nabla \times \nabla \times \vec{F} = \nabla(\nabla \cdot \vec{F}) - \nabla \cdot \nabla^2 \vec{F} = \nabla(\nabla \cdot \vec{F}) - \nabla^2 \vec{F} \quad (12)$$

pode-se escrever

$$\nabla^2 \vec{E} = \sigma \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (13)$$

De maneira análoga obtém-se

$$\nabla^2 \vec{H} = \sigma \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (14)$$

Como a intensidade das fontes varia, na maioria das técnicas de prospecção e.m., senoidalmente com o tempo e o mesmo ocorre com os vetores e.m.,  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  podem então ser expressos como

$$\vec{E} = \vec{E}_0 (\cos \omega t - i \sin \omega t) = \vec{E}_0 e^{-i\omega t} \quad (15)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 (\cos \omega t - i \sin \omega t) = \vec{H}_0 e^{-i\omega t} \quad (16)$$

onde  $\omega$  = frequência angular (rad/s) =  $2\pi f$  (sendo  $f$  = frequência em Hz)

Com as relações (15) e (16), as equações (13) e (14) transformam-se em

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

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

### 2.2.3 A Constante de Propagação

As equações de propagação dos campos elétrico e magnético (17) e (18) podem ser ainda simplificadas usando-se a constante de propagação  $K$ . Tem-se então

$$\nabla^2 \vec{E} + K^2 \vec{E} = 0 \quad (19)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + K^2 \vec{H} = 0 \quad (20)$$

onde

$$K^2 = \omega\mu(\omega\epsilon + i\sigma) \quad (21)$$

A constante  $K$ , que não é uma constante para cada meio visto que depende da frequência de emissão, é de extrema importância porque reúne todos os parâmetros que influenciam os campos e.m. Como se trata de uma quantidade complexa, pode ser desmembrada em suas partes real  $K_r$  e imaginária  $K_i$ , sendo  $K = K_r + K_i i$ . Logo,

$$K^2 = (K_r^2 - K_i^2) + 2K_r K_i i$$

Considerando-se a relação acima e a equação (21) pode-se escrever

$$K_r^2 - K_i^2 = \omega^2\mu\epsilon$$

$$2K_r K_i = \omega\mu\sigma$$

Resolvendo-se esse sistema de equações chega-se a

$$K_r = \frac{1}{\sqrt{2}} (\omega\mu)^{1/2} \left[ (\omega^2\epsilon^2 + \sigma^2)^{1/2} + \omega\epsilon \right]^{1/2} \quad (22)$$

$$K_i = \frac{1}{\sqrt{2}} (\omega\mu)^{1/2} \left[ (\omega^2\epsilon^2 + \sigma^2)^{1/2} - \omega\epsilon \right]^{1/2} \quad (23)$$

Adiante será mencionado porque  $K_r$  e  $K_i$  são, respectivamente, conhecidos como constantes de fase e de atenuação.

#### 2.2.4 Aproximação para Grandes Comprimentos de Onda

Considerando-se os valores que a constante de propagação  $K$  assume de acordo com o ambiente e a frequência de prospecção, esta última dificilmente superior a 5.000 Hz, pode-se partir para uma série de simplificações dadas a seguir:

a) Meios condutivos:

$$\epsilon \cong 10 \epsilon_v = 8,85 \times 10^{-11} \text{ F/m}$$

$$\mu = \mu_v = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (\text{para rochas ricas em minerais ferromagnéticos, } \mu \leq 3 \mu_0)$$

$$\sigma = 10^3 \text{ S/m}$$

Estes valores fornecem  $K_r = K_i = 4,4 \text{ m}^{-1}$  e  $K^2 = 38,7i \text{ m}^{-2}$ .

b) Meios resistivos:

$$\epsilon \cong 10 \epsilon_v = 8,85 \times 10^{-11} \text{ F/m}$$

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

$$\sigma = 10^{-3} \text{ S/m}$$

Neste caso,  $K_r = K_i = 4,4 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$  e, portanto,  $K^2$  é um valor insignificante ( $3,9 \times 10^{-5}i \text{ m}^{-2}$ ).

Dos resultados acima, observa-se que:

a) nas equações (22) e (23),  $\sigma$  é cerca de quatro e dez ordens de grandeza maior do que  $\omega\epsilon$ , respectivamente em meios resistivos e meios condutivos. Justo por isto obteve-se  $K_r = K_i$  para os dois meios. Conseqüentemente, desprezando-se o termo  $\omega\epsilon$ , as equações (22) e (23) podem ser reescritas como segue:

$$K_r = K_i = \left(\frac{\omega\mu\sigma}{2}\right)^{1/2} \quad (24)$$

Isto permite simplificar ainda mais a equação (21) que pode ser representada por

$$K^2 = i\omega\mu\sigma \quad (25)$$

O abandono de  $\omega\epsilon$  deve-se ao fato das correntes de deslocamento, dependentes de  $\epsilon$ , serem desprezíveis. Ou seja, é válida a chamada aproximação quase-estática ou quase-estacionária já que não se está trabalhando com freqüências muito altas (e/ou ambientes demasiadamente resistivos).

b) como conseqüência das simplificações realizadas, as equações do campo e.m. podem ser escritas da seguinte maneira:

$$\nabla^2 \vec{E} = -i\omega\sigma\mu\vec{E} = \sigma\mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (26)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = -i\omega\sigma\mu\vec{H} = \sigma\omega \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (27)$$

Estas equações reduzem-se à equação de Laplace, válida também para o vácuo, quando se trabalha em meios resistivos pois  $K^2$  é insignificante. Assim, nesses casos, as equações do campo e.m. (26) e (27) transformam-se em

$$\nabla^2 \vec{E} = 0 \quad (28)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = 0 \quad (29)$$

A natureza das soluções obtidas pode ser analisada admitindo-se que a onda seja plano-polarizada. Se a onda se propaga ao longo do eixo dos z (correspondendo à profundidade h) de modo que o plano x-y seja o plano de polarização pode-se escrever

$$\vec{H} = \vec{H}_y(h,t) = \vec{H}_0 e^{-i(\omega t - kh)} = \vec{H}_0 e^{-K_i h - i(\omega t - K_r h)}$$

$$\vec{H}_y = \vec{H}_0 e^{-K_i h} \left[ \cos(\omega t - K_R h) - i \sin(\omega t - K_R h) \right] \quad (30)$$

Como as ondas são transversais, de maneira análoga chega-se a

$$\vec{E}_x = \vec{E}_0 e^{-K_i h} \left[ \cos(\omega t - K_R h) - i \sin(\omega t - K_R h) \right] \quad (31)$$

Substituindo-se a equação (7) na relação (31) obtém-se

$$\vec{J}_x = \sigma e^{-K_i h} \left[ \cos(\omega t - K_R h) - i \sin(\omega t - K_R h) \right] \quad (32)$$

As últimas três equações (vetoriais de difusão) traduzem um movimento harmônico simples de frequência angular  $\omega$  que sofre um deslocamento de fase  $K_R h$ , daí  $K_R$  ser conhecida como constante de fase. A amplitude dessas ondas é atenuada segundo uma função exponencial dependente de  $K_i h$  e, por isso mesmo,  $K_i$  é dita constante de atenuação.

Considerando-se a equação (24) pode-se ainda dizer que se  $\omega \mu \sigma$  for bastante pequeno, haverá pouca atenuação e o campo magnético penetrará no condutor. A corrente induzida, responsável pela atenuação sofrida pelo campo, distribuir-se-á por todo o condutor e gerará um campo magnético secundário de pequena expressão. Se  $\omega \mu \sigma$  for grande, a atenuação será intensa, o campo magnético pouco penetrará no condutor e as correntes induzidas serão superficiais e produzirão um intenso campo magnético secundário que poderá cancelar parcial ou totalmente o primário.

A partir de uma certa profundidade,  $\vec{I}_x$ ,  $\vec{E}_x$  e  $\vec{H}_y$  são praticamente nulos. Como a diminuição da amplitude desses vetores é gradual, convencionou-se chamar de profundidade de "penetração"  $\delta$  ("skin depth"), à profundidade onde a amplitude se encontra atenuada de  $1/e = 0,368$ , ou seja, de aproximadamente 37% de seu valor original.

Como a amplitude diminui segundo a função  $e^{-K_i h}$  das equações (30), (31) e (32), pode-se escrever que

$$-K_i \delta = -1$$

Com o auxílio da equação (24) e considerando-se  $\mu = \mu_v f_i$

ca-se com

$$\delta = 503,3 \left( \frac{1}{f\sigma} \right)^{1/2} \quad (33)$$

### 2.2.5 O Vetor Potencial Magnético

A solução das equações de propagação dos campos elétrico e magnético, mesmo considerando-se as simplificações já vistas, é bastante trabalhosa por causa das chamadas condições de contorno que elas devem obedecer no limite entre dois meios isotrópicos diferentes. É, portanto, conveniente introduzir um vetor potencial  $\vec{A}$  do qual  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  possam ser obtidos.

Como o divergente de  $\vec{B}$  é zero (3),  $\vec{B}$  pode ser derivado, por definição, de um vetor potencial como segue:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (34)$$

Substituindo-se a equação acima na relação (1), encontra-se

$$\nabla \times \vec{E} = \nabla \times - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

Logo,

$$\vec{E} = - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (35)$$

Com as equações (11) e (35), pode-se escrever

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad (36)$$

E substituindo-se a equação (34) na (5), obtém-se o campo magnético

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) \quad (37)$$

Usando-se na equação (9), os resultados obtidos em (35) e (37) chega-se a

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = - \sigma \mu \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2}$$

o que dá, considerando-se (36)

$$\nabla^2 \vec{A} = \sigma \mu \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} \quad (38)$$

Esta última relação (38) é uma equação de onda do mesmo tipo que aquelas vistas em (13) e (14). Conseqüentemente para grandes comprimentos de onda, são válidas as seguintes simplificações:

a) meios condutivos:

$$\nabla^2 \vec{A} = -i\omega \sigma \mu \vec{A} = \sigma \mu \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (39)$$

b) meios resistivos:

$$\nabla^2 \vec{A} = 0 \quad (40)$$

Com as relações (35) e (7), a equação (39) pode ser transformada em

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (41)$$

A equação acima (41) assemelha-se à equação de Poisson utilizada em gravimetria e magnetometria e cuja solução, em coordenadas cartesianas, tem a seguinte forma:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J} \cdot d\vec{v}}{r} \quad (42)$$

sendo  $r$  = módulo do vetor  $\vec{r}$

$v$  e  $d\vec{v}$  = volume e vetor elemento de volume definido por  $\vec{r}$

O vetor potencial magnético  $\vec{A}$  não tem o significado físico do potencial escalar em gravitação e eletrostática. Trata-se apenas de um artifício matemático para facilitar a determinação dos campos e.m. Através dele é possível, então, calcular a intensidade do campo magnético  $\vec{H}$  devido aos diferentes tipos de fonte empregadas nos métodos e.m. de prospecção, tais como aquelas geradas fazendo-se passar uma corrente alternada em cabos retilíneos e espiras.

### 2.2.6 Polarização Elíptica

Os vetores do campo e.m. no vácuo (e em meios resistivos), considerando-se a aproximação para grandes comprimentos de onda, não sofrem mudanças. No entanto, quando existem condutores em suas vizinhanças, são gerados campos e.m. secundários que se somam aos primários dando origem aos já mencionados campos resultantes.

O campo secundário difere do primário em intensidade, fase e direção. Sejam os vetores  $\vec{P} \cos \omega t$  e  $\vec{S} \cos(\omega t + \xi)$  respectivamente, os campos primário e secundário, diferentes em direção de um ângulo  $\psi$  e em fase, de um ângulo  $\xi$  (fig. 2a.).

Considerando-se o sistema de coordenadas y-z, tem-se

$P_y \cos \omega t$  e  $P_z \cos \omega t$  como componentes do vetor  $\vec{P} \cos \omega t$  e

$S_y \cos(\omega t + \xi)$  e  $S_z \cos(\omega t + \xi)$  como componentes do vetor  $\vec{S} \cos(\omega t + \xi)$ .

Somando-se as duas componentes nas direções y e z obtém-se, respectivamente  $R_y$  e  $R_z$  do vetor resultante  $\vec{R}$  como sendo

$$R_y(t) = Y \cos(\omega t + \xi_1) \quad (43)$$

$$R_z(t) = Z \cos(\omega t + \xi_2) \quad (44)$$

onde  $\xi_1$  e  $\xi_2$  = diferenças de fase entre as componentes de  $\vec{P}$  e  $\vec{S}$  nas direções y e z, respectivamente.

Y e Z = soma das intensidades das componentes de  $\vec{P}$  e  $\vec{S}$  nas direções y e z, respectivamente.

Das equações (43) e (44) pode-se tirar a diferença de fase  $\gamma$  entre as componentes de  $\vec{R}$ , sendo  $\gamma = \xi_2 - \xi_1$ .

Assim,

$$\gamma = \arccos \frac{R_z}{Z} - \arccos \frac{R_y}{Y}$$

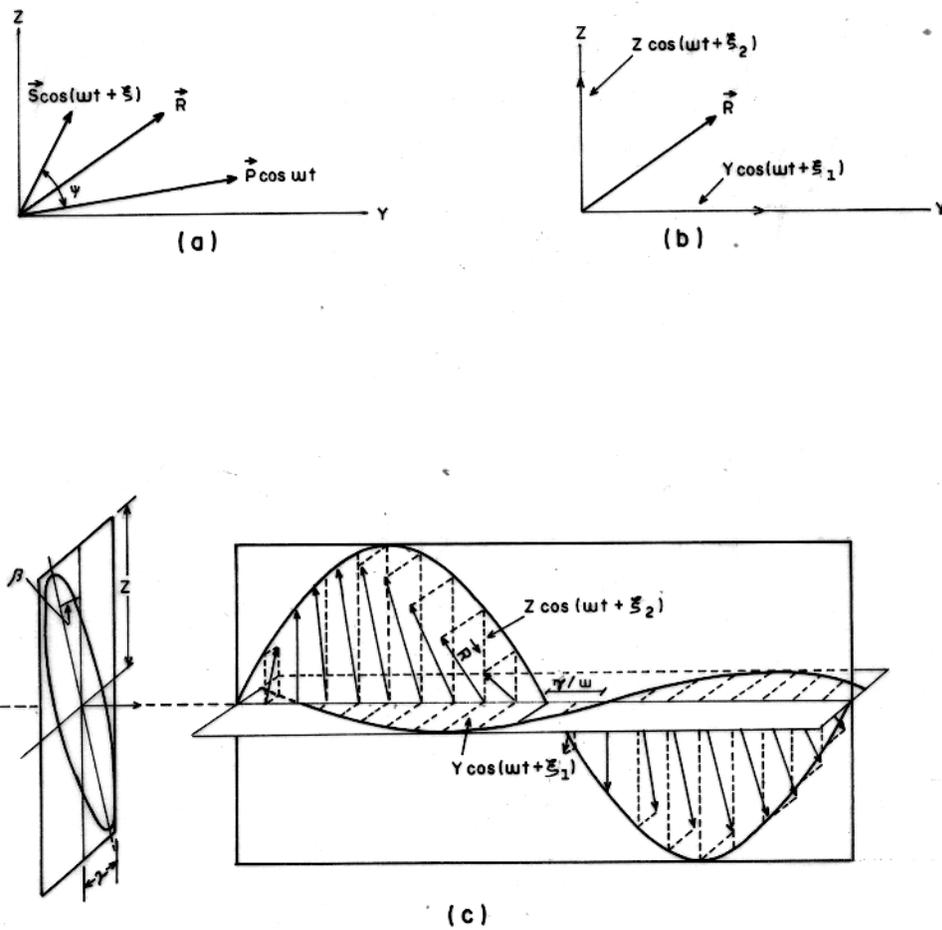


Fig. 2 - (a) e (b) Adição dos vetores campos primário e secundário.  
(c) Polarização elíptica.

A equação acima pode ser rearranjada fornecendo

$$\frac{R_y^2}{Y^2 \sin^2 \gamma} + \frac{R_z^2}{Z^2 \sin^2 \gamma} - \frac{2 \cos \gamma}{YZ \sin^2 \gamma} R_y R_z = 1 \quad (45)$$

que é a equação de uma elipse com centro na origem das coordenadas e cujo eixo maior é inclinado de um ângulo  $\beta$  com respeito ao eixo z igual a

$$\operatorname{tg} 2\beta = \frac{2YZ \cos \gamma}{Y^2 - Z^2} \quad (46)$$

Conseqüentemente, o vetor  $\vec{R}$  gira no espaço dentro do plano y-z de modo a descrever a elipse dada por (45), ou seja, trata-se de um campo elipticamente polarizado (fig. 2b).

Quando  $\gamma=0$ , (45) reduz-se a equação de uma reta do tipo

$$ZR_y = YR_z$$

Nesse caso, tem-se a polarização linear, típica de condutores perfeitos que promovem no campo secundário, além do atraso  $\pi/2$  provocado pela lei fundamental da indução, um atraso  $\pi/2$  ( $\xi=\pi$ ).

Quando  $\gamma = \pi/2$ , a equação (45) fica sendo igual a

$$\frac{R_y^2}{Y^2} + \frac{R_z^2}{Z^2} = 1$$

Neste caso, tem-se a equação de uma elipse com eixos na direção  $O_x$  e  $O_y$ , que se transforma na equação de um círculo quando  $Y=Z$ . Assim,

$$R_y^2 + R_z^2 = Y^2 = Z^2$$

Essa última situação ocorre quando o campo magnético sofre apenas o atraso  $\pi/2$ , ou melhor, não sofre atrasos gerados pelas propriedades do condutor. Isso significa que inexiste condutor subsuperficial.

### 2.2.7 Indutância Mútua

As respostas fornecidas por um condutor subsuperficial submetido a um campo e.m. primário podem ser analisadas através do circuito de três espiras (Grant e West, 1965). O problema não apresenta grande semelhança com qualquer outro de cunho geológico mas reproduz, qualitativamente, a resposta indutiva de condutores genéricos sob a influência de um campo solenoidal homogêneo ou de outro tipo.

Sejam três espiras T, C e R representando, respectivamente, o transmissor, o condutor subsuperficial e o receptor (fig. 3a).

Uma corrente alternada  $I_T = I_{0T} e^{-i\omega t}$  circula no transmissor gerando um campo magnético alternado  $\vec{B}_R$  em suas vizinhanças que induz no receptor uma força eletromotriz (f.e.m.)  $U_R^T$ , proporcional à corrente  $I_T$ . A constante de proporcionalidade relacionando  $U_R^T$  e  $I_T$  é conhecida como indutância mútua  $M_{TR}$  das duas espiras e descreve a interação, à distância, entre esses dois circuitos elétricos. Assim, pode-se escrever

$$U_R^T = - M_{TR} \frac{dI_T}{dt} \quad (47)$$

No condutor, de maneira análoga tem-se

$$U_C^T = - M_{TC} \frac{dI_T}{dt} \quad (48)$$

Através da Lei de Ohm, a corrente  $I_C$  que circula no condutor é

$$I_C = \frac{U_C^T}{Z} \quad (49)$$

onde,

$$Z = R - i \omega L \quad (50)$$

$Z$  = impedância (ohm)

$R$  = resistência (ohm)

$L$  = indutância (H)

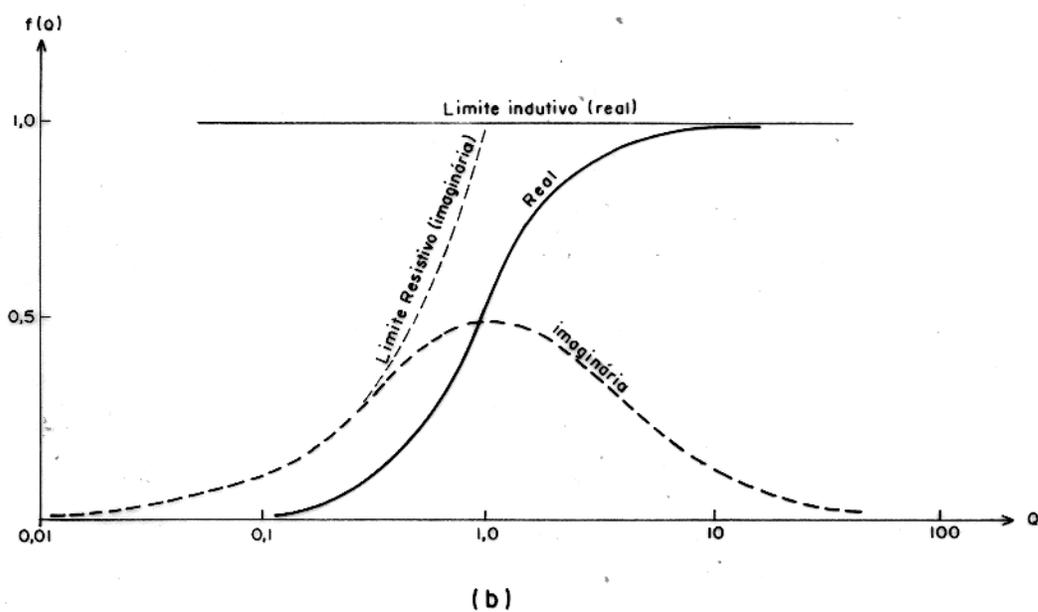
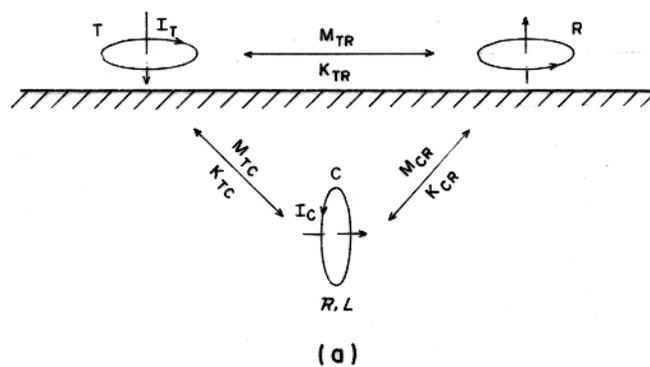


Fig. 3 - (a) Circuito das três espiras.  
 (b) Partes real e imaginária da função  $f(Q)$   
 (segundo Grant e West, 1965).

Substituindo-se as equações (48) e (50) na (49) e considerando-se que as correntes variam senoidalmente com o tempo pode-se escrever

$$I_{OC} e^{-i\omega t} = \frac{i\omega M_{TC} (R+i\omega L)}{R^2 + \omega^2 L^2} I_{OT} e^{-i\omega t} \quad (51)$$

A corrente  $I_C$  produz um outro campo magnético que, por sua vez, gera uma f.e.m. secundária ( $U_R^C$ ) que é análoga aquela dada na equação (47), sendo representada por

$$U_R^C = - M_{CR} \frac{dI_C}{dt} \quad (52)$$

Na maioria das vezes, os aparelhos utilizados medem a razão entre a f.e.m. provocada pelo condutor no receptor e a f.e.m. provocada pelo transmissor no receptor na ausência do condutor, ou seja,  $U_R^C/U_R^T$ . Esta razão é conhecida como resposta do sistema ou intensidade da anomalia e, utilizando-se (47), (51) e (52) pode ser escrita como segue:

$$\frac{U_R^C}{U_R^T} = i\omega \frac{M_{TC} M_{CR}}{M_{TR}} \frac{R + i\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (53)$$

Como  $\omega L/R$  é conhecido como fator de qualidade  $Q$  (ou parâmetro de resposta) do circuito subterrâneo, a equação (53) pode ser reescrita como

$$\frac{U_R^C}{U_R^T} = - \frac{M_{TC} M_{CR}}{M_{TR} L} \frac{Q - iQ}{1 + Q^2} \quad (54)$$

Esta última equação (54) pode ainda ser simplificada considerando-se os coeficientes de indutância mútua em termos da auto-indutância  $L_N$  e do coeficiente de acoplamento individual  $K_{FN}$  de cada uma das três espiras, já que

$$M_{FN} = K_{FN} (L_F L_N)^{1/2}$$

onde  $F$  e  $N$  = espiras quaisquer

Assim, fica-se com

$$\frac{U_R^C}{U_R^T} = - \frac{K_{TC} K_{CR}}{K_{TR}} \frac{Q^2 - iQ}{1 + Q^2} \quad (55)$$

A equação (55) mostra que a intensidade da anomalia varia com dois fatores, o primeiro dos quais é um fator de acoplamento composto que depende da geometria do problema e o segundo, conhecido como função resposta  $f(Q)$ , que depende das características intrínsecas do condutor e da frequência utilizada.

A função resposta fornece importantes informações quando desmembrada em suas partes real e imaginária e que, respectivamente, correspondem as componentes real (em-fase) e imaginária (quadratura) do campo secundário com respeito ao primário. Assim, com o auxílio da figura 3b pode-se verificar as seguintes situações:

- Quanto  $Q$  é muito pequeno, as duas componentes tendem a zero, até que a real deixa de existir e a resposta fica totalmente em quadratura com o campo primário. Neste caso, praticamente nexiste condutor e a equação (55) pode ser escrita como

$$\frac{U_R^C}{U_R^T} = \frac{K_{TC} K_{CR}}{K_{TR}} \frac{i\omega L}{R}$$

- Quando  $Q$  tende a valores muito altos, a em-fase tende a 1, atingindo o chamado limite indutivo, e a quadratura cai a zero (caso em que o condutor é ideal). A equação (55) pode, então, ser escrita como

$$\frac{U_R^C}{U_R^T} = - \frac{K_{TC} K_{CR}}{K_{TC}}$$

Neste caso, a resposta, em-fase com o campo primário, dependerá basicamente da configuração geométrica do problema.

- Entre o primeiro e o segundo limites discutidos, as componentes crescem a princípio linearmente e, depois, suavemente. A qua

dratura, quando  $Q = 1,0$ , já fora do chamado limite resistivo onde a resposta do sistema é pouco ou nada influenciada pela componente em-fase, atinge seu valor máximo (0,5) e começa a cair. A real cresce até atingir o limite indutivo.

Na prática, trabalha-se entre os limites. De preferência, escolhe-se a frequência e/ou o espaçamento entre as bobinas de modo que as componentes real e imaginária caiam sempre na região onde  $Q > 1$ , pois aí os valores das leituras podem ser mais facilmente analisados.

### 2.3 Modelamento Eletromagnético

Modelos reduzidos têm sido, principalmente nas últimas três décadas, amplamente utilizados com a finalidade de fornecer subsídios às interpretações e.m. Isto decorre da grande complexidade que cerca as soluções matemáticas dos problemas e.m., notadamente aqueles de geometria não tão simples.

As condições para que um sistema modelo reproduza acuradamente a configuração geométrica das linhas de força do sistema real foram desenvolvidas por Sinclair, em 1948 (in Frischknecht, 1971) a partir da teoria de similitude eletromagnética. Essa teoria é amplamente tratada em Grant e West (1965), Ward (1967b), Hood e Ward (1969), Frischknecht (1971) e Orellana (1974). Este último, utilizando a análise dimensional.

Seja um ponto  $P(x,y,z)$  do sistema real e outro,  $P'(x',y',z')$  do sistema modelo. Eles podem ser relacionados da seguinte maneira:

$$x = px' \quad y = py' \quad z = pz' \quad (56)$$

onde  $p$  = fator linear de escala

Além das distâncias lineares, é preciso também relacionar  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  e  $t$  de ambos os sistemas:

$$\vec{E}(x,y,z,t) = a\vec{E}'(x',y',z',t') \quad (57)$$

$$\vec{H}(x,y,z,t) = b\vec{H}'(x',y',z',t') \quad (58)$$

$$t = gt' \quad \text{ou} \quad \omega' = g\omega \quad (59)$$

sendo  $a, b, g$  = fatores de escala para a intensidade do campo elétrico, a intensidade do campo magnético e o tempo, respectivamente.

Resta verificar como se relacionam as equações de onda para os dois sistemas. Tomando-se como exemplo a equação do campo elétrico (19), tem-se que

$$\nabla^2 \vec{E} + K^2 \vec{E} = 0 \quad (60)$$

$$\nabla'^2 \vec{E}' + K'^2 \vec{E}' = 0 \quad (61)$$

onde o símbolo  $\nabla'^2$  significa que as diferenciações devem ser feitas considerando-se as coordenadas  $(x', y', z')$  do sistema modelo.

A equação (61) pode ser reescrita à luz da (57) como se que:

$$p^2 \nabla^2 \frac{\vec{E}}{a} + K'^2 \frac{\vec{E}}{a} = 0 \quad (62)$$

Para que o sistema modelo possa simular acuradamente o sistema real, é necessário que as equações (60) e (62) sejam iguais. Igualando-as, chega-se a mais uma condição, deste vez com respeito a  $K$ , ou seja

$$K^2 = \frac{K'^2}{p^2} \quad \text{ou} \quad K' = pK \quad (63)$$

Considerando-se a aproximação quase-estática, o valor de  $K$ , dado pela equação (25), é

$$K^2 = i\omega\mu\sigma$$

Analogamente, para o sistema modelo, tem-se

$$K'^2 = i\omega'\mu'\sigma' \quad (64)$$

Substituindo-se as equações (64) e (25) na (63) fica-se com

$$\omega' \mu' \sigma' = p^2 \omega \mu \sigma$$

Como  $p$  pode ser expresso por

$$p = \frac{L}{L'}$$

onde  $L$  = dimensão linear característica do sistema real

$L'$  = dimensão linear correspondente a  $L$  no sistema modelo.

pode-se, então, escrever

$$\omega \mu \sigma L^2 = \omega' \mu' \sigma' L'^2 \quad (65)$$

sendo os primeiro e segundo termos desta equação (65) conhecidos, respectivamente como números de indução (ou parâmetros de resposta) do sistema real ( $\alpha$ ) e do sistema modelo ( $\alpha'$ ).

Qualquer sistema real pode ser simulado em laboratório. Para tanto, ao invés de cumprir uma a uma das condições impostas, basta conseguir a igualdade dos números de indução envolvidos pois ela garante o cumprimento de todas as demais condições.

Na prática, os materiais disponíveis comercialmente para tais simulações são em pequena variedade. Essa dificuldade é facilmente contornada uma vez que se pode alterar indiscriminadamente a frequência, a condutividade e a dimensão linear do modelo mas desde que seja mantida a igualdade dos números de indução.

É importante dizer que a dimensão linear tem diferentes significados de acordo com a técnica e.m. utilizada e o corpo considerado. Assim, por exemplo, para:

- esfera em campo uniforme,  $L$  = raio da esfera
- cilindro em campo uniforme,  $L$  = raio do cilindro
- semi-plano em campo dipolar,  $L^2$  = espessura ( $t$ ). distância entre as bobinas ( $l$ ).

Convém notar que o último exemplo corresponde aos modelos e campo considerados neste estudo.

## 2.4 Métodos de Prospecção Eletromagnética

A seguir é apresentada uma revisão da teoria dos métodos de prospecção e.m. extraída de Grant e West (1965), Keller e Frischknecht (1966), Bosschart (1967), Ward (1967b), Ward (1967c), Strangway e Vozoff (1967), Heiland (1968), Parasnis (1972), Orelana (1974), Parasnis (1975) e Telford (1976).

### 2.4.1 Parâmetros Mensuráveis

Diversos são os métodos de prospecção geofísica que se baseiam no fenômeno e.m. No domínio da frequência, as técnicas existentes envolvem a medição de parâmetros do campo e.m. tais como:

- a. "Strike" do eixo maior do elipsóide de polarização.
- b. Inclinação do eixo maior do elipsóide de polarização ("dip angle").
- c. Valores absolutos da amplitude do campo magnético total ou das componentes em termos de espaço (horizontal ou vertical) do campo magnético total.
- d. Valores semi-absolutos de uma ou mais componentes do campo magnético secundário, medidos em relação às amplitudes e fase da corrente ou do campo magnético primários.
- e. Componentes em quadratura do campo magnético em relação às componentes em-fase correspondentes.
- f. Razões do campo magnético e diferenças de fase em pontos sucessivos de observação.
- g. Razões das componentes em-fase em pontos sucessivos de observação.

Em geral, técnicas que se baseiam nas medições descritas em b e d são as mais comumente utilizadas. As técnicas que se utilizam de pulsos, ou seja, que trabalham no domínio do tempo (transientes), foram inicialmente desenvolvidas pelos russos e podem ser consideradas equivalentes aos trabalhos realizados em multifreqüências. Isto porque os resultados com elas obtidos podem ser decompostos em espectros de frequência através da trans

formada de Fourier. Por isso mesmo, toda a teoria aqui revista permanece válida para essas técnicas.

Nos métodos transientes, as correntes induzidas são geradas pela variação da corrente emitida com o tempo, já que esta última não atinge imediatamente o equilíbrio quando o circuito formado com o terreno é aberto ou fechado. O sinal que é recebido no receptor, quando é interrompido o pulso, não atinge imediatamente zero, decaindo gradualmente. Esse decaimento é tanto menor quanto maior for a condutividade superficial, como consequência da dissipação das correntes secundárias que foram induzidas. Assim, nesses métodos, o parâmetro a ser medido é o decaimento do sinal. Os primeiros instantes desse decaimento são governados pela condutividade da camada mais superficial uma vez que estão associados com as componentes de alta frequência do pulso. Portanto, são os instantes finais do decaimento, por estarem associados predominantemente com as componentes de baixa frequência do pulso, que melhor caracterizam a condutividade do corpo mais profundo.

Apesar das técnicas transientes serem novas e pouco testadas em comparação com as demais, pelo que foi exposto nota-se que são mais vantajosas, inclusive porque possibilitam investigações mais profundas em subsuperfície. No entanto, exigem instrumental de custo elevado.

#### 2.4.2 Classificação

Os diversos métodos e.m. podem ser classificados segundo vários critérios, tais como:

##### a) Domínio

###### a.1) da Frequência

Exemplos: Slingram, Turam, MT, AMT, HEM, AFMAG, TRIDEM, VLF, E-Phase, Radiophase, Quadrem, IREM, Shootback.

###### a.2) do Tempo

Exemplos: INPUT, PEM, Turam-sistema transiente.

## b) Fonte

## b.1) Natural

Exemplos: AFMAG, MT, AMT.

## b.2) Artificial

Exemplos: os demais.

## c) Banda de Freqüência

## c.1) Alta

Exemplos: VLF, E-Phase, Radiophase.

## c.2) Baixa

Exemplos: os demais.

## d) Modo de Operação

As técnicas e.m. podem ser classificadas de acordo com a condução do levantamento, a posição da fonte e, em se tratando de técnica que se utiliza de fonte artificial, da orientação e do arranjo das bobinas.

## d.1) Condução do levantamento

Terrestre. Ex.: Slingram, TURAM (e sua variedade transiente), MT, AMT, AFMAG, VLF, IREM, Shootback, PEM.

Áerea. Ex.: DIGHEM, E-Phase, Radiophase, Quadrem, INPUT.

## d.2) Posição da Fonte

Fixa

Móvel

No primeiro caso, pode-se citar como exemplo o método TURAM no qual é utilizado como fonte uma espira, em geral retangular, disposta na superfície do terreno. O próprio método VLF, que faz uso de campos gerados por antenas especialmente construídas para comunicações com submarinos, também cai nessa categoria. Outros seriam o UTEM, o PEM e o IREM.

A maioria das técnicas utiliza fontes móveis. Isto é válido principalmente para técnicas aéreas, se bem que foram desenvolvidas recentemente técnicas como o TURAIR e o VLF-aéreo, cuja fonte se encontra fixa em terra. Essas novas versões do método e.m. são conhecidas como técnicas semi-aéreas.

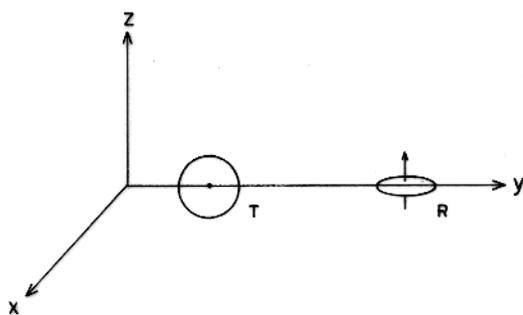
#### d.3) Orientação e Arranjo das Bobinas

Existem cinco sistemas básicos de orientação das bobinas, os quais são apresentados na figura 4. Desses, os mais comumente utilizados são os 1 e 4, seguidos do 2.

Quanto ao arranjo das bobinas convem, primeiramente, considerar se a fonte é fixa ou não. No primeiro caso, a bobina receptora pode caminhar ao longo do perfil onde se encontra a fonte e/ou em perfis adjacentes. Esse procedimento também é seguido quando o receptor é mantido fixo e a fonte é móvel (arranjo bastante incomum). Quando tanto a fonte como o receptor são móveis, as duas bobinas podem ser arranjadas em fila ("in-line") ou de frente ("broadside"). No primeiro arranjo, transmissor e receptor movem-se sobre o mesmo perfil e no outro, em perfis paralelos. Em ambos os arranjos, o espaçamento entre as bobinas é mantido constante.

Todos os arranjos mencionados são passíveis de serem utilizados em aero-levantamentos. Os mais comuns são aqueles em que a fonte e a recepção são móveis. Nesses casos, ambas as bobinas podem ser atreladas à fuselagem do avião (ou helicóptero) ou a um dispositivo que é preso por um cabo ao avião. Tais sistemas são conhecidos como "rigid-boom" e permitem arranjos em fila ou de frente. É possível ainda prender uma das bobinas à fuselagem do avião e a outra, a um dispositivo semelhante ao mencionado. Nesse caso tem-se os "towed-bird" e os levantamentos são todos em fila, mas as bobinas não se encontram no mesmo plano. Como exemplos desses últimos cita-se o INPUT e o Quadrem e, dos "rigid-boom", o DIGHEM e o TRIDEM.

A descrição de uma dada técnica considerando-se a orientação das bobinas pode ser feita de várias maneiras. Por exemplo, considerando-se a orientação da bobina transmissora, os sistemas 1 e 4 (fig. 4) podem ser descritos como, respectivamente, de bobina ("loop") vertical ou dipolo horizontal e de bobina horizontal ou dipolo vertical. Mais freqüentemente, os sistemas são caracteri

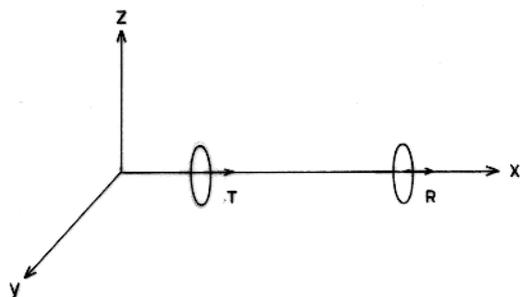


(1)

ACOPLAMENTO MÍNIMO

Resposta nula para folhas planas infinitas

COM ARRANJO DE FRENTE:

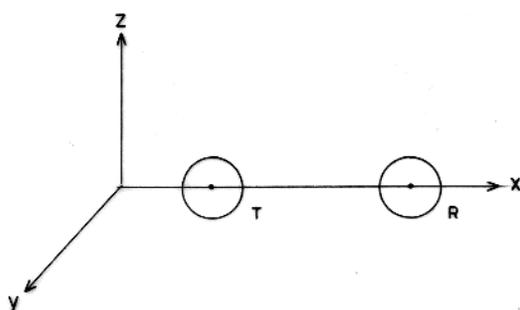
configuração  $T\ 1,0,0\ L\ 0,1,0\ R\ 0,0,1$ 

(2)

ACOPLAMENTO MÁXIMO

Resposta muito pequena para folhas planas infinitas

COM ARRANJO EM FILA:

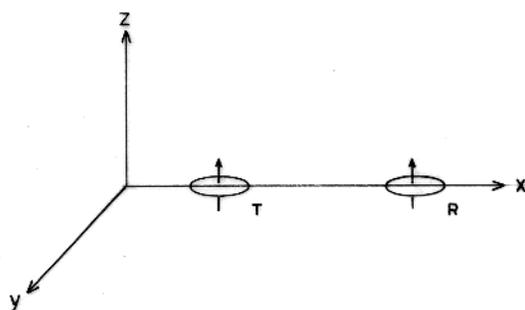
configuração  $T\ 1,0,0\ L\ 1,0,0\ R\ 1,0,0$ 

(3)

ACOPLAMENTO MÁXIMO

Resposta mediana para folhas planas infinitas

COM ARRANJO EM FILA:

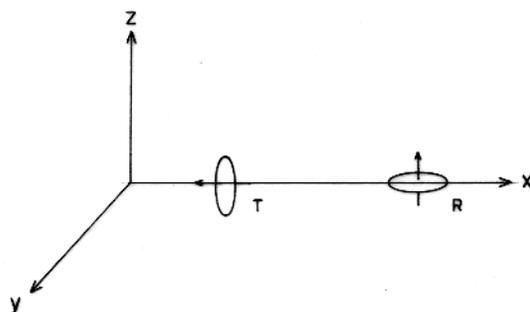
configuração  $T\ 0,1,0\ L\ 1,0,0\ R\ 0,1,0$ 

(4)

ACOPLAMENTO MÁXIMO

Boa resposta para folhas planas infinitas

COM ARRANJO EM FILA:

configuração  $T\ 0,0,1\ L\ 1,0,0\ R\ 0,0,1$ 

(5)

ACOPLAMENTO MÍNIMO

Ótima resposta para folhas planas infinitas

COM ARRANJO EM FILA:

configuração  $T\ 1,0,0\ L\ 1,0,0\ R\ 0,0,1$ 

Fig. 4 - Sistemas básicos de orientação das bobinas para levantamentos e.m. com exemplos de arranjos utilizados para os mesmos. A posição dos dipolos é dada por uma seta ou um ponto.

zados através do plano ou do eixo das bobinas transmissora e receptora, consideradas conjuntamente. Dessa maneira, 4 e 1 seriam, respectivamente um sistema horizontal coplanar, e um sistema de bobina transmissora de eixo horizontal e de bobina receptora de eixo vertical.

Uma grande desvantagem desse tipo de descrição é a sua ambigüidade já que nada diz sobre a direção da linha que passa pelas bobinas transmissora e receptora ( $L$ ) e sobre a direção na qual o sistema é movido como um todo. Ou seja, não descrevem o arranjo das bobinas.

Parasnis (1970) apresentou uma nomenclatura simples, elegante e livre de ambigüidades para esse tipo de descrição e que cada vez mais vem substituindo as anteriores. Ela especifica a direção dos eixos dos dipolos gerados nas bobinas transmissora e receptora (respectivamente  $T$  e  $R$ ), a direção da linha  $L$  e o ângulo formado por  $L$  e a direção na qual o sistema está sendo movimentado.

Considerando-se o eixo dos  $x$  como paralelo à direção de movimento do sistema e o plano vertical que passa por esse eixo como o plano  $x-z$ , o eixo dos  $z$  pode ser considerado como qualquer reta contida nesse plano. Como o sistema é ortogonal, o eixo dos  $y$  fica então definido como uma reta perpendicular às demais. Sendo  $T_1, T_2$  e  $T_3$  -  $L_1, L_2$  e  $L_3$  -  $R_1, R_2$  e  $R_3$ , respectivamente os cossenos diretores do dipolo gerado no transmissor, da linha  $L$  e do dipolo no receptor, então, qualquer particular modo de operação seja terrestre ou aéreo tem sua orientação e o arranjo das bobinas descritos por

$$T \quad T_1, T_2, T_3 \qquad L \quad L_1, L_2, L_3 \qquad R \quad R_1, R_2, R_3$$

Na figura 4 são apresentados exemplos de arranjos utilizados para cada um dos sistemas básicos de orientação das bobinas bem como a configuração dos mesmos usando-se a nomenclatura de Parasnis. É conveniente esclarecer que dos exemplos dados para os sistemas de orientação, 2, 3, 4 e 5 são usados em levantamentos terrestres enquanto que 1, 2 e 5 são usados em levantamentos realizados com helicópteros. Além disso, 1 é um possível sistema terrestre e aéreo (avião).

Finalmente, convém ressaltar que os métodos e.m. são multos e, portanto, fugiria por completo ao objetivo deste trabalho descer a maiores considerações, mesmo que fosse sobre aqueles métodos mais comuns, senão aquele que foi utilizado, o método Slingram.

#### 2.4.3 O Método Slingram

O método Slingram foi primeiramente desenvolvido na Suécia em 1937, e é considerado uma derivação do método Sundberg. Tem aplicação tanto terrestre quanto aérea ("rigid-boom"), sendo um dos métodos e.m. mais comumente empregado em prospecção geofísica.

Nesta técnica, as duas bobinas, em geral circulares (0,5 a 2,0 m de diâmetro), podem ser orientadas segundo qualquer um dos cinco sistemas básicos de orientação (fig. 4). Mas, a orientação dita coplanar horizontal em arranjos em fila, configuração  $T\ 0,0,1\ L\ 1,0,0\ R\ 0,0,1$  (nº 4 da fig. 4), é a mais comumente utilizada. Por isso mesmo, o termo Slingram tem sido erroneamente usado como sinônimo desse tipo de orientação ou mesmo da configuração citada. Muito raramente, são usadas bobinas coaxiais (tam**ém** em fila).

A bobina transmissora comporta-se como um dipolo magnético oscilante uma vez que por ela é feita circular uma corrente de baixa frequência. Dessa bobina parte, através de um cabo ou de telemetria, uma tensão para o aparelho receptor. Neste último, um compensador permite os ajustes da fase e da amplitude da tensão de modo que a mesma possa servir de referência para a medição das componentes do campo magnético secundário.

O levantamento com o método Slingram deve ser realizado em perfis que cortem perpendicularmente o "strike" geológico e/ou a direção presumida para os corpos procurados. A malha de investigação depende do tamanho e da profundidade esperados para os corpos e do detalhe exigido.

Os resultados obtidos são apresentados sob a forma de perfis onde os valores das componentes são atribuídos ao ponto médio entre a distância das bobinas. Como o sistema é simétrico, as posições das bobinas podem ser permutadas porque as leituras per

manecem as mesmas.

A interpretação é feita comparando-se os perfis com curvas obtidas através de modelamento reduzido ou digital. Essa simples investigação já permite indicações qualitativas a respeito da locação e do mergulho do condutor. A primeira pode ser estimada como sendo cerca da metade da distância entre os pontos em que a componente real inverte de sinal conforme é aproximadamente verificado nos perfis de laboratório. O mergulho, por sua vez, pode ser avaliado através do grau de assimetria entre os dois picos máximos das componentes.

Além das curvas teóricas são utilizados diagramas de Argand que permitem uma interpretação mais quantitativa do mergulho, da profundidade e da condutância  $\sigma t$  do corpo. É conveniente notar que  $\sigma t$  pode ser separado dentro de certos limites desde que o levantamento tenha sido realizado com equipamentos de múltiplas frequências (Parasnis, 1971).

Além do mais, para uma melhor visualização do "trend" das anomalias, podem ser construídos mapas onde isovalores de cada uma das componentes podem ser contornados.

Para que os dados, ao serem interpretados, forneçam informações precisas, é necessário tomar uma série de cuidados quando da obtenção dos mesmos. A maioria diz respeito a necessidade de se evitar variações tanto do espaçamento entre as bobinas como da orientação das mesmas.

As primeiras variações são as mais comuns de ocorrer e, por isso mesmo, o envio do sinal de referência através do cabo é preferível ao envio do mesmo por telemetria, uma vez que o cabo permite um certo controle sobre o espaçamento (além de não onerar o custo do equipamento). Um erro de 2% no espaçamento leva a um erro apreciável (6%) na componente em-fase. Conseqüentemente, não é muito vantajoso trabalhar com espaçamentos pequenos pois os erros na variação dos mesmos são relativamente maiores.

Os erros devidos à orientação são menos freqüentes a não ser em terrenos acidentados. Conduzem a menores erros nas leituras do que as modificações do espaçamento entre as bobinas. Um erro angular de 10° promove uma variação igual ou maior do que 1,5% na componente real. Quando as bobinas são coaxiais, a orientação adequada das mesmas é mais difícil de ser conseguida, o

que tem levado a um uso bem mais restrito desse sistema de orientação. A quadratura é em parte imune aos erros discutidos.

Finalmente, já que a forma e a amplitude da anomalia também são controladas pela distância  $\ell$  considerada com respeito à dimensão linear  $L$  do condutor, um outro cuidado que assegura a utilidade dos dados, desta feita em face aos esquemas de interpretação existentes, diz respeito à escolha de  $\ell$ . Por exemplo, em se tratando de um condutor do tipo semi-plano, para que o mesmo possua extensão infinita em profundidade é necessário que essa sua extensão seja superior a  $2\ell$  (Martin, 1960 in Lowrie e West, 1965). A maioria dos corpos de interesse cai nessa categoria quando  $\ell$  é menor ou igual a 90 m.

### 3 METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO

#### 3.1 Modelos Simulados

##### 3.1.1 Aproximações Físicas

Na natureza os corpos mineralizados podem se apresentar sob inúmeras formas e, por isso mesmo, é praticamente impossível analisar todas as variedades com modelos reduzidos. No entanto, a grande maioria desses corpos possui uma dimensão bastante pequena, a espessura, quando comparada com as outras duas. Conseqüentemente, uma boa parte das possibilidades pode ser coberta adotando-se modelos do tipo semi-plano.

O manto de intemperismo, por possuir duas de suas dimensões enormemente grandes em comparação com a espessura, pode ser adequadamente simulado por modelos do tipo plano. Essa aproximação nem sempre é satisfatória porque o manto pode apresentar, localmente, variações de espessura e condutividade.

Como o objetivo deste trabalho é a análise dos efeitos provocados pelo manto de intemperismo sobre anomalias associadas a corpos tabulares mineralizados, foram utilizados ambos os modelos citados para simular a situação que se busca investigar.

Para que esses modelos de corpo e manto respondam, respectivamente, como um plano e um semi-plano, é necessário escolher adequadamente as dimensões dos mesmos para que não sejam sentidos efeitos de borda e o corpo possa ser considerado de extensão infinita em profundidade. A primeira dessas condições é satisfeita quando as dimensões dos modelos de laboratório permitem que as bordas dos mesmos estejam no mínimo a 0,75ℓ das bobinas (Lowrie e West, 1965). A outra, é cumprida quando a extensão do modelo que simula o corpo é superior a 2ℓ como já foi anteriormente mencionado.

Na condução deste estudo o halo de disseminação de sulfatos foi considerado pouco desenvolvido e a encaixante, altamente resistiva (vide fig. 1). Esta última suposição permite que o modelamento seja executado ao ar-livre ("free-air"), o que diminui bastante as dificuldades de operação e o custo do modelamento. Não há, assim, necessidade do emprego de tanques com soluções eletrolíticas (salmoura ou ácido clorídrico diluído), comumente

usadas para simulação de rochas encaixantes levemente condutivas, e mesmo de uma série de equipamentos especiais (Freschknecht, 1971; Verma e Gaur, 1973). Para completar as condições de modelamento foi admitida a inexistência de minerais ferromagnéticos em todo o conjunto.

### 3.1.2 Parâmetros de Resposta Escolhidos

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

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

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

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

O histograma apresentado na figura 5a mostra a distribuição da freqüência das condutâncias obtidas para vários depósitos de sulfetos. Dos 72 valores utilizados, 85% deles possuem de 0 (ou melhor, 0,4) a 60 S. Dentro desta faixa, tem-se cerca de 50% dos valores concentrados entre 0 (0,4) e 10 S conforme pode ser visto no histograma da figura 5b. Os dados utilizados pa

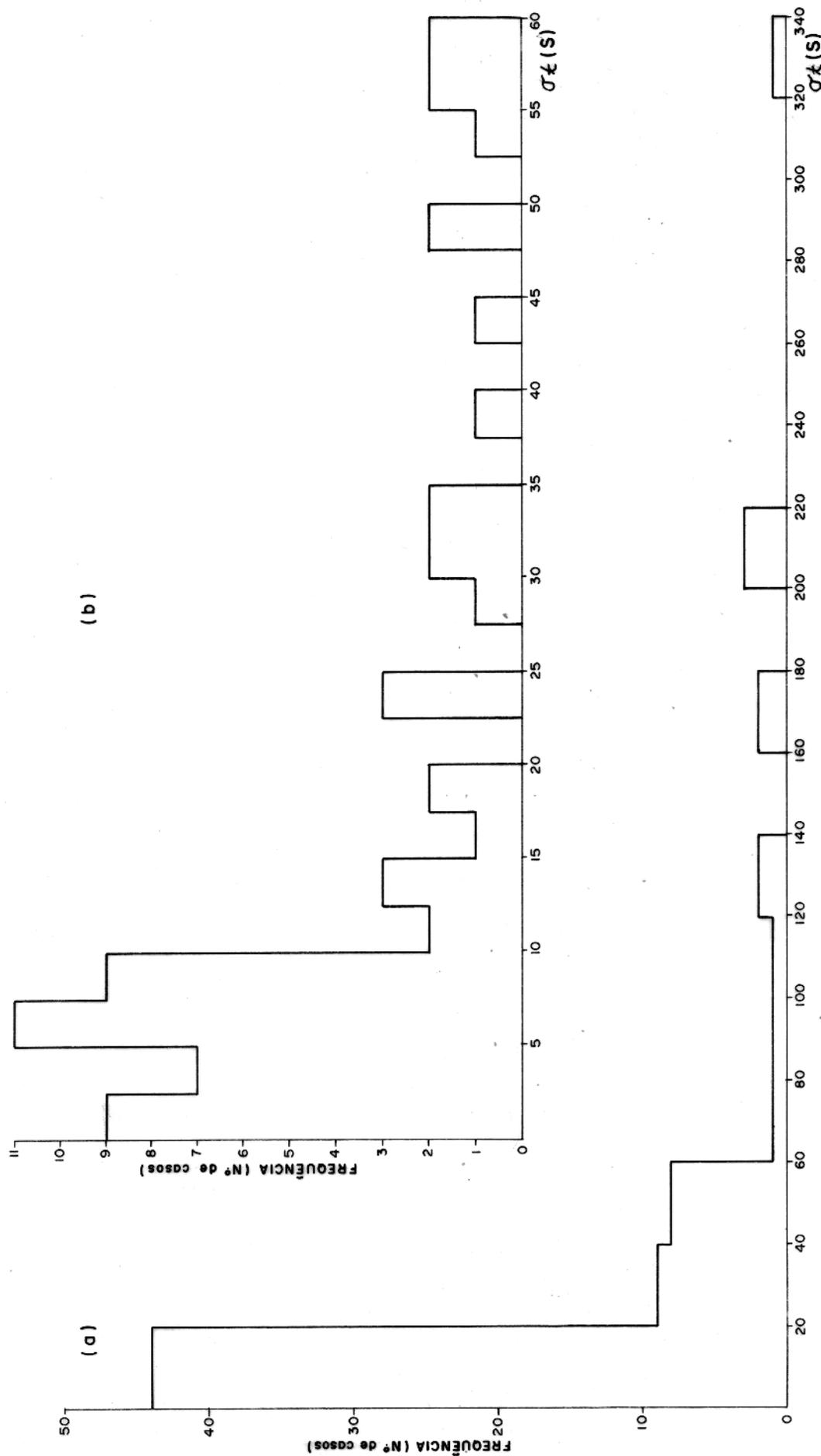


Fig.5 - Frequência das condutâncias obtidas para vários depósitos de sulfetos. (a) Distribuição total. (b) Distribuição no intervalo de 0 a 60 S.

ra esta análise foram extraídos de Bosschart (1961), Paterson (1961), Strangway (1966) e Questor Surveys Ltd. (s.d.).

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

No método Slingram, a frequência de operação varia de umas poucas centenas a alguns milhares de Hz e a distância entre as bobinas, de cerca de 30 até 150 m. No entanto, frequências inferiores a 2000 Hz são comumente utilizadas quando se trabalha com equipamentos que operam em uma ou mesmo em duas frequências, na realidade os mais utilizados em prospecção. Ademais, para diminuir o efeito de blindagem provocado pelo manto de intemperismo é aconselhável a utilização de grandes espaçamentos entre as bobinas, como por exemplo, 100 m ou mais (Preston, 1975; Parasnis, 1971).

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

$$\alpha_c = 1,60 \text{ a } 32,27$$

e

$$\alpha_m = 0, 0,25, 0,50 \text{ e } 1,00$$

O caso  $\alpha_m = 0$  implica na inexistência do manto mas se trata de um caso necessário na presente investigação para permitir comparação com os demais e, também, com os resultados obtidos por Lowrie e West (1965) e Nair et al. (1968).

### 3.1.3 Materiais Utilizados

Uma das limitações encontradas em modelamento reduzido diz respeito à pequena variedade de materiais comercialmente disponíveis para que a simulação possa ser, toda ela, realizada com

reduções adequadas dos parâmetros. Para contornar essa limitação empregam-se frequências que permitam, em face à condutância dos materiais disponíveis para os modelos, a obtenção dos parâmetros de resposta pretendidos.

Neste trabalho, o fator geométrico de redução varia em torno de 400. Considerando-se este fator, o espaço entre os centros das bobinas ( $l$ ) foi reduzida para 0,25 m. O manto de in temperismo foi simulado por folhas de aço e o corpo, por folhas de alumínio e de aço. Ambos os materiais são de fácil obtenção no mercado e de baixo custo, principalmente o alumínio, em comparação com os vários outros que poderiam ser utilizados.

A condutividade das folhas foi medida com um resistivímetro RESISTOMAT - Mikroohmmeter, Typ 2302 fabricado pela Burster Gernsbach Präzisionsmesstechnik (Alemanha Ocidental). Nas medições foram empregadas tiras de 1,00 m x 0,01 m cortadas das folhas metálicas. Em cada tira foram feitas três medições considerando-se os eletrodos de potencial espaçados de 0,60, 0,70 e 0,80 m e os eletrodos de corrente sempre nas bordas das tiras. As medições das condutividades foram realizadas a 27,4°C. Para cada grau de variações da temperatura durante o trabalho, o erro na condutividade é no máximo de cerca de 0,4%.

Na tabela 1, são dados os valores encontrados para as espessuras e condutividades das folhas e na tabela 2, as frequências de operação e as combinações utilizadas entre as diversas folhas bem como os parâmetros de resposta obtidos para o manto e o corpo.

As dimensões das folhas utilizadas como corpo e como manto foram, respectivamente, as seguintes: 1,00 m x 0,80 m e 2,00 m x 1,00 m. Estes valores garantiram, em face à distância utilizada entre as bobinas (0,25 m), que as condições anteriormente citadas para que os modelos pudessem se comportar como um semi-plano e um plano fossem plenamente satisfeitas.

No total, foram utilizadas 2 e 8 folhas para simulação do manto e do corpo, respectivamente.

Tab 1 : Espessuras e condutividades das folhas metálicas utilizadas nos experimentos.

Folha	Material	$t$ ( $10^{-3}$ m)	$\sigma_{27,4^0}$ ( $10^6$ S/m)
1	Alumínio	0,278	33,367
2	Alumínio	0,428	32,126
3	Alumínio	0,514	30,470
4	Alumínio	0,709	32,550
5	Alumínio	1,008	33,126
6	Alumínio	1,513	33,251
7	Alumínio	2,135	33,420
8	Aço	0,283	1,377
9	Aço	0,812	1,387
10	Aço	2,570	1,398

Tab 2 : Freqüências, combinações utilizadas entre as folhas e parâmetros de resposta obtidos para o manto e o corpo.

f(Hz)	Manto		Corpo	
	Folha	$\alpha_m$	Folha	$\alpha_c$
325	8	0,25	10	2,31
			1	5,95
			2	8,82
			4	14,81
			6	32,27
225	9	0,50	10	1,60
			1	4,12
			3	6,96
			5	14,83
			7	31,69
450	9	1,00	10	3,19
			1	8,24
			3	13,91
			5	29,66

### 3.2 Equipamentos

O conjunto de modelamento compreende os seguintes sistemas: de energização, de recepção e de disposição dos modelos e das bobinas. Na figura 6 apresenta-se o bloco diagrama dos sistemas de energização e de recepção.

#### 3.2.1 Sistema de Energização

Desse sistema fazem parte um oscilador senoidal, um amplificador de potência e a bobina transmissora. O oscilador excita o amplificador que, por sua vez, alimenta a bobina. Por esta última circula uma corrente de 1 A monitorada por um oscilador que permite evitar distorções harmônicas da mesma.

O oscilador, um modelo GR-1361 da General Radio (USA), permite trabalhar com frequências de 10 Hz a 100 kHz. Entre 100 Hz e 10 kHz, as distorções do sinal de saída são inferiores a 0,2% quando a potência fornecida é de no máximo 1,6 W. Além de alimentar o amplificador, o oscilador fornece voltagens em fase e em quadratura que são usadas como sinais de referência, após calibração, para análise do campo secundário. As voltagens de referências de fase e de quadratura ( $1,25 \pm 0,2 V_{rms}$ ) têm, respectivamente distorções menores que 0,2% e 0,4%. A impedância mínima de saída é igual a 47 kohm.

O amplificador, um modelo 467A da Hewlett-Packard (USA), fornece -20 V a +20 V dc com uma potência de 10 W. A distorção até 1 kHz é inferior a 0,01%. A impedância de entrada é 50 kohm em paralelo com 100 pF e a de saída, 5 mohm em série com 1  $\mu$ H.

A bobina transmissora tem 0,025 m de diâmetro, ou seja, um diâmetro exagerado em face ao fator de escala utilizado no modelamento. Foi construída com 137 espiras de fio esmaltado de cobre, bitola nº 20 S.W.G., e com um núcleo de ferrite ( $L = 583 \mu$ H,  $R = 0,425$  ohm), tendo sido montada num suporte de acrílico.

#### 3.2.2 Sistema de Recepção

Esse sistema conta com uma bobina receptora, um detetor de fase e um registrador gráfico potenciométrico.

Para a bobina receptora, também com 0,25 m de diâmetro e

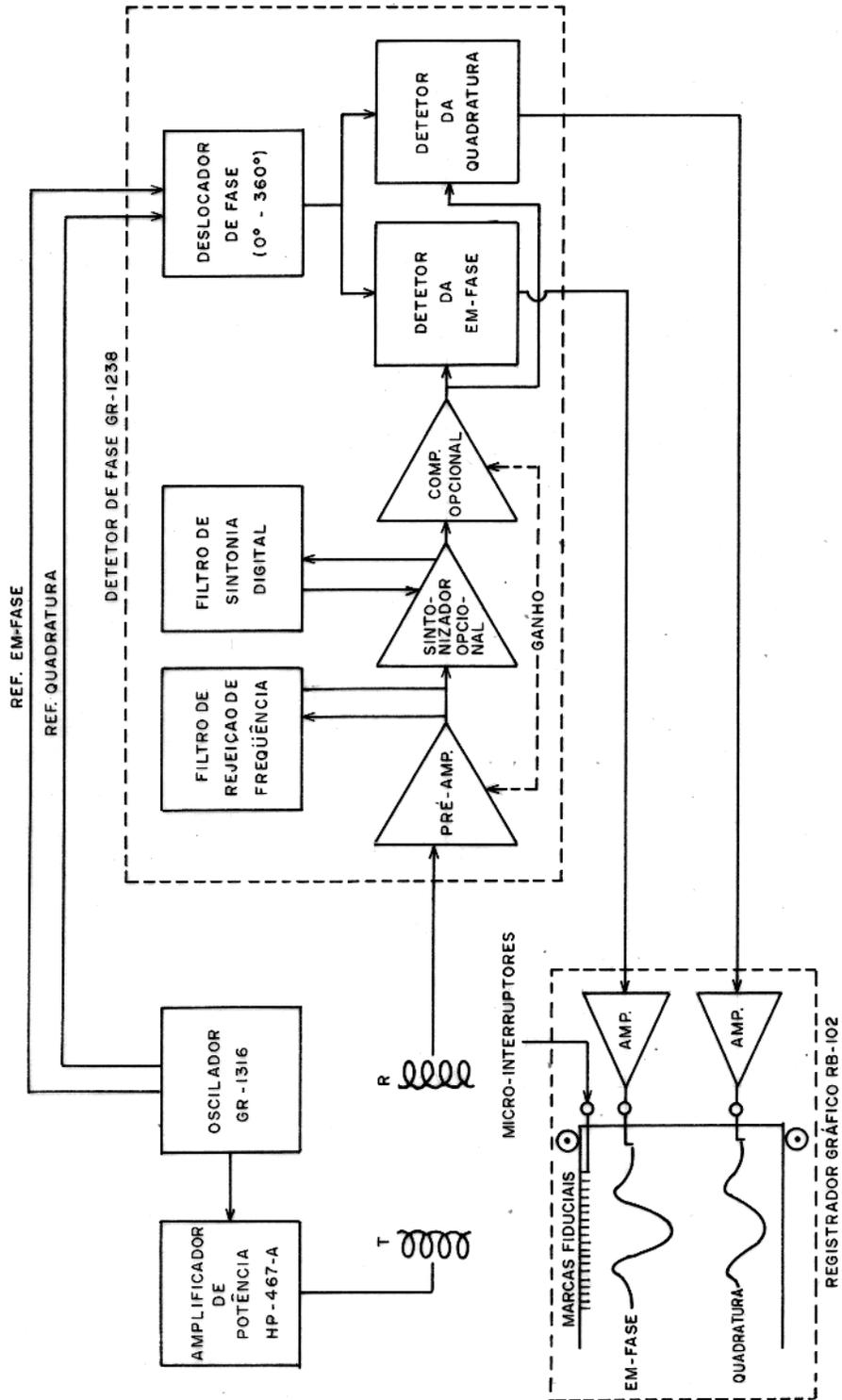


Fig. 6 - Bloco diagrama dos sistemas de energização e recepção.

núcleo de ferrite, foram utilizadas 680 espiras de fio esmaltado de cobre, bitola nº 36 S.W.G. Com esse número de espiras, obteve-se um alto valor de indutância ( $L = 6,23$  mH) e uma resistência ôhmica de  $R = 8,3$  ohms tal que para a bobina tem-se  $Q = 4,7$  a 1 kHz.

O detetor de fase, um modelo 1238 da General Radio (USA) é sintonizável e de alto ganho, tem amplificação linear na faixa de frequência utilizada e usa um par de detetores sensível à fase. Esses detetores respondem a quaisquer componentes ortogonais do sinal de entrada enviado pela bobina receptora desde que haja um sinal de referência, ou melhor, as componentes de referência enviadas pelo oscilador. Essas são calibradas de modo a serem iguais a f.e.m. produzida pelo campo primário e dirigem relés síncronos que detetam as componentes apropriadas do sinal desconhecido e cujo resultado é, em seguida, amplificado. O detetor tem uma sensibilidade de  $35$  nV<sub>rms</sub> para frequências de 500 Hz a 100 kHz e uma impedância de entrada de 1 Gohm em paralelo com 20 pF.

Os resultados obtidos no detetor, dados como uma fração (de 0 a 1) do campo primário, seguem para um registrador gráfico de dois canais, modelo RB-102 da ECB (Brasil). Neste, o registro dos resultados feito pelo servomotor de corrente alternada, pode ser realizado em 24 diferentes velocidades numa carta de largura de 0,25 m. A sensibilidade é de 0,1% da faixa selecionada e a impedância de entrada é potenciométrica até 500 mV e igual a 1 Mohm constante para 1 V e 2 V. O registrador conta ainda com um marcador de eventos que permite posicionar o sistema de bobinas (T-R) com respeito às leituras obtidas.

### 3.2.3 Sistema de Disposição dos Modelos e das Bobinas

Duas estruturas de madeira, uma menor e outra maior e externa a outra, foram utilizadas, respectivamente, para as disposições dos modelos e das bobinas.

A estrutura menor 2,00 m x 1,10 m permite dispor o corpo a várias profundidades ( $h_c/\ell$ ), com quaisquer mergulhos. Para isso o corpo é atrelado a uma prancha de madeira que, por sua vez, é presa pelas suas bordas superiores à estrutura, através de parafusos de acrílico, em quaisquer um dos nove furos existentes

na porção central dos lados da estrutura. Esses furos foram feitos a cada 0,025 m de altura em duas placas grossas de acrílico que substituem a madeira naquela parte da estrutura. Essa substituição foi necessária porque os furos inicialmente executados na própria madeira não permitiram uma boa precisão de  $h_c/\ell$  em face às características desse material e do peso do conjunto corpo prancha. Esse conjunto pôde ser inclinado segundo um ângulo qualquer e preso à própria estrutura por parafusos de acrílico, e também por um fio rígido de nylon atrelado ao centro da porção mais inferior da prancha e a um ponto da estrutura maior. O ângulo do mergulho pôde ser medido com uma bússola. Ou, ainda, através de um transferidor preso a um dos parafusos que ajusta a prancha à estrutura. Uma pequena régua de acrílico que pode ser presa aquele parafuso, move-se com a prancha permitindo ler no transferidor o ângulo de mergulho da mesma.

Sobre a estrutura menor foi colocado o manto entre duas chapas de madeira compensada para assegurar a horizontalidade do mesmo.

A estrutura maior é também mais alta que a menor e foi a ela atrelada. Conta com dois trilhos horizontais de madeira ao longo dos quais desloca-se um carrinho de acrílico contendo as bobinas na altura desejada. Esse carrinho é movido por um motor passo-a-passo. Para auxiliar o movimento do mesmo, foi utilizado um peso preso por um fio de nylon ao carrinho. Esse fio passa por uma roldana presa no lado da estrutura na direção da qual é movimentado o carrinho. Dezenove micro-interruptores foram dispostos a cada 0,05 m do trilho. Uma pequena peça de acrílico, presa ao lado do carrinho numa posição que corresponde ao centro do sistema T-R, aciona os interruptores quando o sistema é posto em movimento. Como cada interruptor está ligado ao registrador gráfico, o posicionamento do perfil é feito pelo marcador de eventos daquele instrumento.

### 3.3 Medições

#### 3.3.1 Calibração

Os sinais de referência enviados pelo oscilador ao detector são calibrados com respeito a f.e.m. gerada na bobina recep

tora pelo campo primário.

Isso é feito, primeiramente, anulando-se a componente em-fase do sinal de referência com respeito ao sinal do campo primário. O que significa que os eixos dos sinais de referência são deslocados de modo que o sinal primário fique em quadratura com o sinal enviado pela bobina receptora. Nesta situação, a caneta do registrador que responderá pela componente em-fase é deslocada para a posição escolhida como zero.

Em seguida, girando-se a fase do sinal de referência de  $90^\circ$ , pode-se anular o sinal da mesma em quadratura, também com respeito ao sinal do campo primário. Analogamente, neste outro caso, os eixos de referência são deslocados de modo que o sinal em fase do oscilador fique em fase com o sinal primário. A caneta do registrador que responderá pela quadratura é levada à posição zero. A outra, correspondente a em-fase pode, então, através de ajuste potenciométrico, ser levada à posição que corresponde a 100% ou a outro valor dependendo da escala escolhida. Ou seja, iguala-se à amplitude do sinal primário (que é igual a 1 mas, por conveniência, é dada em percentagem), a componente em-fase.

Deslocando-se novamente o sinal de referência de  $90^\circ$  pode-se, de maneira análoga à descrita, igualar a amplitude do sinal de referência ao sinal primário, desta feita porém em quadratura.

Após essas operações, o sinal de referência passa a corresponder a f.e.m. produzida pelo campo primário. Está feita a calibração restando apenas, levar ambas as canetas para uma posição escolhida como base. Nesta posição as componentes serão iguais a 0% sempre que não houver campo provocado secundariamente. Em outras palavras, o sinal de referência não acusará variações sempre que houver apenas o campo primário.

### 3.3.2 Calibração em Diferentes Ambientes

Neste modelamento, as calibrações foram feitas sobre o manto e na ausência do mesmo. No campo, esta última é realizada sobre afloramento de rocha resistiva e a primeira, sobre o próprio manto. No campo ou no laboratório, os efeitos devido ao condutor não devem ser sentidos na estação onde é feita a calibração.

A calibração sobre o manto foi realizada levando-se as bobinas ao centro da estrutura maior, estando ausente o corpo. Para a calibração feita na ausência do manto, o carrinho com as bobinas foi removido dos trilhos e disposto numa pequena armação de madeira bastante distante dos modelos.

### 3.3.3 Perfilagem

Todas as perfilagens foram realizadas continuamente, com as bobinas caminhando transversalmente à direção do corpo. A figura 7 mostra esquematicamente a disposição dos condutores em relação à posição das bobinas.

No total foram realizados cerca de 700 perfis alguns dos quais apenas para testes de propósitos diversos.

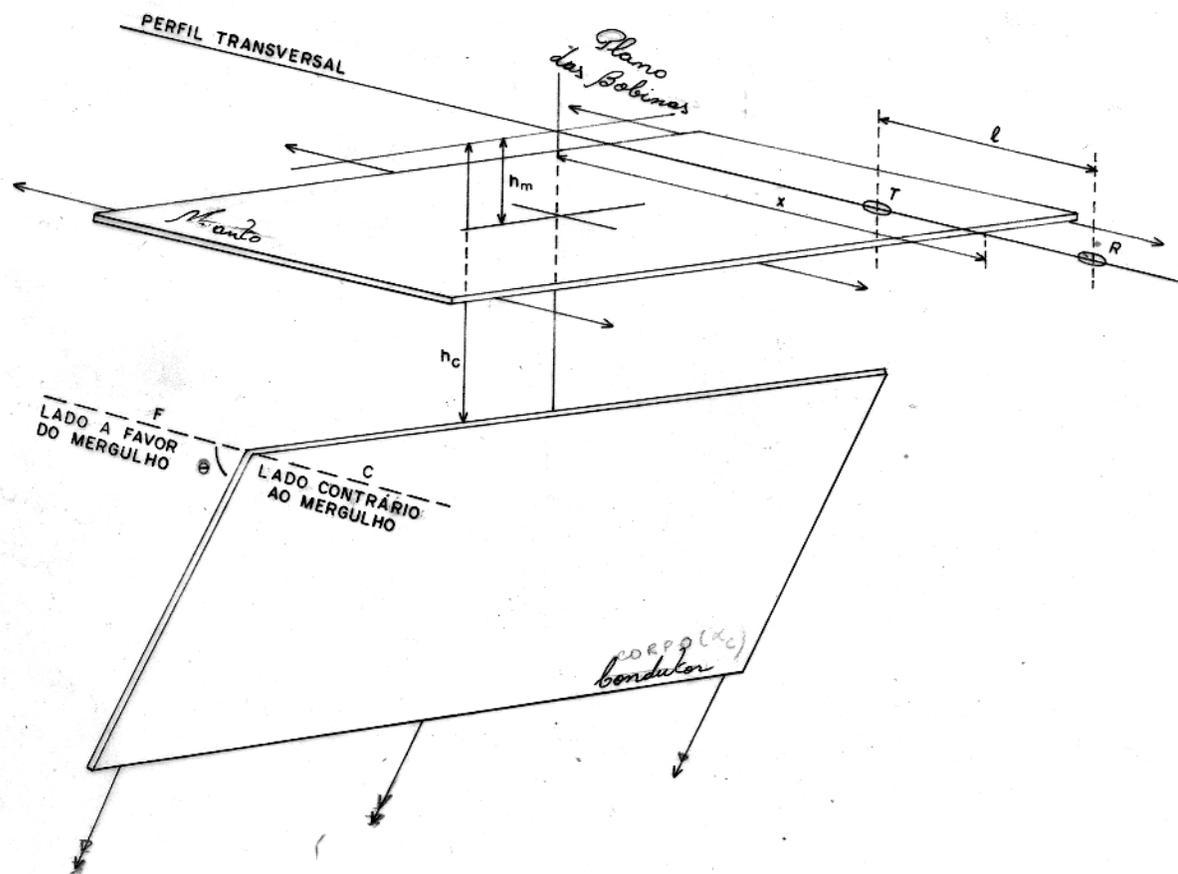
Os perfis para  $\alpha_m = 0,25$  foram os únicos conduzidos considerando-se apenas a calibração sobre o manto. Isto porque, para estes, os resultados obtidos com ambas as calibrações são bastante próximos. A opção pela calibração citada foi feita porque os dados obtidos com a mesma, como será visto adiante, são menos susceptíveis a variações da posição do modelo-manto.

A seguir são tecidas algumas considerações a respeito dos parâmetros físicos dos modelos utilizados.

#### 3.3.3.1 Posicionamento do Modelo-Manto

Foram feitos vários perfis para escolha da posição (isto é, da profundidade normalizada  $h_m/\ell$ ) em que a folha horizontal devia estar disposto para simular o manto. Convém notar que  $h_m/\ell$  tem significado apenas em sistemas modelos.

A figura 8 mostra os resultados daquelas investigações. Em todos os casos, o corpo é vertical e os valores plotados foram obtidos considerando-se os valores pico-a-pico da anomalia que é, no caso, simétrica (os valores pico-a-pico das anomalias assimétricas serão amplamente considerados adiante). As setas da figura indicam  $h_m/\ell$ . Os resultados obtidos considerando-se as diferentes calibrações estão unidos por uma linha apenas para facilitar a visualização dos mesmos. Os parâmetros gravados na borda dos círculos são válidos para os valores pico-a-pico dentro deles contidos.



**LEGENDA**

- T e R : BOBINA TRANSMISSORA E BOBINA RECEPTORA  
 $l$  : DISTÂNCIA ENTRE AS BOBINAS T e R  
 $x$  : DISTÂNCIA DO TOPO DO SEMI-PLANO AO CENTRO DA DISTÂNCIA ENTRE AS BOBINAS TOMADA NA HORIZONTAL  
 $h_m$  e  $h_c$  : PROFUNDIDADE DO MANTO E DO CORPO EM RELAÇÃO AO PLANO QUE PASSA PELO CENTRO DAS DUAS BOBINAS  
 $\theta$  : MERGULHO

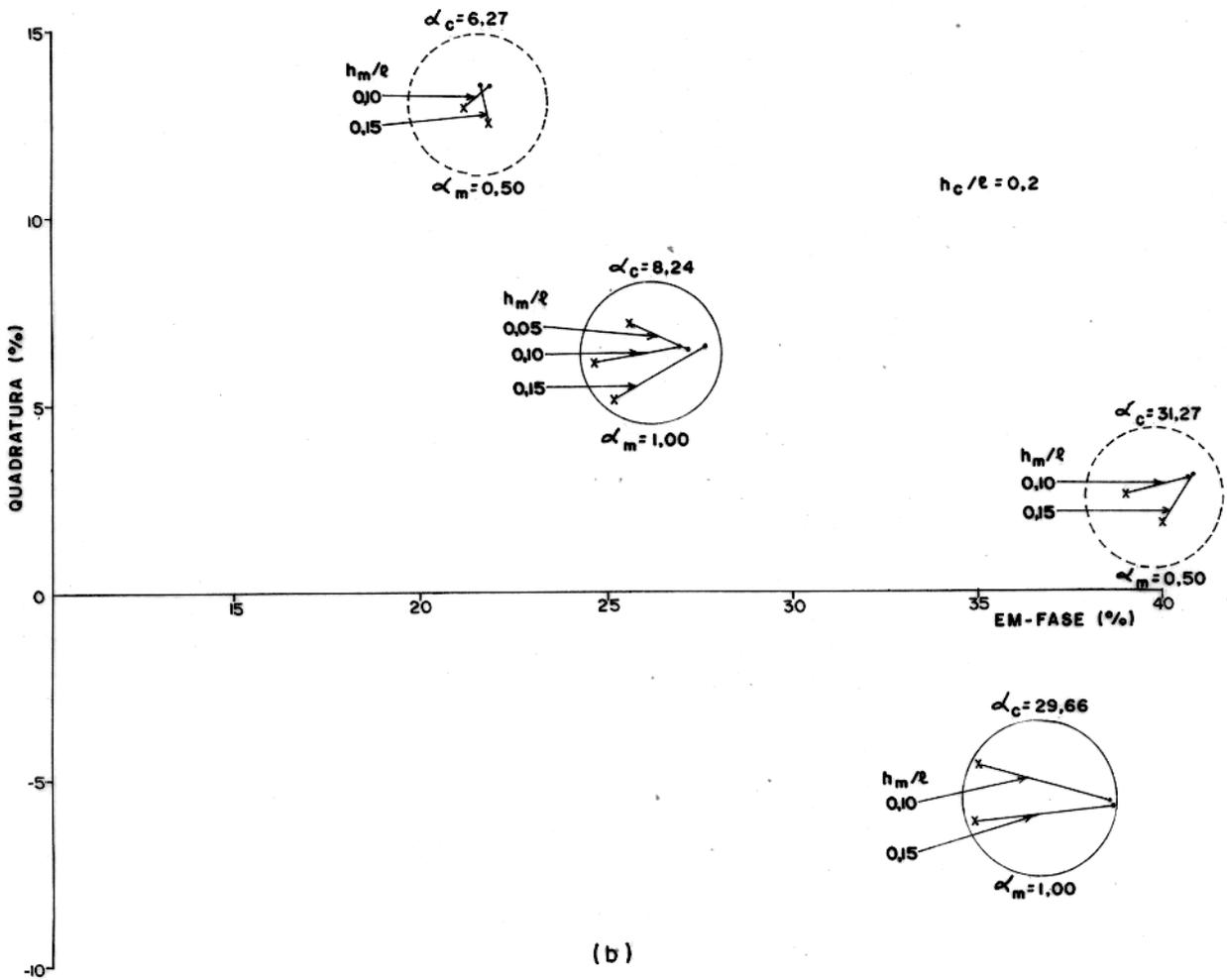
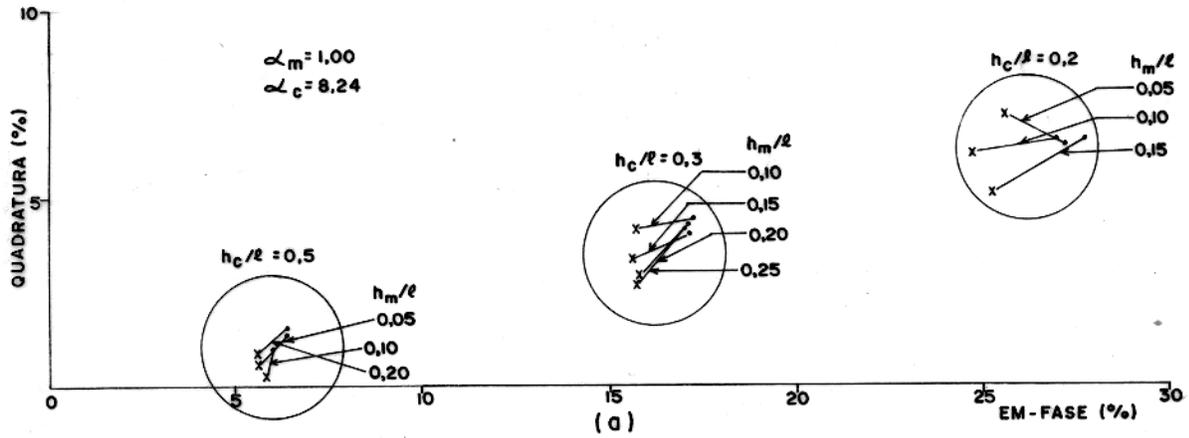
Fig. 7- Croqui da situação modelada.

Primeiramente, considerou-se um manto com  $\alpha_m = 1,00$  e um corpo com  $\alpha_c = 8,24$  nas seguintes profundidades normalizadas :  $h_c/\ell = 0,2, 0,3$  e  $0,5$ . Fazendo-se variar a profundidade do manto, observou-se (fig. 8a) que os valores pico-a-pico dos perfis realizados são praticamente os mesmos considerando-se a calibração na ausência do manto. Isto já não ocorre com aqueles valores obtidos assumindo-se a calibração sobre o manto. Neste caso, as variações observadas podem chegar a pouco mais de 2% sendo a componente em quadratura mais sensível às mesmas. Com o aumento da profundidade do corpo as variações diminuem. Mas, em face aos pequenos valores pico-a-pico obtidos para as anomalias associadas a corpos mais profundos, as variações observadas nestes casos são comparáveis àquelas para corpos mais rasos.

Foram ainda realizados outros testes mantendo-se a profundidade do corpo igual a  $h_c/\ell = 0,2$  e fazendo-se variar não só a profundidade do manto como também os parâmetros de resposta deste e do corpo (fig. 8b). Novamente verificou-se uma variação desprezível dos valores pico-a-pico obtidos quando a calibração é realizada na ausência do manto. Para aqueles valores obtidos considerando-se a outra calibração, observou-se que os mesmos mostram maiores variações quanto maiores forem os valores de  $\alpha_m$  e  $\alpha_c$ .

Em face dos resultados obtidos para os casos estudados, optou-se por trabalhar com  $h_m/\ell = 0,10$  porque nesta profundidade os resultados gerados com ambas as calibrações mostram-se aproximadamente com a mesma fase. Cabe ainda notar que, possivelmente, uma representação mais acurada do manto, de acordo com Lowrie e West (1965), poderia ser obtida através do uso de um recipiente contendo uma solução eletrolítica. A espessura do manto poderia, neste caso, ser convenientemente modelada. E, então, deveriam inexistir as discrepâncias aqui observadas para aqueles resultados obtidos com a calibração sobre o manto.

Finalmente, deve ser dito que para se obter a profundidade escolhida para o manto, após dispô-lo sobre a estrutura menor, ajustou-se a altura das bobinas considerando-se a profundidade desejada para o mesmo. Essa altura foi medida do manto ao plano horizontal que contém o centro das bobinas.



**LEGENDA**

- VALORES PICO-A-PICO COM CALIBRAÇÃO:
- NA AUSÊNCIA DO MANTO
  - x SOBRE O MANTO

Fig. 8 - Variação dos valores pico-a-pico para corpos verticais, obtidos com calibrações sobre o manto e na ausência do manto com (a)  $h_c/l$  e (b)  $\alpha_m$  e  $\alpha_c$ .

### 3.3.3.2 Posicionamento do Modelo-Corpo

O corpo foi disposto nas seguintes profundidades:  $h_c/l = 0,2, 0,3$  e  $0,5$ . Abaixo de  $h_c/l = 0,2$  fica difícil admitir a existência de um manto de intemperismo de  $\sigma t$  considerável. Acima de  $0,5$  as anomalias obtidas tornam-se muito fracas e outros métodos e.m. (AFMAG, TURAM, Magnetotelúrico) são mais recomendados.

Para obtenção dessas profundidades ajustou-se o corpo na prancha de modo a deixá-lo a  $h_c/l = 0,2$  do plano horizontal que contem o meio das bobinas e que foi anteriormente fixado. As demais profundidades do corpo foram conseguidas mudando-se a prancha para furos adequados das placas de acrílico da estrutura menor do sistema de disposição. Este procedimento foi considerado o mais correto porque se o corpo fosse posicionado com respeito ao manto, a precisão de  $h_c/l$  poderia diminuir já que esse é passível de se vergar ligeiramente.

O corpo foi ainda disposto segundo os seguintes ângulos de mergulho  $\theta$  :  $90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ$  e  $30^\circ$ .

Em todos os casos, o corpo, distante no mínimo de  $0,10 \ell$  do manto, não se encontrava em contato elétrico com o mesmo, situação que nem sempre ocorre na natureza. Umhas poucas investigações foram realizadas visando-se detetar as modificações provocadas pelo contato elétrico entre os modelos. Nestas investigações considerou-se  $\theta = 30^\circ$ ,  $\alpha_c = 13,91$  e  $\alpha_m = 1,00$  e fez-se, ora  $h_m/l = h_c/l = 0,2$ , ora  $h_m/l = 0,20$  e  $h_c/l = 0,23$ . Uma pasta de grafite foi utilizada para assegurar um perfeito contato entre os dois corpos no caso  $h_m/l = h_c/l$ .

### 3.4 Avaliação do Desempenho do Conjunto de Modelamento

Os erros máximos dos experimentados são estimados como inferiores a  $\pm 4,0\%$  levando em consideração todas as fontes mais prováveis de erro e que são, em seguida, tratadas com detalhe. É conveniente notar que, para essas, os erros foram geralmente superestimados.

### 3.4.1 Erros na Simulação

Como foi mencionado, o tamanho das bobinas superou em muito aquele que deveria ser utilizado considerando-se o fator de redução assumido. Ou seja, em vez de 0,025 m de diâmetro, as bobinas deveriam ter sido construídas com  $3,75 \times 10^{-3}$  m.

No entanto, a utilização de bobinas não reduzidas adequadamente é uma prática comum em modelamento. Isto porque bobinas de diâmetro muito pequeno são de difícil construção. Além disso, nessas, o acoplamento mútuo é grande e, considerando-se que por elas passam correntes de elevado valor, seriam produzidos ruídos excessivos. Soma-se ao que já foi dito, o fato dos resultados obtidos serem independentes do diâmetro das bobinas quando este é menor ou igual a  $10 \ell$ , ou seja, quando as bobinas podem ser tratadas como dipolos (Frischknecht, 1971). Conseqüentemente, o tamanho exagerado das bobinas pode ser considerado uma fonte desprezível de erro.

Outra fonte de erro diz respeito ao valor obtido para o parâmetro de resposta do modelo ( $\alpha = \mu 2\pi f \sigma t \ell$ ). Sejam os seguintes erros máximos para os parâmetros envolvidos em  $\alpha$ :  $\mu = 0\%$  (com base no valor teórico),  $f = \pm 1,0\%$  (precisão do oscilador),  $\ell = \pm 2,0\%$  (estimado),  $\sigma = \pm 2,5\%$  (estimado, considerando-se possíveis variações ocasionadas pela mudança da temperatura de trabalho) e  $t = \pm 1,0\%$  (estimado). Então, através dos mínimos quadrados, o erro de  $\alpha$  é de, no máximo,  $\pm 3,5\%$  (válido para  $\alpha_c$  e  $\alpha_m$ ).

### 3.4.2 Erros no Posicionamento dos Modelos e das Bobinas

Como erros máximos das profundidades do corpo e do manto foram estimados  $\pm 2,0\%$  e  $\pm 4,0\%$  respectivamente. Para as espessuras dos dois modelos, por terem sido elas medidas com um micrômetro de grande precisão, o erro é inferior a  $\pm 1,0\%$  como acima mencionado. Para a distância entre as bobinas, o erro, também já citado, gira em torno de  $\pm 2,0\%$ . A precisão do ângulo de mergulho do corpo foi estimada em  $\pm 3,0\%$ .

Os erros relacionados ao posicionamento entre os centros elétricos das bobinas promovem deslocamentos da em-fase e da quadratura respectivamente de no máximo  $\pm 0,2\%$  e  $\pm 0,4\%$ . Estes deslocamentos foram estimados considerando-se perfis para

$\theta = 90^\circ$  obtidos com diferentes parâmetros e avaliando-se a assimetria constatada em alguns deles. Esta diminui para corpos mais profundos e com parâmetros de resposta mais baixos.

#### 3.4.3 Erros Instrumentais

Uns poucos testes realizados permitiram verificar que os sistemas de energização e recepção demoram cerca de 20 minutos, após ligados, para se tornarem bastante estáveis. Assim, os sistemas podem ser considerados bastante confiáveis com praticamente nenhuma contribuição a erros nos experimentos.

#### 3.4.4 Erros Não Sistemáticos

A leitura da anomalia, registrada em cartas onde cada 1,0% do valor da mesma corresponde a 0,0025 m, pode conduzir ao exagero ou a redução das componentes em cerca de 0,3%.

Ainda, nas cartas, variações nas posições das penas bem como no traçado das componentes (resultante do desgaste das pontas das canetas) promovem exageros ou reduções das componentes avaliados em até 0,4%.

#### 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Um perfil e.m. típico obtido sobre um semi-plano inclinado na ausência do manto de intemperismo pode ser observado na figura 9.

Neste trabalho, convencionou-se chamar de lado a favor do mergulho à região que, a partir do topo do condutor, se estende na direção do mergulho do mesmo, e de lado contrário ao mergulho, àquela que ocorre na direção oposta (vide também a fig. 7). A anomalia pode então ser descrita considerando-se os valores pico-a-pico dos lados a favor e contrário ao mergulho que aqui se rão referidos como, respectivamente, pico-a-pico a favor e pico-a-pico contra.

Os valores do pico negativo poderiam ter sido utilizados, para tanto, porém, valores auxiliares dos picos positivos do lado a favor e/ou contra teria de ser considerados (Nair et al., 1968). No entanto, valores pico-a-pico são considerados mais apróprios (vide discussão sobre investigações considerando-se diferentes espaçamentos para as bobinas in Parasnis, 1971). Além disso, fugas com relação à base de referência no registrador, após a calibração, não afetam os valores pico-a-pico. O mesmo não ocorre com os valores da base ao mínimo (pico negativo) e aos máximos (picos positivos).

Os deslocamentos laterais do pico negativo da em-fase e da quadratura, respectivamente DI e DQ não foram quantificados mas, adiante, as variações qualitativas dos mesmos serão abordadas. No exemplo dado (fig. 9) é mostrado apenas DI já que DQ é desprezível.

##### 4.1 Efeitos do Manto

As anomalias obtidas sobre semi-planos inclinados podem sofrer grandes modificações quando está presente o manto de intemperismo. Dentre essas modificações cita-se a rotação da fase da anomalia acompanhada da redução de sua amplitude (a serem tratadadas adiante). Observa-se ainda, uma mudança da feição do perfil, a qual está relacionada a três fatores: 1º) deslocamento do perfil com respeito a sua base (0%) quando o mesmo é realizado

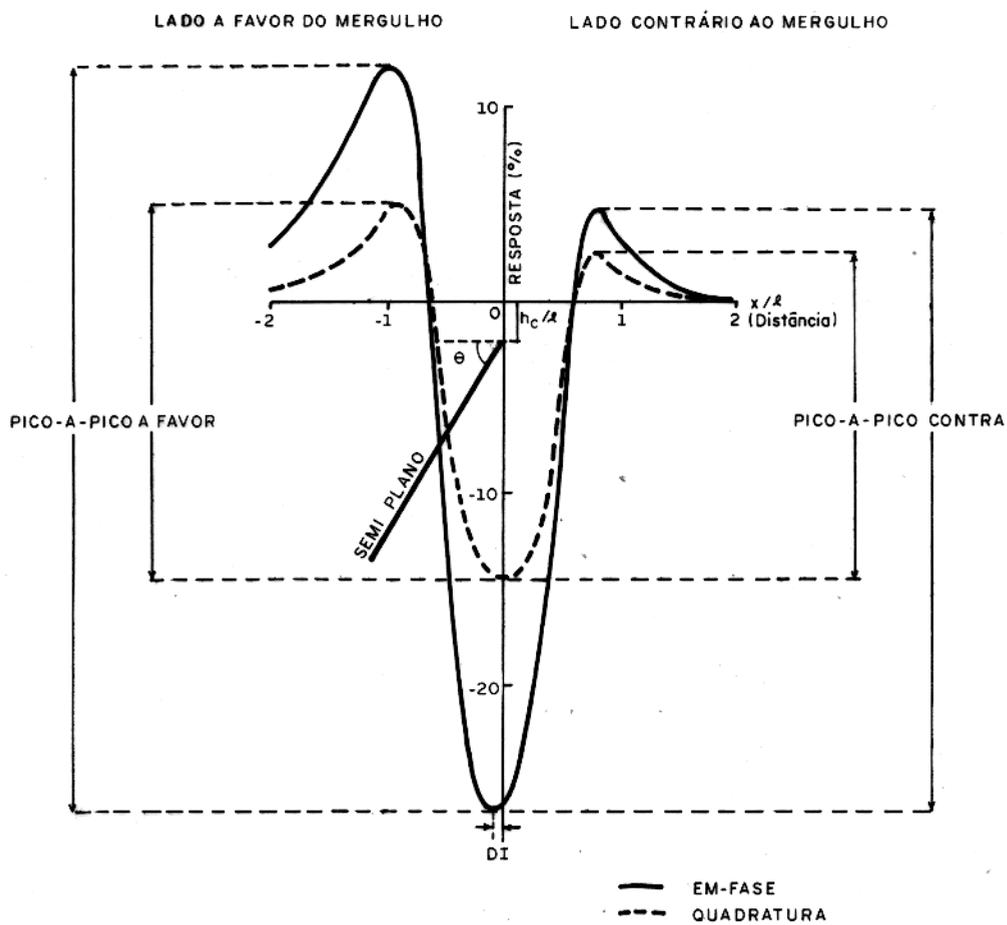


Fig. 9 - Perfil típico sobre um semi-plano inclinado ( $\theta = 60^\circ$ ,  $\alpha_c = 13.91$ ,  $h_c/l = 0.2$  e  $\alpha_m = 0$ ).

com a calibração feita na ausência do manto (fig. 10); 2º) reversão da quadratura (fig. 11); e 3º) aparecimento de um pico extra nesta mesma componente (fig. 12).

O deslocamento do perfil com respeito à base cresce com o aumento de  $\alpha_m$  (figs. 10a e 10b). A reversão da quadratura se dá para elevados valores de  $\alpha_m$  e também de  $\alpha_c$  (fig. 11b). O aparecimento de um pico extra na quadratura (fig. 12b) está as sociado basicamente com a diminuição do ângulo de mergulho do corpo e se instala mais facilmente quanto maiores forem  $\alpha_c$  e  $\alpha_m$ .

O pico extra se forma porque, quando o corpo é inclinado, há uma maior proximidade do lado a favor do mergulho entre os dois condutores e, portanto, uma maior interação entre ambos. Em sua forma incipiente, esse pico promove a redução do valor pico a-pico a favor da quadratura tornando-o inferior ao valor obtido no lado contrário (figs. 12b e 13a). Em um estágio mais avançado, ele se torna tão marcante a ponto de mascarar parcialmente a reversão, dificultando a interpretação (fig. 13b).

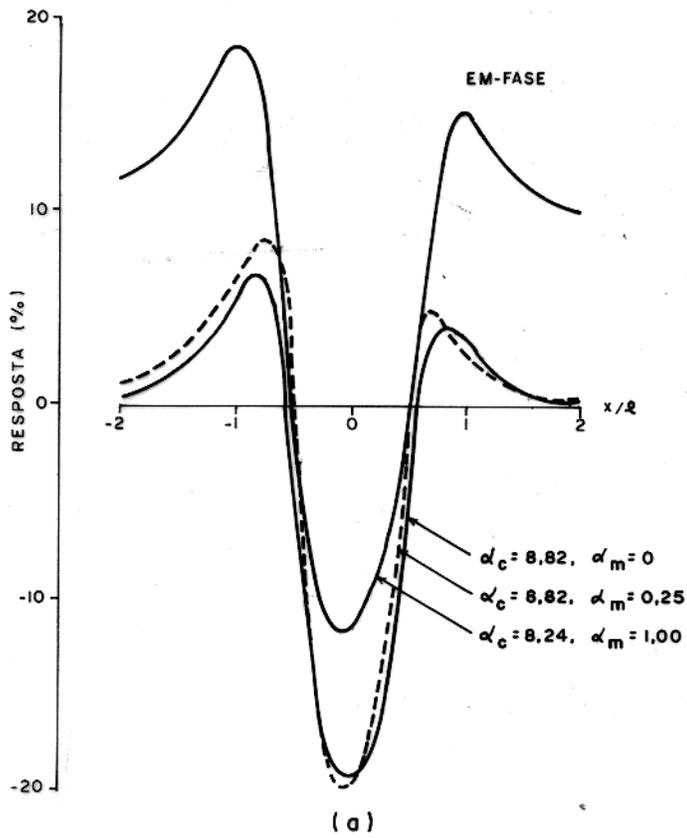
Neste estudo, os valores pico-a-pico da quadratura, quando se torna bastante distinto o aparecimento do pico extra, foram considerados reversos se o pico positivo da quadratura do lado contra-lado este que no perfil passa a ser definido apenas pela componente em-fase - é menor do que o pico a favor. Isto corresponde a assumir que o pico a favor passa a ser o pico gerado pela maior proximidade dos condutores mas com a ressalva de que, neste caso, admite-se que a reversão e o pico se confundem e, de certa maneira, superpõem-se.

Assim, das anomalias apresentadas nas figuras 13a e 13b, apenas a última é considerada com a quadratura reversa. Isto é correto porque com o aprofundamento do corpo (figs. 13a<sub>1</sub> e 13b<sub>1</sub>), a interação que dá origem ao pico extra diminui e a reversão da quadratura torna-se mais nítida (fig. 13b<sub>1</sub>).

A seguir, são considerados os efeitos do manto em relação ao parâmetro de resposta, à profundidade e ao ângulo de mergulho do corpo.

#### 4.1.1 Relacionados ao Parâmetro de Resposta do Corpo

O aumento do parâmetro de resposta do corpo favorece a re



$\theta = 75^\circ, h_c/l = 0.2$

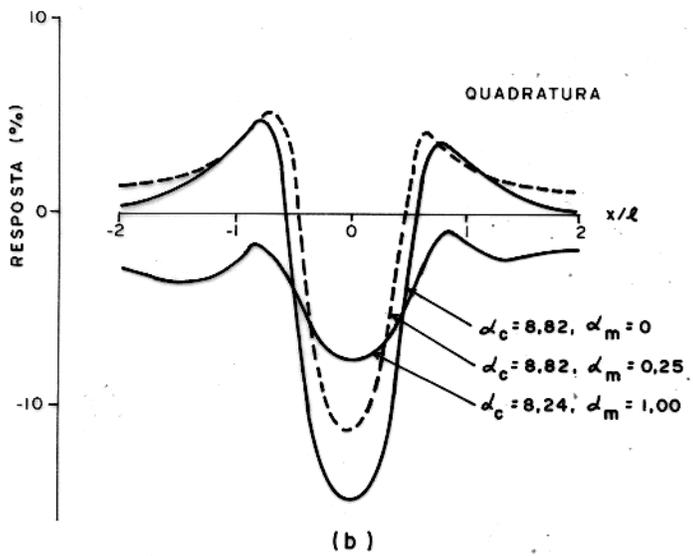


Fig.10-Deslocamento da base dos perfis devido à presença do manto. (calibração feita na ausência do manto).  
 (a) Perfis da em-fase. (b) Perfis da quadratura.

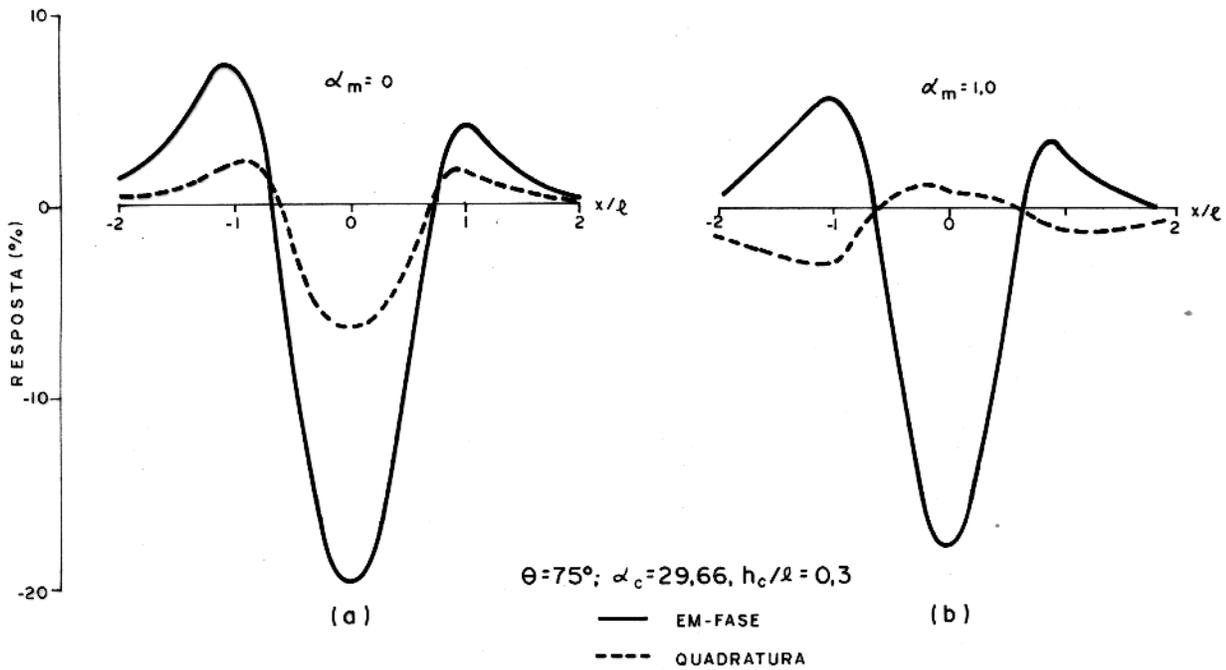


Fig.11 - Reversão da quadratura gerada pela presença do manto.

(a)  $\alpha_m = 0$  (b)  $\alpha_m = 1,00$

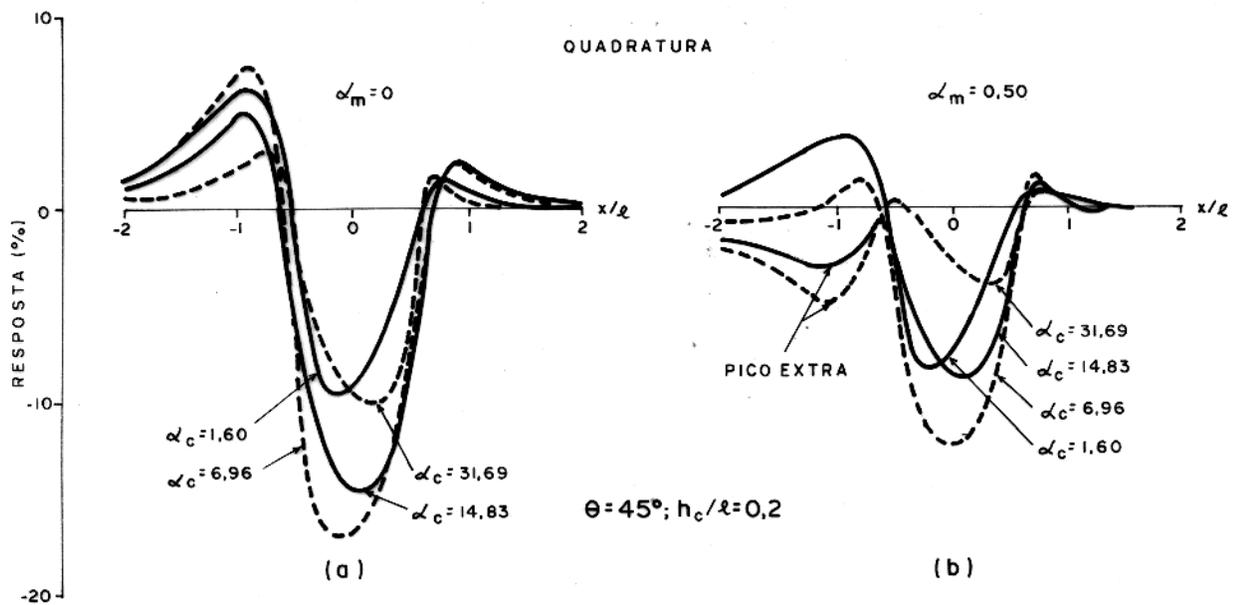
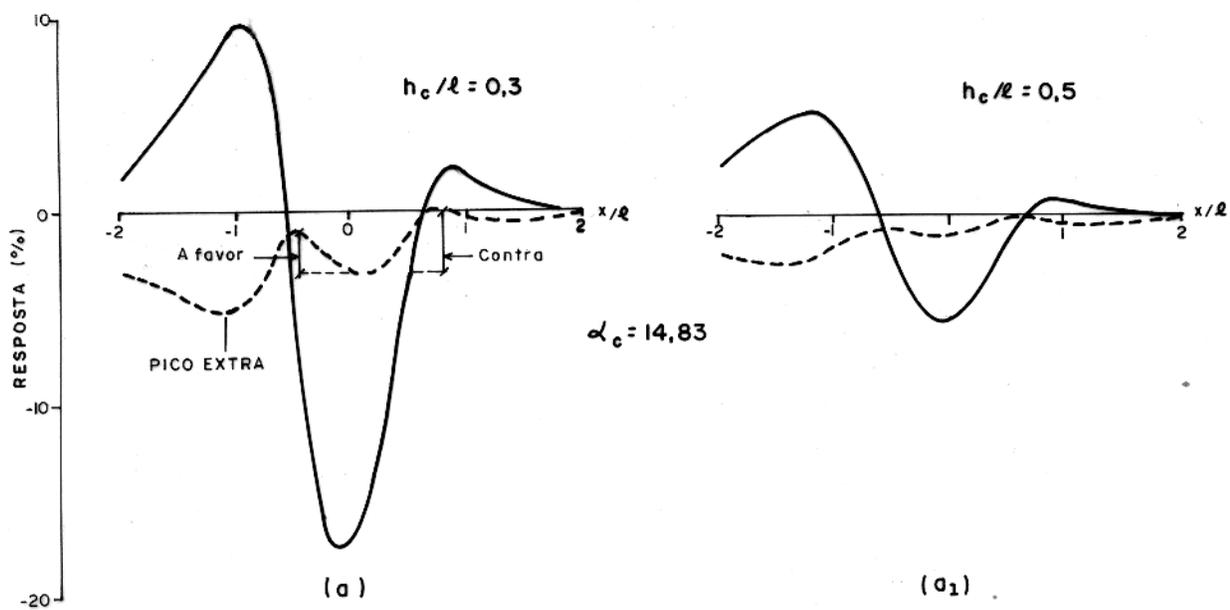


Fig.12 - Aparecimento de um pico extra na quadratura devido à presença do manto e ao aumento de  $\alpha_c$ .

(a)  $\alpha_m = 0$  (b)  $\alpha_m = 0,50$ .



$\theta = 45^\circ, \alpha_m = 0,50$

— EM-FASE  
 --- QUADRATURA

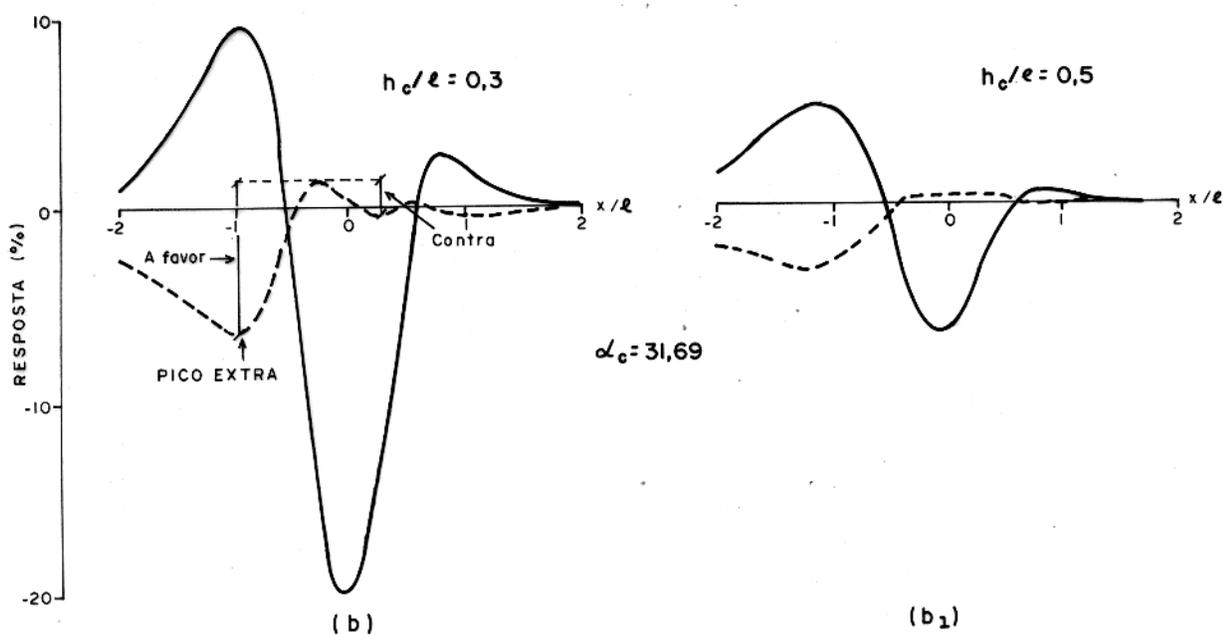


Fig. 13- Mascaramento da reversão pelo pico extra da quadratura. (a) e (a<sub>1</sub>) quadratura não reversa. (b) e (b<sub>1</sub>) quadratura reversa.

versão e a instalação de um pico extra na quadratura (figs. 12b, 13a, 13a<sub>1</sub> e 13b).

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

Esse comportamento dos valores pico-a-pico com respeito à variação de  $\alpha_c$  para vários mergulhos pode ser verificado nas figuras 14 a 18. Nestas figuras foram utilizados os valores obtidos com a calibração na ausência do manto e  $h_c/\ell = 0,2$ , observando-se que:

a) Os valores pico-a-pico da componente em-fase crescem mais lentamente com o aumento de  $\alpha_c$  quando o manto está presente. Esses valores, a princípio maiores do que aqueles obtidos na ausência do manto, atingem primeiramente o limite indutivo. Quando este está sendo alcançado, os valores obtidos quando inexistente o manto atingem então valores superiores aos outros. As observações aqui feitas são mais aparentes para os valores pico-a-pico a favor e para os mergulhos de menor valor.

b) Os valores pico-a-pico da componente em quadratura caem muito rapidamente quando existe o manto, tornando-se negativos (o que caracterizou a reversão da componente) quando  $\alpha_c$  é alto. É interessante notar que imediatamente antes de haver a reversão da quadratura, principalmente para corpos pouco inclinados, os valores passam por um intervalo de  $\alpha_c$  onde a caída dos mesmos torna-se muito suave para, em seguida, voltarem a cair muito mais abruptamente do que antes. A zona de "transição" da quadratura é ocasionada pelo desenvolvimento do pico extra. Este, por seu turno, é também responsável pela modificação do posicionamento dos valores pico-a-pico dos lados contra e a favor nos gráficos. Ou seja, quando existe o manto, os valores a favor são inferiores aos valores contra. Isto não acontece na ausência do manto. Novamente, todas as observações feitas são mais marcantes para os valores pico-a-pico do lado a favor e para os mergulhos de menor valor.

#### 4.1.2 Relacionados à Profundidade do Corpo

A amplitude da anomalia diminui com o aumento da profun

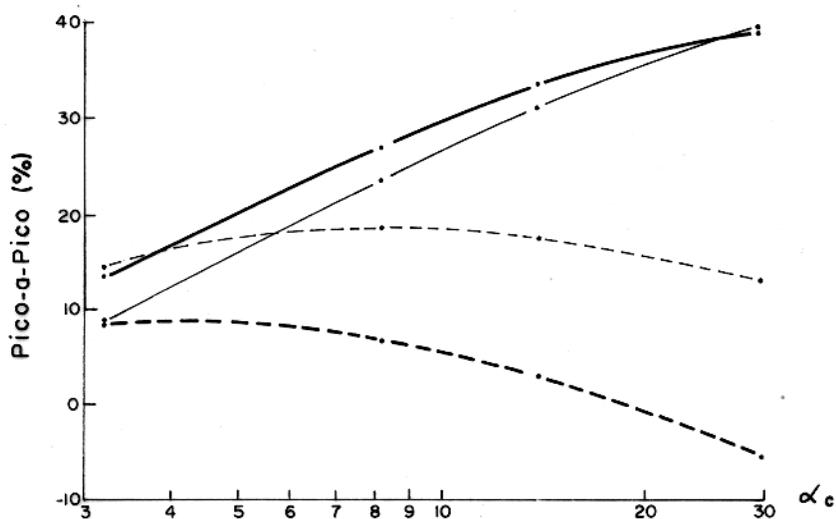


Fig. 14- Variação dos valores pico-a-pico das componentes com o parâmetro de resposta para  $\theta = 90^\circ$ .

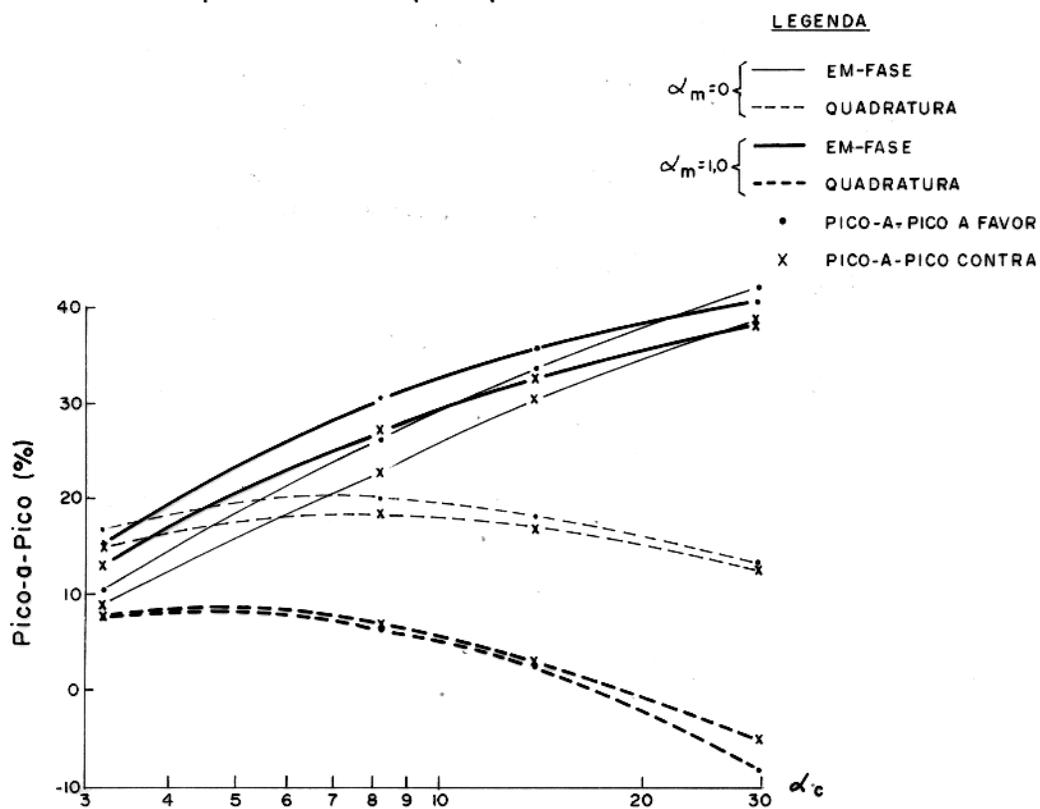


Fig. 15- Variação dos valores pico-a-pico das componentes com o parâmetro de resposta para  $\theta = 75^\circ$ .

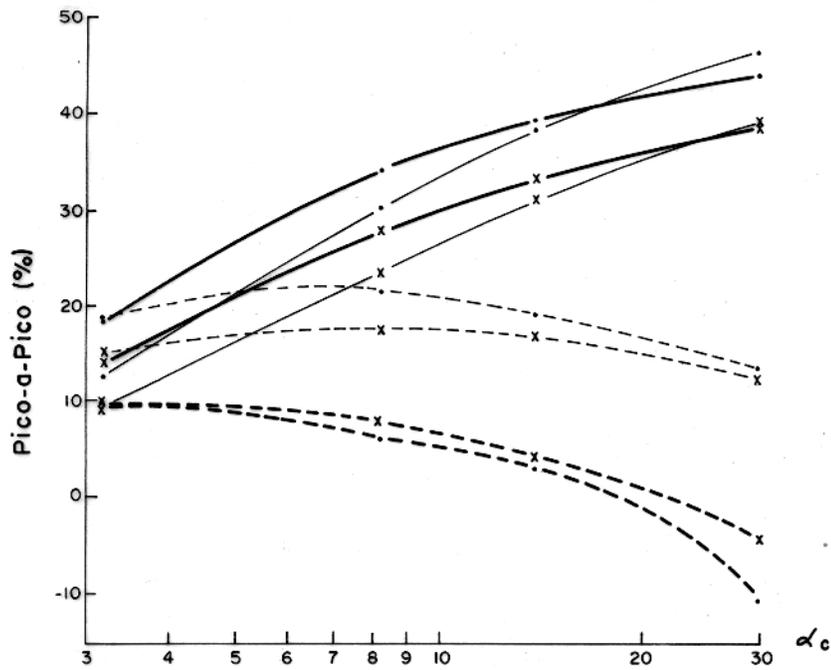


Fig. 16 - Variação dos valores pico-a-pico das componentes com o parâmetro de resposta para  $\theta = 60^\circ$ .

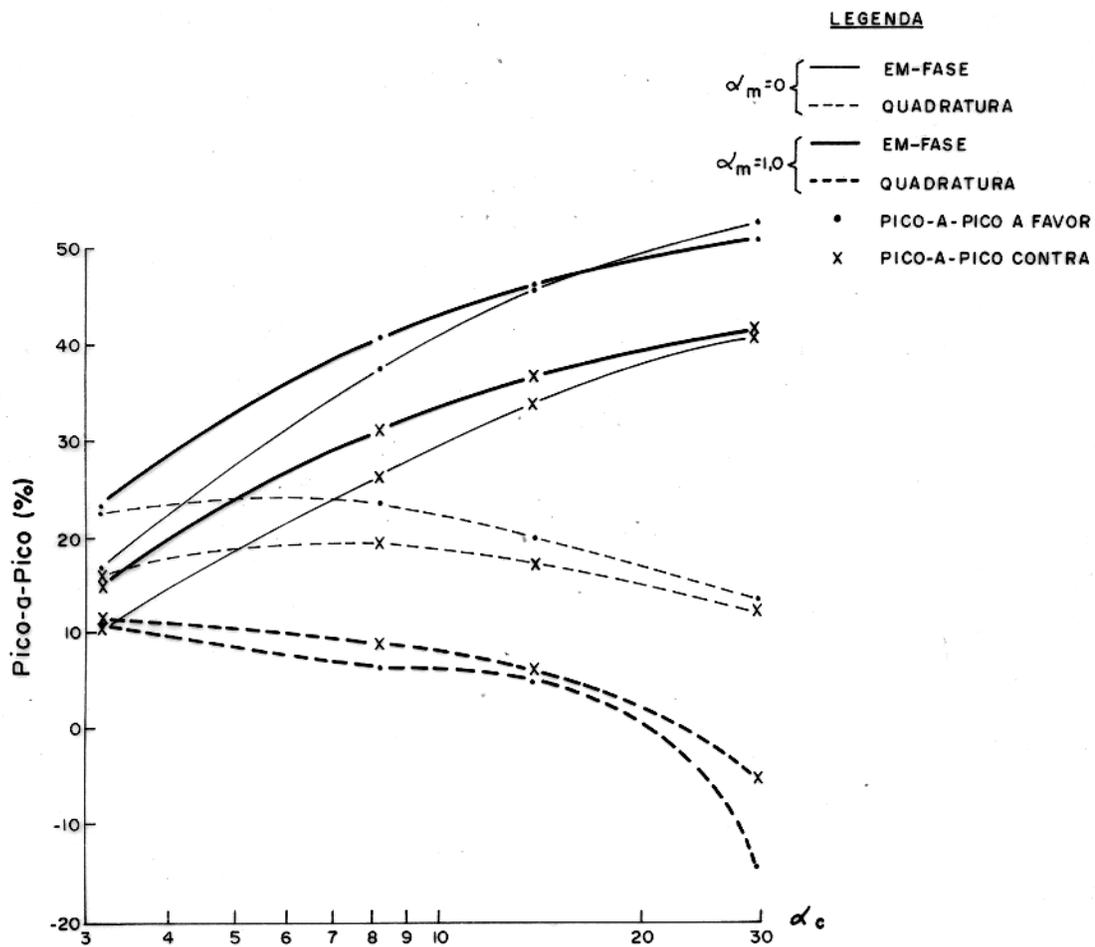


Fig. 17 - Variação dos valores pico-a-pico das componentes com o parâmetro de resposta para  $\theta = 45^\circ$ .

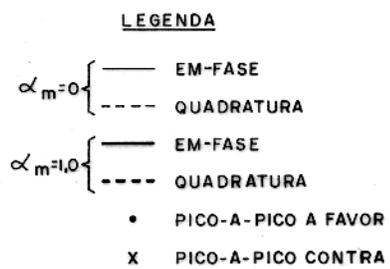
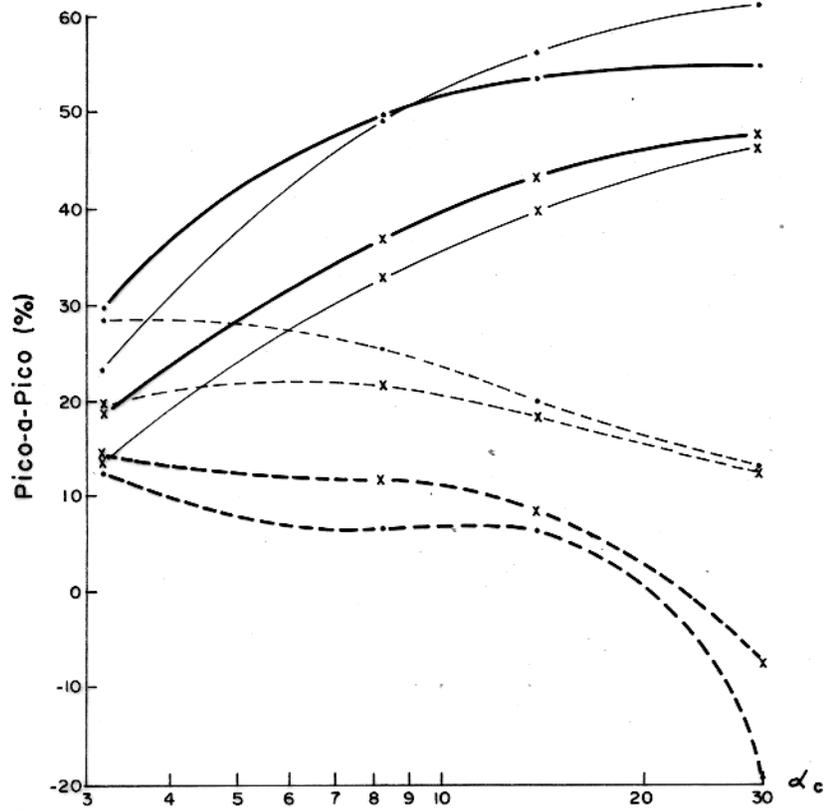


Fig. 18- Variação dos valores pico-a-pico das componentes com o parâmetro de resposta para  $\theta = 30^\circ$ .

didade, tornando-se menos nítida (fig. 19). Este fato é fácil de compreender porque as interações em jogo são maiores quanto mais próximo estiver o corpo das bobinas do manto.

#### 4.1.3 Relacionados ao Mergulho

Nas figuras 20, 21 e 22 são mostradas anomalias provocadas por condutores, respectivamente, "fraco" ( $\alpha_c = 3,19$ ), "moderado" ( $\alpha_c = 8,24$ ) e "bom" ( $\alpha_c = 29,66$ ) mergulhando de  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $30^\circ$ .

A análise destas anomalias mostra que:

a) A presença do manto não altera a feição da em-fase. Com a diminuição do ângulo de mergulho do corpo, o pico positivo a favor cresce e o contra diminui e a anomalia torna-se progressivamente assimétrica.

b) O deslocamento lateral do pico negativo da em-fase se dá, com ou sem o manto, sempre no sentido do lado a favor do mergulho.

c) A quadratura torna-se também assimétrica com a diminuição do mergulho mas a feição do perfil é modificada pela presença do manto, notadamente quando o corpo possui elevados valores de  $\alpha_c$ . O pico positivo a favor diminui e o contra cresce, o que não ocorre quando inexistente o manto, salvo para mergulhos muito pequenos e  $\alpha_c$  elevados (vide fig. 22b).

d) O deslocamento lateral do pico negativo da quadratura se dá, no condutor "fraco", para o lado a favor e no "bom", para o contra, exatamente como no caso o manto não é considerado. No entanto, quando há a reversão, isto não é válido. Nestes casos, o deslocamento do pico, agora positivo, é no sentido do lado a favor (vide fig. 22b<sub>1</sub>).

#### 4.2 Síntese dos Efeitos

A maioria dos efeitos já mencionados foi condensada sob a forma de diagramas de Argand onde os valores pico-a-pico das componentes são plotados para vários parâmetros de resposta e profundidades do corpo, mantendo-se fixos mergulho e o parâmetro de resposta do manto.

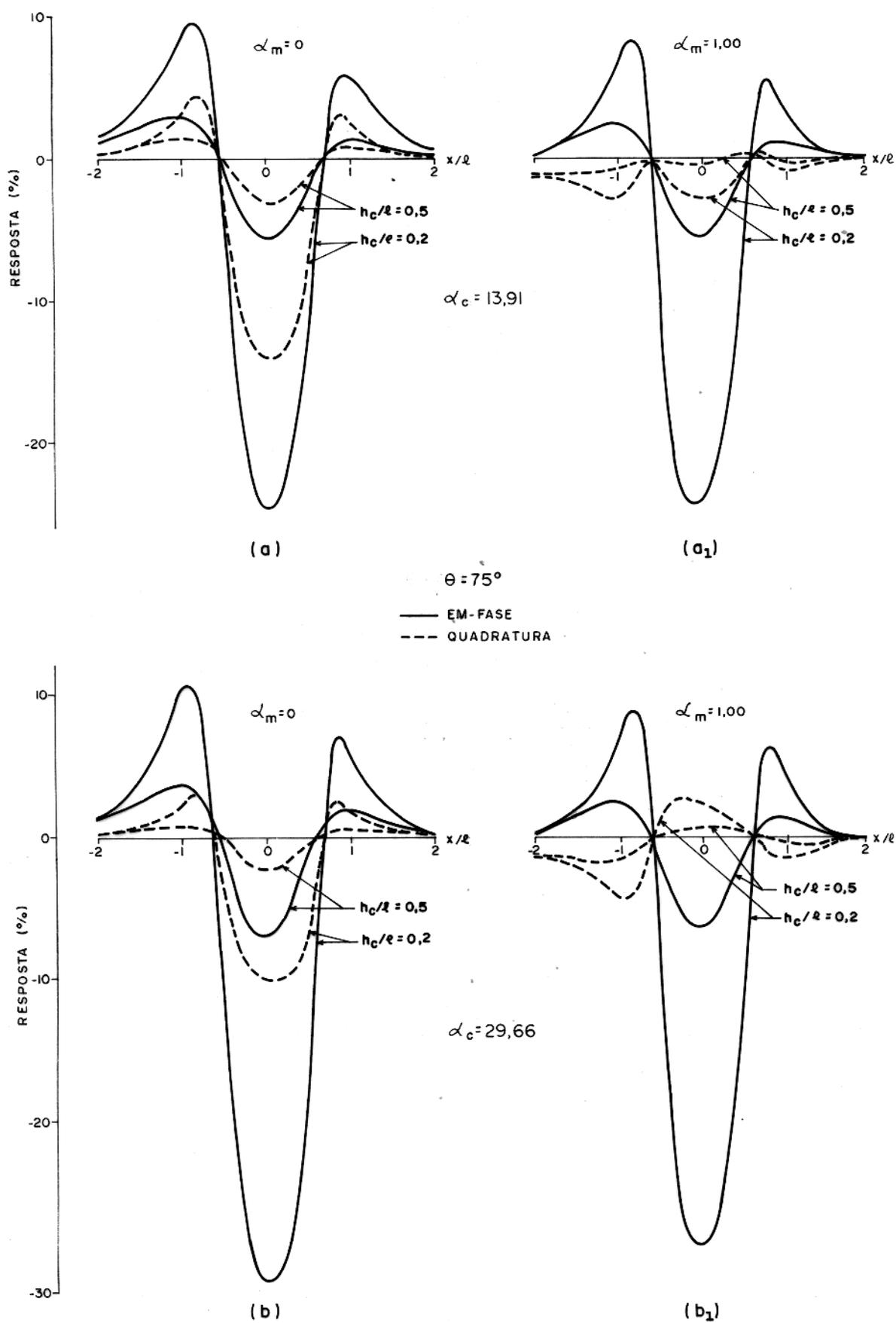
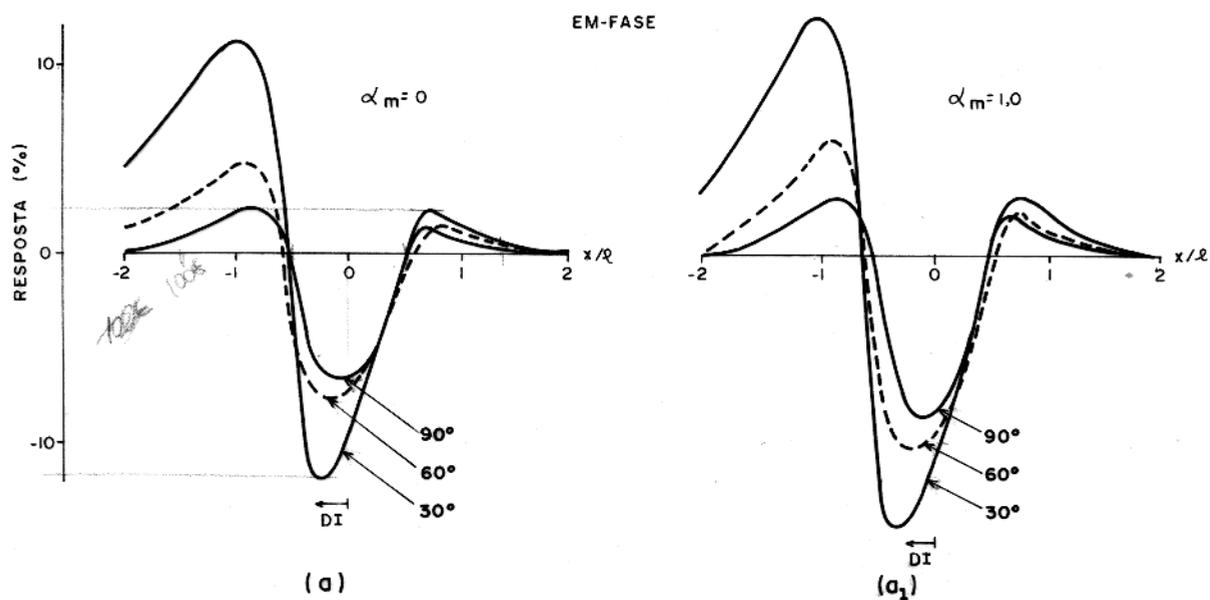


Fig.19 - Redução da amplitude da anomalia com o aumento da profundidade.

(a)  $\alpha_c = 13,91$  e  $\alpha_m = 0$ ; (a<sub>1</sub>)  $\alpha_c = 13,91$  e  $\alpha_m = 1,00$

(b)  $\alpha_c = 29,66$  e  $\alpha_m = 0$ ; (b<sub>1</sub>)  $\alpha_c = 29,66$  e  $\alpha_m = 1,00$



$$\alpha_c = 3,19, h_c/l = 0,2$$

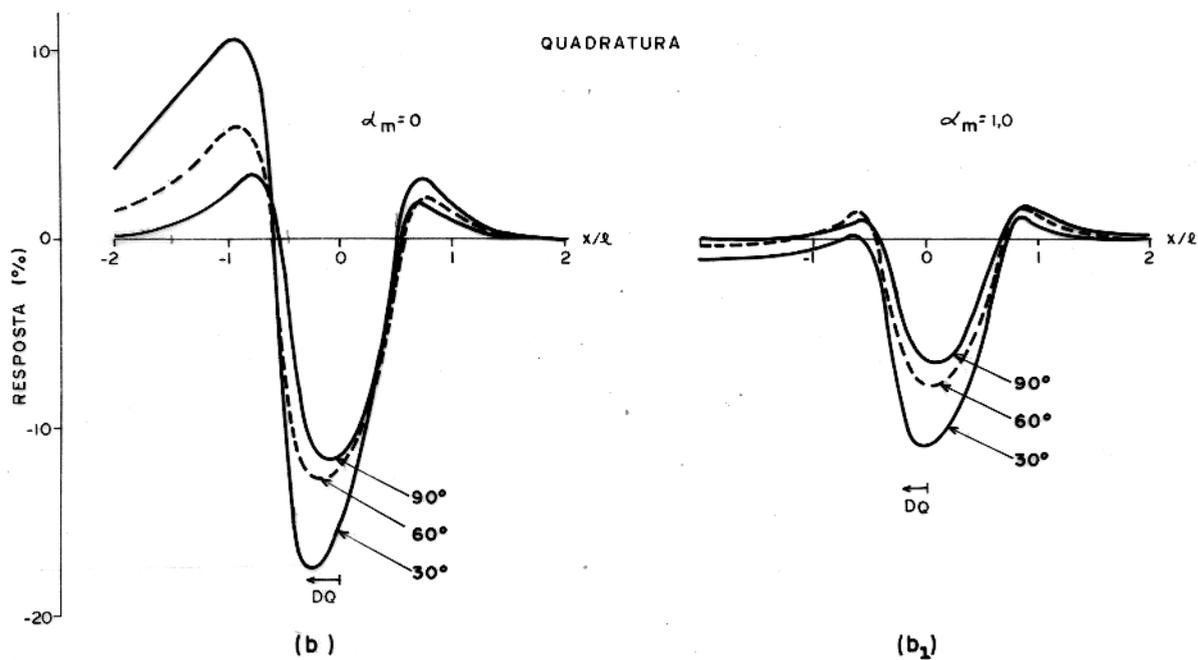


Fig.20 - Mudança da resposta com a variação do mergulho para um condutor "fraco" ( $\alpha_c = 3,19$ ).

(a) e (a<sub>1</sub>) Perfis da em-fase.

(b) e (b<sub>1</sub>) Perfis da quadratura.

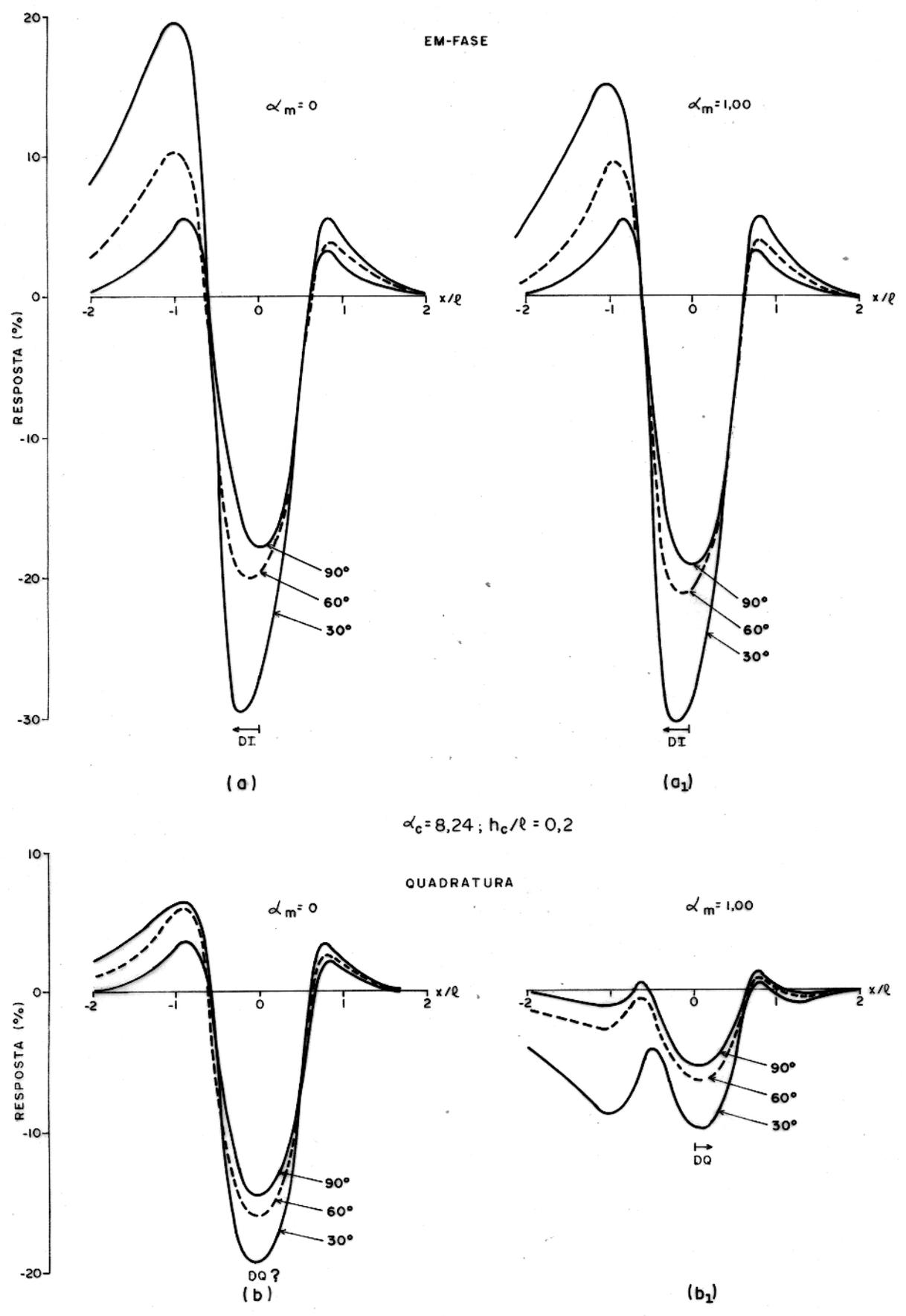


Fig. 21 - Mudança da resposta com a variação do mergulho para um condutor "moderado" ( $\alpha_c = 8.24$ ).  
(a) e (a<sub>1</sub>) Perfis da em-fase.  
(b) e (b<sub>1</sub>) Perfis da quadratura.

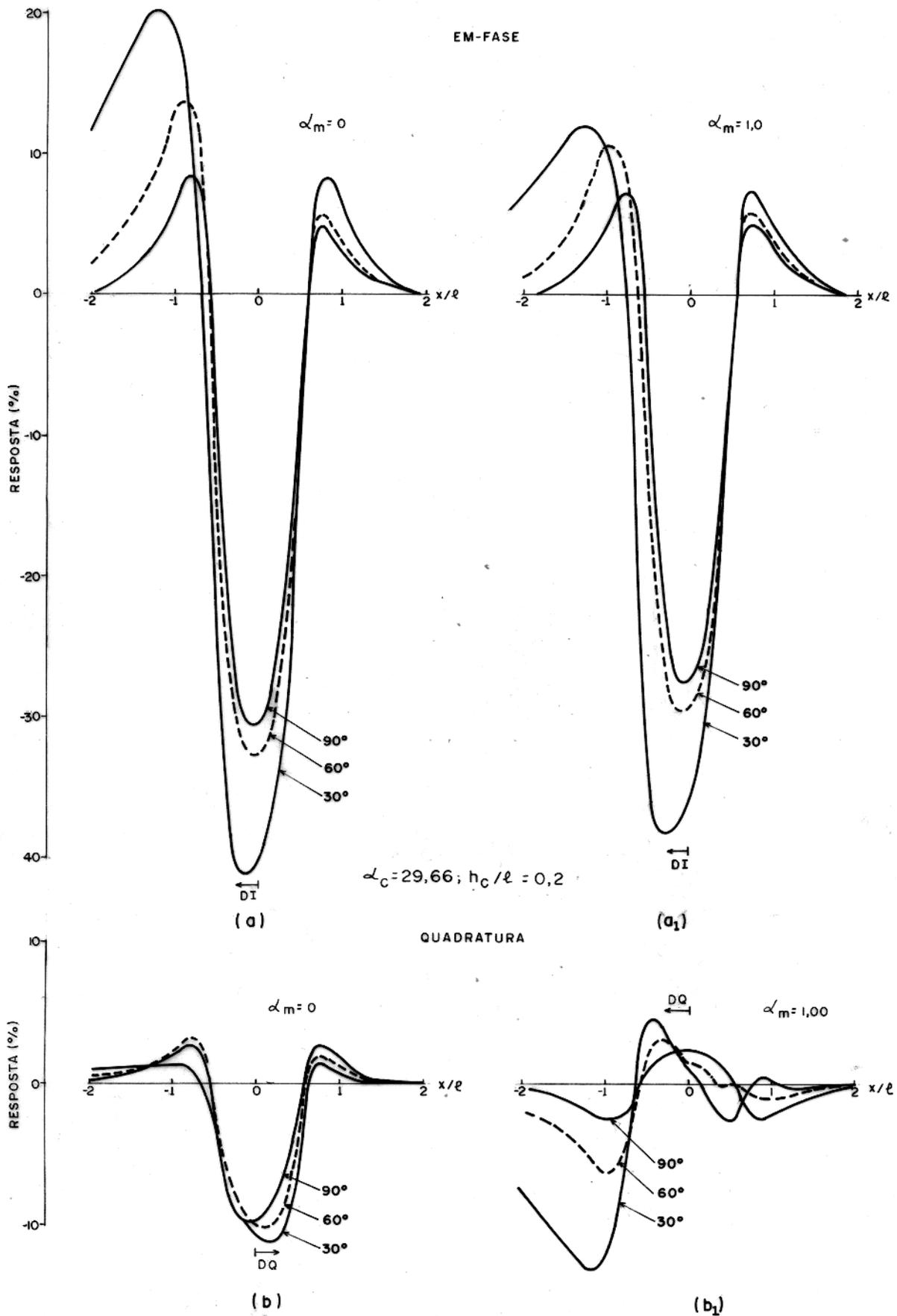


Fig. 22- Mudança da resposta com a variação do mergulho para um condutor "bom" ( $\alpha_c = 29,66$ ).  
 (a) e (a<sub>1</sub>) Perfis da em-fase.  
 (b) e (b<sub>1</sub>) Perfis da quadratura.

Foram construídos 86 diagramas considerando-se os resultados obtidos sobre o manto com ambas as calibrações e na ausência do mesmo. Para facilitar o manuseio do conjunto, esses diagramas foram agrupados em 27 figuras (23 a 49).

As curvas obtidas considerando-se a calibração sobre o manto nos diagramas de  $\alpha_m = 0,50$  (figs. 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42, 45 e 48), sofrem uma menor rotação de fase do que aquelas para a calibração sem o manto. A situação se inverte para os diagramas de  $\alpha_m = 1,00$  (figs. 25, 28, 31, 34, 37, 40, 43, 46 e 49). Estas discrepâncias podem ser entendidas através dos resultados dos testes conduzidos para escolha do posicionamento do modelomanto (fig. 8b).

A rotação da fase da anomalia no sentido horário bem como a redução de sua amplitude são facilmente observadas nestes diagramas. O ângulo de rotação da fase e a percentagem de redução da amplitude da anomalia:

- a) crescem com o parâmetro de resposta do manto;
- b) são maiores para os valores pico-a-pico a favor;
- c) aparentemente mostram uma tendência a reduzirem-se com o aumento de  $\alpha_c$ ; e,
- d) com a diminuição de  $\theta$ , aumentam se forem considerados valores pico-a-pico a favor e crescem para os pico-a-pico contra.

Para  $\alpha_m = 0,25, 0,50$  e  $1,00$ , com  $\theta = 90^\circ$ , o ângulo de rotação gira em torno de, respectivamente,  $6,25^\circ, 12,5^\circ$  e  $25^\circ$  (concordando com os resultados de Lowrie e West, 1965). Para os demais mergulhos, essa quantificação é bastante difícil em consequência da maior interação do corpo com o manto. Aproximadamente, no entanto, variam em torno de 2,0% (um pouco mais para  $\theta = 30^\circ$ ) daquelas rotações encontradas para o corpo vertical. A redução da amplitude foi calculada e aproximadamente pode-se dizer que para  $\alpha_m = 0,25, 0,50$  e  $1,00$  elas são, respectivamente, iguais ou pouco menores a 2,5, 5,0 e 10,0%. Para a obtenção destes resultados (e todos aqueles tratados anteriormente para a mudança de fase a para a redução da amplitude) foram considerados apenas os valores obtidos com a calibração na ausência do manto. Isto significa, pela simples inspeção dos diagramas de Argand, que para os valores obtidos com a outra calibração, as reduções da amplitude são bastante superiores às apresentadas.

A ocorrência da reversão da quadratura, associada a al tos valores de  $\alpha_c$  e  $\alpha_m$  pode ser facilmente verificado nos diagramas para  $\alpha_m = 1,00$  (figs. 25, 28, 31, 34, 37, 40, 43, 46 e 49) notando-se que ela ocorre qualquer que seja o mergulho do corpo.

O aparecimento do pico extra na quadratura, que como foi visto é regido pelo valor de  $\theta$ , não é diretamente percebido nos diagramas. Quanto menor for  $\theta$  e maior for  $\alpha_m$  e  $\alpha_c$ , mais fa cilmente ele se instala. Assim, por exemplo, os diagramas para  $\alpha_m = 0,50$  e  $1,00$ , e  $\theta = 30^\circ$  (a favor) (figs. 45 e 46), a grande redução do ângulo de rotação da fase observada para os va lores mais elevados de  $\alpha_c$ , antes de se dar a inversão da qua dratura, é gerada por este pico.

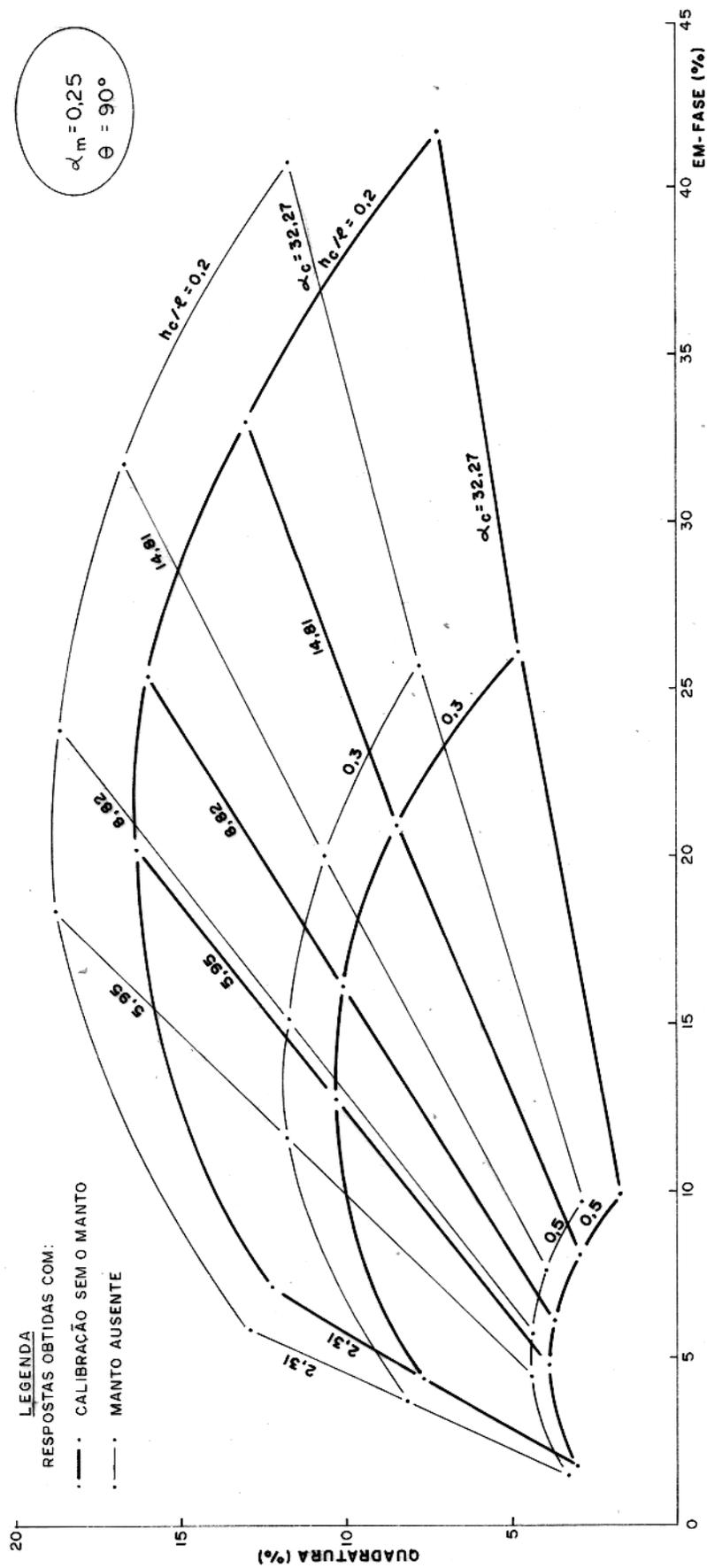


Fig.2.3- Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para  $\alpha_m = 0,25$  e  $\theta = 90^\circ$ .

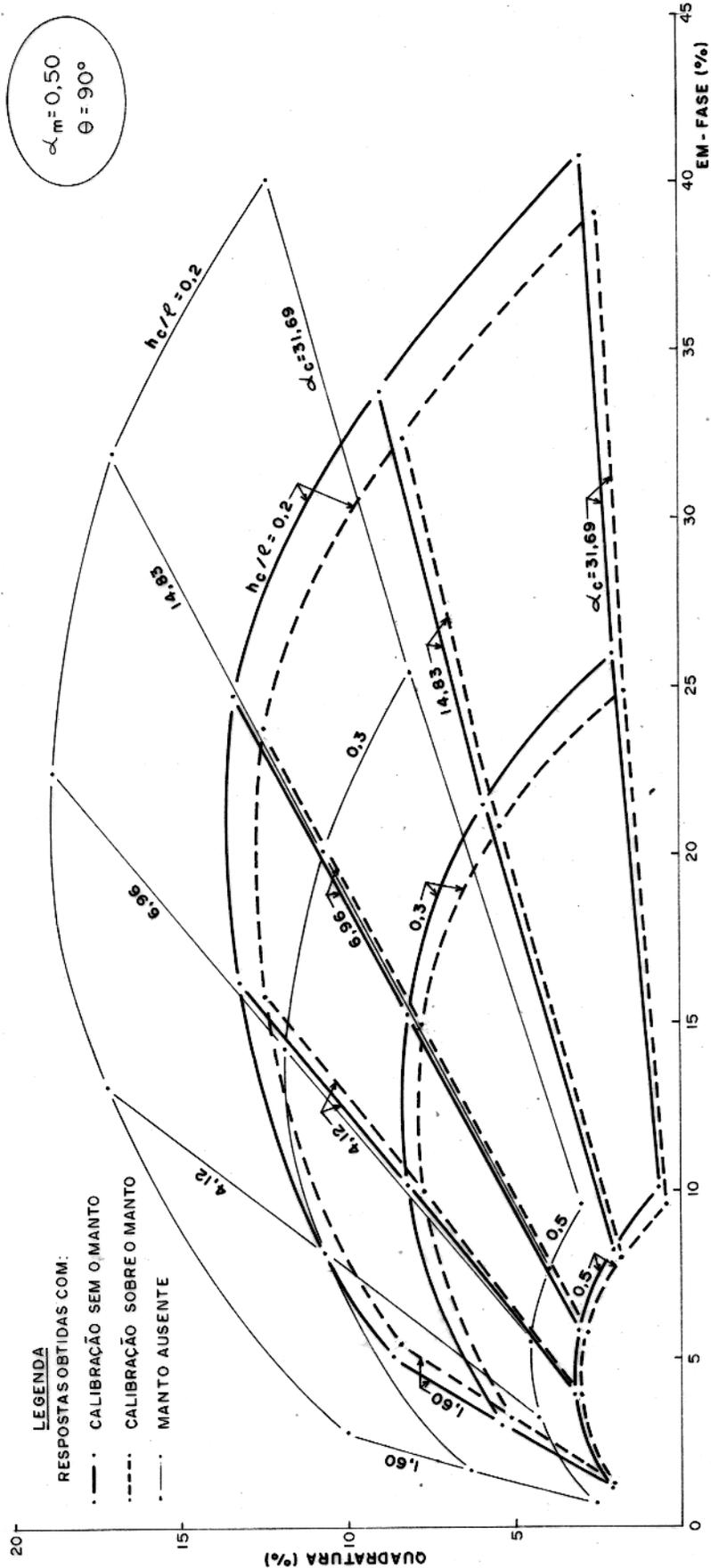


Fig.24- Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico para  $\alpha_m = 0,50$  e  $\theta = 90^\circ$



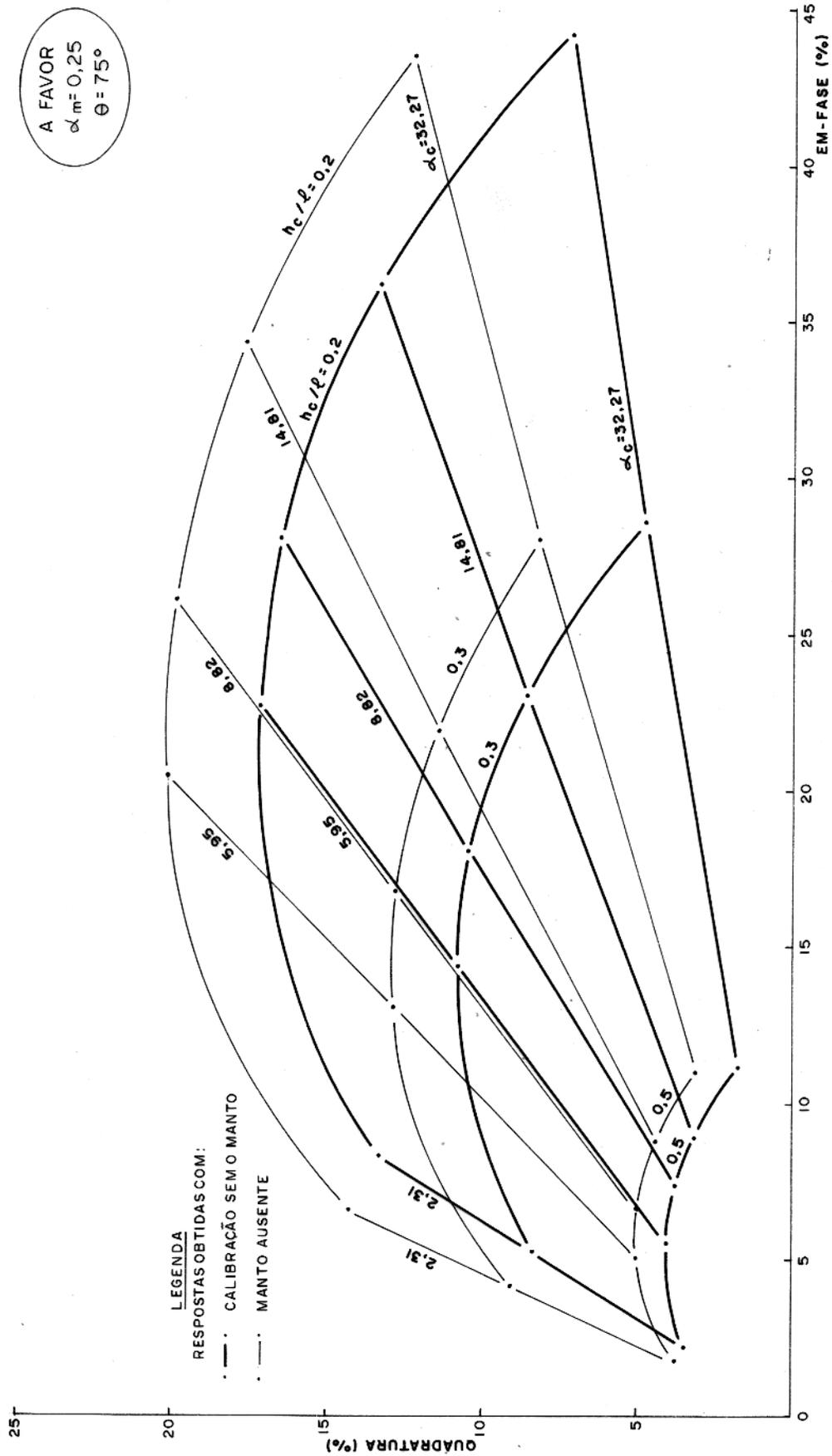


Fig.26 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para  $\alpha_m = 0,25$  e  $\theta = 75^\circ$

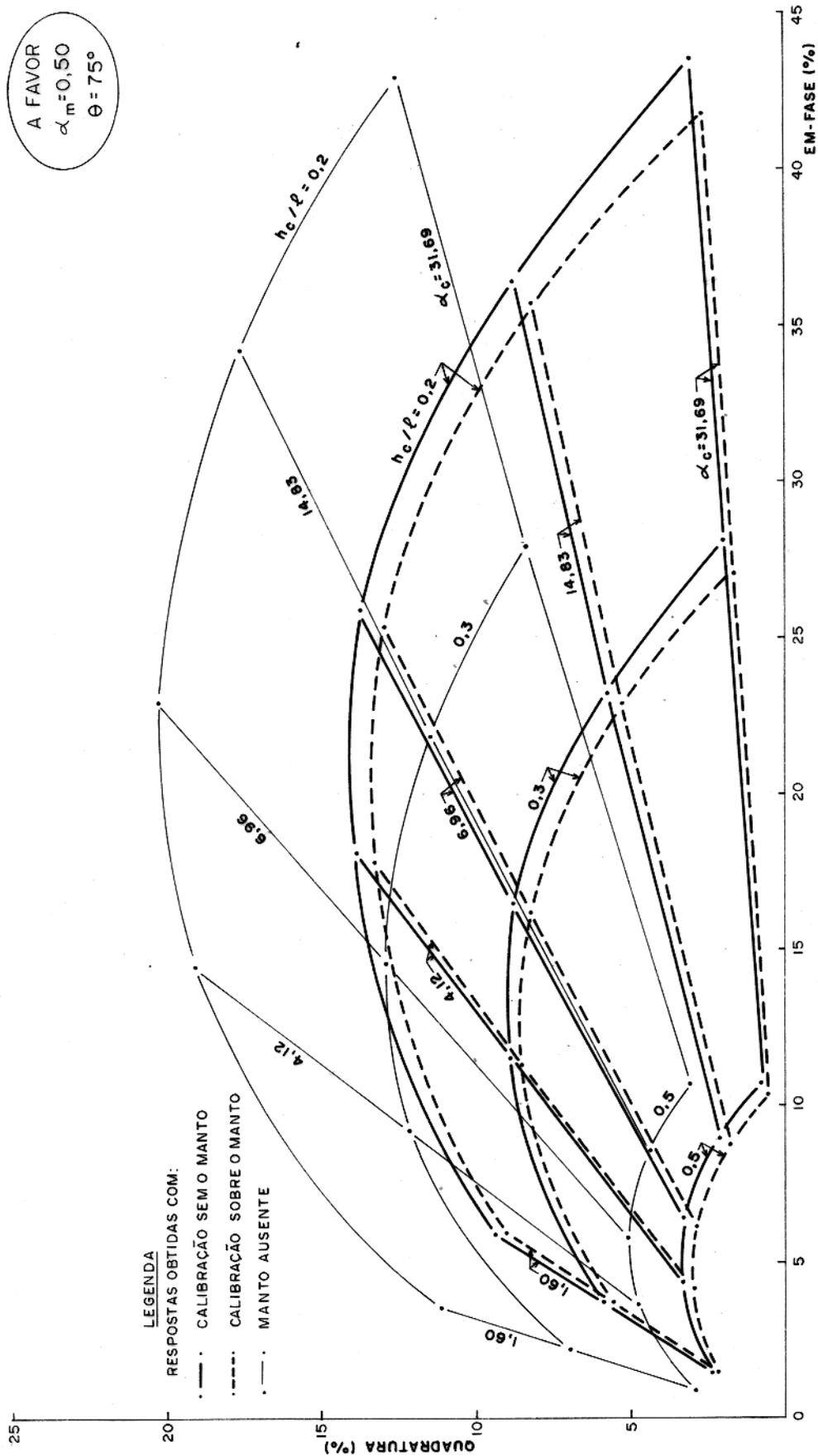


Fig.27 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para  $\alpha_m = 0,50$   $\theta = 75^\circ$ .

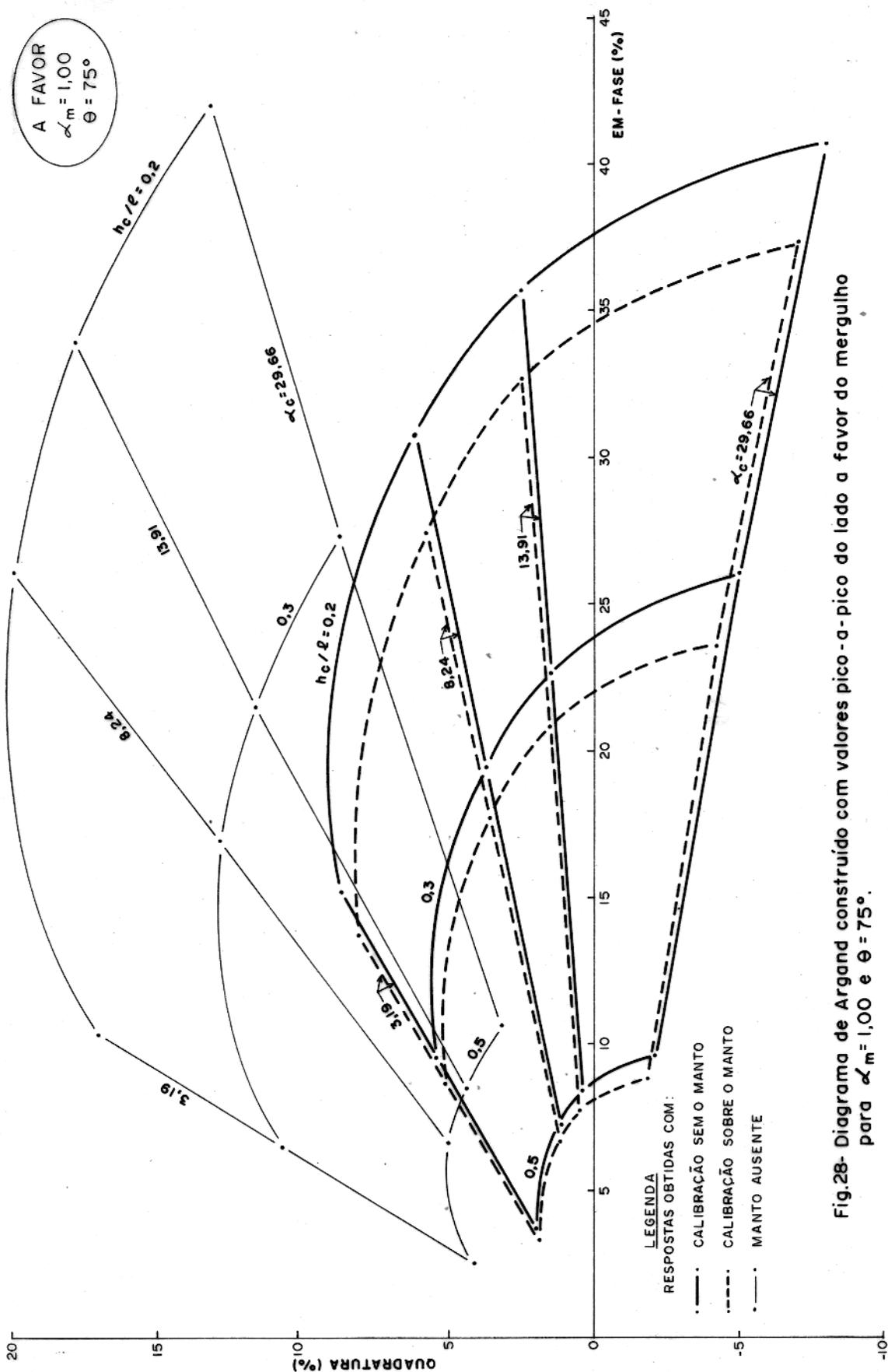


Fig.28- Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para  $\alpha_m = 1,00$  e  $\theta = 75^\circ$ .

CONTRA  
 $\alpha_m = 0,25$   
 $\theta = 75^\circ$

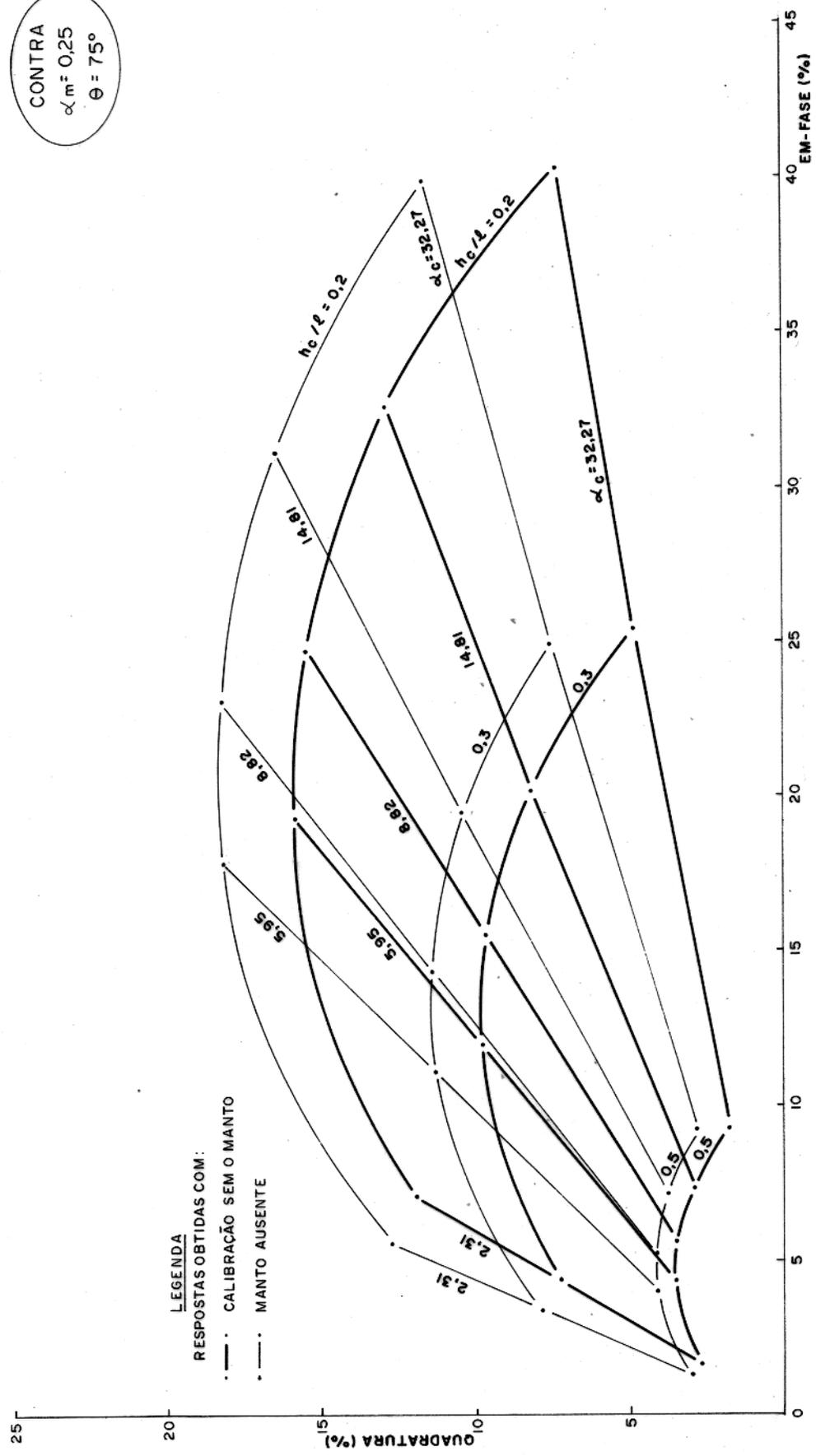


Fig.29-Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para  $\alpha_m = 0,25$  e  $\theta = 75^\circ$ .

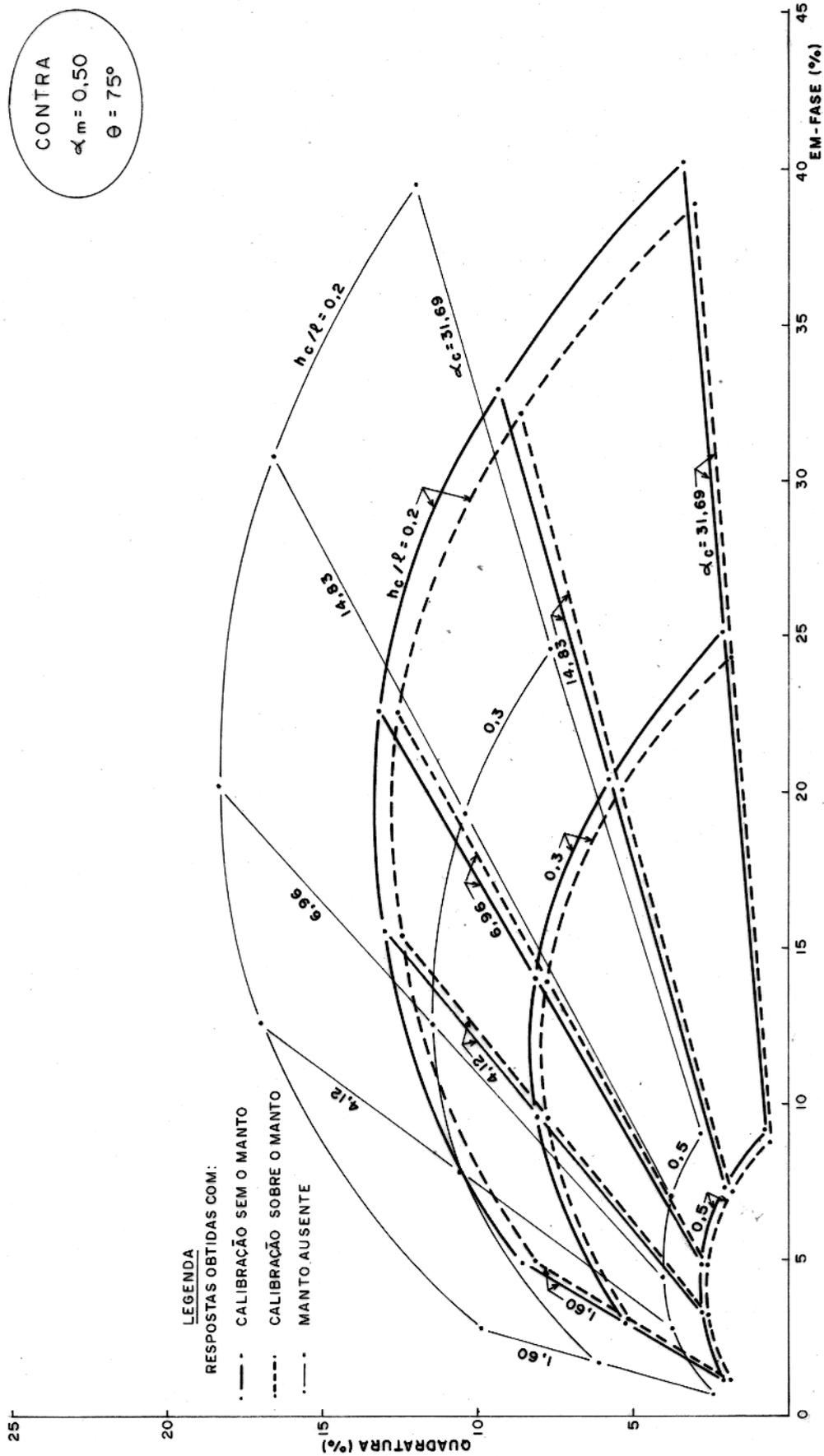


Fig.30-Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para  $\alpha_m=0,50$  e  $\theta = 75^\circ$ .

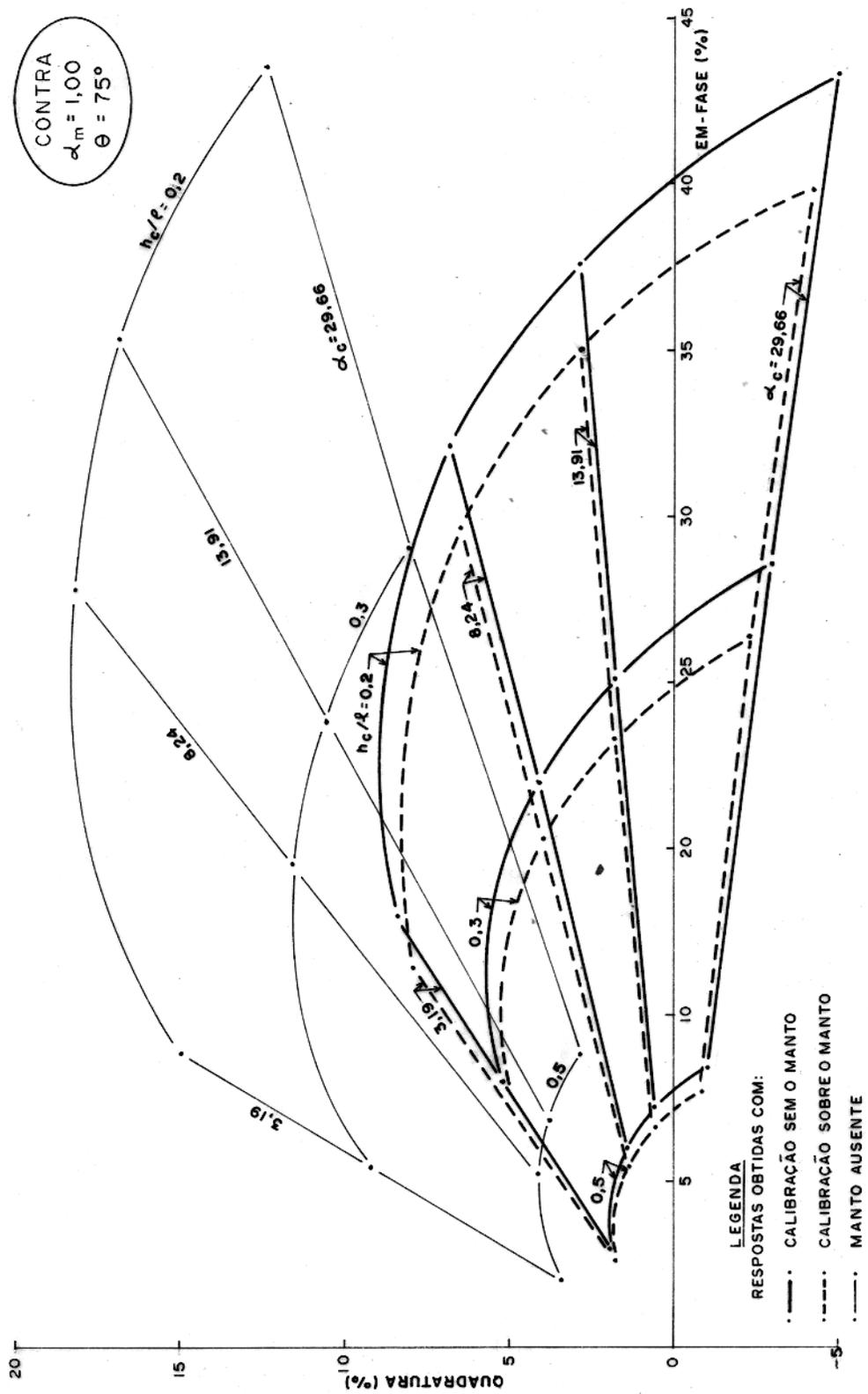


Fig.31 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para  $\alpha_m = 1,00$  e  $\theta = 75^\circ$ .

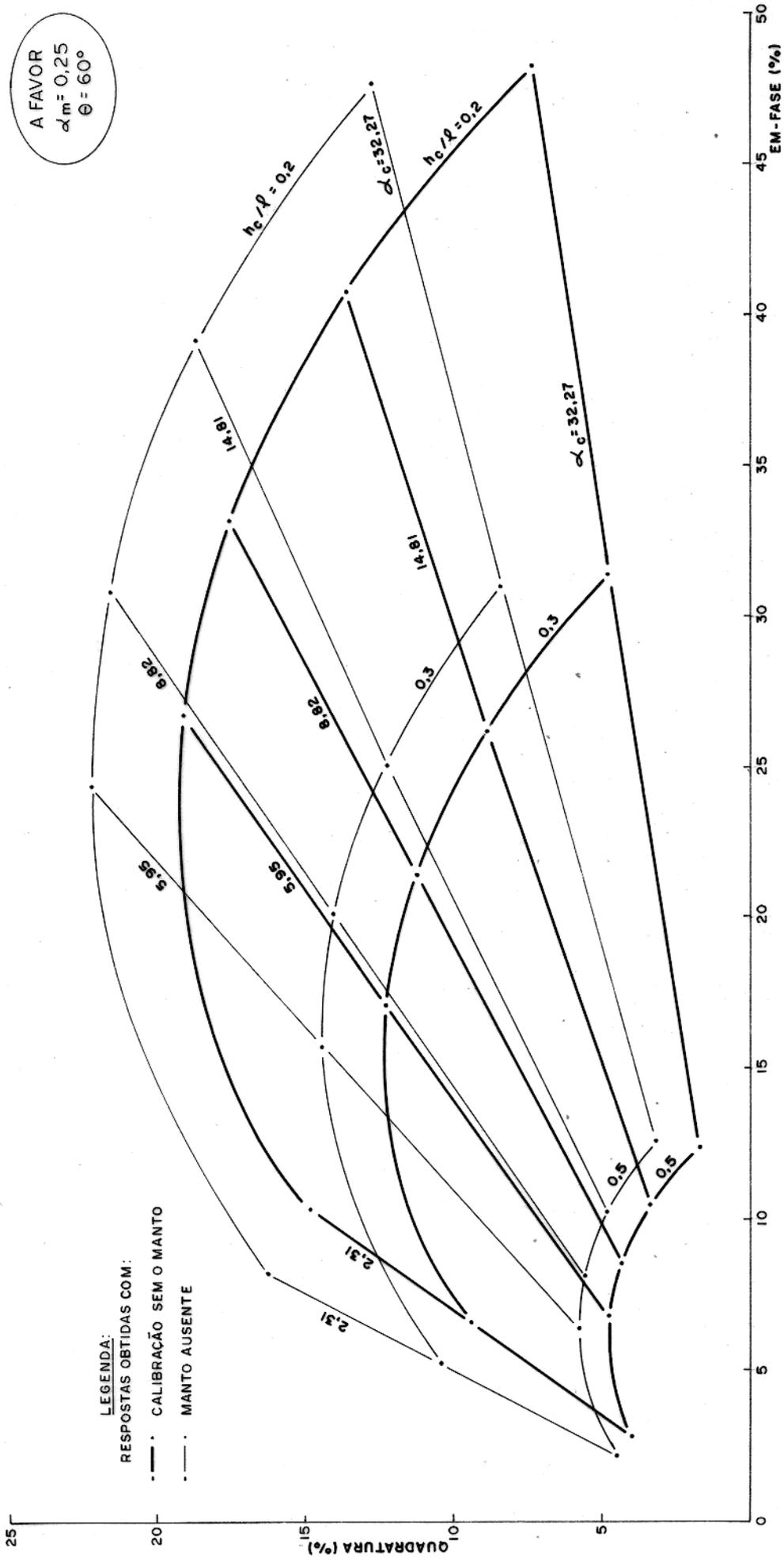


Fig.32- Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para  $\alpha_m=0,25$  e  $\theta = 60^\circ$ .

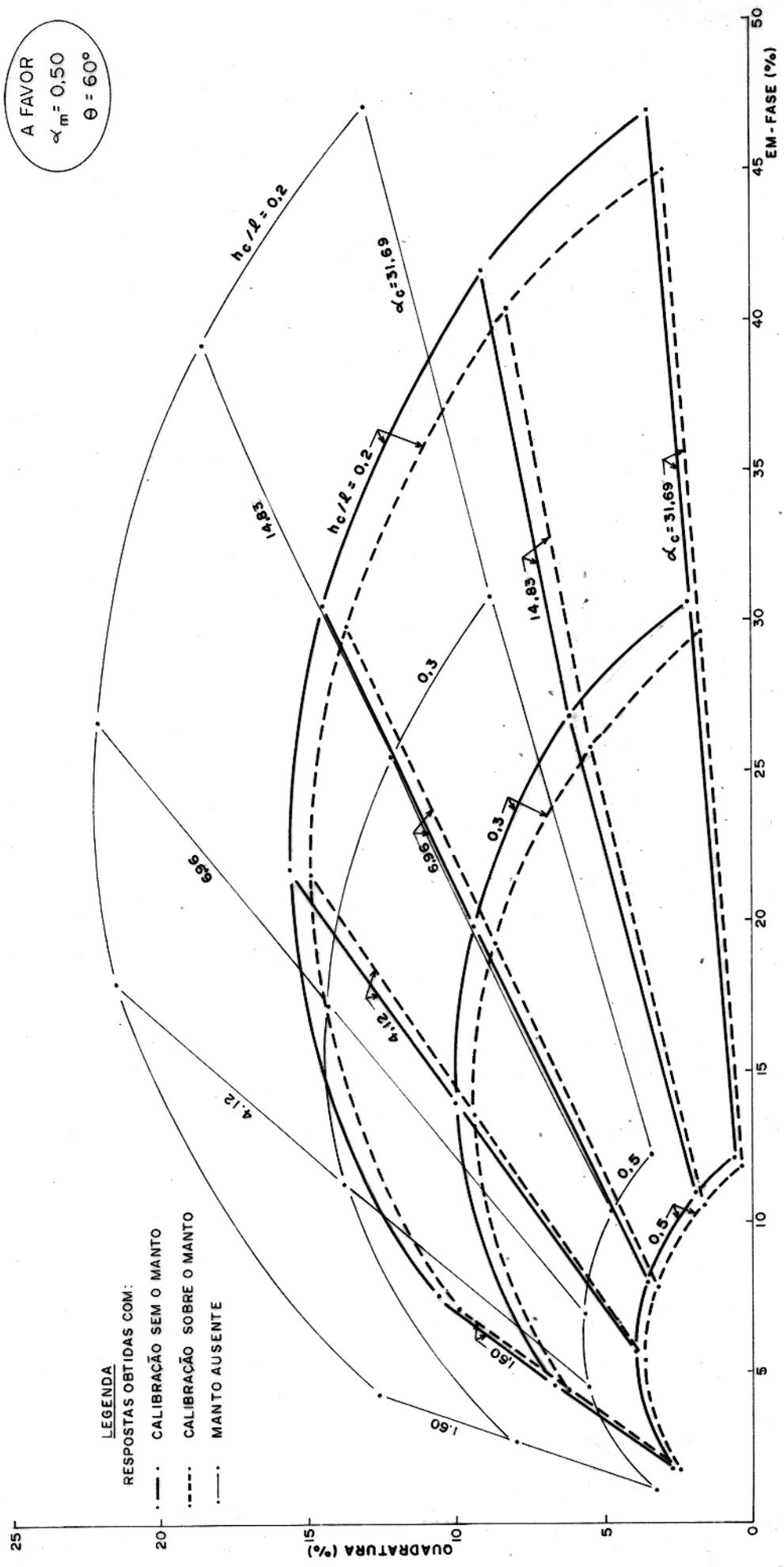


Fig.33- Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para  $\alpha_m = 0,50$  e  $\theta = 60^\circ$ .

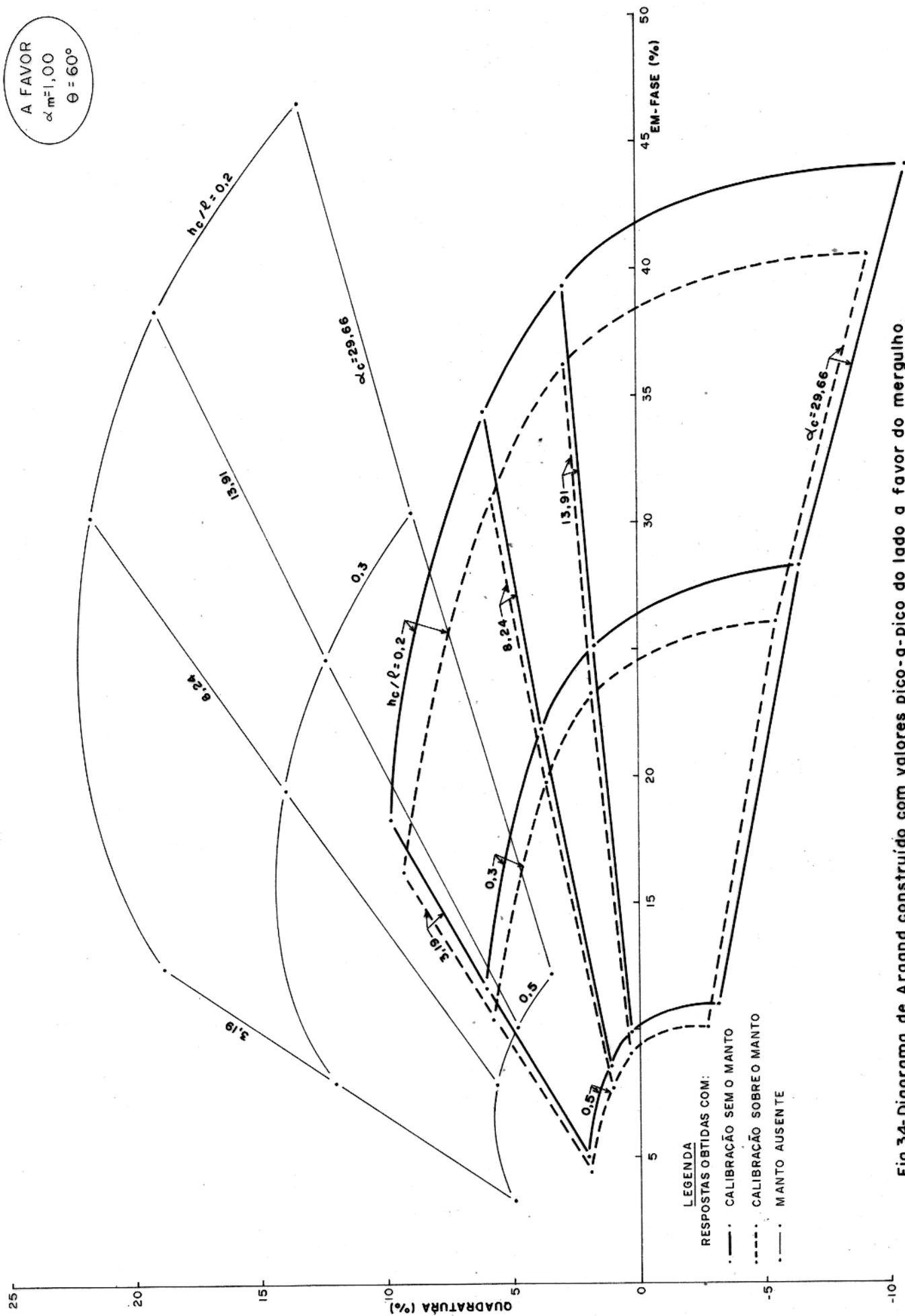


Fig.34-Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para  $\alpha_m = 1,00$  e  $\theta = 60^\circ$ .

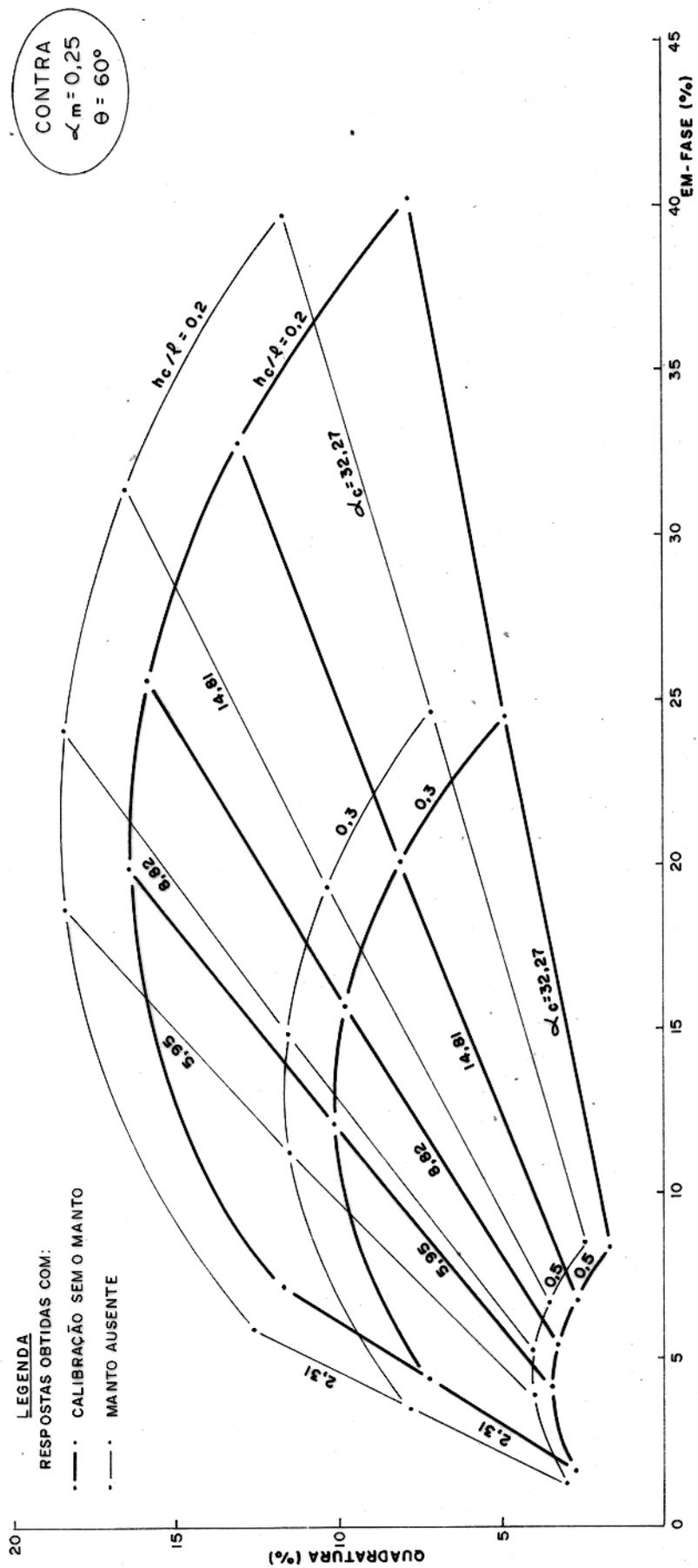


Fig.35-Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para  $\alpha_m = 0,25$  e  $\theta = 60^\circ$ .





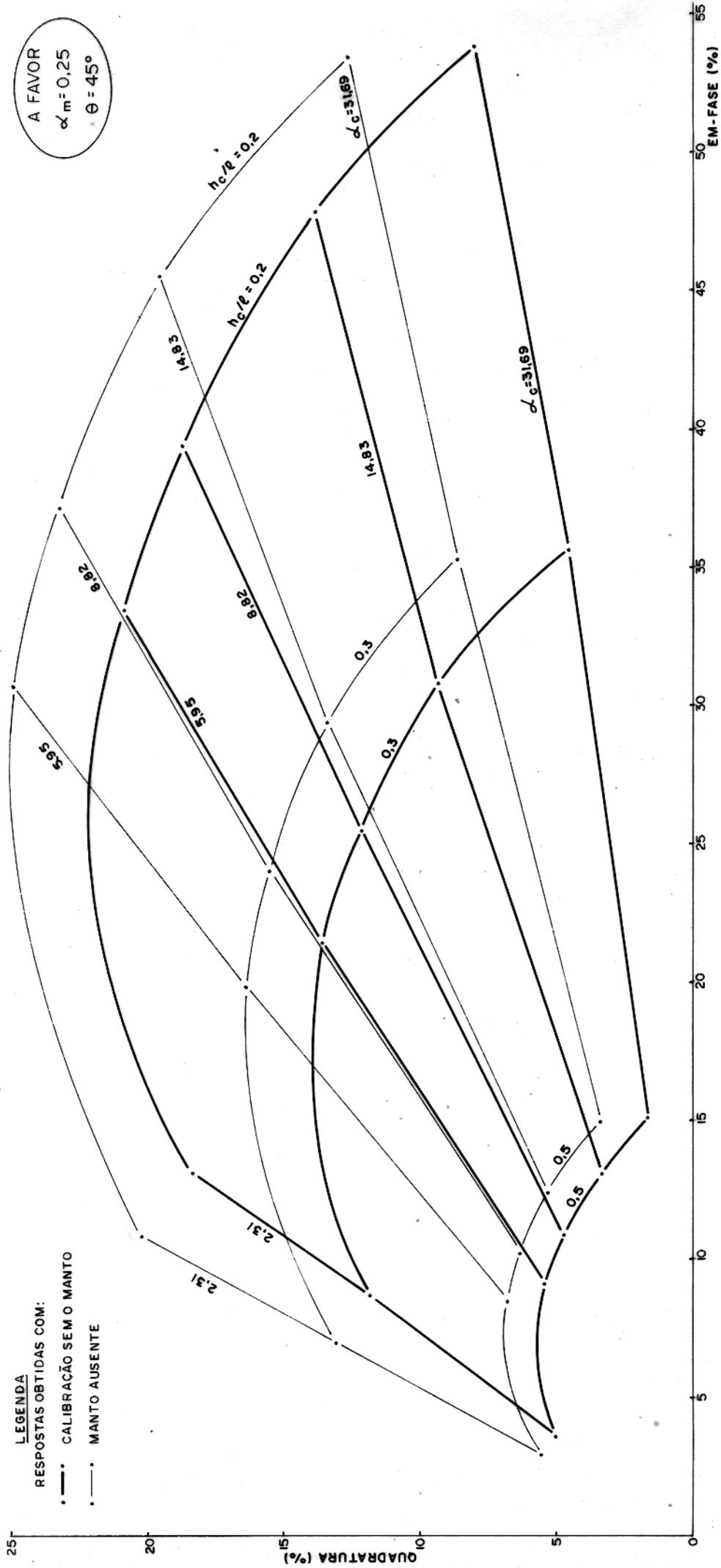


Fig.38- Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para  $\alpha_m = 0,25$  e  $\theta = 45^\circ$ .

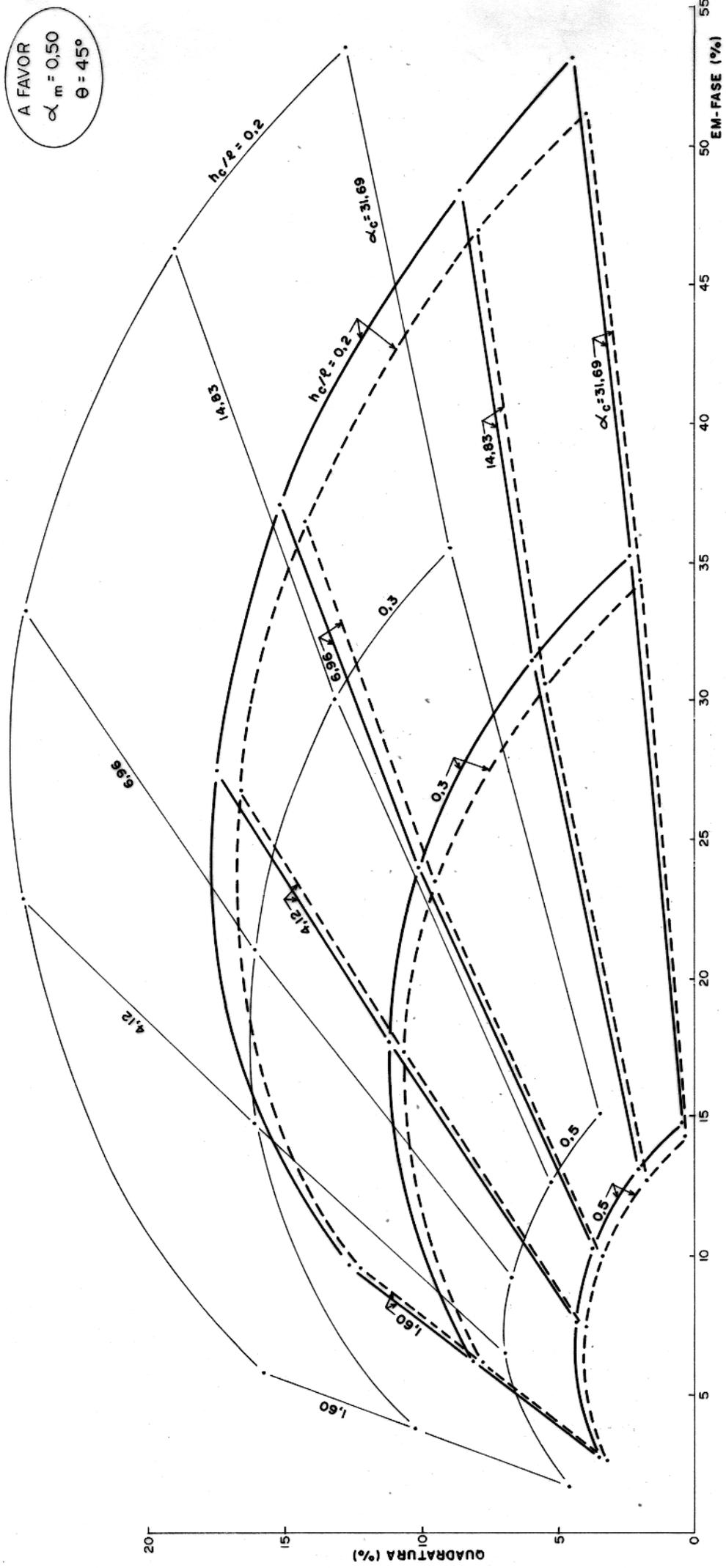


Fig.39- Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para  $\alpha_m = 0.50$  e  $\theta = 45^\circ$ .

A FAVOR  
 $\alpha_m = 1,00$   
 $\theta = 45^\circ$

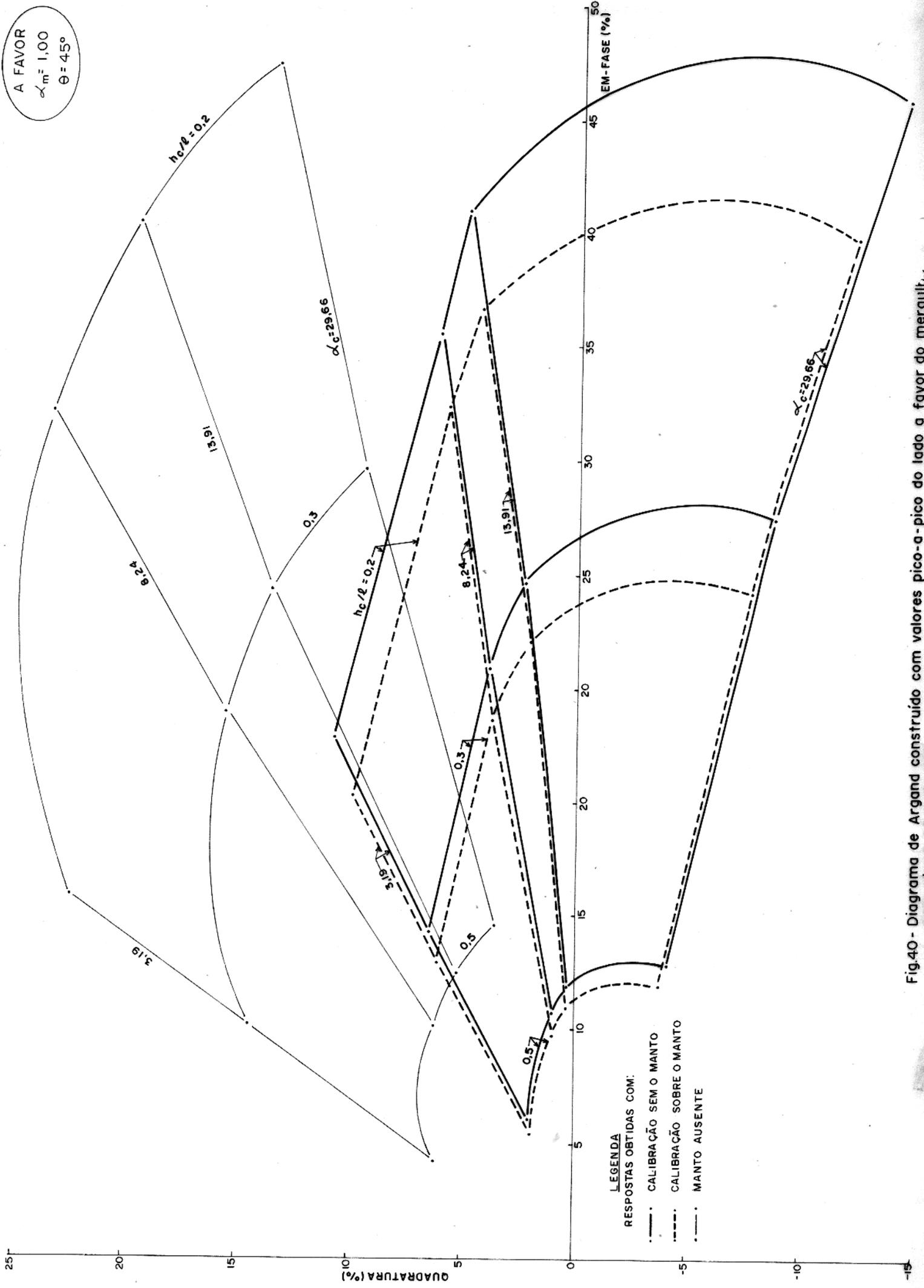


Fig.40 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para  $\alpha_m = 1,00$  e  $\theta = 45^\circ$

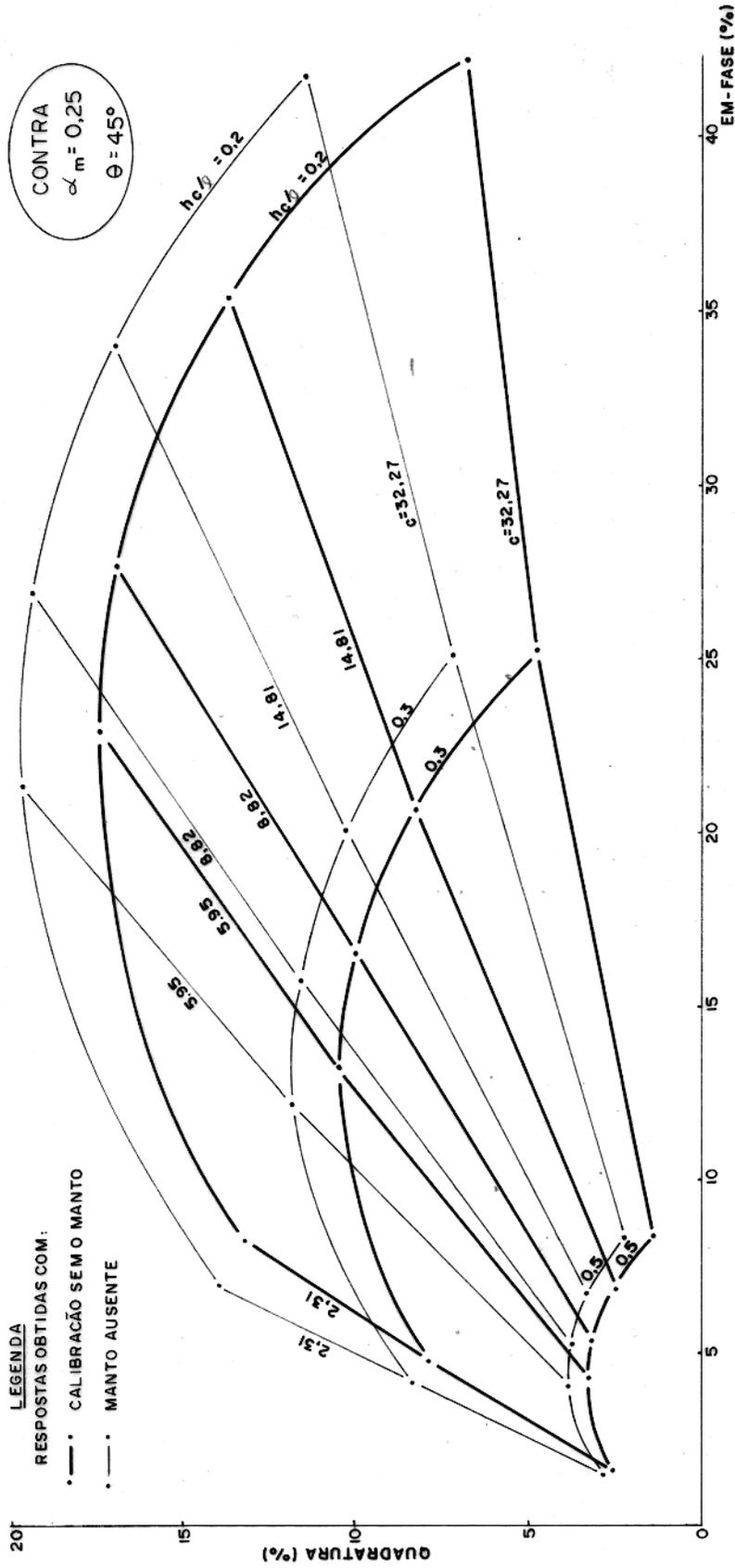


Fig.41-Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para  $\alpha_m = 0,25$  e  $\theta = 45^\circ$ .

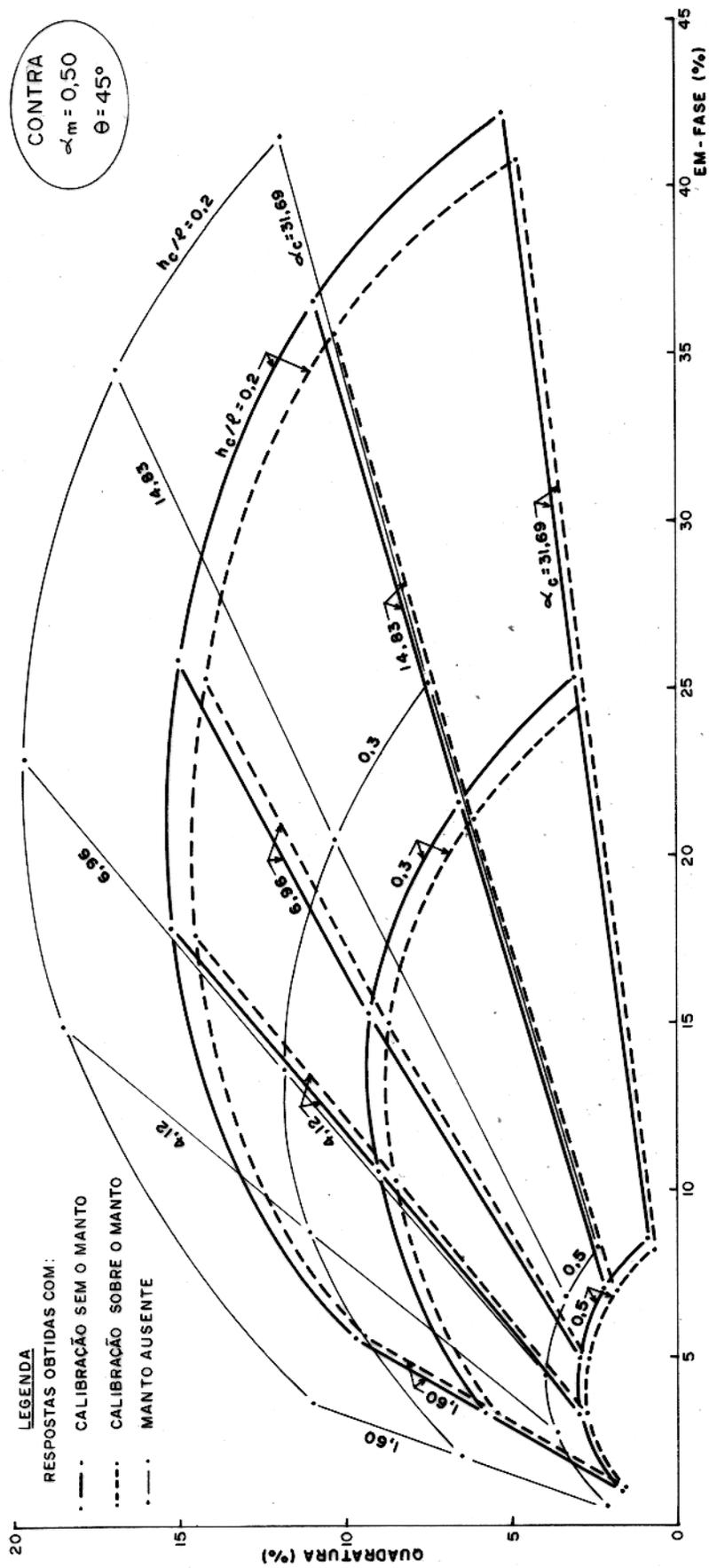


Fig.42 Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para  $\alpha_m=0,50$  e  $\theta=45^\circ$ .

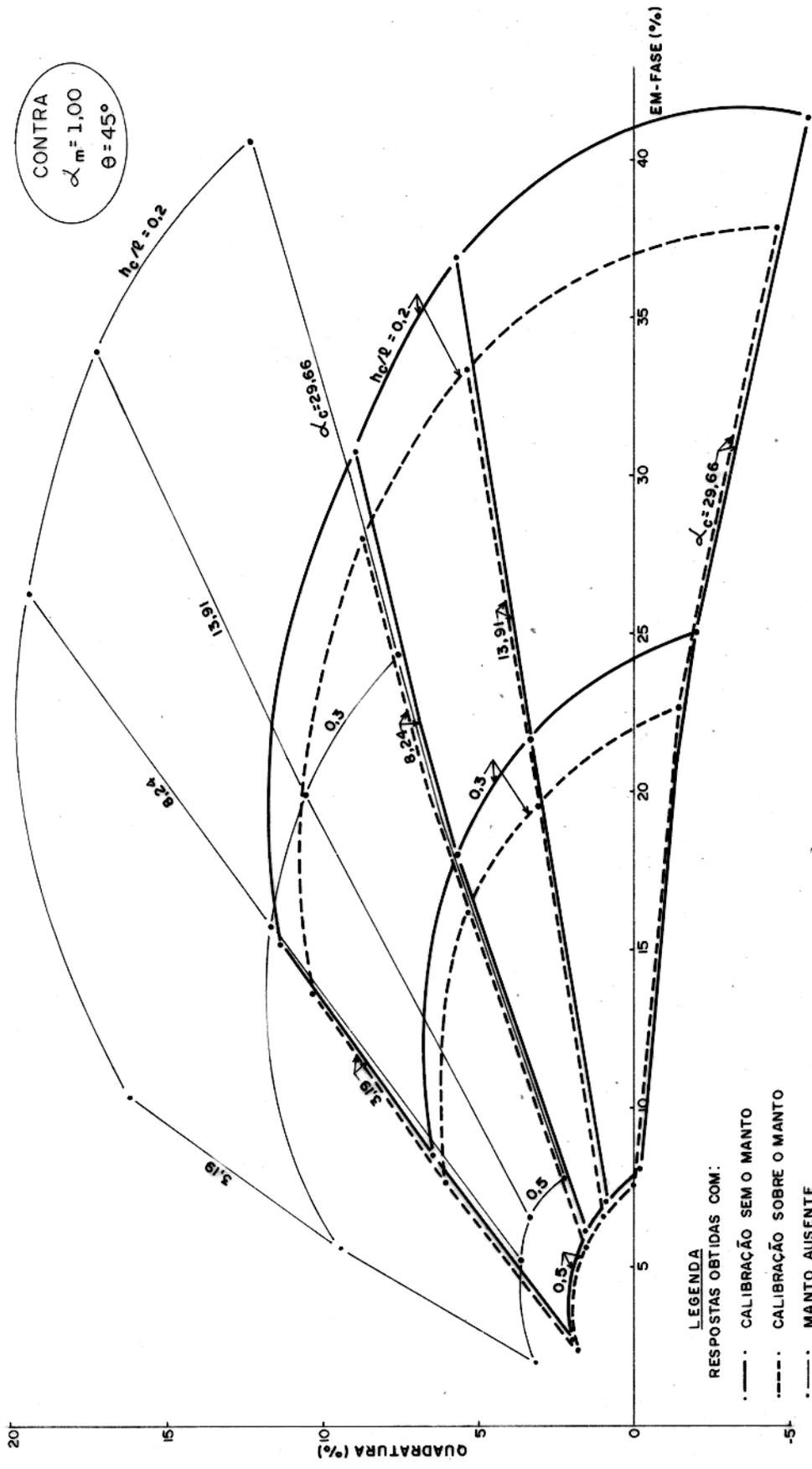


Fig.43-Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para  $\alpha_m = 1,00$  e  $\theta = 45^\circ$ .

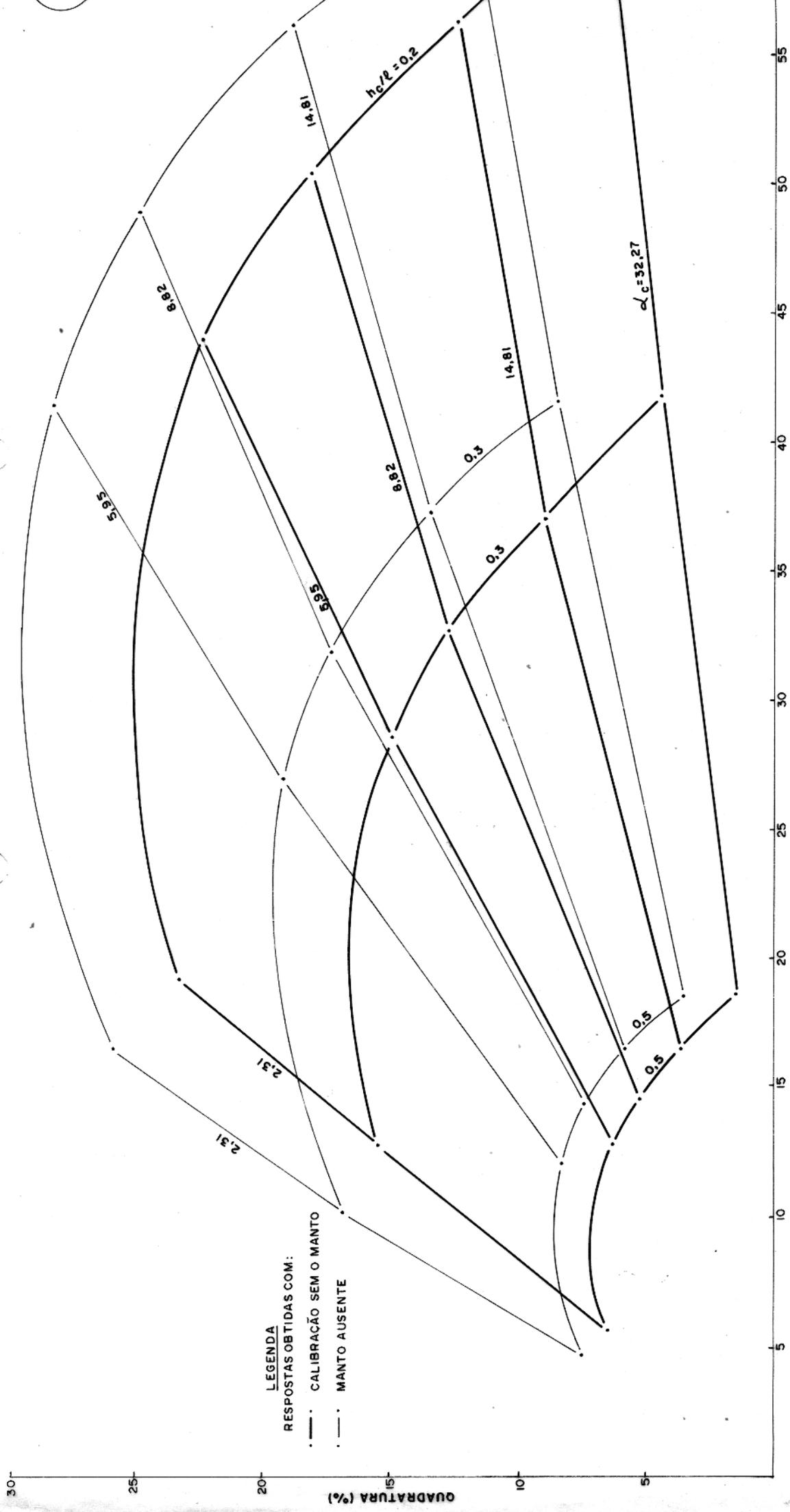
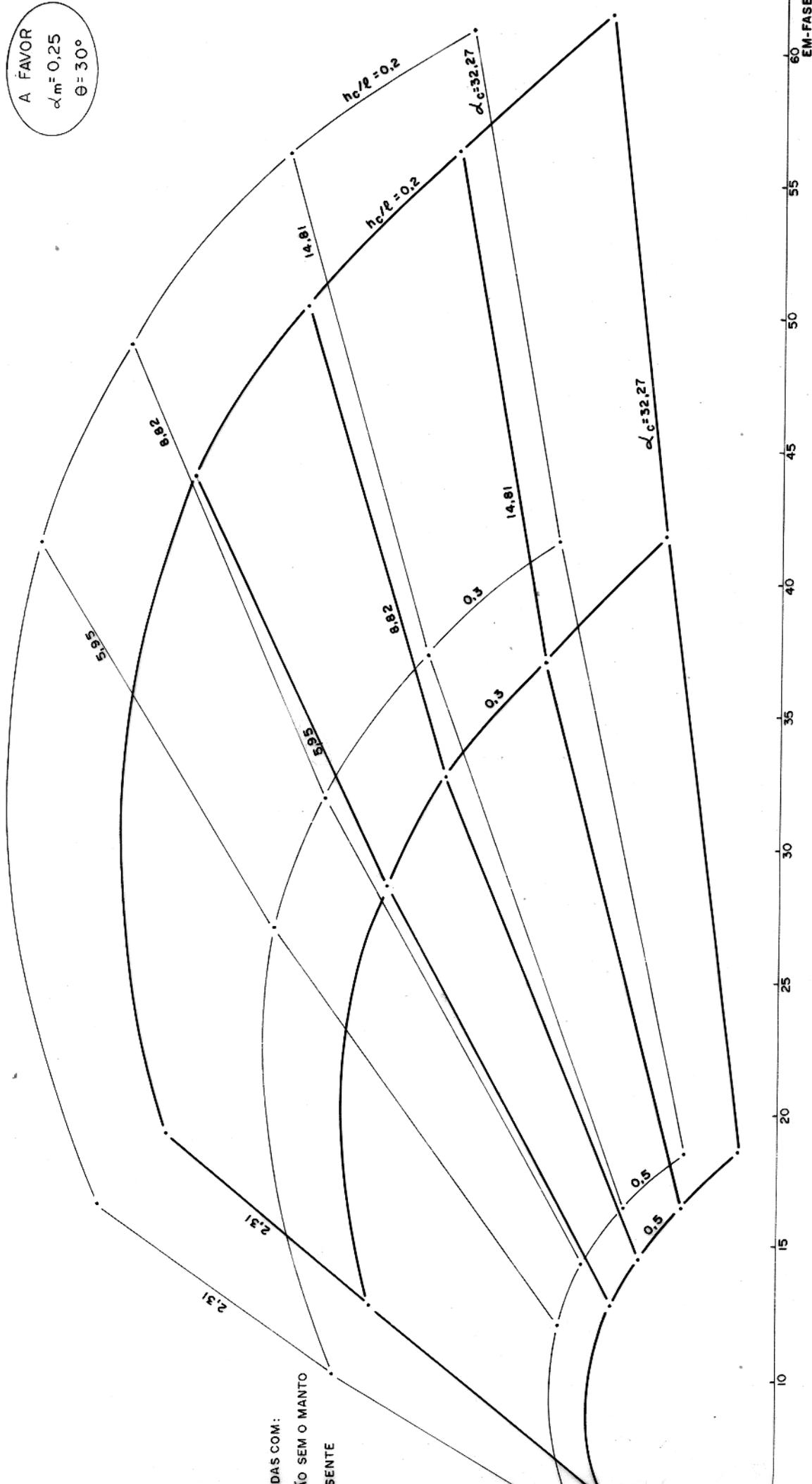


Fig.44- Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para  $\alpha_m = 0.25$  e  $\theta = 30^\circ$

A FAVOR  
 $\alpha_m = 0,25$   
 $\theta = 30^\circ$

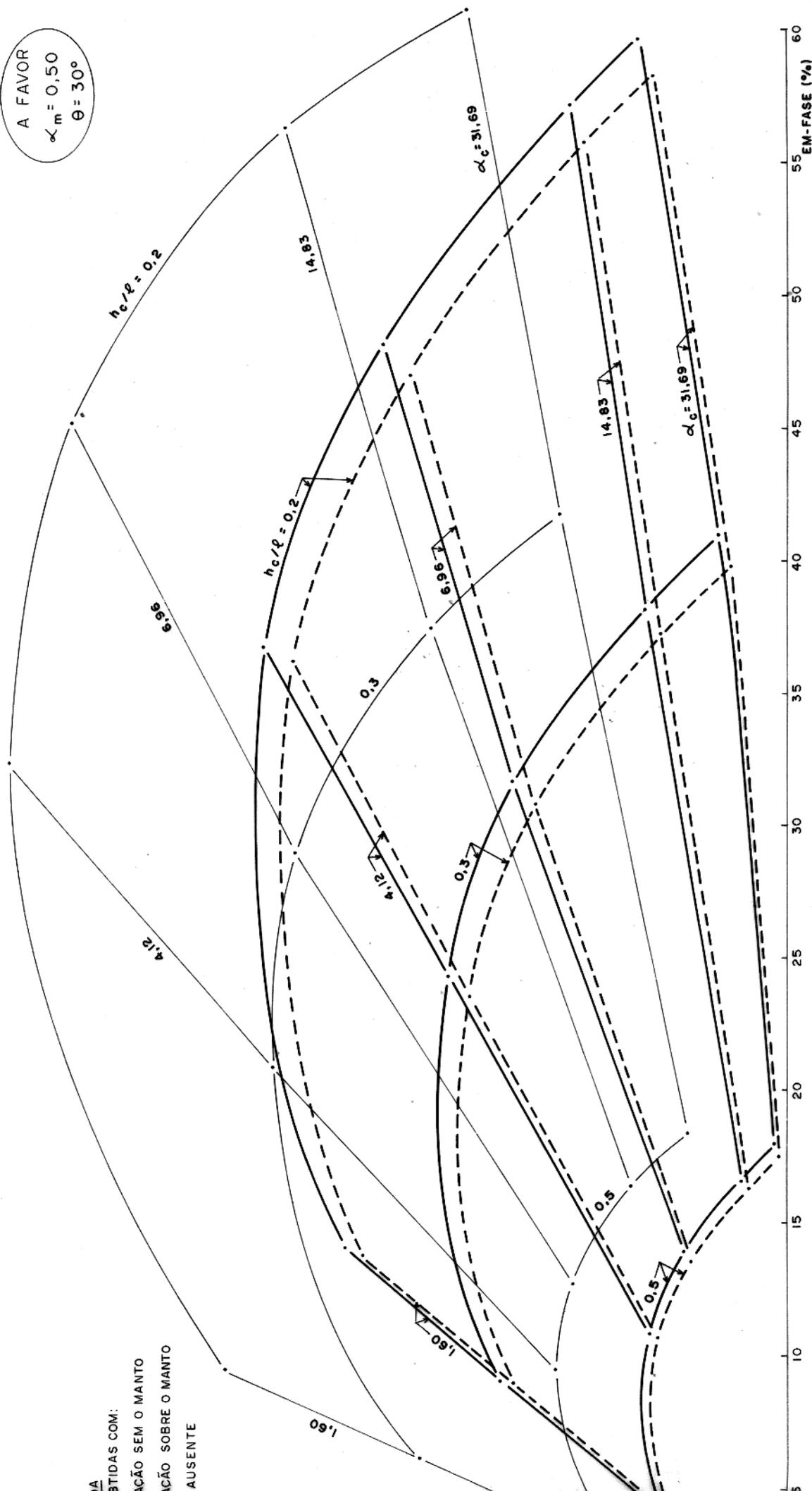


DAS COM:  
 O SEM O MANTO  
 SENTE

Fig.44- Diagrama de Argand construido com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para  $\alpha_m = 0,25$  e  $\theta = 30^\circ$



A FAVOR  
 $\alpha_m = 0,50$   
 $\theta = 30^\circ$



AS  
 BTIDAS COM:  
 IÇÃO SEM O MANTO  
 IÇÃO SOBRE O MANTO  
 AUSENTE

Fig. 45 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho para  $\alpha_m = 0,50$  e  $\theta = 30^\circ$ .

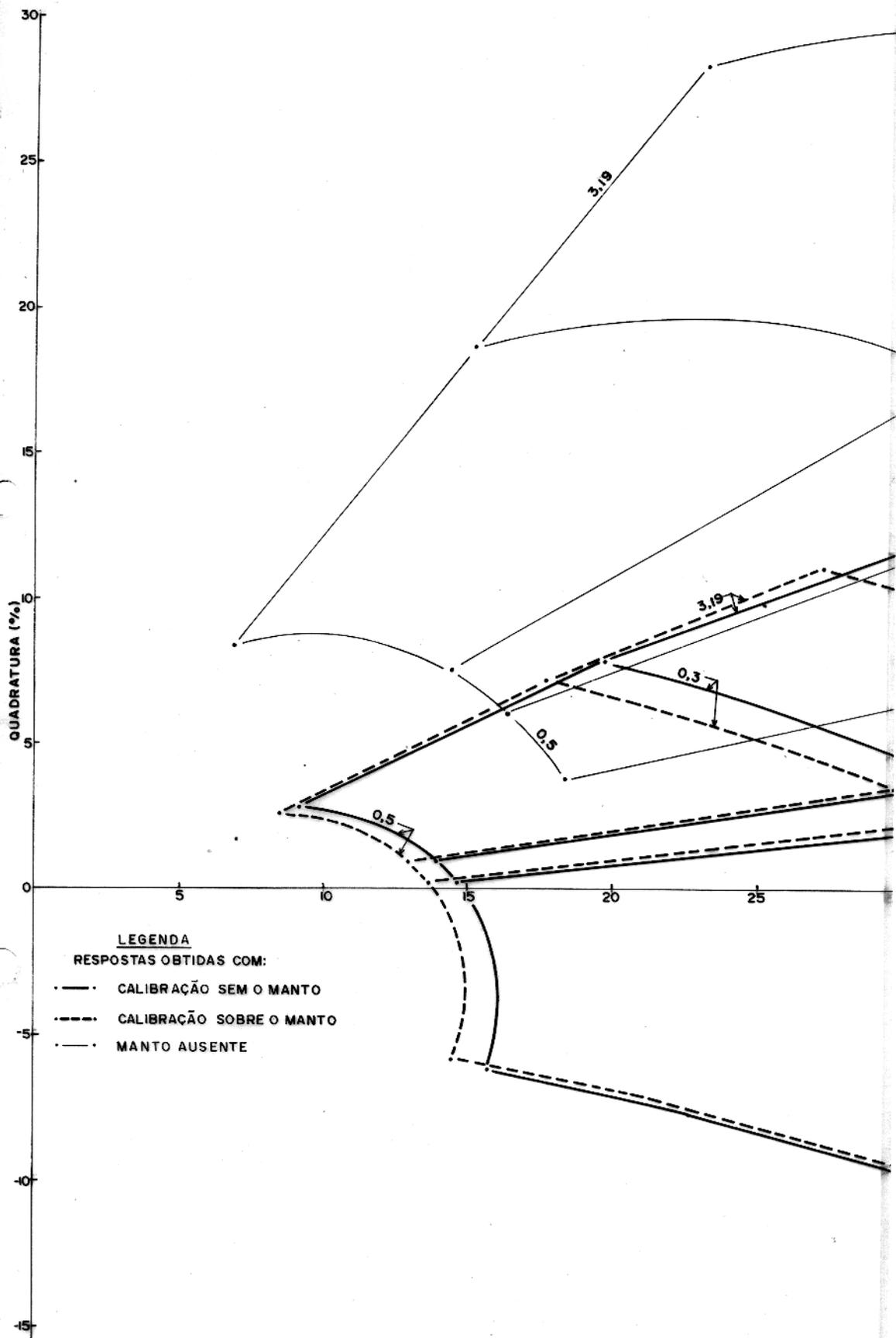
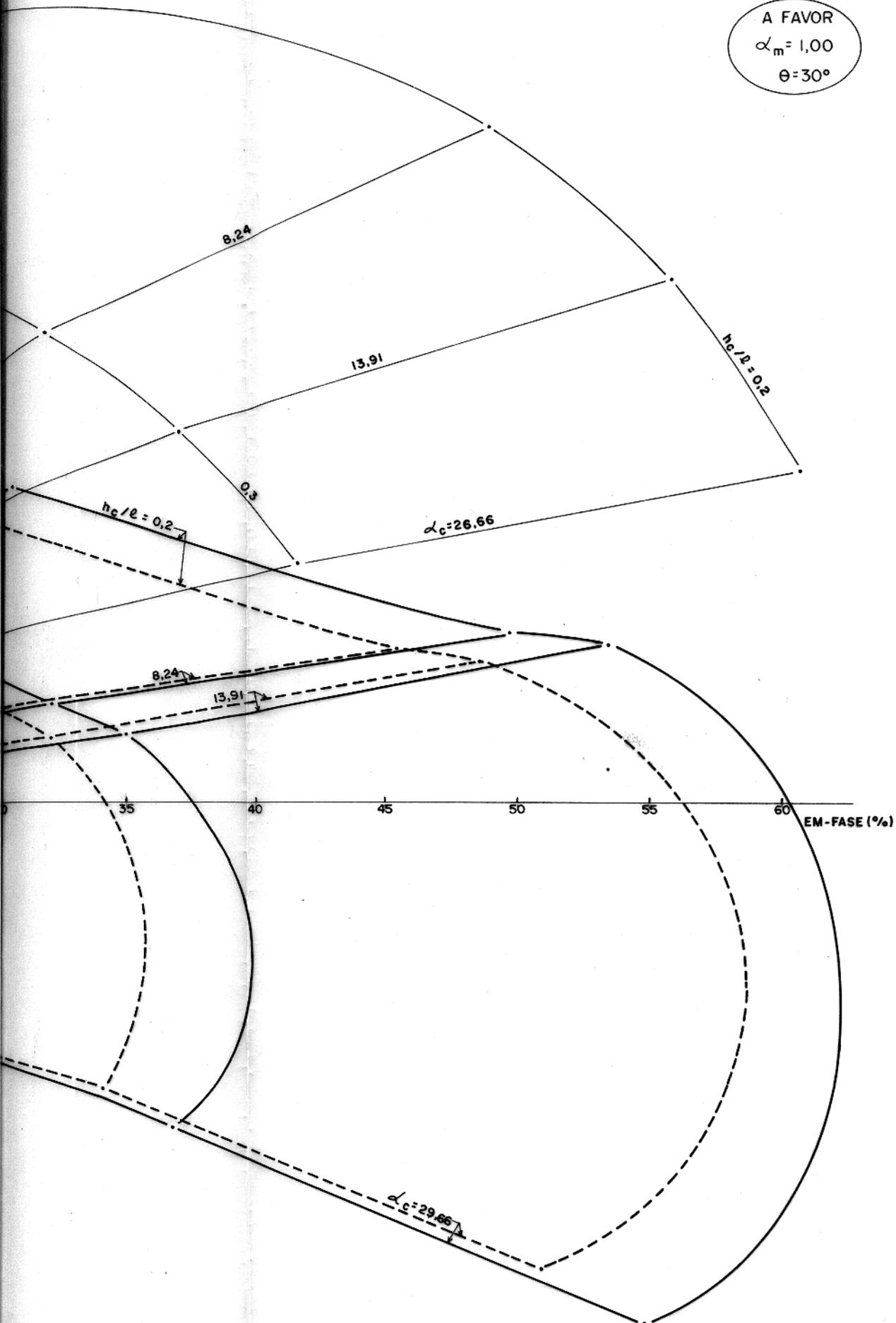


Fig.46- Diagrama de Argand construído com para  $\alpha_m = 1,00$  e  $\theta = 30^\circ$ .

A FAVOR

$\alpha_m = 1,00$

$\theta = 30^\circ$



valores pico-a-pico do lado a favor do mergulho.

CONTRA  
 $\alpha_m = 0,25$   
 $\theta = 30^\circ$

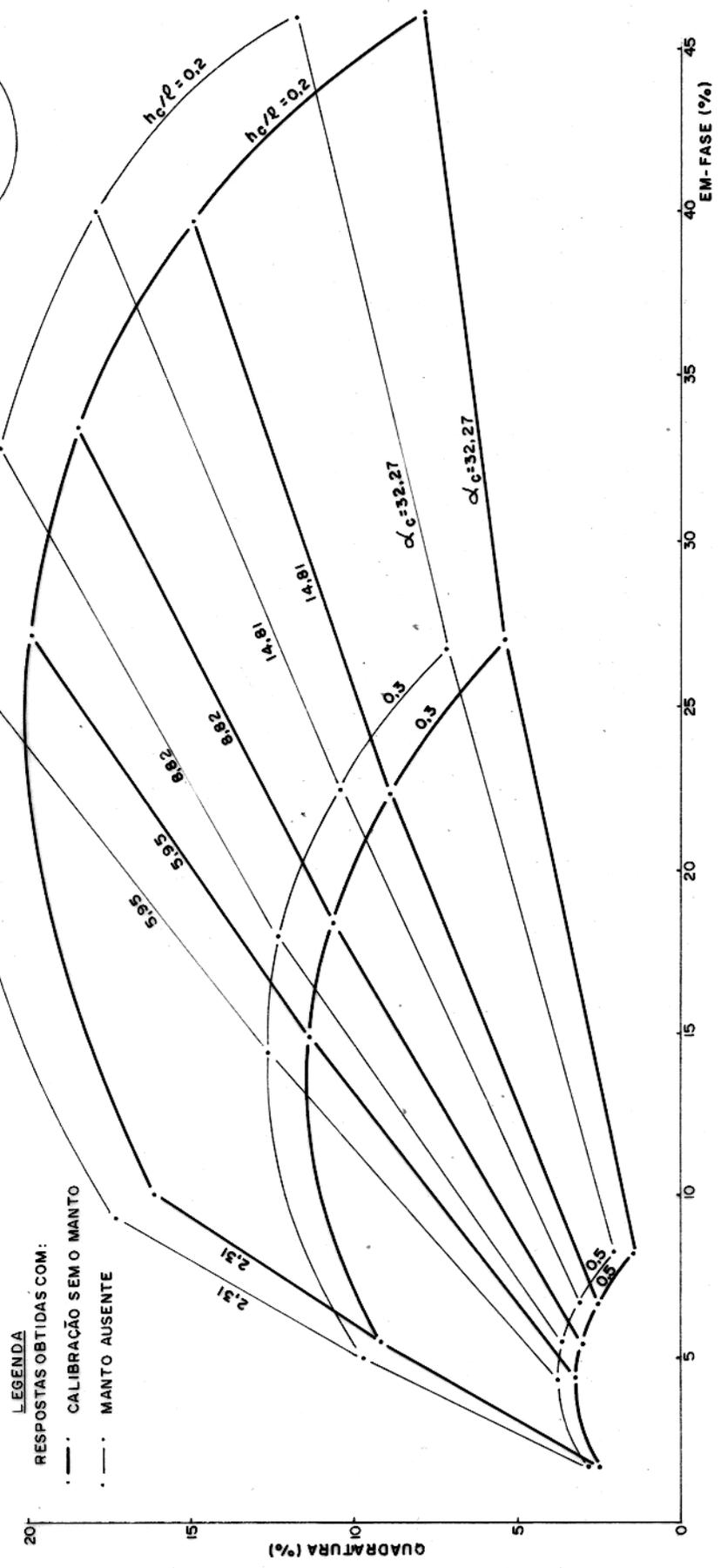


Fig.47 - Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para  $\alpha_m = 0,25$  e  $\theta = 30^\circ$ .

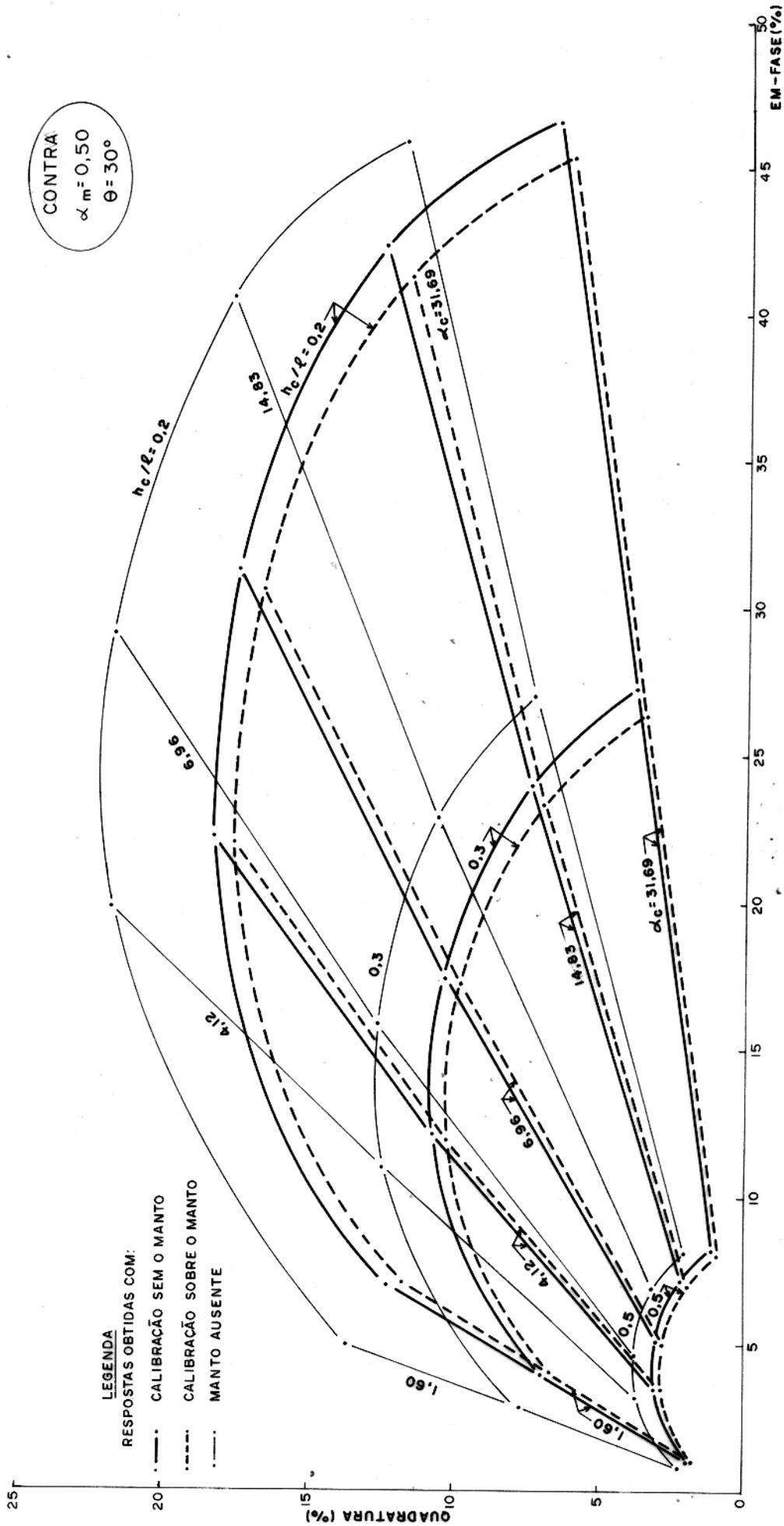


Fig.48- Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho para  $\alpha_m = 0,50$  e  $\theta = 30^\circ$ .

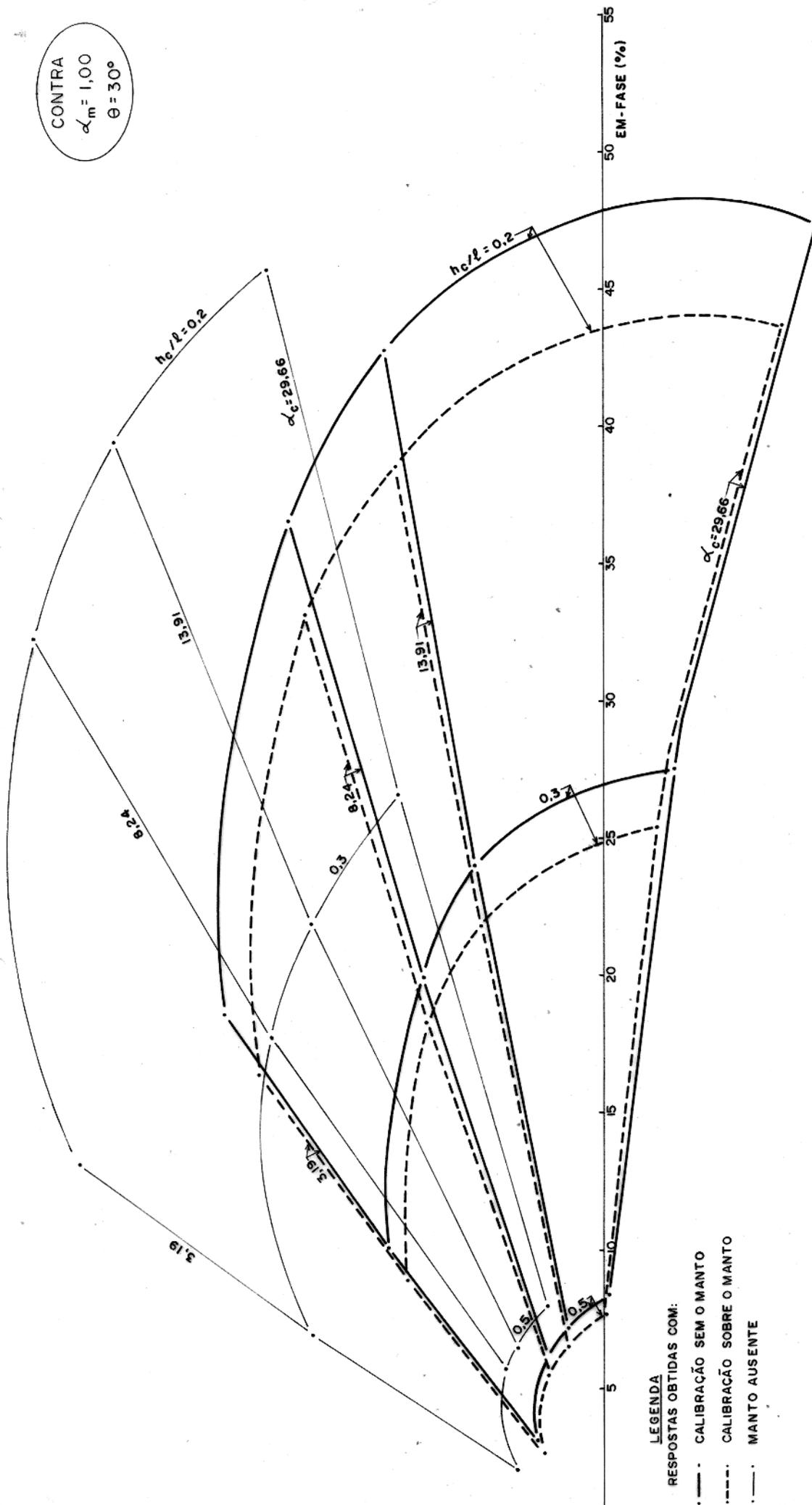


Fig.49- Diagrama de Argand construído com valores pico-a-pico do lado contrário ao mergulho. para  $\alpha_m=1,00$  e  $\theta=30^\circ$ .

## 5 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORPOS DO TIPO SEMI-PLANO

Os diagramas de Argand aqui construídos podem ser utilizados na interpretação de dados e.m. de campo desde que as seguintes condições, impostas neste trabalho, sejam cumpridas:

- a) a encaixante é altamente resistiva;
- b) a permeabilidade magnética dos corpos geológicos é desprezível e
- c) o corpo é do tipo semi-plano.

Estas condições podem ser verificadas com base nas informações geológicas da área e em alguns levantamentos geofísicos auxiliares (sondagem elétrica, perfilagem magnética, etc.).

A escolha da família de diagramas mais adequada para a interpretação é feita com base no parâmetro de resposta do manto, facilmente obtido através de sondagens elétricas. Pode ser tentada a obtenção desse parâmetro fazendo-se a calibração do equipamento sobre afloramento resistivo e, em seguida, medindo-se as variações das componentes numa estação onde exista o manto. Essas variações, plotadas no gráfico obtido para as respostas devidas unicamente ao manto (fig 50) a ser adiante mostrado, permitem obter  $\alpha_m$  e  $h_m/\ell$ . Este último dado refere-se apenas a profundidade do modelo utilizado em laboratório (sem sentido, na prática) mas é um dado importante (e não obtido pela sondagem elétrica) caso os perfis de campo tenham sido realizados considerando-se a calibração sobre o manto. Isto porque os diagramas de Argand deste estudo foram construídos com base em perfis obtidos considerando-se o manto à profundidade  $h_m/\ell = 0,10$ . E, como foi visto, se esta profundidade varia, os resultados também variam. Uma avaliação muito grosseira dessas variações pode ser tentada com base na figura 8.

De posse de  $\alpha_m$ , a família de diagramas a ser usada pode ser selecionada. Quando o  $\alpha_m$  determinado não corresponde a nenhum daqueles aqui investigados, pode-se fazer a interpretação dos dados considerando-se a família de curvas cujo  $\alpha_m$  seja o mais

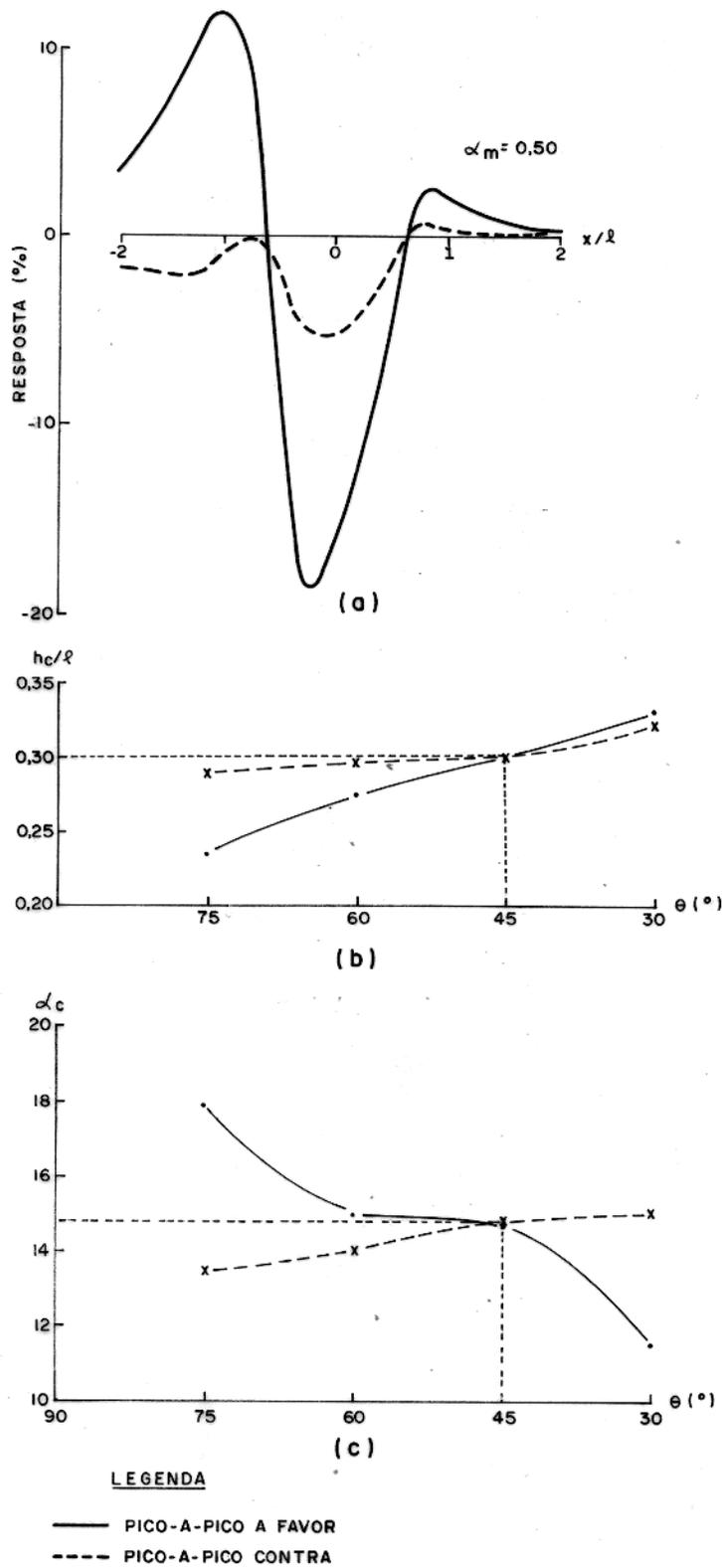


Fig. 50- Ilustração do procedimento para determinação dos parâmetros de um semi-plano.  
 (a) Perfil exemplo. (b) e (c) Respectivamente, gráficos  $\theta \times hc/l$  e  $\theta \times \alpha_c$  construídos com os valores obtidos nos diagramas de  $\alpha_m = 0,50$

próximo possível daquele de campo. Neste caso, os valores a serem obtidos para  $h_c$  e  $\alpha_c$  estarão exagerados se o valor de  $\alpha_m$  das curvas utilizadas for superior àquele de campo, e vice-versa.

Se o perfil de campo é simétrico, utiliza-se apenas o diagrama construída para  $\theta = 90^\circ$  da família de curvas selecionada. Se o perfil é assimétrico, o procedimento mais correto é utilizar todos os diagramas. Para ilustrar como isso é feito, suponha-se um perfil obtido em laboratório considerando-se a calibração sobre o manto, cujos valores pico-a-pico das componentes em fase e em quadratura sejam, respectivamente, os seguintes: para o lado a favor do mergulho, 31,5% e 6,0% e para o lado contra, 21,6% e 6,6% (fig. 50a). Suponha-se também um manto cujo  $\alpha_m$  foi calculado como sendo igual a 0,50.

Entra-se, então, em todos os diagramas da família  $\alpha_m = 0,50$  com estes dados, à exceção daqueles para  $\theta = 90^\circ$  já que a assimetria dos picos da anomalia é grande (figs. 27, 30, 33, 36, 39, 42, 45 e 48). Os valores estimados para  $h_c/l$  e  $\alpha_c$  são apresentados abaixo:

Tabela 3: Parâmetros de corpo extraídos dos diagramas para  $\alpha_m = 0,50$ .

$\theta(^\circ)$	pico-a-pico a favor		pico-a-pico contra	
	$h_c/l$	$\alpha_c$	$h_c/l$	$\alpha_c$
75	0,240	18,00	0,29	13,50
60	0,275	15,00	0,295	14,00
45	0,300	14,83	0,300	14,83
30	0,330	11,50	0,325	15,00

Em seguida, constrói-se, com os valores obtidos, dois gráficos:  $\theta \times h_c/l$  (fig. 50b) e  $\theta \times \alpha_c$  (fig. 50c). A interseção das curvas de valores obtidos nos diagramas pico-a-pico a favor

e contra nos dois gráficos plotados fornece os valores de  $\theta$  e  $h_c/l$  e novamente  $\theta$  e  $\alpha_c$ . No exemplo,  $\theta = 45^\circ$ ,  $h_c/l = 0,3$  e  $\alpha_c = 14,83$ .

Em geral, devem haver discrepâncias entre os valores obtidos para  $\theta$  segundo os dois gráficos. Essas estão associadas a extrapolações erradas de  $h_c/l$  e  $\alpha_c$  a partir dos diagramas de Argand, dada a variação não linear dos mesmos.

Para contornar a situação acima, sejam  $\theta_b$  e  $(h_c/l)_b$  e  $\theta_c$  e  $(\alpha_c)_c$  os valores extraídos, respectivamente, dos gráficos  $\theta \times h_c/l$  (fig.50b) e  $\theta \times \alpha_c$  (fig.50c). Levando-se  $\theta_b$  no gráfico  $\theta \times \alpha_c$  (fig.50c) e  $\theta_c$  no gráfico  $\theta \times h_c/l$  (fig.50b) obtém-se, respectivamente, faixas de variação para  $\alpha_c$  e  $h_c/l$ . Em geral,  $(\alpha_c)_c$  e  $(h_c/l)_b$  são esperados pertencer a tais faixas. Assim, os resultados são dados em termos dos valores máximos e mínimos esperados para  $\alpha_c$ ,  $h_c/l$  e  $\theta$ . Este último, com valor entre  $\theta_b$  e  $\theta_c$ .

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise das anomalias associadas a semi-planos inclinados capeados pelo manto de intemperismo mostra que o último promove os seguintes efeitos sobre as mesmas:

- 1º) rotação no sentido horário da fase;
- 2º) redução de amplitude;
- 3º) deslocamento da base dos perfis quando a calibração é realizada na ausência do manto;
- 4º) reversão da componente em quadratura para altos valores de parâmetros de resposta do corpo e do manto; e
- 5º) aparecimento de um pico extra na componentes em quadratura para pequenos mergulhos do corpo.

Sabe-se que a profundidade de penetração do campo magnético em um condutor é dada pela fórmula (33):

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

A essa profundidade, o campo sofre uma rotação de  $180^\circ$  e sua amplitude se encontra atenuada de  $1/e$  do seu valor original.

Quando o campo magnético primário enviado pelo receptor atravessa o manto condutivo, sofre uma rotação e uma atenuação de, respectivamente,  $180^\circ/\delta$  e  $1/e\delta$  do seu valor original para cada metro de espessura do manto. O mesmo ocorre com o campo secundário ao atravessar o manto antes de alcançar o receptor.

A rotação da fase e a redução da amplitude da anomalia têm sido assim explicadas. No entanto, quando a calibração é feita sobre o manto, ocorre apenas a rotação e a atenuação do campo secundário mas as anomalias obtidas apresentam-se, praticamente, com a mesma rotação verificada para aquelas anomalias conseguidas considerando-se a calibração realizada na ausência do manto. Apenas a amplitude varia consideravelmente. Este resultado salienta que os efeitos provocados pelo manto constituem um problema mais complexo que envolve também interações entre o corpo e o manto.

O deslocamento da base do perfil é, por sua vez, facilmente explicado pelas rotações e atenuações sofridas pelo campo

primário ao atravessar o manto. Por isto mesmo, não ocorre quando a calibração é feita sobre o manto. Na figura 51 são apresentadas as respostas obtidas para o manto. Estas são exatamente iguais aos deslocamentos de base encontrados nos perfis considerando-se os mesmos parâmetros de resposta do manto conforme pode ser verificado, por exemplo na fig. 10.

A reversão da quadratura está associada a uma maior interação entre o corpo e o manto visto que sempre ocorre para elevados  $\alpha_c$  e  $\alpha_m$ . Em consequência dessa maior interação, a rotação da fase é grande e a componente em quadratura torna-se negativa.

O aparecimento de um pico extra na quadratura é gerado pela maior influência entre os dois condutores devida a uma maior proximidade dos mesmos conforme o corpo tem seu mergulho suavizado. Este efeito pode causar sérios problemas na interpretação por que mascara muito os valores pico-a-pico da quadratura. Por outro lado, este efeito e a reversão permitem uma avaliação semi-qualitativa do mergulho e dos parâmetros de resposta do corpo e do manto.

Diante dos resultados obtidos, fica bastante claro que a interpretação feita para um condutor, sendo desprezado um manto de apreciável parâmetro de resposta, conduz a erros sérios. Pelos diagramas de Argand pode ser verificado que, nestes casos, a condutância e a profundidade obtidas para o corpo serão maiores do que as reais. Além disso, haverá erros referentes ao mergulho do corpo.

A falta de controle de dados de campo com respeito aos parâmetros aqui utilizados, impediu que se ilustrasse o procedimento de interpretação apresentado. Mas, qualitativamente, pode-se mostrar a grande validade dos diagramas construídos através de um exemplo extraído de Lowrie e West 1971, (fig. 52). Perfis com quatro diferentes frequências foram realizados sobre um corpo condutivo de mergulho vertical (pirita com quantidades menores de pirrotita e calcopirita) capeado por cobertura condutiva de  $\sigma t = 0,7$  S, localizado em Abitibi Clay Belt, Canadá. Esses perfis (fig. 52a) mostram, nitidamente, a reversão da quadratura com o aumento da frequência (aumento de  $\alpha_c$  e  $\alpha_m$ ). Os valores obtidos para os picos negativos das anomalias foram plotados em um diagrama de Argand construído para  $\alpha_m = 0$  e  $\theta = 90^\circ$  de Nair et al. (1968) (fig. 52b). A migração observada dos valores do

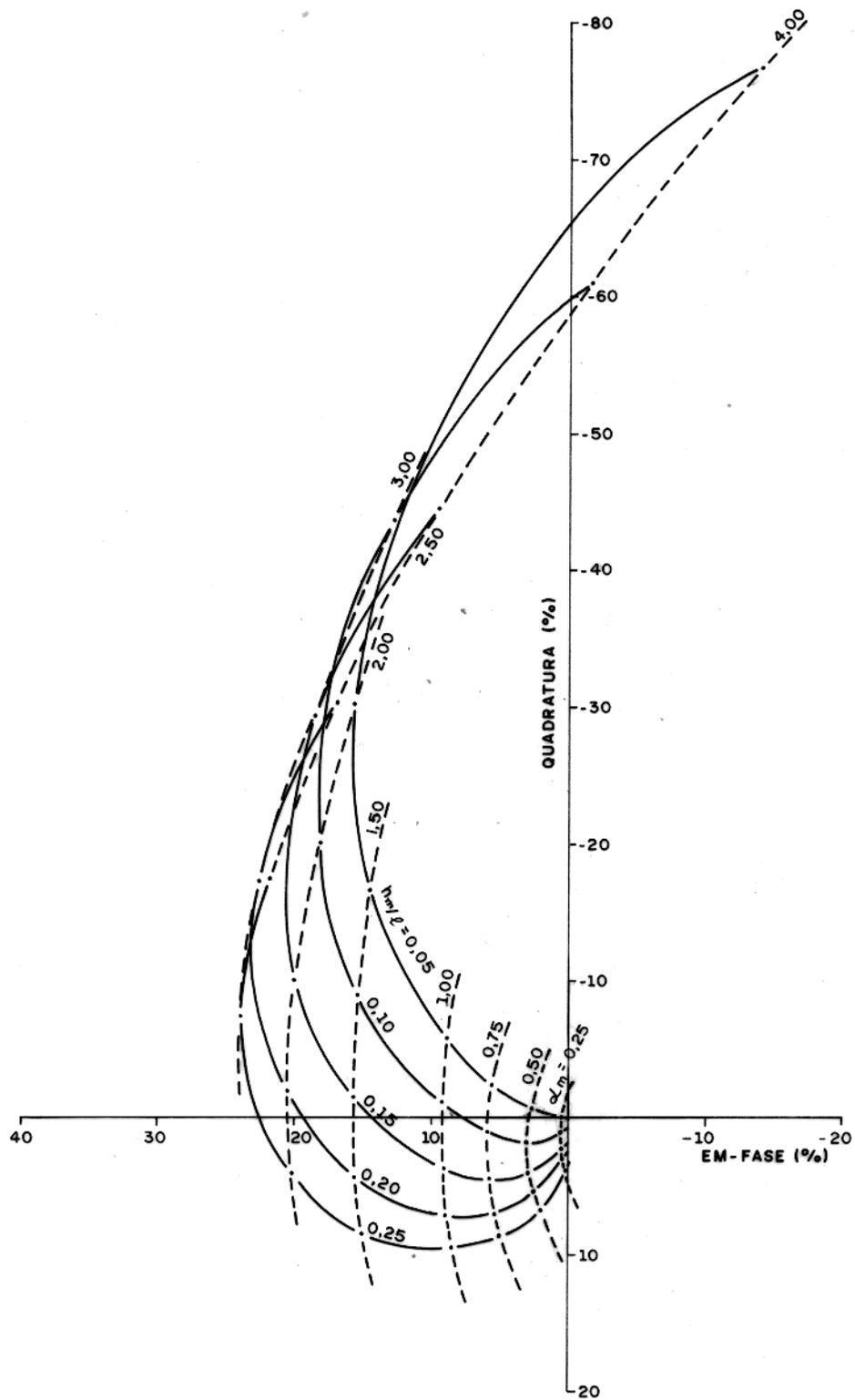


Fig. 51 - Respostas obtidas para o manto

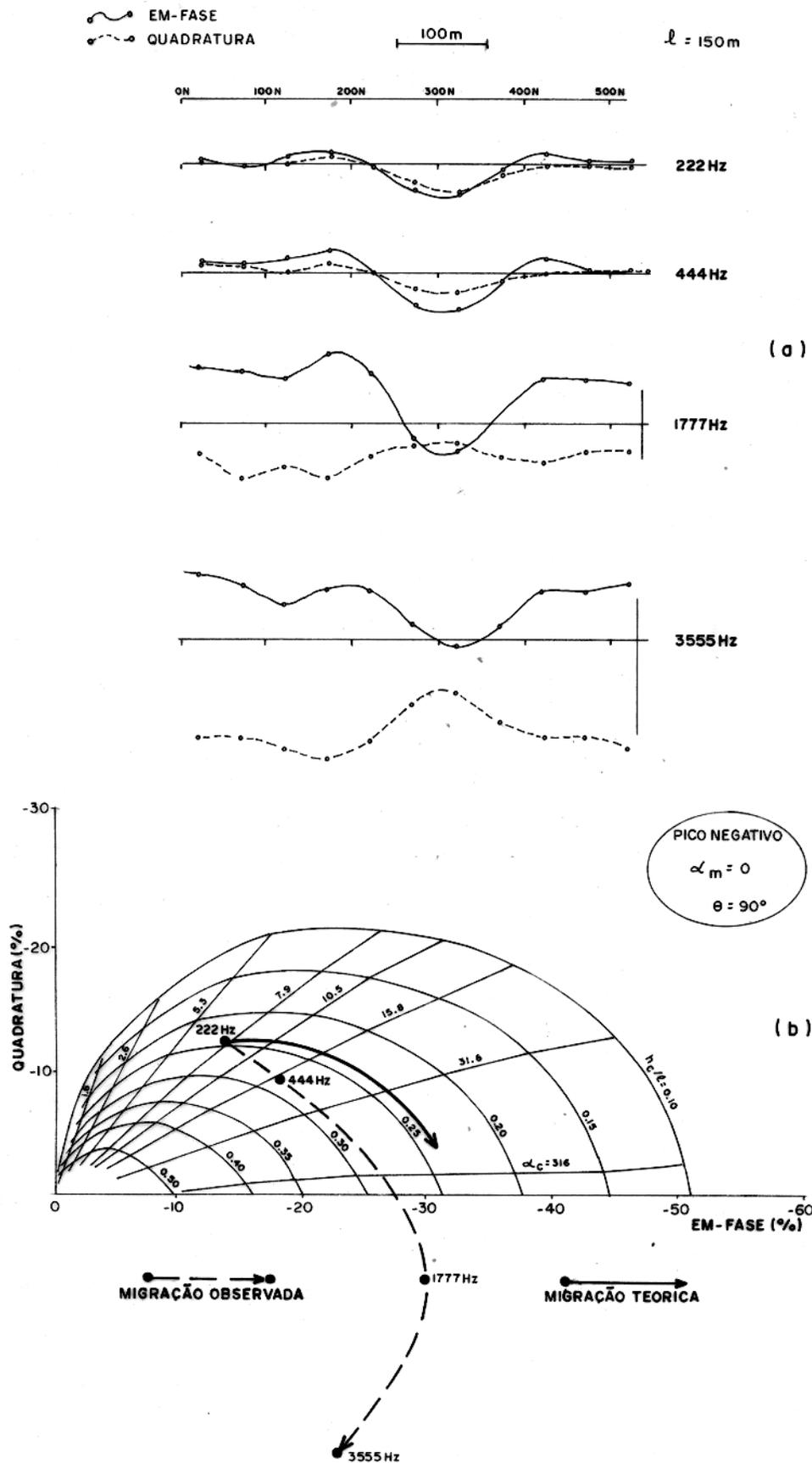


Fig.52 - (a) Perfis de campo sobre corpo de sulfetos capeado por manto de intemperismo (Abitibi Clay Belt, Canadá)  
(b) Migração observada e teórica dos valores do pico negativo.  
(Segundo Lajoie e West, 1977)

pico negativo desvia-se substancialmente daquela teórica, com portando-se como as migrações observadas nos diagramas aqui apresentados (notar valores obtidos para  $\alpha_m = 0$  e  $\alpha_m \neq 0$  nos diagramas para  $\theta = 90^\circ$  - figs. 23, 24 e 25) embora nestes tenham sido utilizados valores pico-a-pico. Como consequência dessa discrepância, verifica-se que cada um dos pontos plotados no diagrama fornecerão valores diferentes para as condutância e profundidade do corpo.

Recomenda-se para melhor compreensão dos efeitos do manto:

a) considerar o corpo em contato elétrico com o manto.

Cabe notar que, neste trabalho, foram realizados poucos testes nesse sentido. Para tanto, considerou-se um corpo de  $\alpha_c = 13,91$  e  $\theta = 30^\circ$  e um manto de  $\alpha_m = 1,00$ . Foram feitos perfis assumindo-se:

- .  $h_c/l = h_m/l = 0,20$  e contato elétrico entre corpo e manto, usando-se uma pasta de grafite.
- .  $h_c/l = h_m/l = 0,20$  e sem contato elétrico, situação esta obtida colocando-se folhas de papel entre os condutores.
- .  $h_c/l \cong 0,23$  e  $h_m/l = 0,2$ , sem contato elétrico.

Em todos os casos, os resultados obtidos foram praticamente os mesmos, principalmente para aqueles conduzidos com os condutores à mesma profundidade. Mas em face ao diminuto número de investigações realizadas, o teste não pôde ser considerado conclusivo.

b) considerar várias geometrias e parâmetros físicos do corpo.

c) considerar diferentes configurações de bobinas.

d) considerar a encaixante levemente condutiva.

Pode ser ainda altamente compensador o estudo do comportamento do pico extra da quadratura com respeito a altos valores de  $\alpha_c$  e  $\alpha_m$  e diferentes ângulos de mergulhos.

Finalmente, recomenda-se testes de campo para verificação dos resultados obtidos à luz dos diagramas apresentados e de

acordo com o procedimento de interpretação sugerido.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOSSCHART, R.A. - 1961 - On the occurrence of low resistivity geological conductors. *Geophysical Prospecting*, 9(2): 203-212.
- BOSSCHART, R.A. - 1967 - Ground electromagnetic methods. In: *Mining and Groundwater Geophysics*. Ottawa, Geological Survey of Canada. Economic Geology Report, 26: 67-80.
- CONEY, D.P. - 1977 - Model studies of the VLF-EM method of geophysical prospecting. *Geoexploration*, 15: 19-35.
- FRASER, D.C.; WARD, S.H. - 1967 - Analytical and model studies of a rotatable field electromagnetic prospecting system. *Geophysics*, 32(5): 899-917.
- FRISCHKNECHT, F.C. - 1971 - Electromagnetic scale modeling. In: *Electromagnetic Probing in Geophysics*. Boulder, Golem Press. p. 265-320.
- GRANT, F.S.; WEST, G.F. - 1965 - Interpretation Theory in Applied Geophysics. New York, Mc Graw-Hill Book Company. 584 p.
- GUPTA SARMA, D.; MARU, V.M. - 1971 - A study of some effects of a conducting host rock with a new modelling apparatus. *Geophysics*, 36(1): 166-183.
- 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.
- HEILAND, C.A. - 1968 - Geophysical Exploration. New York, Hafner Publishing. 1013 p.
- HOOD, Peter; WARD, S.H. - 1969 - Airborne geophysical methods. In: *Advances in Geophysics*. New York, Academic Press. p. 2-111.
- HURLEY, D.G. - 1977 - The effect of a conductive overburden on the transient electromagnetic response of a sphere. *Geoexploration*, 15: 77-85.
- JORDAN, Edward C.; BALMAIN, Keith G. - 1971 - Electromagnetic waves and radiating systems. New Delhi, Prentice-Hall of India

Private Ltd. 753 p.

- KELLER, George V.; FRISCHKNECHT, Frank C. - 1966 - Electrical Methods in geophysical prospecting. Oxford: Pergamon Press. 519 p.
- 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 EM anomalies in a conductive environment. Geophysics, 42(3): 655-660.
- LOWRIE, W.; WEST, G.F. - 1965 - The effect of a conducting overburden on electromagnetic prospecting measurements. Geophysics, 30(4): 624-632.
- NAIR, M. Ramachandran; BISWAS, S.K.; MAZUMDAR, K. - 1968 - Experimental studies on the electromagnetic response of tilted conducting half-planes to a horizontal-loop prospecting system. Geoexploration, 6: 187-206.
- NEGI, J.G. - 1967 - Electromagnetic screening due to a disseminated spherical zone over a conducting sphere. Geophysics, 32 (1): 69-87.
- NEGI, J.G.; RAVAL, U. - 1969 - Negative electromagnetic screening by a cylindrical conducting cover. Geophysics, 34(6): 944-957.
- DRELLANA, Ernesto - 1974 - Prospeccion Geoelectrica (por campos variables). Madrid, Paraninfo. v.2, 571 p.
- PALACKY, G.J. - 1975 - Interpretation of INPUT AEM measurements in areas of conductive overburden. Geophysics, 40(3): 490-502.
- PALACKY, G.J.; KADEKARU, Kiyoshi - 1978 - Efeito do intemperismo tropical nos levantamentos eletromagnéticos. In: Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia. Recife, Sociedade Brasileira de Geologia. v.5, p. 2323-2330.
- PALACKY, G.J.; SENA, F.O. - 1979 - Conductor identification in tropical terrains - Case histories from the Itapecuru greenstone belt, Bahia, Brazil. Geophysics, 44(12): 1941-1962.

- PARASNIS, D.S. - 1956 - The electrical resistivity of some sulfide and oxide minerals and their ores. Geophysical Prospecting, 4: 249-278.
- PARASNIS, D.S. - 1970 - An elegant, universal nomenclature for electromagnetic moving source-receiver dipole configurations. Geophysical Prospecting, 18(1): 88-102.
- PARASNIS, D.S. - 1971 - Analysis of some multi-frequency, multi-separation electromagnetic surveys. Geophysical Prospecting, 19(2): 163-179.
- PARASNIS, D.S. - 1972 - Principles of Applied Geophysics. London, Chapman and Hall. 214 p.
- PARASNIS, D.S. - 1975 - Mining geophysics. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company. 395 p.
- PATERSON, Norman R. - 1961 - Experimental and field data for the dual-frequency phase-shift method of airborne electromagnetic prospecting. Geophysics, 26(5): 601-617.
- PRESTON, Bruce - 1975 - Review - Difficulties for the electromagnetic method in Australia. Geoexploration, 13: 29-43.
- QUESTOR Surveys Ltd. - S.D. - The Questor method. Mississauga, Ontario. Case histories: Brouillan Discovery, Detour River Discovery, Lessard Deposit, Magusi River Discovery, New Insco Discovery, Rail Zone, Reed Lake Discovery, Thierry Deposit, Yava Zone. s.p.
- STRANGWAY, David W. - 1966 - Electromagnetic parameters of some sulfide ore bodies. In: Mining Geophysics. Society of Exploration geophysicists. v.1, p. 227-242.
- STRANGWAY, D.W.; VOZOFF, K. - 1967 - Mining exploration with natural electromagnetic fields. In: Mining and Groundwater Geophysics. Ottawa. Geological Survey of Canada. Economic Geology Report, 26: 109-122.
- TELFORD, W.M. - 1976 - Applied Geophysics. London, Cambridge University Press. 860 p.
- VERMA, O.P.; GAUR, V.K. - 1973 - Equipment for carrying out quantitative geoelectromagnetic model experiments. Pure and Applied

Geophysics, 110 (IX): 2085-2098.

VERMA, O.P.; GAUR, V.K. - 1975 - Transformation of electromagnetic anomalies brought about by a conducting host rock. Geophysics, 40(3): 473-489.

WAIT, J.R. - 1969 - Electromagnetic induction in a solid conducting sphere enclosed by a thin conducting spherical shell. Geophysics, 34(5): 753-759.

WARD, Stanley H. - 1967a - Electromagnetic theory for geophysical application. In: Mining Geophysics. Tulsa, S.E.G. v.II (A), p. 10-196.

WARD, Stanley H. - 1967b - The electromagnetic method. In: Mining Geophysics. Tulsa, S.E.G. v.II (C), p. 224-372.

WARD, Stanley H. - 1967c - Airborne electromagnetic methods. In: Mining and Groundwater Geophysics. Ottawa, Geological Survey of Canada. Economic Geology Report, 26: 81-108.

WARD, Stanley H. - 1971 - Foreword and introduction. Geophysics, 36(1): 1-8.