

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

MODELAMENTO ELETROMAGNÉTICO ANALÓGICO DE CORPOS TABULARES
EM CONTATO E SEM CONTATO COM O MANTO

Tese Apresentada por

RAIMUNDO LUNA NERES

como requisito parcial à obtenção do grau em

MESTRE EM CIÊNCIAS

Na área de

GEOFÍSICA

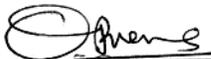
Conferido pelo Curso de Pós-Graduação em

Geociências da

Universidade Federal do Pará

Aprovado: 18.09.89

Comitê de Tese


OM PRAKASH VERMA (ORIENTADOR)


LUIZ RIJS


EDSON EMANOEL S. SAMPAIO

A minha esposa Dorivan
A Paulo Ricardo e Marcelo Davis meus filhos
e a meus pais Emanoel e Carmelinda

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Om Prakash Verma (CG/UFPa) pela orientação durante o trabalho de Tese.

Ao Dr. Luis Rijo (CG/UFPa) co-orientador deste trabalho, pelas recomendações sugeridas.

Ao Dr. Edson Emanuel S. Sampaio (PPPG/UFBa) pelas suas sugestões.

A Universidade Federal do Maranhão, em especial o Departamento de Matemática, pela liberação e apoio a mim concedidos.

Aos professores e funcionários do DEMAT/UFMA pelos incentivos recebidos.

Ao CG/UFPa pelas condições físicas e técnicas colocadas à disposição deste trabalho.

Ao programa de Capacitação Docente (PICD), pela bolsa recebida.

Ao projeto de Instrumentação e Modelamento E.M., e GTZ pela compra de materiais, necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

A Almir pela valiosa colaboração nos serviços de eletrônica.

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

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA	Pág.
1 Diagrama de blocos dos sistemas de energização, recepção e registrador gráfico.....	20
2 Diagrama esquemático mostrando o modelo, a camada de manto e a configuração das bobinas.....	26
3 Situações modeladas de manto-indutivo e condutivo..	28
4 Perfil típico de um semi-plano inclinado.....	30
5 Perfis com a variação de θ , na ausência de manto...	31
6 Aparecimento de pico-extra na quadratura para corpos inclinados (corpo revestido por película).....	31
7 Diminuição da Em-fase e aparecimento de pico-extra com o aumento de α_m	32
8 Aumento de pico-extra e reversão na quadratura para altos valores de α_c	33
9 Aparecimento de pico-extra na quadratura para corpos inclinados.....	35
10 Aparecimento de pico-extra na quadratura com o aumento de σ_s	35
11 Presença de pico-extra na quadratura com o aumento de α_c , $\theta = 45^\circ$	36
12 Aparecimento de pico-extra na quadratura com o aumento de α_c e $\theta = 30^\circ$	36
13 Reversão na quadratura para altos valores de σ_s	37
14 Melhoria de reversão na quadratura com o aumento de contato entre corpo e manto.....	37
15 Mudança do perfil em função da presença de manto indutivo e condutivo em relação à ausência de manto	38

16	Definição de picos a) ausência de manto $\sigma_3 = 0$. Enquanto na presença de manto na quadratura, b) pico-extra e c) reversão.....	41
17	Variação dos picos: extra, a-favor e -contra com o aumento de σ_3 em função de θ e α_c respectivamente..	42
18	Idem-17.....	42
19	Variação da amplitude normalizada A_m com σ_3 , em função de α_c para $\theta = 90^\circ$	45
20	Variação da amplitude normalizada A_m com σ_3 , em função de α_c ; para $\theta = 60^\circ$ e 45°	46
21	Variação da amplitude normalizada A_m com σ_3 , em função de α_c ; para $\theta = 60^\circ$ e 45°	47
22	Variação de Módulo de anomalia normalizada A_m com σ_3 em função de α_c ; para $\theta = 90^\circ$, 60° e 45°	48
23	Variação dos picos: extra e -contra com o aumento de σ_3 em função de θ e α_c respectivamente.....	49
24	Idem-23.....	49
25	Variação dos picos: extra, a-favor e -contra com o aumento de σ_3 em função da profundidade h_c/L	50
26	Variação da amplitude normalizada A_m com σ_3 , em função de α_c e h_c/L para $\theta = 90^\circ$ e $\theta = 60^\circ$	52
27	Variação da amplitude normalizada A_m com σ_3 em função de α_c , h_c/L para $\theta = 45^\circ$ e $\theta = 30^\circ$	53
28	Variação da amplitude normalizada A_m com σ_3 em função de α_c e h_c/L para $\theta = 60^\circ$ e $\theta = 45^\circ$	54
29	Variação da amplitude normalizada A_m com σ_3 em função de α_c e h_c/L para $\theta = 30^\circ$	55

FIGURA

Pág.

30	Variação do módulo da anomalia normalizada A_n^* com G_s , em função de α_c e h_c/L para $\theta = 90^\circ$, $\theta = 60^\circ$, $\theta = 45^\circ$ e $\theta = 30^\circ$	56
31	Variação do módulo de anomalia normalizada A_n^* com G_s em função de α_c e h_c/L para $\theta = 60^\circ$, $\theta = 45^\circ$ e $\theta = 30^\circ$	57
32	Determinação da interação do manto-indutivo para várias inclinações do corpo.....	62
33	Determinação da interação do manto para várias inclinações do corpo.....	63
34	Diagramas de Argand construído com valores pico-a-pico, $\alpha_m = 0.5$	64

TABELA

1	Parâmetros de resposta do corpo modelado.....	18
2	Parâmetros de resposta do manto modelado.....	18

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

RESUMO.....	01
ABSTRACT.....	03
1. INTRODUÇÃO	05
2. FUNDAMENTOS DOS MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS	07
2.1 Introdução.....	07
2.2 O campo Eletromagnético.....	08
2.3 Modelamento Analógico.....	10
2.3.1 Teoria de similitude EM.. ..	10
2.4 Problemas na Interpretação de Dados EM.....	12
2.4.1 Efeitos do halo condutivo.....	12
2.4.2 Efeitos de rocha encaixante condutiva.....	13
2.4.3 Efeitos do manto de intemperismo.....	13
2.4.3.1 No domínio do tempo.....	13
2.4.3.2 No domínio da frequência.....	14
3. MODELAMENTO ANALÓGICO: EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	16
3.1 Introdução.....	16
3.2 Manto.....	17
3.3 Corpo.....	17
3.4 Descrição do Conjunto Experimental.....	19
3.4.1 Sistema de energização.....	19
3.4.2 Sistema de recepção.....	19
3.4.3 Sistema de disposição do modelo.....	22
3.5 Mecanismo de Medidas.....	23
3.5.1 Calibração dos instrumentos.....	23

3.6	Procedimento de Medidas.....	24
3.7	Ocorrência de Erros.....	25
4.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	27
4.1	Efeitos de Manto-Indutivo.....	29
4.2	Efeitos de Manto-Condutoivo.....	34
4.3	Estudo Comparativo dos Efeitos de Manto-Indutivo e de Manto-Condutoivo.....	34
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	40
5.1	Manto-Indutivo.....	40
5.1.1	Anomalias da componente quadratura.....	40
5.1.2	Anomalias da componente em-fase.....	40
5.1.3	Amplitude normalizada A_n	43
5.2	Manto-Condutoivo.....	44
5.2.1	Anomalias da componente quadratura.....	44
5.2.2	Anomalias da componente em-fase.....	44
5.2.3	Amplitude normalizada A_n	51
5.2.4	Módulo de amplitude normalizada A_n	51
6.	Modificações de anomalias EM	58
6.1	Causas de Transformações de Anomalias EM.....	58
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	60
7.1	Efeitos Observados.....	60
7.1.1	Manto-indutivo.....	60
7.1.2	Manto-condutivo.....	60
7.2	Recomendações.....	61
8.	BIBLIOGRAFIA.....	65

RESUMO

Nas últimas três décadas os métodos eletromagnéticos vem se desenvolvendo satisfatoriamente em função da aplicabilidade na prospecção de corpos de sulfetos maciços.

Em regiões de climas tropicais, normalmente o manto de intemperismo apresenta-se condutivo. E este, na maioria das vezes, não é levado em conta na prospecção eletromagnética, causando portanto erros consideráveis de interpretações. Neste trabalho consideramos o manto de intemperismo em contato e sem-contato com o corpo condutor.

Com o objetivo de estudar os efeitos dos mantos sobre anomalias EM de corpos tabulares inclinados, foram feitos vários experimentos utilizando modelamento analógico em escala reduzida, admitindo-se diferentes parâmetros de resposta para o corpo e o manto.

Para simular o corpo foram utilizadas placas de aço inoxidável com as dimensões suficientemente grande em relação ao espaçamento entre as bobinas, de tal modo que simulassem um semi-plano.

Para simular o manto foi utilizado uma solução de sais, sendo que para o caso de manto-condutivo, o corpo foi colocado em contato galvânico com a solução. Para o manto-indutivo foi considerado sem-contato galvânico, de tal forma que o corpo e o manto fossem acoplados apenas indutivamente. Onde 1) o corpo foi colocado totalmente sem contato com o manto 2) o corpo foi revestido por uma película resistiva e colocado em contato com o manto.

Com a presença de manto-indutivo, observamos que a amplitude dos perfis é levemente atenuada. Além disso, Ob-

servamos na quadratura a reversão e o aparecimento de um pico-extra nas inclinações do corpo $\theta \leq 60^\circ$ e nos valores de número de indução $\alpha_c \geq 78.16$ e $\alpha_m \geq 0.5$ respectivamente do corpo e do manto. E a rotação de fase se dava no sentido horário, sendo mais intensa para altos valores de número de indução do corpo.

No manto-indutivo o corpo parece estar a uma profundidade maior que a verdadeira, e ser mais condutivo do que realmente é.

Com manto-condutivo, observamos que as amplitudes dos perfis são ligeiramente acrescidos assim como, a rotação de fase se dava no sentido anti-horário sendo mais intensa para pequenos valores de número de indução do corpo. Os demais efeitos tais como reversão na quadratura e presença de pico-extra ocorrem de modo análogo ao ocorrido no caso de manto-indutivo.

No manto-condutivo, o corpo parece estar a uma profundidade inferior à verdadeira e ser menos condutivo.

As anomalias EM são ligeiramente modificadas em função da rotação de fase e atenuação de amplitudes que ocorrem nos campos primário e secundário quando atravessam o manto, e também em consequência da interação indutiva de corrente induzida entre corpo e manto.

Além disso ocorre a redistribuição de corrente no manto devido à presença de corpo dentro do manto.

No manto-condutivo as correntes são canalizadas dentro do corpo que está em contato galvânico com o manto, enquanto no manto-indutivo ocorre um desvio de corrente, devido à película resistiva que envolve o corpo.

ABSTRACT

In the last three decades, electromagnetic methods are continuing to develop due to their proven usefulness in the search for massive sulfides.

In tropical regions, the overburden is usually conducting. However the effect of this conducting layer is seldom taken into account while interpreting the EM data. This can cause considerable interpretation errors. In this work, we considered the overburden in-contact and not in-contact with the underlying conductor. Reduced scale model experiments were carried out to study the effects of the overburden on the EM anomalies of inclined tabular like bodies.

With this objective, response parameters of the conductor and the overburden were varied. The target-conductor is represented in the model experiments by stainless steel sheets. These sheets are, large compared the coil separation in order to simulate the behavior of a half-plane.

The overburden is simulated by a conducting solution. To represent the case of a conductive-overburden the model is placed in galvanic contact with the solution. In case of the inductive-overburden the model is coupled to the overburden only inductively and did not have a galvanic contact. This situation is attained by keeping the model 1) totally out of the solution, and 2) partially in the solution but the model is covered by a resistive film to avoid the galvanic contact with the solution.

In the presence of inductive-overburden, the anomalies are slightly attenuated. In the quadrature component the profile is inverted and an extra-peak appears in the case of low

dipping models at higher induction numbers of the overburden and the model. Also the anomaly suffers a clockwise rotation which is intense for higher induction number of the conductor. Therefore, in the presence of an inductive-overburden the conductor appears to be more conducting and at higher depth than it really is.

In the presence of a conductive-overburden, the anomaly amplitude are slightly enhanced and suffer an anticlockwise phase rotation, which is more intense at the lower induction number of the conductor. However, the other effects in the quadrature component, like the inversion and an appearance of the extra-peak, are similar to that of the inductive-overburden. Due to these effects of the conductive-overburden, the conductor appears to be at a shallower depth and less conducting than it actually is.

These modifications in anomalies are caused by: a) The primary and secondary EM fields suffering attenuation and phase rotation when passing through a conducting overburden, b) an inductive interaction between the induced currents in the conductor and the overburden, and also, c) a redistribution of the currents in the overburden when the conductor is placed in it. In case of a conductive-overburden, currents are channeled in the conductor which is in galvanic contact with the less conducting overburden. On the other hand when a conductor covered with a resistive film is placed in the conducting solution, the currents are displaced and they crowd in the solution next to the boundary of the resistive film.

1. INTRODUÇÃO

Técnicas de prospecção eletromagnética EM foram inicialmente desenvolvidas em países de climas frios, tais como: Canadá, Suécia e URSS. E, nas últimas três décadas a aplicação dessas técnicas tem se desenvolvido enormemente, graças à sua comprovada eficácia na procura de depósitos de sulfetos maciços.

Nas regiões tropicais e subtropicais, principalmente na Amazônia, há manto de intemperismo parcialmente condutivo afetando consideravelmente os dados EM. Portanto os efeitos do manto de intemperismo não podem ser desprezados, haja vista o manto ser encontrado comumente em contato com o corpo, causando erros nos cálculos dos parâmetros do corpo. Por mais de 20 anos através dos modelos analíticos, numéricos e analógicos estudos tem sido feitos para examinar o papel de uma camada de manto em prospecção indutiva EM (D'yakonov, 1959a, 1959b; Negi, 1967; Wait, 1969.)

Lowrie e West (1965), usando o sistema de bobinas HLEM observaram atenuações na amplitude das anomalias e também rotação de fase no sentido horário para corpos verticais na presença de manto. Além disso esses efeitos eram proporcionais à condutância do manto sem contato com o corpo.

Negi (1967), usando soluções analíticas obteve maior resposta EM do condutor na presença de manto moderadamente condutivo, em contato galvânico com o condutor.

Silva (1981), através de modelamento analógico utilizando HLEM e várias inclinações para o corpo, com manto de intemperismo sem contato, obteve resultados semelhantes aos de Lowrie e West (1965), além disso observou um pico extra na com-

ponente em quadratura para pequenos mergulhos do corpo.

Joshi et al. (1984) simularam analogicamente diferentes situações geológicas de ocorrência de manto, isto é: manto em contato; sem contato; e com variações de condutividade lateral. Eles estudaram os corpos verticais e observaram efeitos similares aos autores citados anteriormente para manto sem contato. Entretanto para manto em contato os efeitos observados foram contrários aos efeitos do manto sem contato.

Parasnis (1971) e Preston (1975) mostraram que as interpretações de dados de levantamentos EM empregando diagramas de interpretações convencionais isto é: baseado no modelo de "condutor em espaço livre" conduziu a resultados errôneos, embora assim inferiores aos parâmetros físicos reais.

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

O objetivo deste trabalho é avaliar as modificações EM de corpos tabulares inclinados devido a uma camada de manto de intemperismo. 1) Em contato galvânico. 2) Sem contato galvânico com o manto. Espera-se, através de experimentos usando modelo reduzido, que os resultados nos levem a um melhor entendimento físico do acoplamento indutivo e condutivo entre o corpo e o manto. Este estudo será feito utilizando-se o sistema de bobinas dispostas na configuração HLEM.

2. FUNDAMENTOS DOS MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

2.1 Introdução

Os métodos EM envolvem a propagação de campos eletromagnéticos de baixa frequência produzidos em sua maioria por fontes portáteis, embora em alguns casos, as fontes sejam fixas como no VLF e TURAM.

Geralmente os métodos eletromagnéticos aparecem como métodos indutivos, quando o campo primário é gerado através de bobina transmissora. Quando o campo é gerado através de correntes nos eletrodos com contato galvânico no terreno, são chamados métodos condutivos EM, estes tem sido pouco utilizados na prática.

Uma particular vantagem dos métodos indutivos é que permite o uso de sistemas EM em aviões, geralmente em combinação com equipamentos aeromagnéticos, e tem sido largamente aplicados em trabalhos de reconhecimento para exploração mineral.

Os métodos de prospecção EM também podem ser empregados com sucesso em regiões onde o solo é altamente resistivo, caso específico das regiões áridas, das regiões polares e subpolares.

Em regiões onde o solo apresenta uma certa condutividade, os métodos indutivos EM não tem um bom desempenho, isto por que as correntes induzidas nestes solos condutivos podem mascarar e modificar as respostas EM de corpos condutores mais profundos.

A interpretação dos dados EM é comumente baseada nos resultados obtidos a partir de estudos de modelamento analógico (reduzido) ou numérico.

2.2 O Campo Eletromagnético

Os campos elétrico e magnético no domínio da frequência que ocorrem na natureza podem ser relacionados com suas fontes através das seguintes equações de Maxwell:

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

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

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

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

onde \vec{E} e \vec{H} são os vetores campo elétrico e magnético, \vec{B} e \vec{D} são as densidades de fluxo magnético e elétrico, σ a condutividade elétrica do meio e ρ densidade de carga volumétrica. Além disso temos as seguintes relações empíricas:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$\vec{J} = \sigma \vec{E}$ (Lei de Ohm), onde \vec{J} é a densidade de corrente, ϵ e μ a permeabilidade dielétrica e magnética respectivamente.

Assim as equações de Maxwell, levando em conta a lei de conservação de carga e considerando que não existe carga livre; tomam a forma:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (8)$$

Aplicando o rotacional em (5) e usando a identidade vetorial:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$$

teremos:

$$\nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H})$$

usando a equação (6) e, observando que:

$$\nabla (\nabla \cdot \vec{E}) = 0 \quad \text{na ausência de fonte.}$$

temos:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

Similarmente obtemos:

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (10)$$

Chamadas equações de onda eletromagnética.

Desta forma para pontos no meio onde as propriedades elétrica e magnética não variam espacialmente, teremos obtido equações envolvendo somente os campos elétrico ou magnético.

Considerando que os campos elétrico \vec{E} e magnético \vec{H} variam com o tempo, de forma que:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\omega t}$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 e^{i\omega t}$$

onde ω é a frequência angular (rad/s) = $2\pi f$, e f a frequência em Hz. Assim podemos expressar (9) e (10) na forma:

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

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

Analisando as equações (11) e (12) com respeito às suas magnitudes, observamos que dentre os coeficientes que aparecem do lado direito, estão as propriedades físicas.

Com exceção da água ($\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \approx 80$), raramente as capacidades dielétricas variam mais do que uma ordem de magnitude, o valor mais apropriado para as rochas e minerais é de $\epsilon = 9\epsilon_0 = 8 \times 10^{-11}$ farad/m. Mesmo entre os minerais ferromagnéticos a permeabilidade permanece menor que 3, e na maioria dos casos se aproxima de 1. Desta forma, podemos tomar $\mu \approx \mu_0 \approx 1.3 \times 10^{-6}$ henry/m. Com respeito à condutividade, podemos tomar praticamente igual a zero, no ar, e ainda condutividade elevada no caso de metais $\sigma \approx 10^7$ S/m.

Considerando o ambiente como altamente resistivo, isto é, $\sigma \approx 0$ e $\epsilon \approx \epsilon_0$, $\mu \approx \mu_0$, teremos de (11) e (12) que:

$$\nabla^2 \frac{\vec{E}}{H} = 0$$

Nestas condições o receptor fica dentro da zona estática do transmissor. Por outro lado se considerarmos o ambiente pouco condutivo onde $\epsilon = 9\epsilon_0$, $\mu = \mu_0$, $\sigma = 10^{-3}$ S/m e $\omega = 2\pi f$, $f = 10$ Hz teremos:

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

desta forma podemos concluir que em zonas resistivas, os campos obedecem a equação:

$$\nabla^2 \vec{E} = 0$$

enquanto, em zonas condutivas satisfazem a equação de difusão:

$$\nabla^2 \vec{E} = i\mu\sigma\omega \left(\frac{\vec{E}}{\omega} \right) \quad (13)$$

2.3 Modelamento Analógico

Modelos analógicos EM vem sendo utilizados nas interpretações EM, há mais de três décadas, (Sinclair, 1948); dada a complexidade em alguns casos das soluções analíticas.

As experiências utilizando modelamento analógico podem ser feitas por meio dos circuitos elétricos, ou através do princípio de similitude, o último afirma que os sistemas de campo e laboratório em diferentes escalas são eletromagneticamente equivalentes se ambos satisfazem as mesmas equações físicas. Esta teoria tem sido apresentada por vários autores. (Sinclair, 1948; Grant e West, 1965 e outros).

2.3.1 Teoria de similitude EM

As condições de modelar um dado sistema eletromagnético surgem da linearidade das equações diferenciais de Maxwell. Estas descrevem o campo EM em qualquer meio com exceção de meios não lineares tais como meios ferromagnéticos e/ou ionizados na presença de campos magnéticos. Assim os meios considerados deverão ser lineares e podem variar ponto a ponto no espaço mas, eles devem ser independentes de tempo.

Seja $P(x_c, y_c, z_c)$ um ponto qualquer do sistema utilizado no campo e $P(x_l, y_l, z_l)$ um ponto do sistema modelo em laboratório, tal que os sistemas estejam relacionados pela transformação:

$x = Lx_l$, $y = Ly_l$ e $z = Lz_l$, onde L é o fator linear de escala. A unidade de comprimento a ser usada deverá ser a mesma. \vec{E} , \vec{H} e t , também deverão estar relacionados em ambos os sistemas, ou seja:

$$\vec{E}_c(x_c, y_c, z_c, t_c) = a \vec{E}_l(x_l, y_l, z_l, t_l)$$

$$\vec{H}_c(x_c, y_c, z_c, t_c) = b \vec{H}_l(x_l, y_l, z_l, t_l) \text{ e}$$

$$k = (w_c / w_l) = (f_c / f_l) = (t_l / t_c) \text{ onde:}$$

a e b são fatores de escala para as intensidades dos campos elétricos e magnéticos e k para a frequência respectivamente.

Partindo da equação de difusão (13), e adaptando-a para os casos de campo e laboratório respectivamente teremos:

$$\nabla_c^2 \left(\frac{\vec{E}_c}{\vec{H}_c} \right) = i \mu_c \sigma_c \omega_c \left(\frac{\vec{E}_c}{\vec{H}_c} \right) \quad (14)$$

de modo análogo, segue-se:

$$\nabla_l^2 \left(\frac{\vec{E}_l}{\vec{H}_l} \right) = i \mu_l \sigma_l \omega_l \left(\frac{\vec{E}_l}{\vec{H}_l} \right) \quad (15)$$

por outro lado, temos:

$$\nabla_c^2 = \frac{1}{L^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x_c^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_c^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_c^2} \right) \quad (16)$$

assim.

$$\nabla_c^2 = \frac{1}{L^2} \nabla_l^2 \quad (17)$$

substituindo (17) em (14) e levando em conta $\vec{E}_c = a \vec{E}_l$ e $\vec{H}_c = b \vec{H}_l$

teremos:

$$\frac{1}{L^2} \nabla_l^2 \left(\frac{a \vec{E}_l}{b \vec{H}_l} \right) = i \mu_c \sigma_c \omega_c \left(\frac{a \vec{E}_l}{b \vec{H}_l} \right)$$

comparando com (15) obteremos:

$$\mu_l \sigma_l \omega_l = L^2 \mu_c \sigma_c \omega_c \quad (18)$$

O primeiro e segundo membro da equação (18) são chamados respectivamente, como número de indução (ou parâmetro de resposta) do sistema real, e número de indução (ou parâmetro

de resposta) do sistema modelo.

Na maioria das vezes é possível um sistema real ser modelado em laboratório, bastando para isso conseguir a igualdade entre os números de indução.

2.4 Problemas na Interpretação de Dados EM

Na prática, a interpretação de anomalias eletromagnéticas é feita por meio de comparação entre respostas calculadas ou medidas no laboratório, para condutores de vários tipos, formas e condutividades.

Geralmente os modelos utilizados para a interpretação dos dados EM são corpos de formas simples e regulares, tais como esfera, disco, cilindro e semi-plano.

Nas interpretações frequentemente são ignorados os efeitos da presença de rocha encaixante, manto de intemperismo e do halo. Os estudos descritos a seguir mostram as mudanças nas anomalias de corpo devido à presença destes. Estes não podem ser desprezados por causarem erros nas interpretações dos dados de campo quando comparados aos resultados reais.

2.4.1 Efeitos do halo condutivo

Poddar (1975) ; Caballero (1983) ; Negi (1967) ; Wait (1969) e outros, estudaram as mudanças nas respostas eletromagnéticas, devido à presença de halo condutivo, e mostraram que normalmente as curvas de resposta na frequência ou no tempo apresentam dois picos, de maneira que ao halo está associado um pico em altas frequências, e ao corpo central um pico em baixa frequência. Mostraram também que à medida que aumenta o número de indução do halo quando comparado ao do corpo, os picos tendem a desaparecer tornando as curvas suaves, a tal ponto de

mascarar a resposta proveniente da combinação do corpo e do halo. Por outro lado, a componente em-fase é menos sensível do que a componente em quadratura.

2.4.2 Efeitos de rocha encaixante condutiva

Gaur (1959); Gupta Sarma e Maru (1971); Verma (1972) e outros estudaram os efeitos da presença de rocha encaixante condutiva sobre a resposta EM de corpos condutivos. Mostraram que, quando as rochas encaixantes são parcialmente condutivas, haverá um aumento na amplitude da anomalia e uma rotação de fase no sentido anti-horário, e para o caso de rochas encaixantes com altos valores de condutividades, existe uma diminuição na amplitude, e o corpo parecerá mais profundo.

Particularmente para corpos inclinados, os perfis são assimétricos quando estamos na presença de rocha encaixante altamente resistiva. Entretanto, na presença de rocha encaixante condutiva as anomalias tendem a se tornarem simétricas, perdendo a indicação de inclinação do corpo, Verma e Gaur (1975).

Tendo em vista o exposto acima, quando desejarmos estimar a profundidade, condutância e inclinação do corpo, devemos levar em conta a presença de rocha encaixante.

2.4.3 Efeitos do manto de intemperismo

2.4.3.1 No domínio do tempo

Palacky (1975), usando o sistema INPUT, estudou os efeitos de manto de intemperismo uniforme e sem contato elétrico com o corpo, mostrou que o efeito do manto é mais acentuado nos primeiros canais, e também que o sistema de bobinas horizontais é mais sensível aos efeitos do manto do que outros sistemas de bobinas. Além disso os níveis de base nos canais são

levantados e a forma da anomalia é distorcida. Para corpos inclinados, ele observou que ocorrem mudanças drásticas na forma dos perfis nos tempos iniciais, principalmente no primeiro canal.

Lamontagne (1975) observou que quando o contato elétrico entre manto condutivo e corpo condutor é bom, pode haver uma transferência de corrente do manto para o corpo. Produzindo assim efeitos semelhantes aos produzidos pela rocha encaixante condutiva. Mostrou também que a amplitude da anomalia neste caso é essencialmente crescente nos tempos iniciais, quando comparada à de mesmo modelo sem-contato.

2.4.3.2 No domínio do tempo

Lowrie e West (1965); Lajoie (1973), estudaram os efeitos de manto de intemperismo sem-contato elétrico com condutores verticais. Observaram que a fase sofre uma rotação no sentido horário, e quanto maior fosse o número de indução do corpo maior seria essa rotação. Além disso, a atenuação apresentada na amplitude era resultado da absorção dos campos EM passando através da camada de manto.

Silva e Verma (1986), utilizaram o sistema HLEM e corpos tipos semi-planos verticais e inclinados sem-contato com o manto. Observaram, para corpos verticais os mesmos efeitos descritos por Lowrie e West (1965). Entretanto, para corpos inclinados, também observaram uma reversão na componente em quadratura para altos valores de parâmetros de resposta do corpo e do manto. Além disso observaram a presença de um pico-extra na componente em quadratura para pequenos mergulhos do corpo. Este pico-extra ocorre do mesmo lado da inclinação do corpo, devido à maior interação entre corpo e manto.

Joshi et al. (1984), estudaram os efeitos de manto com contato galvânico com corpos tipo semi-plano vertical no sistema HLEM. Eles observaram que a rotação de fase se dava no sentido anti-horário. Além disso as anomalias em-fase e quadratura tinham um ligeiro aumento de amplitude, sendo mais considerável na componente em quadratura. Por outro lado, verificaram também que a rotação era maior para condutores ruins do que para bons condutores.

Neste trabalho nos propusemos a estudar os efeitos de manto sem-contato e com-contato com corpos semi-planos inclinados. Para tal escolhemos os parâmetros de corpo e de manto mais próximos de situações geológicas reais.

No capítulo 4 os resultados são apresentados e discutidos, enquanto no capítulo 5, estes são analisados.

3. MODELAMENTO ANALÓGICO : EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

3.1 Introdução

Devido à variedade de formas como os corpos condutivos mineralizados se apresentam na natureza, torna-se quase impossível uma análise de todos eles. Entretanto, em sua grande maioria estes se apresentam com uma de suas dimensões, a espessura, bastante pequena quando comparada às demais. Em função disso estes corpos podem ser simulados por modelos do tipo semi-plano. De igual forma o manto de intemperismo também pode ser simulado.

Em sua grande maioria os corpos condutivos mineralizados (sulfetos), são representados em laboratórios em escala reduzida conforme lei de similitude, por materiais de alta condutividade tais como: aço inoxidável, grafite e alumínio. Neste trabalho foi utilizado escala de 1:500.

De modo semelhante, o manto também pode ser representado por materiais de alta condutividade conforme lei de similitude.

Levando em conta os parâmetros de resposta do corpo- α_c e do manto- α_m , que se aproximam de situações geológicas reais, Silva (1981):

$$\alpha_c = 1.60 \text{ a } 32.27$$

e

$$\alpha_m = 0, 0.25, 0.5 \text{ e } 1.0$$

Na tentativa de nos aproximarmos desses valores reais em laboratório usamos uma frequência de 100 k Hz. Nós utilizamos placas de aço inoxidável para representar os corpos condutivos e uma solução de sais para representar o manto.

3.2 Manto

Para simular a camada de manto foi utilizado uma solução comum de sal de cozinha, ácido clorídrico e cloreto de amônio. A espessura desta camada foi de $t_s = 0.04\text{m}$ e 0.10m e de condutividade $G_s = 21 \text{ S/m}$, 42 S/m e 59 S/m .

A condutância da camada, ou seja o produto espessura-condutividade Gt é de suma importância em estudos de prospecção indutiva. Quando a condutividade e a espessura da camada do manto são uniformes sobre áreas suficientemente grandes consideramos o manto uniforme e homogêneo, no entanto se não é constante consideramos como lateralmente não homogêneo.

3.3 Corpo

Para simular o corpo condutor foram utilizadas placas de aço inoxidável com as seguintes dimensões: $0.9\text{m} \times 0.52\text{m}$, $0.5\text{m} \times 0.4\text{m}$ e $0.94\text{m} \times 0.55\text{m}$ respectivamente, e de condutividade de $G_c = 1.38 \times 10^6 \text{ S/m}$ e espessura $t_c = (0.28, 0.48, 0.81) \times 10^{-3} \text{ m}$ respectivamente.

Nas tabelas 1 e 2 são feitas apresentações dos valores dos parâmetros de resposta do corpo e do manto que foram utilizados.

Tabela.1: Parâmetro de Resposta do Corpo

Número de indução do corpo - $\alpha_c = \mu_c w_c t_c L \sigma_c$

Separação entre bobinas $L = 0.15\text{m}$

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

Frequência angular $w = 2\pi \times 10^5 \text{ rad/s}$

Condutividade elétrica $\sigma_c = 1.38 \times 10^6 \text{ S/m}$ (aço inoxidável)

Condutores	Espessura (10^{-3} m)	Condutância (σt)	Número de indução (α_c)
C ₁	0.28	386.4	$\alpha_{c_1} = 45.60$
C ₂	0.48	662.4	$\alpha_{c_2} = 78.16$
C ₃	0.81	1117.8	$\alpha_{c_3} = 131.9$

Tabela.2: Parâmetro de Resposta do Manto

Número de indução do manto - $\alpha_m = \mu_m w_m t_m L \sigma_m$

Condutividade da solução - σ_s

Espessura da camada de solução do manto - t_s

Condutividade σ_s (S/m)	Número de indução $\alpha_m, t_s = 0.04\text{m}$	Número de indução $\alpha_m, t_s = 0.10\text{m}$
21	0.1	0.25
42	0.2	0.50
59	0.28	0.70

3.4 Descrição do Conjunto Experimental

O conjunto experimental consiste: dos sistemas de energização, de disposição do modelo e de recepção, bem como do registrador gráfico, figura 1.

3.4.1 Sistema de energização

O sistema de energização é composto de um oscilador senoidal e uma bobina transmissora.

Foi utilizado o oscilador da General Radio (USA), modelo GR-1316 com faixa de frequência variando entre 10Hz e 100 k Hz. A potência máxima desse oscilador é de 1.6 W, com distorções de saída do sinal inferiores a 1.0 %. Ele também fornece duas voltagens ($1.25 + 0.25 V_{rms}$) de referência, uma em fase e outra em quadratura com o sinal de saída, que são conectadas ao analisador de fase.

A bobina transmissora (T) foi construída com material acrílico, sendo que a espessura da parte interna foi de 7×10^{-3} m e de diâmetro 2×10^{-2} m. Esta possui núcleo de ferrite cilíndrico e foi enrolada com fio esmaltado, e de bitola 28 A.W. .G., e 51 espiras. A mesma está blindada por uma malha de fios esmaltados, isto é, por uma gaiola de Farady para eliminar o efeito eletrostático.

3.4.2 Sistema de recepção

O sistema de recepção é composto de uma bobina receptora (R), de um pré-amplificador de sinal, de um detetor de fase e de um registrador gráfico.

A bobina receptora é semelhante à bobina transmissora possui também núcleo de ferrite, foi enrolada com fio esmaltado e de bitola 40 A.W.G. e contém 472 espiras. De igual forma que

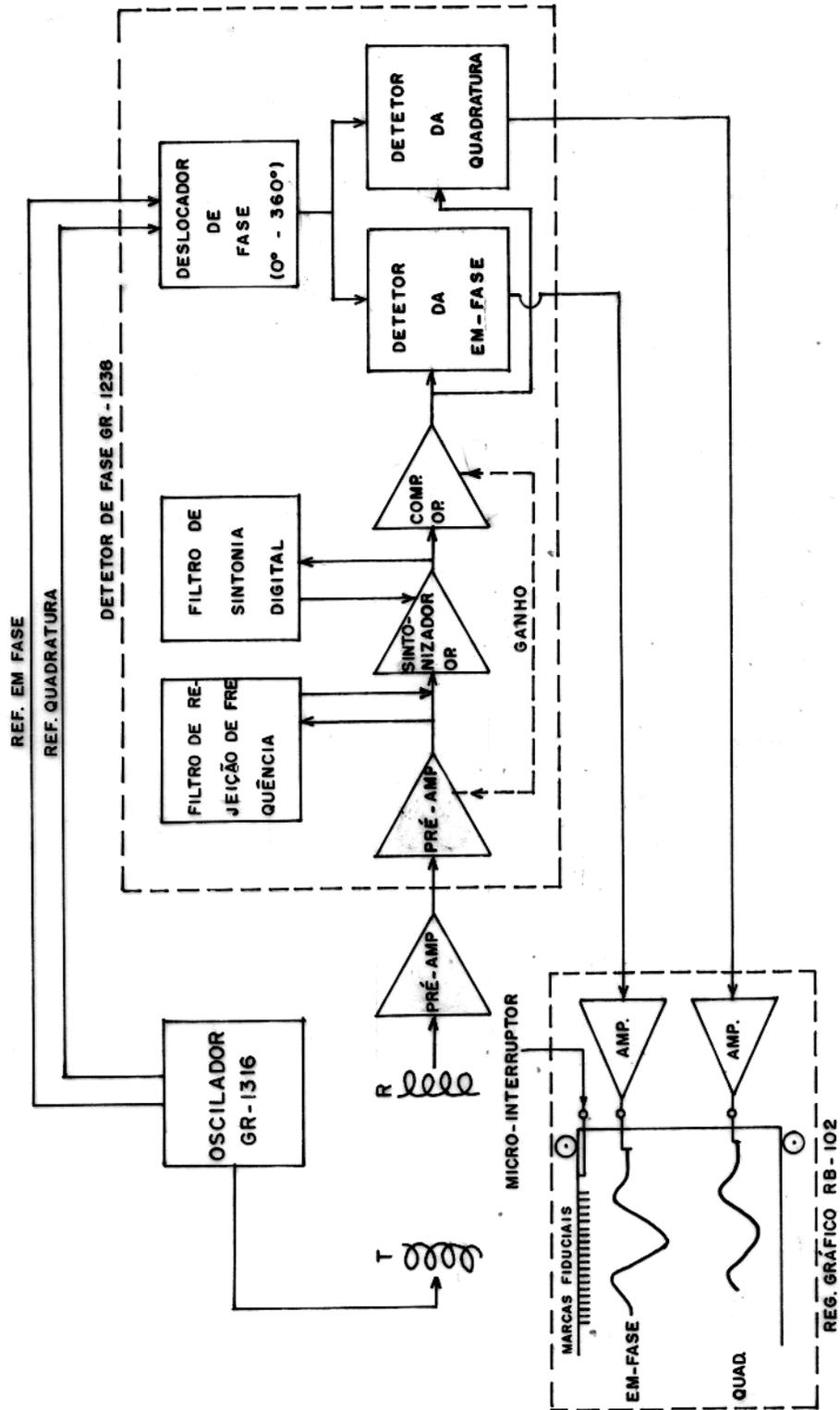


FIG. 1: DIAGRAMA DE BLOCOS DOS SISTEMAS DE ENERGIZAÇÃO, RECEPÇÃO E REGISTRADOR GRÁFICO

a bobina transmissora foi blindada para eliminar o efeito eletrostático.

O pré-amplificador utilizado, foi construído com o objetivo de amplificar o sinal captado pela bobina receptora e para baixar a impedância de saída do sinal. Onde o ganho do amplificador era de 112d-B de malha aberta.

O detetor de fase utilizado foi o da General Radio (USA), modelo 1238 sintonizável e de alto ganho. O objetivo deste é analisar a f.e.m. induzida na bobina receptora. O detetor possui ainda amplificador linear na faixa de frequência desejada e usa um par de detetores sensíveis à fase cuja sensibilidade é em torno de $50 V_{rms}$.

Possui também um deslocador de fase que pode girar de 0° a 360° ambos os sinais, em fase e em quadratura, fornecidos pelo oscilador.

O registrador gráfico utilizado foi o da Equipamentos Científicos Brasileiro (ECB) modelo RB-102, possui dois canais um marcador de eventos e opera em diferentes velocidades de papel. A medida que os resultados são obtidos no detetor de fase estes são registrados em papel especial de largura 250 mm pelos dois canais do registrador gráfico.

A velocidade de arraste do papel é ajustável, podendo variar de 1 cm/h a 60 cm/min e a sensibilidade pode variar de 1 mV a 2 V e de + 0.1 % (10 faixas).

A impedância de entrada é potenciométrica até 500mV, e igual a 1 Mohm constantes para 1 V e 2 V. E, o marcador de eventos permite relacionar a posição das bobinas com respeito à do modelo.

3.4.3 Sistema de disposição do modelo

O sistema de disposição do modelo consiste: a) sistema de bobinas T-R, e b) disposição do modelo.

Na disposição do modelo desenvolvido, foi utilizada uma estrutura de madeira com 75 cm de altura, 1,80 m de comprimento e 1,0 m de largura. A altura de 45cm foram colocados dois trilhos horizontais dentados, onde neles desloca-se um carrinho de acrílico que contém as bobinas T-R. No centro deste foi fixado um tarugo cilíndrico também de acrílico e neste uma pequena régua de acrílico contendo dois furos simétricos com relação ao centro do tarugo e carrinho. Neste são colocadas as bobinas transmissora e receptora, sendo o tarugo ajustável com respeito à altura. O carrinho é movido por um motor passo-a-passo com 1.5 W de potência. Para o funcionamento do motor foi construído um circuito eletrônico o qual controla a velocidade do mesmo através de um potenciômetro.

Preso ao carrinho é colocado um micro-interruptor na posição central das bobinas T-R, ligado ao registrador gráfico. Ao lado é colocada uma peça de madeira contendo 41 furos, dispostos numa posição que corresponde ao centro do sistema. Acionado o motor, o carrinho entra em movimento e em cada furo transposto o micro-interruptor é disparado permitindo portanto posicionar o perfil através do marcador de eventos do registrador.

Sobre a estrutura de madeira é colocado o tanque de fibra de vidro o qual contém a solução representando o manto. E em suas bordas estão presas duas hastes de madeira com furos ajustáveis, sob as quais são colocadas 4 hastes verticais de acrílico, que vão desde a superfície até o fundo do tanque, O aparato vertical de acrílico é ajustável e tem um sistema de

amarração na extremidade inferior. Neste aparato é colocado o modelo condutor podendo ser ajustado a qualquer ângulo e altura desejada. A posição central do modelo corresponde ao furo 21 podendo as medidas serem efetuadas em ambos os lados do condutor. A calibração do ângulo de mergulho pode ser obtida por bússola ou transferidor. Na figura 2, é mostrado um croqui da situação modelada.

3.5 Mecanismo de Medidas

3.5.1 Calibração dos instrumentos

Os sinais de referência colhidos no oscilador são enviados ao detetor de fase e são calibrados igualando-se vetorialmente ao campo primário. Esta calibração obedece o seguinte critério: 1) A componente em-fase do sinal de referência é anulada 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.

Girando-se a fase do sinal de referência de 90° 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 de 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, à componente em fase.

Deslocando-se novamente o sinal de referência de 90° 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 o campo primário. As calibrações foram feitas na presença de manto estando ausente o copo condutor.

3.6 Procedimento de Medidas

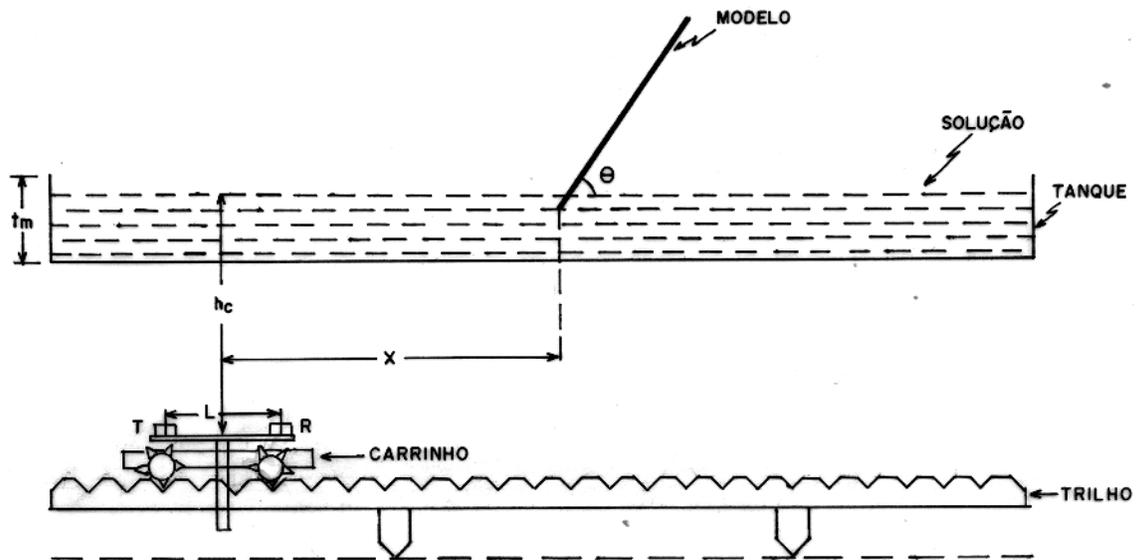
Na aquisição dos dados os perfis foram registrados continuamente com o sistema de bobinas na configuração HLEM, se deslocando no sentido transversal à direção do corpo.

A separação entre as bobinas T-R foi constante $L=0.15\text{m}$ e as observações foram tomadas para diferentes profundidades ao topo do corpo $h_c = 0.03\text{m}$, 0.06m e 0.09m que corresponde $h_c/L = (0.2, 0.4 \text{ e } 0.6)$, onde h_c denota a distância entre o topo do condutor e a linha T-R. As inclinações tomadas foram $\theta = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ \text{ e } 30^\circ$.

As medidas foram tomadas na presença de solução nas duas situações seguintes: 1) manto-condutivo, o condutor foi colocado em contato galvânico com o manto e 2) manto-indutivo o condutor não estava em contato galvânico com o manto. Também com o objetivo de comparação de efeitos foram tomadas leituras na ausência de manto, para as mesmas situações do corpo.

3.7 Ocorrência de Erros

Os erros nos levantamentos podem ser encarados sobre dois aspectos: a) erros de posição dos modelos, estes estão associados à profundidade e inclinação do corpo, os quais foram estimados em torno de $\pm 1\text{mm}$ e ± 0.5 respectivamente. Os erros referentes ao posicionamento com relação ao centro das bobinas é quase desprezível em torno de $\pm 0.25\text{mm}$, estes erros foram estimados à luz dos perfis medidos para $\theta = 90^\circ$. b) Os erros de variação de frequência e de amplificação estão associados aos sistemas de energização e recepção. Os equipamentos estabilizam após 20 minutos de ligados, podendo então serem considerados confiáveis dada a repetibilidade ao longo do levantamento.



T - BOBINA TRANSMISSORA
R - BOBINA RECEPTORA

FIG.02 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO MOSTRANDO O MODELO, A CAMADA DE MANTO E O SISTEMA DE BOBINAS NA CONFIGURAÇÃO HLEM.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os efeitos de manto foram estudados para dois casos: a) manto sem contato galvânico com o corpo condutor, definimos como " manto-indutivo " e b) manto em contato galvânico chamado como " manto-condutivo ".

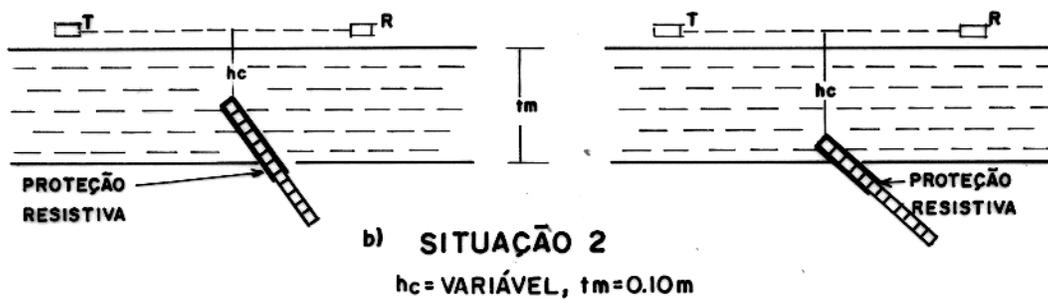
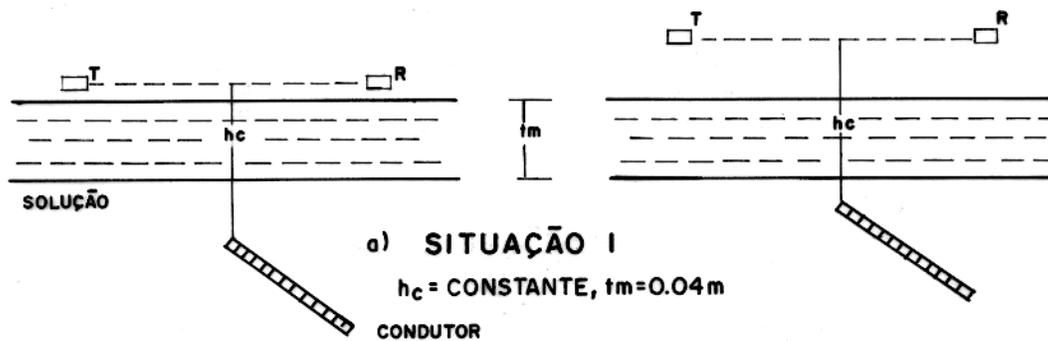
No estudo de manto-indutivo foram consideradas duas situações: 1) quando o corpo fica totalmente fora do manto e 2) quando uma parte do corpo é colocado num manto, mas o contato é apenas indutivo. Para simular esta situação o corpo foi revestido por uma película altamente resistiva, evitando assim o contato galvânico, figura 3.

Para estudar os efeitos de manto-indutivo da situação-1, variamos o número de indução do manto $\alpha_m = 0.1$, 0.2 e 0.28 . Esta variação foi feita variando a condutividade da solução $\sigma_s = 21$ S/m, 42 S/m e 59 S/m e mantendo a espessura constante $t_s = 0.04$ m. Variamos o número de indução do corpo α_c usando placas de aço inoxidável de diferentes espessuras e nas inclinações $\theta = 90^\circ$, 60° , 45° e 30° .

Para compreender melhor a interação indutiva entre corpo e manto na situação-1, fixamos a altura do corpo $h_c = 0.09$ m e variamos verticalmente o posicionamento do sistema " bobinas-corpo" em relação à camada de manto, figura 3a.

No caso de manto-indutivo situação-2, variamos o número de indução do manto $\alpha_m = 0.25$, 0.5 e 0.7 , sendo que esta variação foi feita considerando a espessura constante $t_s = 0.10$ m e variando a condutividade de modo análogo ao citado acima. Ver tabela 2. Neste caso para estudar a interação indutiva entre corpo e manto colocamos o modelo em diferentes profundidades, figura 3b.

MANTO INDUTIVO



MANTO CONDUTIVO

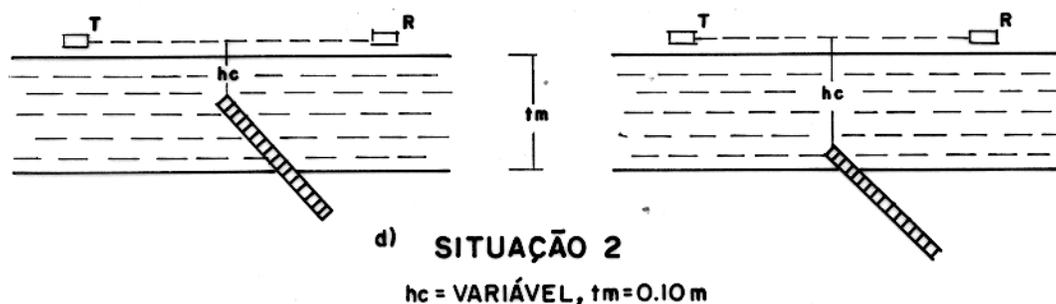
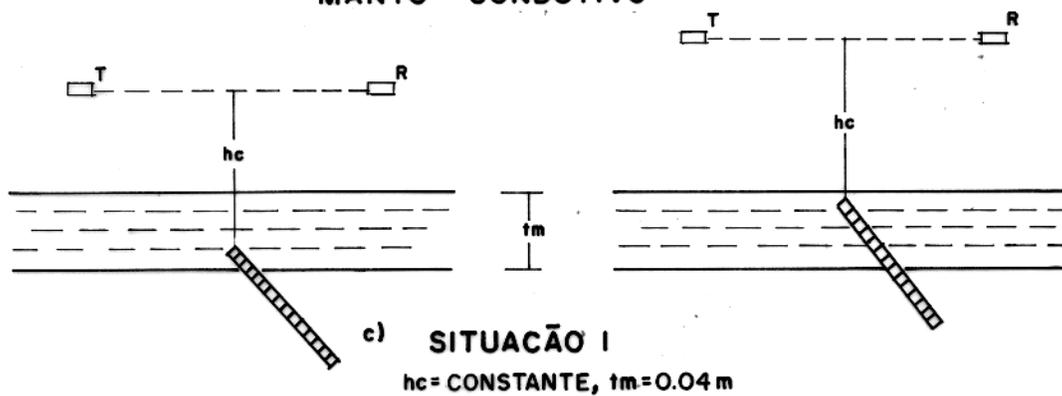


FIG.03-SITUAÇÕES MODELADAS DE MANTO INDUTIVO E CONDUTIVO.

Os corpos foram simulados por placas de aço inoxidável de condutividade $\sigma_c = 1.38 \times 10^6$ S/m. Ver tabela 1.

No estudo de manto-condutivo, procedemos de modo análogo ao de manto-indutivo variamos também os números de indução do corpo e do manto, a espessura, a profundidade h_c e a inclinação do corpo, figuras 3c e 3d.

As respostas eletromagnéticas de corpos tabulares são representadas sob a forma de perfis em-fase e em quadratura. Na figura 4 é apresentado um perfil típico obtido de um semi-plano inclinado $\theta = 45^\circ$ na ausência de manto $\alpha_m = 0$.

Por conveniência de descrição foi definido no perfil pico-a-pico ao lado do mergulho como " pico-a-favor " e pico-a-pico do lado contrário ao mergulho como " pico-contra ".

4.1 Efeitos de Manto-Indutivo

Estes efeitos foram estudados comparando os perfis em fase e em quadratura obtidos na presença de manto-indutivo para as situações-1 e -2, com os obtidos na ausência de manto, figura 5.

- 1) Observamos uma ligeira diminuição de amplitude na em-fase e na quadratura na presença de manto, figuras 6, 7 e 15.
- 2) Aparece um " pico-extra " na quadratura na presença de manto para corpos inclinados, e se manifesta melhor para pequenas inclinações do corpo, figura 6. Este pico-extra se caracteriza melhor com os aumentos de condutividade da solução σ_s e de número de indução do corpo α_c , figuras 7 e 8a.
- 3) Ocorre a reverção na quadratura para altos valores de α_c , inclusive em pequenas inclinações do corpo e maior espessura de manto, figura 8b.

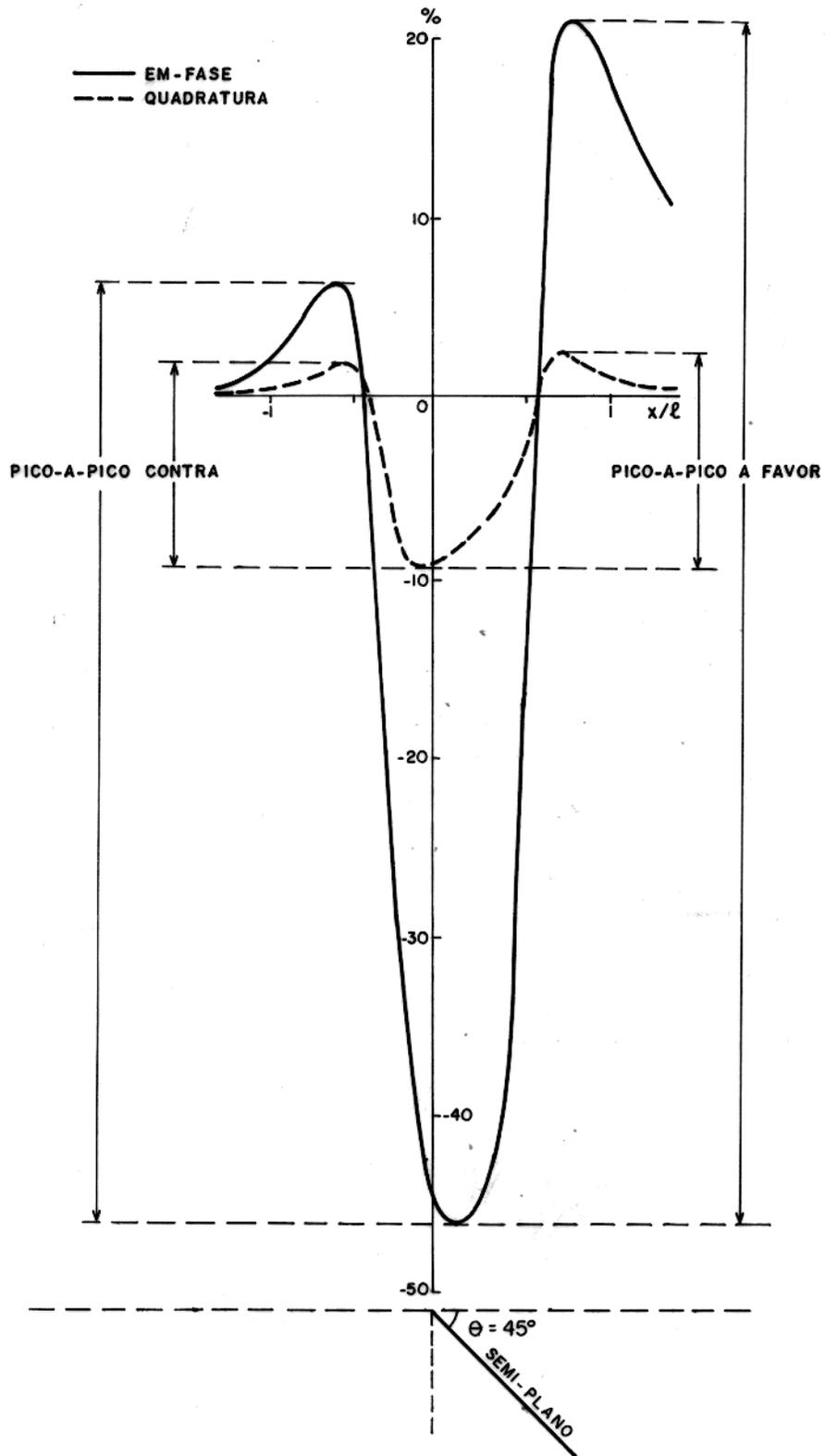


FIG. 04 - PERFIL DE UM SEMI-PLANO INCLINADO $\theta = 45^\circ$
 $\alpha_{c1} = 45.60$, $h_c/L = 0.2$ E $\sigma_s = 0$.

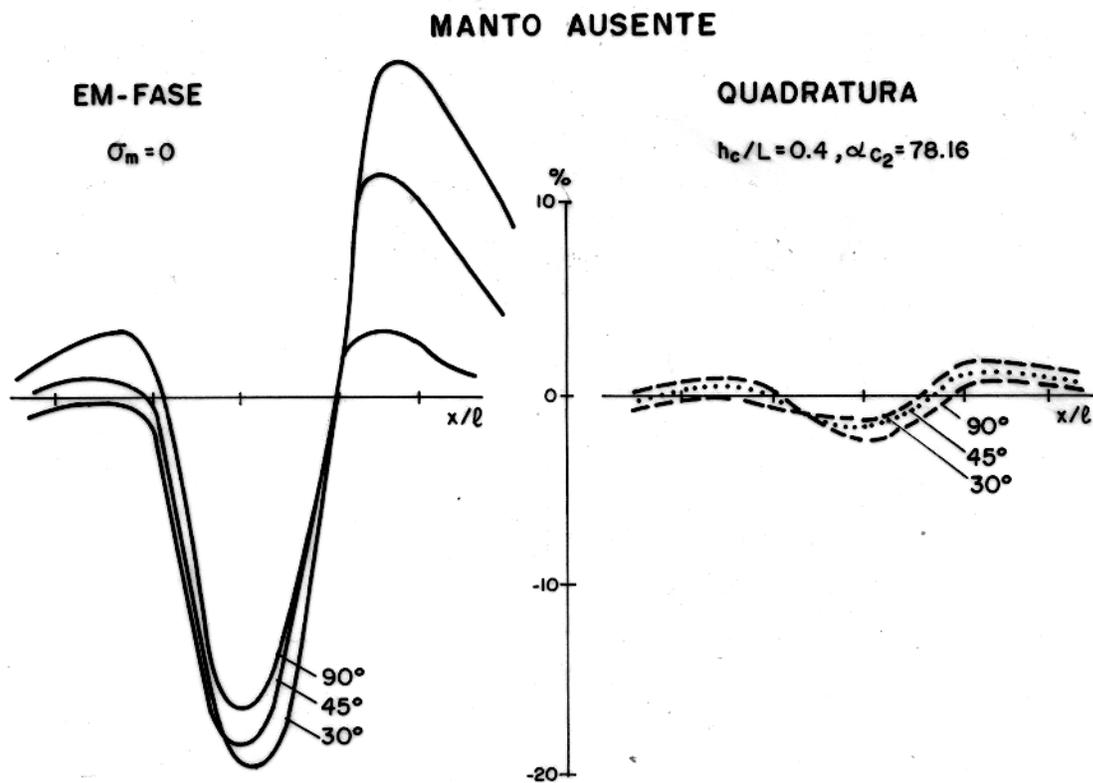


FIG.02 - PERFIS COM A VARIAÇÃO DE θ , NA AUSÊNCIA DO MANTO, $\sigma_m = 0$ (ar).

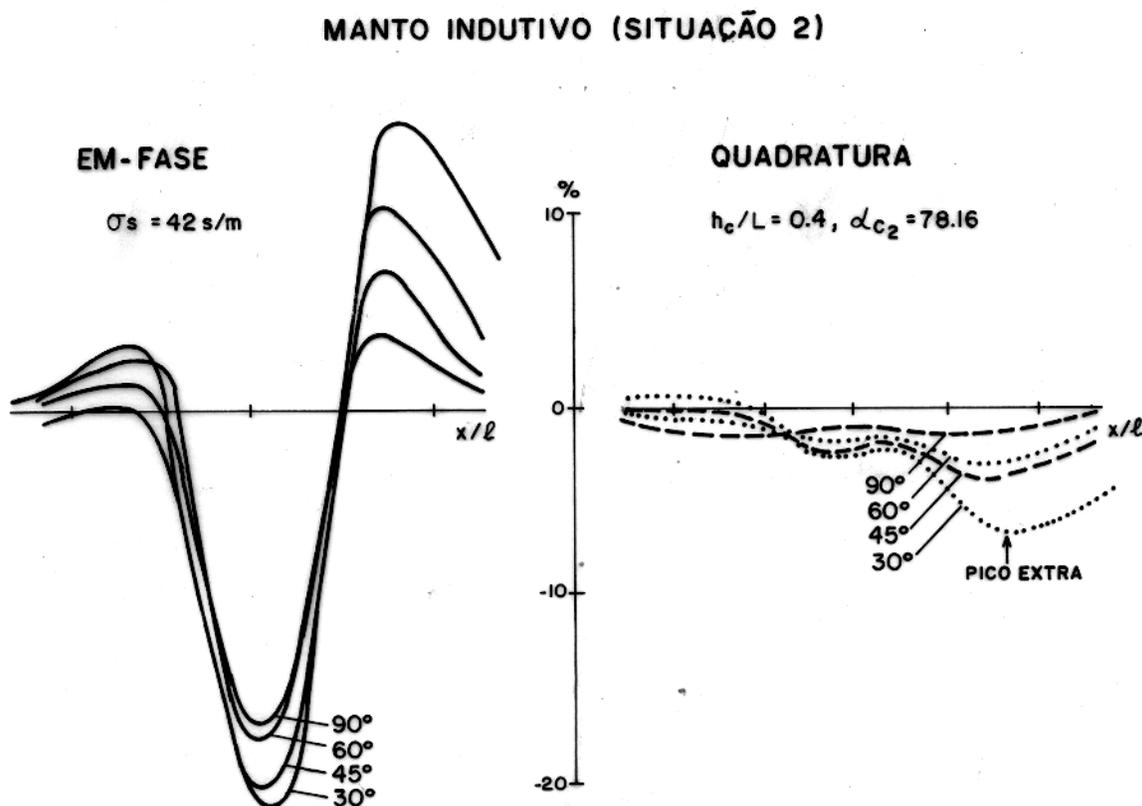


FIG.06 - APARECIMENTO DE PICO EXTRA NA QUADRATURA PARA CORPOS INCLINADOS (CORPO REVESTIDO POR PELÍCULA).

MANTO INDUTIVO (SITUAÇÃO 1)

$$\theta = 45^\circ, \alpha_{c_2} = 78.16, h_c/L = 0.6$$

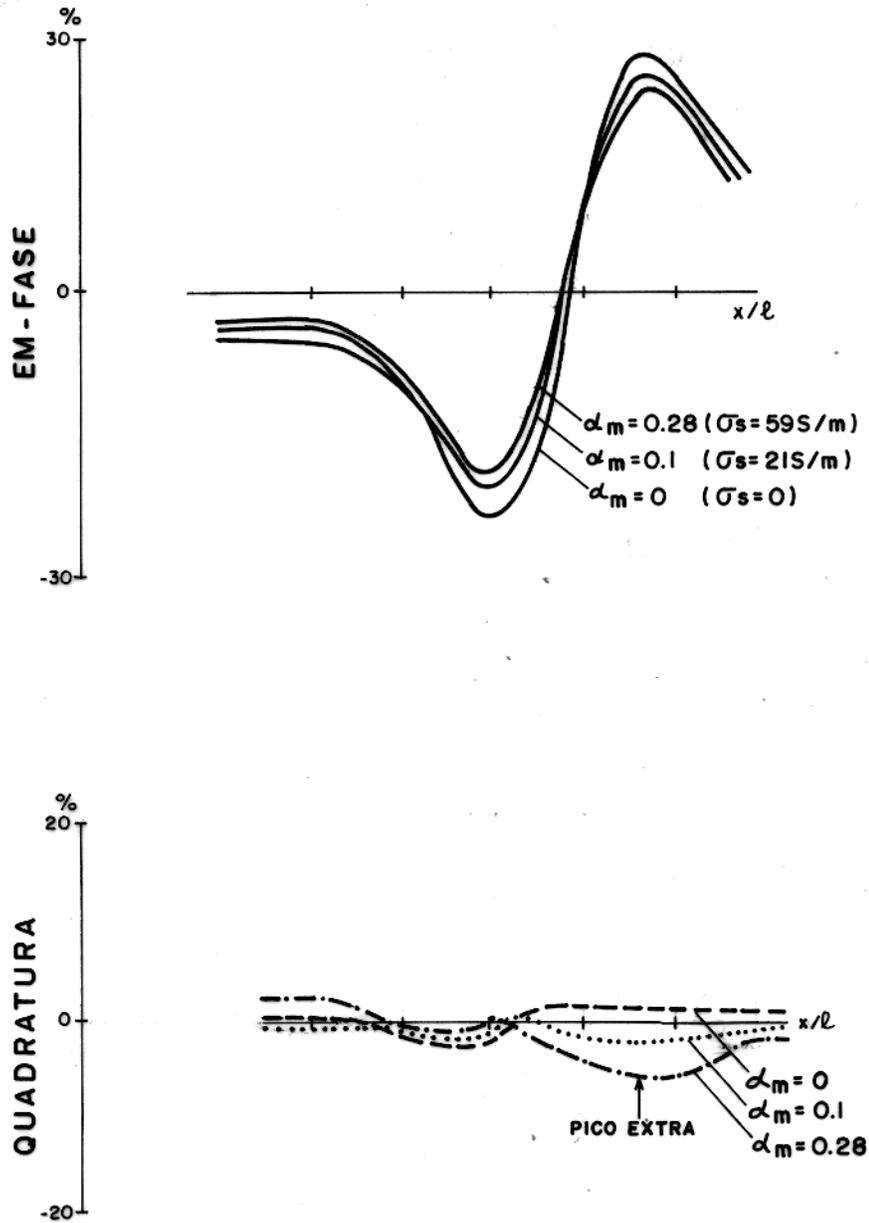
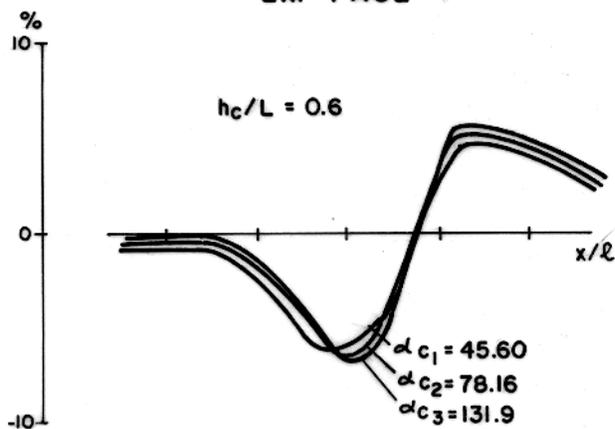


FIG.07 - DIMINUIÇÃO DA EM-FASE, E APARECIMENTO DE PICO EXTRA COM O AUMENTO DE α_m .

MANTO INDUTIVO (SITUAÇÃO 2)

$$\theta = 45, \sigma_s = 42 \text{ s/m}$$

EM - FASE



QUADRATURA

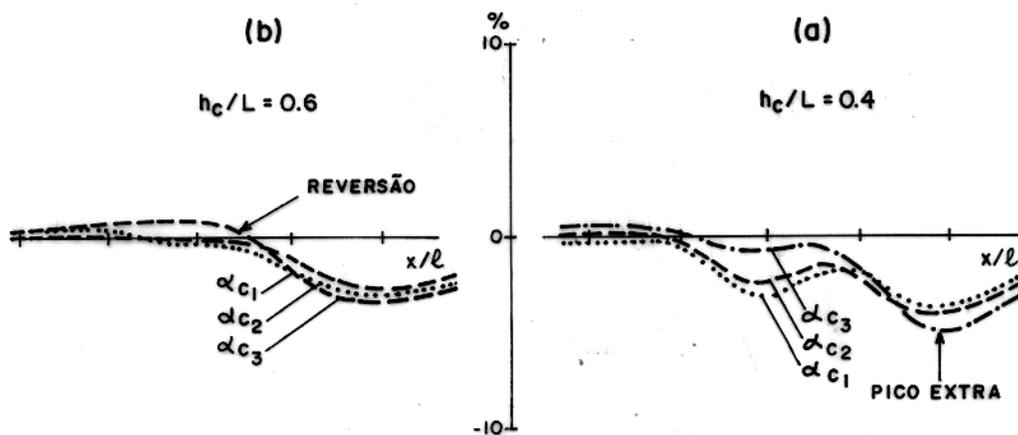


FIG. 08 - a) AUMENTO DE PICO EXTRA, b) REVERSÃO NA QUADRATURA PARA ALTOS VALORES DE α_c .

Efeitos similares foram observados também por Silva e Verma (1986).

4.2 Efeitos de Manto-Condutoivo

Comparando os perfis obtidos na presença de manto em contato galvânico com o corpo, com os na ausência de manto observamos:

- 1) Ocorre um ligeiro aumento em ambas as amplitudes de em-fase e quadratura, figuras 5, 9 e 15. Efeito similar também foi observado por Joshi et al. (1984) para corpos verticais.
- 2) Aparece um pico-extra na quadratura para corpos inclinados e este se expressa melhor para pequenas inclinações e com aumento de ζ e α_c , figuras 9, 10 e 11.
- 3) Ocorre a reversão na quadratura para altos valores de ζ e α_c , figuras 13 e 14. Esta reversão melhor se apresenta para maior contato entre corpo e manto. Este efeito foi estudado colocando-se cada vês maior parte do corpo em contato com a solução, mantendo-se constante h_c / L , figura 14.

4.3 Estudo Comparativo dos Efeitos de Manto Indutivo e de Manto-Condutoivo

- 1) No manto-indutivo ocorre uma ligeira diminuição na amplitude dos perfis em-fase e quadratura, enquanto no manto-condutivo foi observado um ligeiro aumento em ambas as componentes, figura 15.
- 2) Em ambas as condições aparecem picos-extras na quadratura em pequenas inclinações do corpo, figuras 6 e 9.
- 3) Com o aumento de ζ e α_c , ocorre a reversão e o pico-extra

MANTO CONDUTIVO (SITUAÇÃO 2)

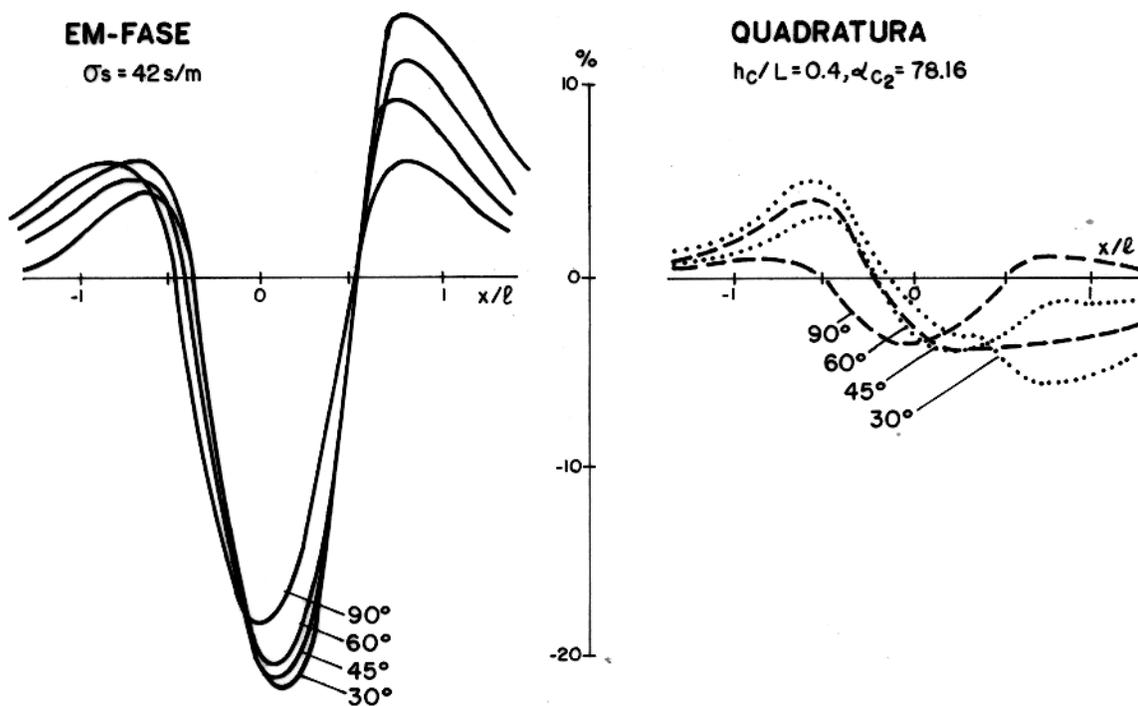
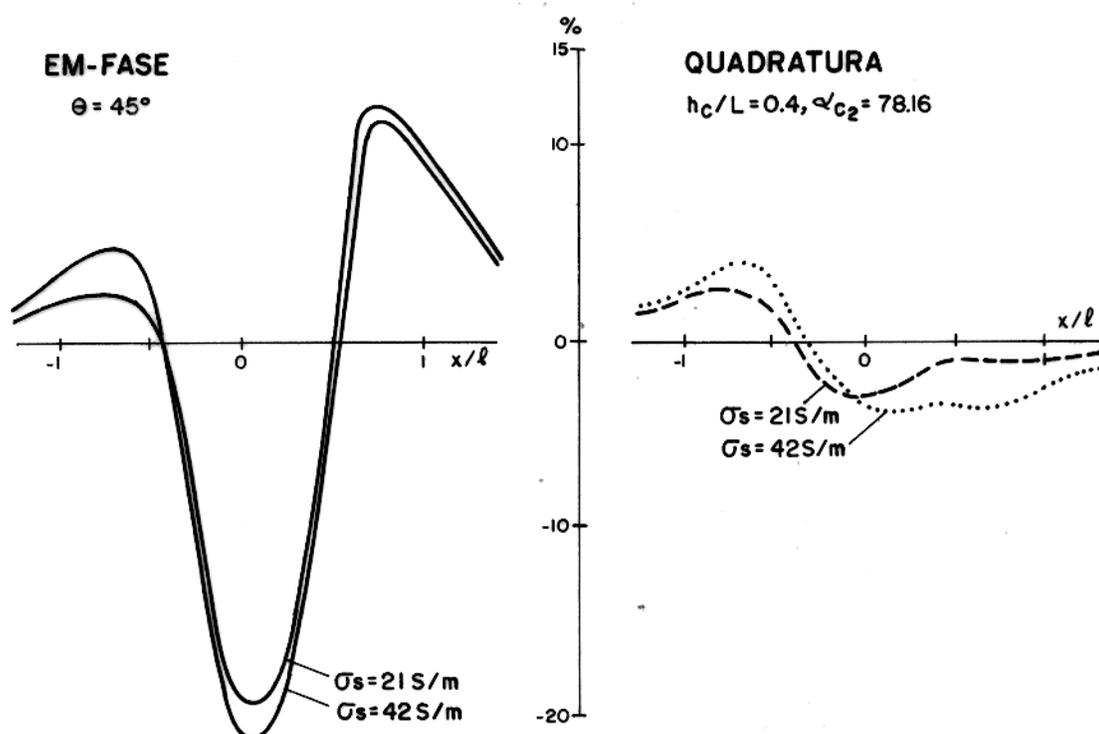


FIG.04 - APARECIMENTO DE PICO EXTRA NA QUADRATURA PARA CORPOS INCLINADOS.

FIG.10 - APARECIMENTO DE PICO EXTRA NA QUADRATURA COM AUMENTO DE σ_s .

MANTO CONDUTIVO (SITUAÇÃO 2)

$\theta = 45^\circ$ $h/L = 0.4$ $\sigma_s = 215/m$

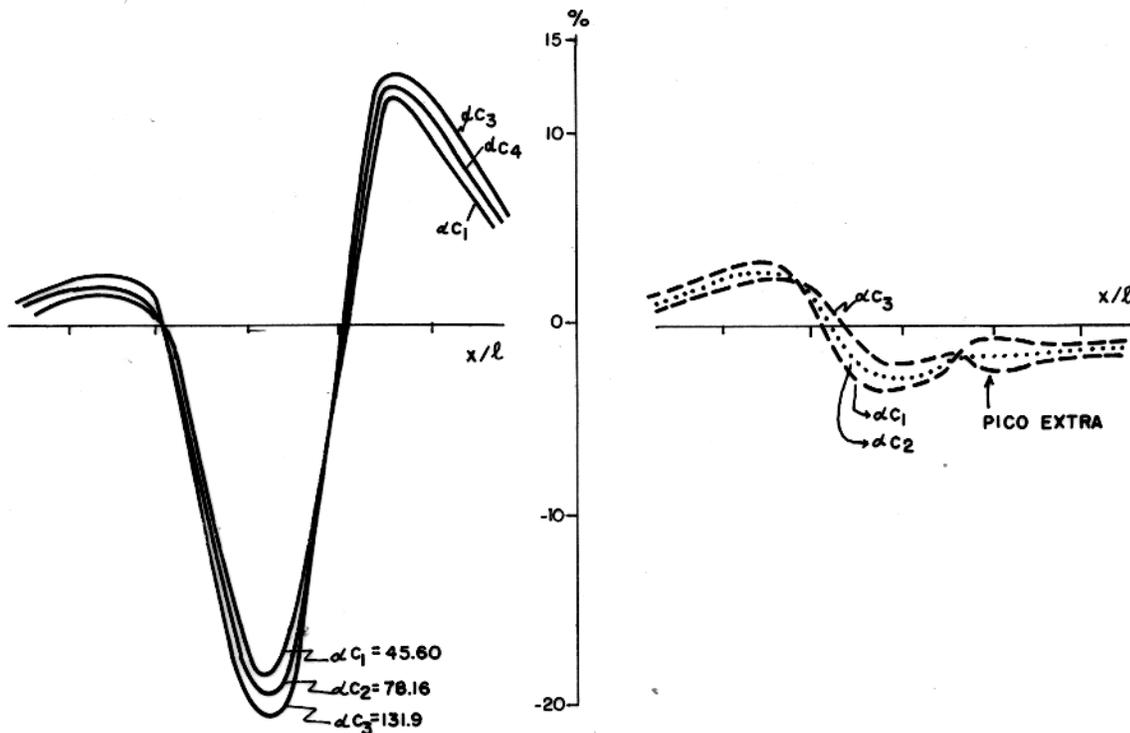


FIG. II - PRESENÇA DE PICO EXTRA NA QUADRATURA COM O AUMENTO DE α_c .

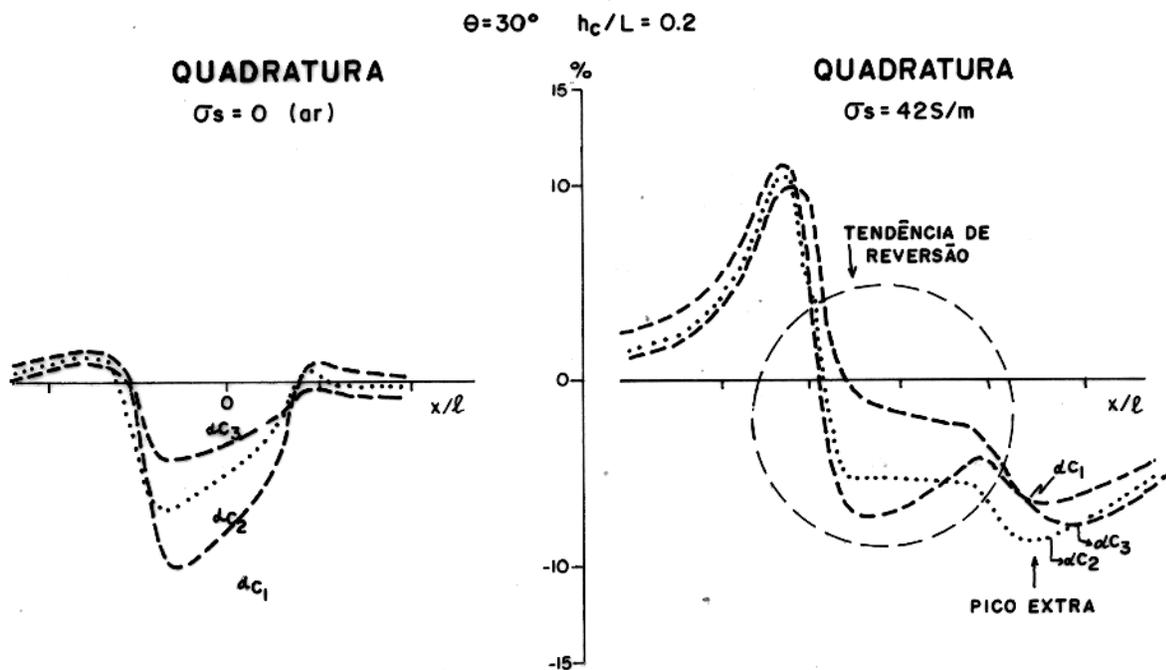
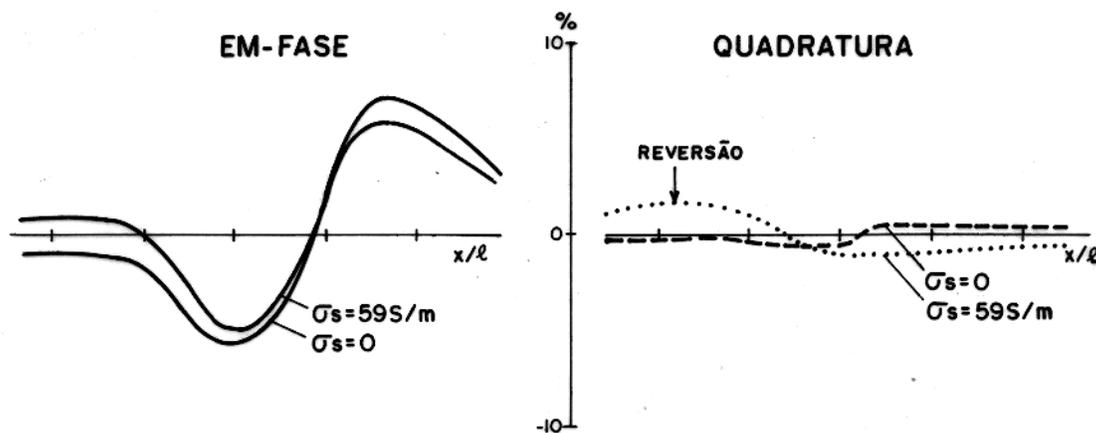


FIG. 12 - APARECIMENTO DE PICO EXTRA NA QUADRATURA COM O AUMENTO DE α_c .
 $\alpha_{c1} = 45.60$, $\alpha_{c2} = 78.16$ e $\alpha_{c3} = 131.9$

MANTO CONDUTIVO (SITUAÇÃO 1)

$$\theta = 45^\circ, \quad h_c/L = 0.6, \quad \alpha_{c_2} = 78.16$$

FIG.13 - REVERSÃO NA QUADRATURA PARA ALTO VALOR DE σ_s .

$$\theta = 45^\circ, \quad \sigma_s = 59 \text{ s/m}, \quad h_c/L = 0.6, \quad \alpha_{c_2} = 78,16$$

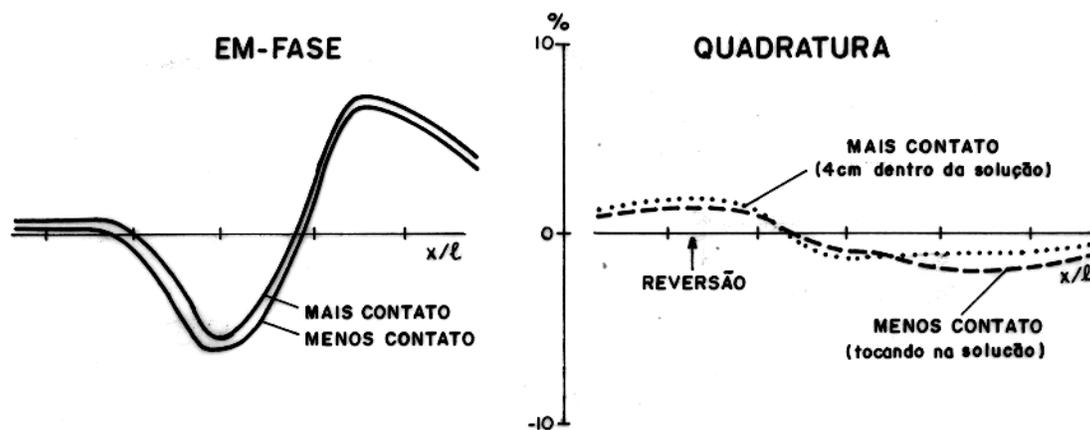


FIG.14 - MELHORIA DE REVERSÃO NA QUADRATURA COM AUMENTO DO CONTATO ENTRE CORPO E MANTO.

— EM-FASE

--- QUADRATURA

$h_c/L=0.4 \quad \sigma_s = 42 \text{ s/m}, \quad \alpha_{c_1}=45.60$

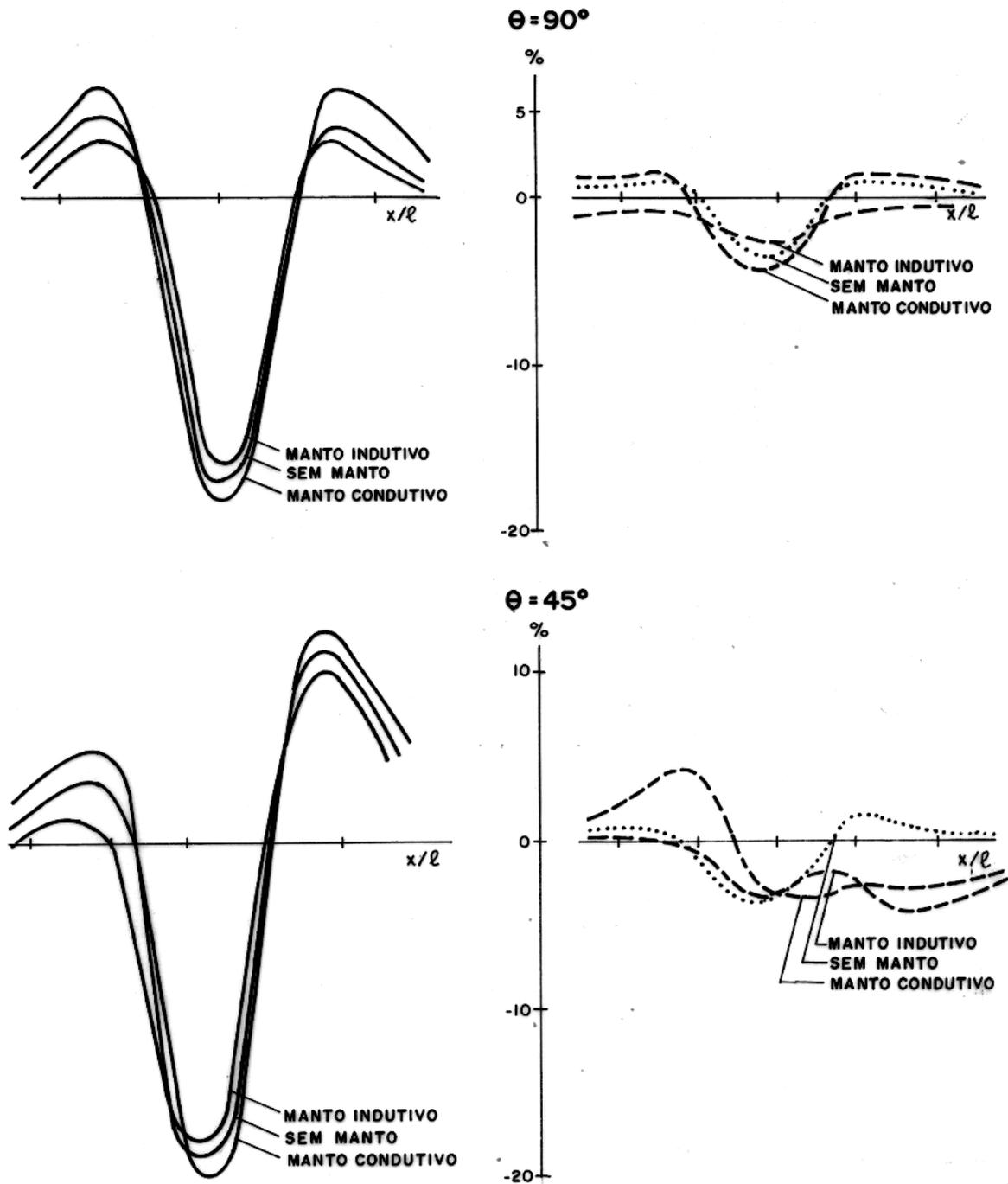


FIG. 15 - MUDANÇA DO PERFIL EM FUNÇÃO DA PRESENÇA DE MANTO INDUTIVO E CONDUTIVO, EM RELAÇÃO A AUSÊNCIA DE MANTO.

se caracteriza melhor em ambas as situações de manto, figuras 7, 8a e 8b, 10, 11, 12, 13 e 14.

- 4) No manto-condutivo, observamos que com o aumento de contato a reversão e pico-extra na quadratura se manifesta melhor, figuras 5, 13 e 14. O mesmo ocorrendo para o caso de manto-indutivo (situação-2), figura 8. Enquanto para a (situação-1) no manto-indutivo este efeito não ficou bem caracterizado dentro dos parâmetros estudados.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos efeitos dos mantos-indutivos e -condutivos nas anomalias foram feitas em relação à ausência de manto usando valores pico-a-pico. Os efeitos foram estudados com variações dos parâmetros de manto e de corpo para diferentes inclinações e profundidades.

Para este objetivo tomamos como convenção pico-a-pico a favor e pico-a-pico contra na ausência de manto e em baixos valores de condutividade da solução σ_3 , conforme a figura 16a. Enquanto nos altos valores de σ_3 quando aparece o pico-extra e reversão na quadratura, definimos os picos conforme figuras 16b e 16c. Os efeitos foram observados com o aumento de σ_3 .

5.1 Manto-Indutivo

5.1.1 Anomalias em quadratura

- a) Pico-extra: se caracteriza melhor com o aumento do número de indução α_c , pequenas inclinações do corpo e em altos valores de σ_3 , figuras 17a e 18a.
- b) Pico-a-favor: diminui com o aumento de σ_3 além disso atinge maiores valores para menores valores de α_c , figura 17b. Este pico é positivo para pequenos valores de σ_3 e torna-se negativo com o aumento do último, sendo maiores em pequenas inclinações, figura 18b.
- c) Pico-cotra: de modo análogo ao item-b, este também diminui com o aumento de σ_3 são maiores para menores valores de α_c e corpos mais inclinados, figuras 17c e 18c.

5.1.2 Anomalias na em-fase

As anomalias na em-fase nos picos a-favor e -contra

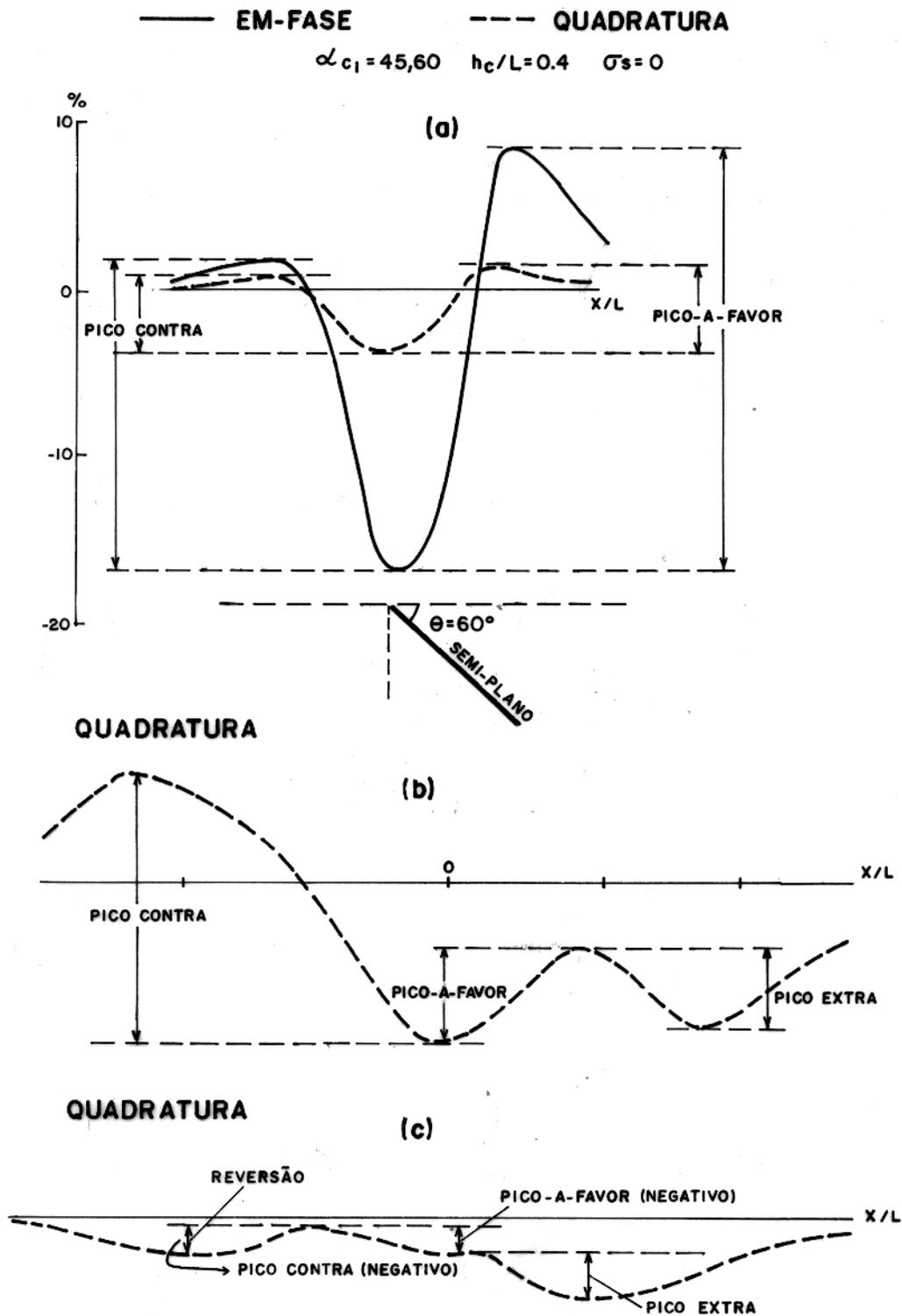


FIG. 16 - DEFINIÇÃO DE PICOS: a) AUSÊNCIA DE MANTO $\sigma_s = 0$. ENQUANTO NA PRESENÇA DE MANTO NA QUADRATURA, b) PICO EXTRA E c) REVERSÃO.

MANTO INDUTIVO (SITUAÇÃO 1)
 QUADRATURA

$$\theta = 45^\circ \quad h_c/L = 0.6 \quad \alpha_{c3} = 131.9$$

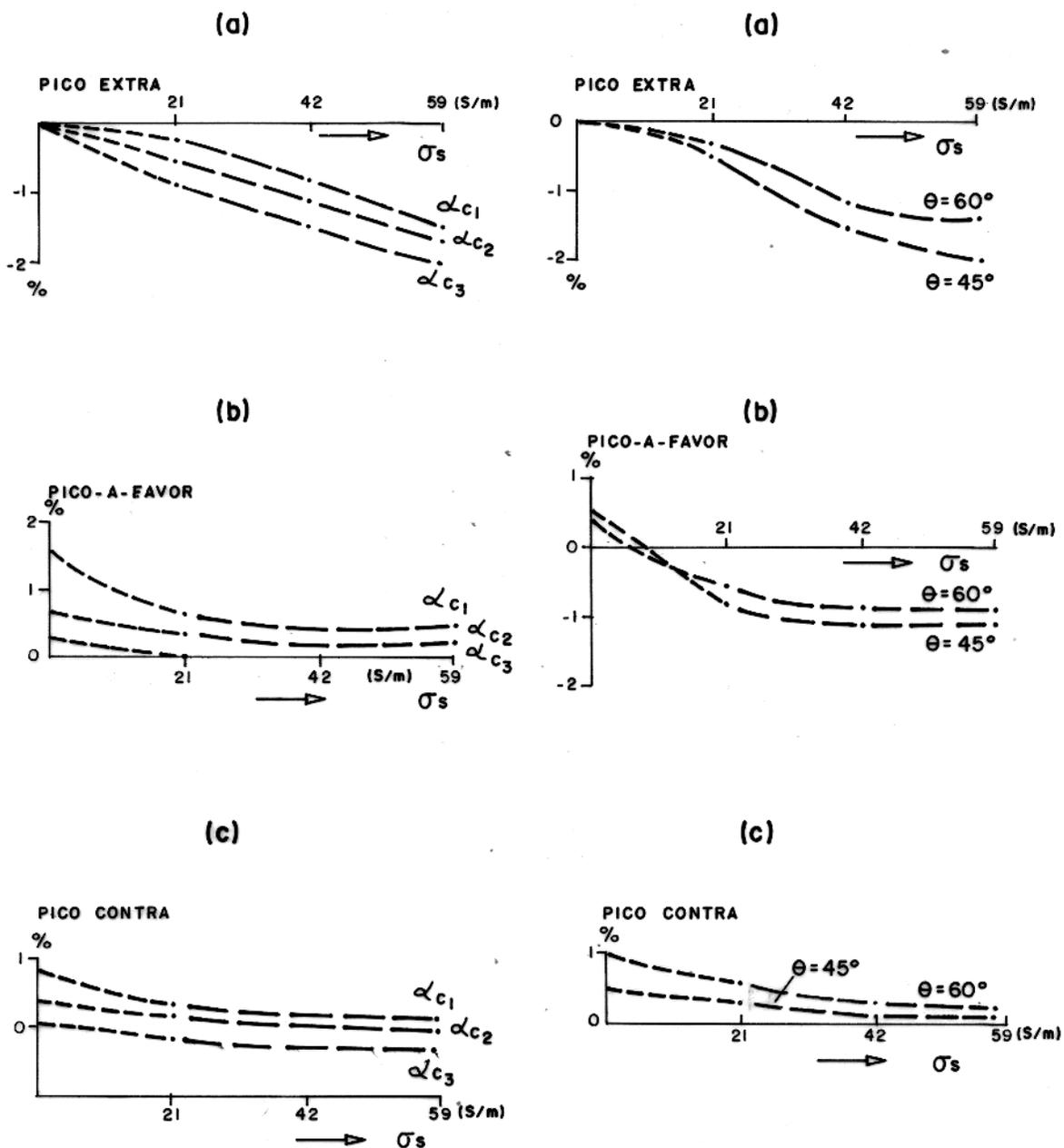


FIG. 17

FIG. 18

FIGURAS. 17 E 18 - VARIAÇÕES DOS PICOS: EXTRA, A FAVOR E CONTRA COM O AUMENTO DE σ_s EM FUNÇÃO DE θ E α_c RESPECTIVAMENTE.

aumentam na presença de manto-indutivo. Este aumento é maior para altos valores de α_c , $\alpha_c \geq 78.16$, pequenas inclinações do corpo $\theta \leq 60^\circ$.

5.1.3 Amplitudes normalizadas

Com o objetivo de estudar o aumento ou diminuição das anomalias na presença de manto, as amplitudes em-fase e em quadratura, bem como o módulo da amplitude foram normalizadas em relação à ausência de manto.

A) A amplitude normalizada A_n foi definida por:

$$A_n = \frac{PP_{soz}}{PP_{or}} - 1 \text{ onde:}$$

PP_{soz} - valores pico-a-pico na presença de manto

PP_{or} - " " na ausência de manto.

Os valores positivos de A_n significam aumento de anomalia, enquanto os negativos significam diminuição, com respeito à ausência de manto nas mesmas condições.

Para $\theta = 90^\circ$ e 60° , a em-fase cresce com o aumento de ζ_s em ambos os picos: a-favor e -contra. No pico-a-favor o maior crescimento ocorre para baixos valores de α_c , enquanto este efeito no pico contra ocorre para altos valores de α_c . Na componente quadratura ocorre ao contrário da em-fase, isto é decresce sendo o decrescimento maior para altos valores de α_c , figuras 19 (a,b); 20(a,b) e 21(a,b).

Enquanto para $\theta = 45^\circ$, na em-fase ocorre de modo contrário ao dos casos de $\theta = 90^\circ$ e 60° , e na quadratura ocorre de modo similar, figuras 20(c,d) e 21(c,d).

B) O Módulo de amplitude normalizada \tilde{A}_n foi definido por:

$$A_m^* = \left| \frac{A_{sal}}{A_{or}} \right| - 1 \text{ onde:}$$

$$|A| = (E_{pp}^2 + Q_{pp}^2)^{1/2}$$

E_{pp} - pico-a-pico em-fase

Q_{pp} - " em quadratura.

Com o aumento de G_s no manto-indutivo o módulo decresce em todas as inclinações de corpo, tanto no pico-a-pico a-favor como no contra. Para $\theta = 90^\circ$ o maior decrescimento ocorre nos altos valores de α_c , figuras 22(a,b,c,d,e).

5.2 Manto-Condutoivo

5.2.1 Anomalias em quadratura

- a) O pico-extra se manifesta melhor em pequenas inclinações do corpo, aumento do número de indução α_c e de profundidade h_c/L , figuras 23a, 24a e 25a.
- b) Pico-a-favor: decresce com o aumento de G_s e α_c , tornando-se negativo para pequenas inclinações do corpo. Este decrescimento é maior nos baixos valores de α_c , figuras 23b e 24b. Com o aumento de profundidade decresce também e este é maior para corpos mais rasos, figura 25b.
- c) Pico-contra: cresce com o aumento de G_s e α_c sendo maior para corpos menos inclinados e baixos valores de α_c , figuras 23c e 24c. Este crescimento é maior para corpos menos profundos, figura 25c.

5.2.2 Anomalias na em-fase

As anomalias na em-fase, aumentam na presença de manto-condutivo. Este aumento é maior nos altos valores de α_c para pequenas inclinações do corpo e em pequenas profundidades.

MANTO INDUTIVO (SITUAÇÃO 1)

EM - FASE

$$A_n = \frac{PP_{sol}}{PP_{ar}} - 1$$

$$\theta = 90^\circ$$

$$h_c/L = 0.6$$

QUADRATURA

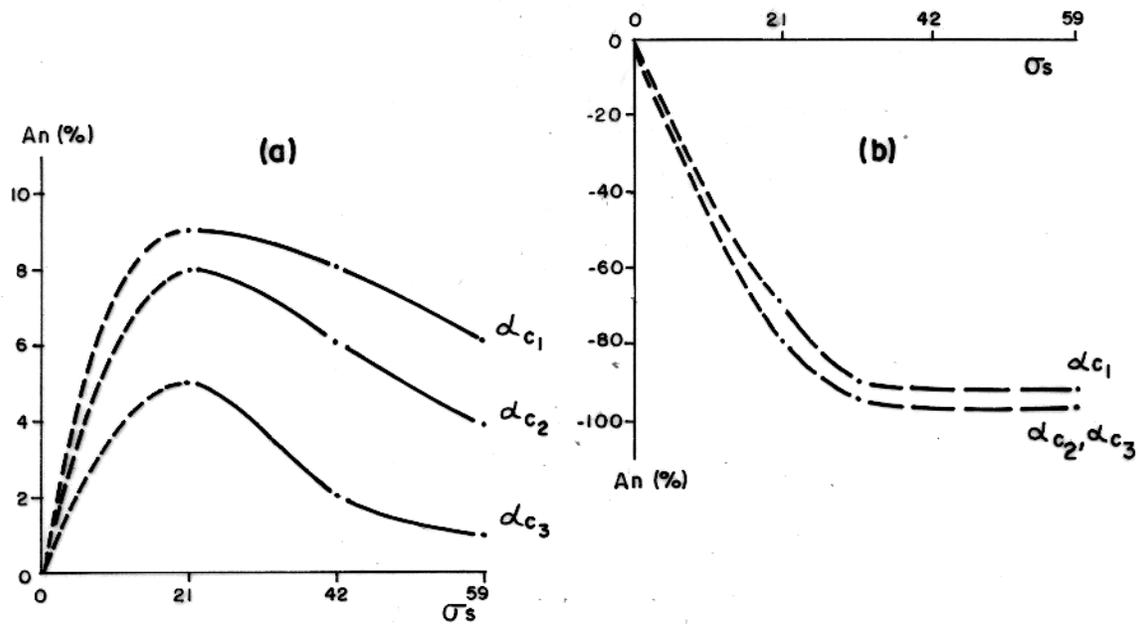
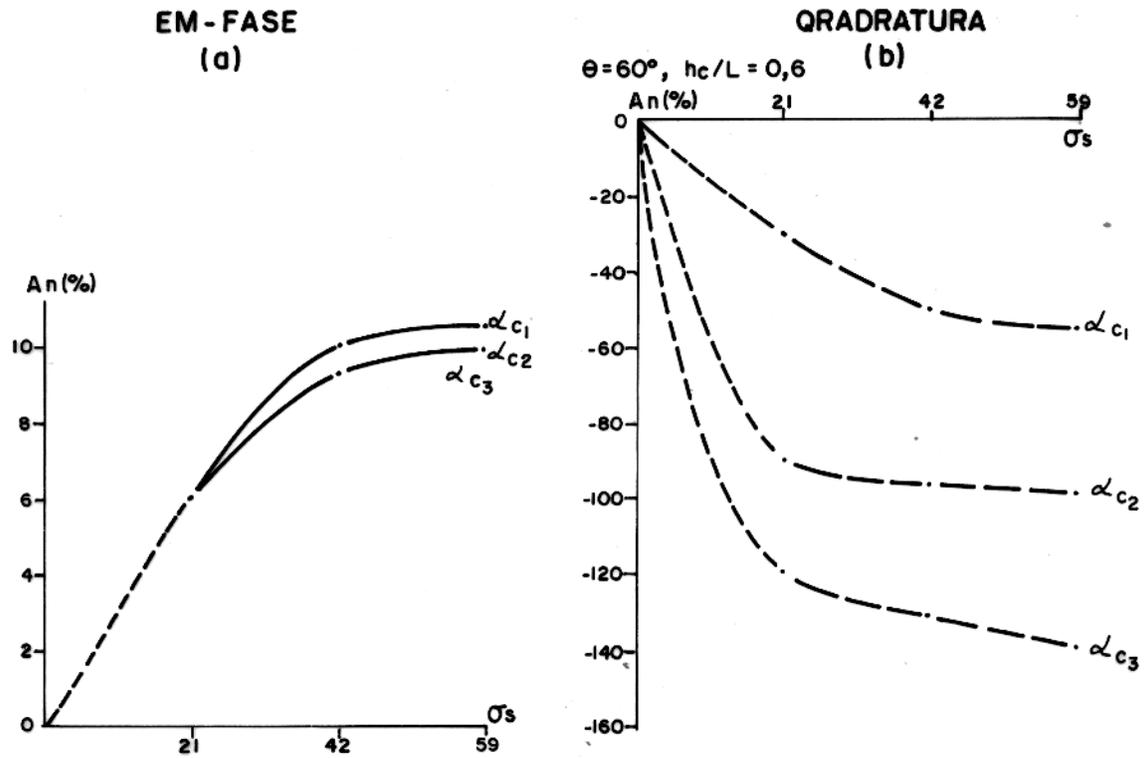


FIG. 19 - VARIAÇÃO DA AMPLITUDE NORMALIZADA A_n COM σ_s ,
EM FUNÇÃO DE α_c PARA $\theta = 90^\circ$.

MANTO INDUTIVO (SITUAÇÃO I)
PICO-A-FAVOR



PICO-A-FAVOR

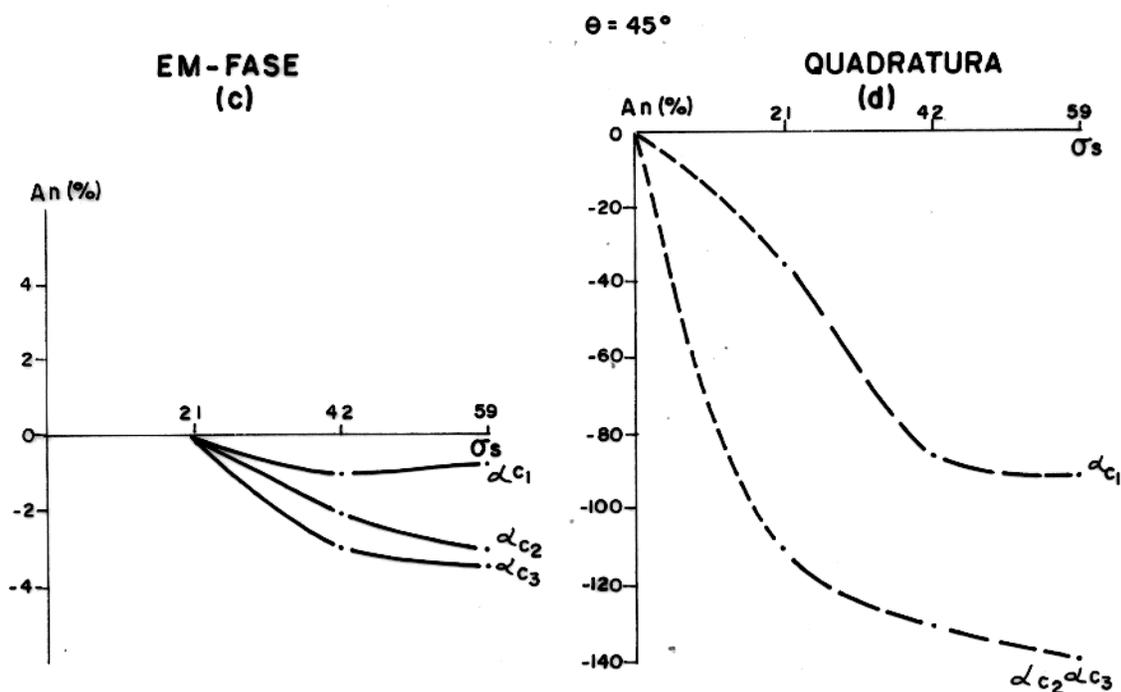
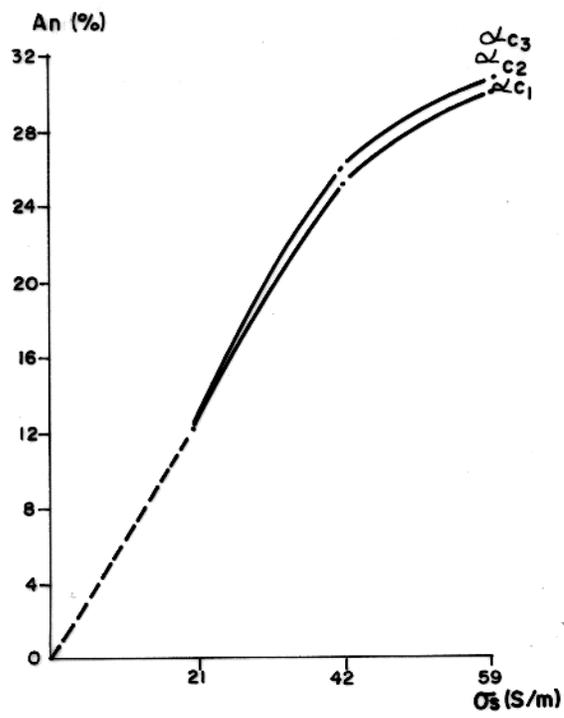


FIG. 20: VARIAÇÃO DA AMPLITUDE NORMALIZADA An COM σ_s , EM FUNÇÃO DE α_c ; PARA $\theta = 60^\circ$ e 45° .

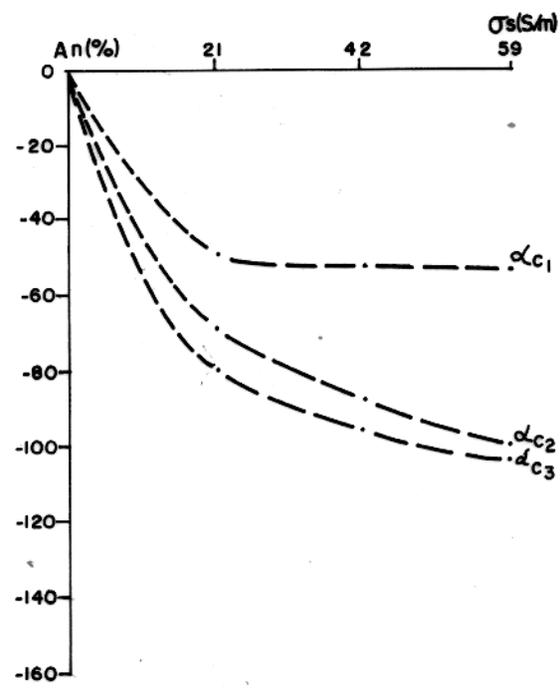
MANTO INDUTIVO (SITUAÇÃO I) PICO CONTRA

EM - FASE
(a)

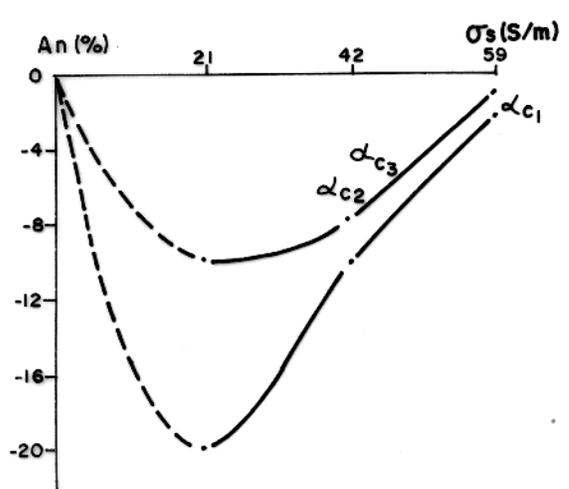


QUADRATURA

$\theta = 60^\circ, h_c/L = 0,6$ (b)



(c)



(d)

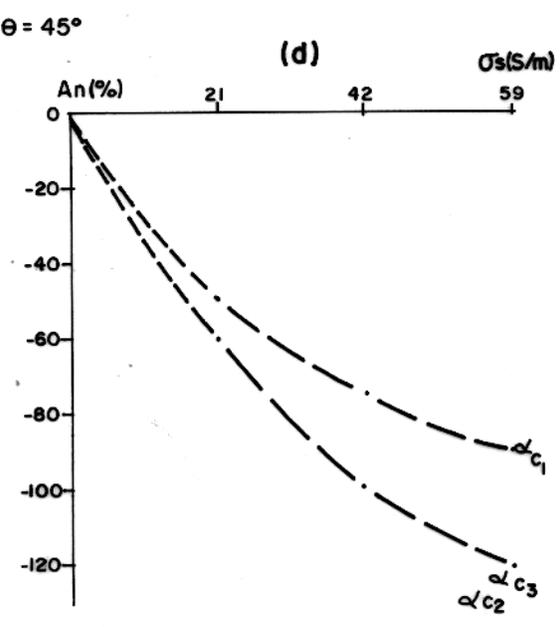


FIG. 21: VARIAÇÃO DA AMPLITUDE NORMALIZADA An COM σ_s , EM FUNÇÃO DE α_c ; PARA $\theta = 60^\circ$ E 45° .

MANTO INDUTIVO (SITUAÇÃO I)

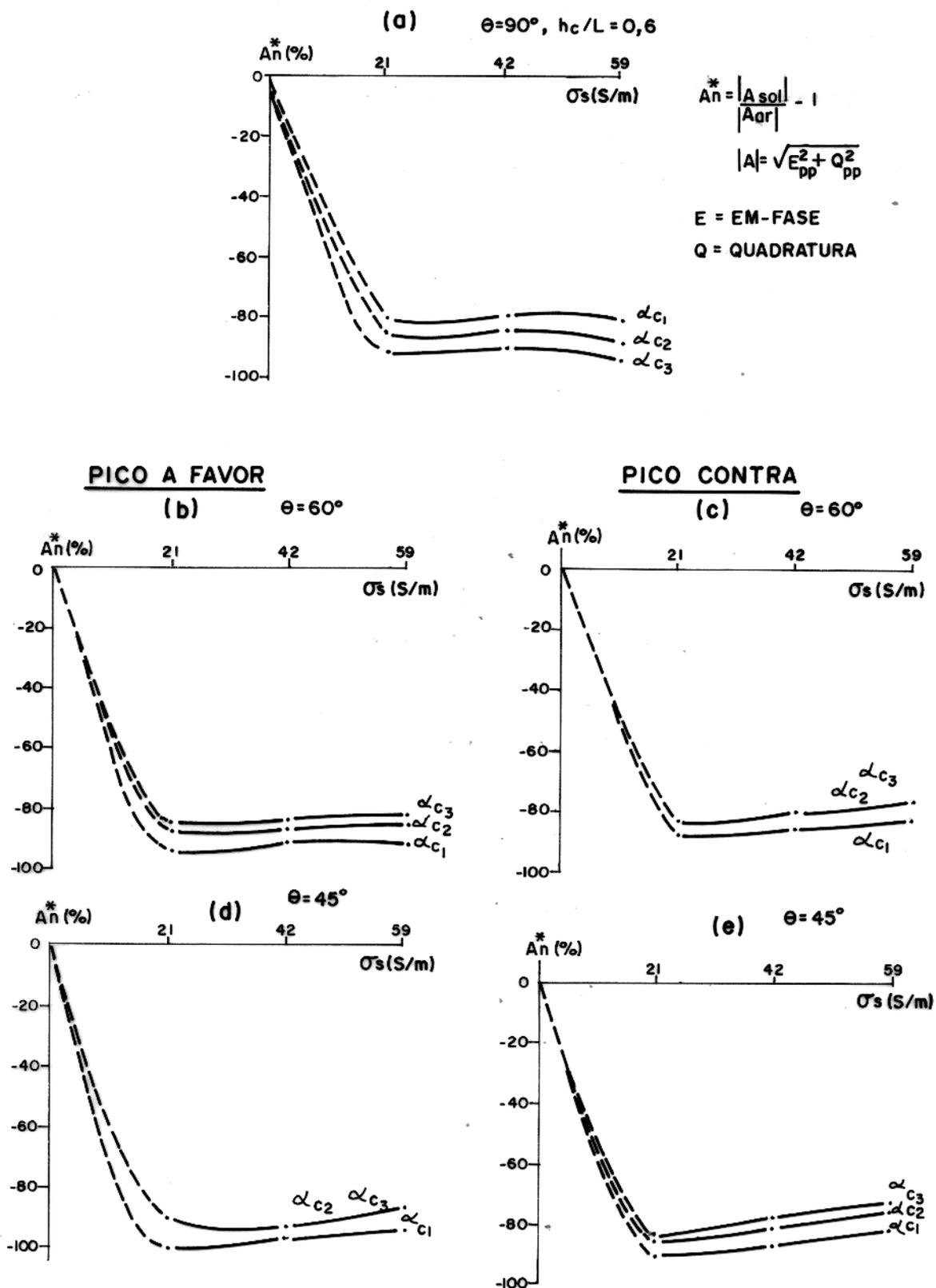


FIG. 22: VARIÇÃO DE MÓDULO DE ANOMALIA NORMALIZADA An^* COM σ_s , EM FUNÇÃO DE α_c ; PARA $\theta = 90^\circ, 60^\circ$ e 45° .

MANTO CONDUTIVO (SITUAÇÃO 2) QUADRATURA

$\alpha_{c3} = 131.9$ $h_c/L = 0.2$ $\theta = 45^\circ$

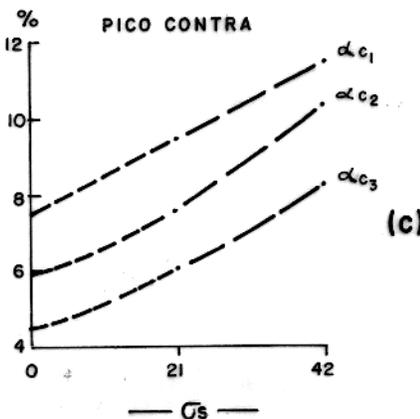
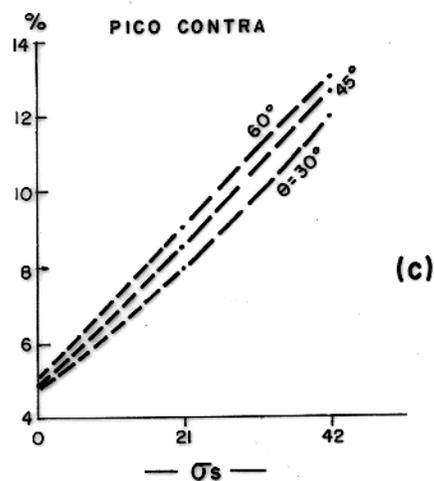
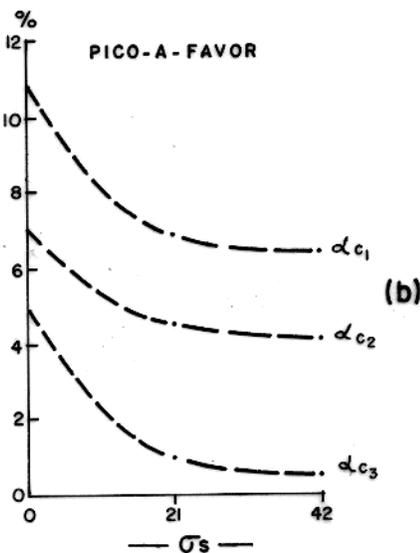
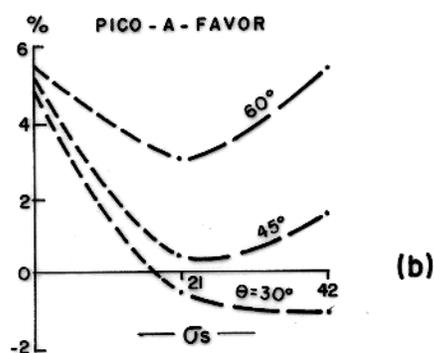
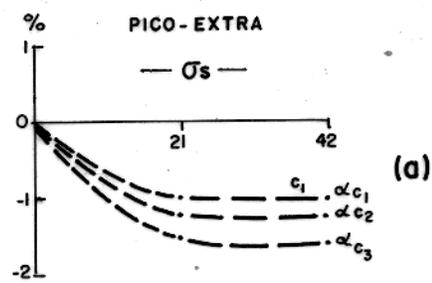
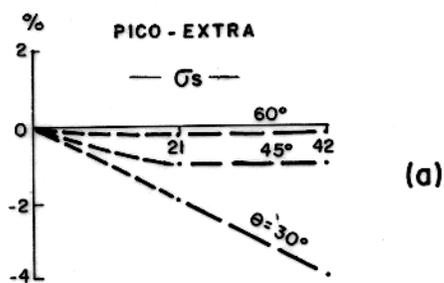


FIG. 23

FIG. 24

FIG. 23 E 24 - VARIAÇÕES DOS PICOS: EXTRA, A-FAVOR E CONTRA COM O AUMENTO DE σ_s EM FUNÇÃO DE θ E α_c RESPECTIVAMENTE.

MANTO CONDUTIVO (SITUAÇÃO 2)

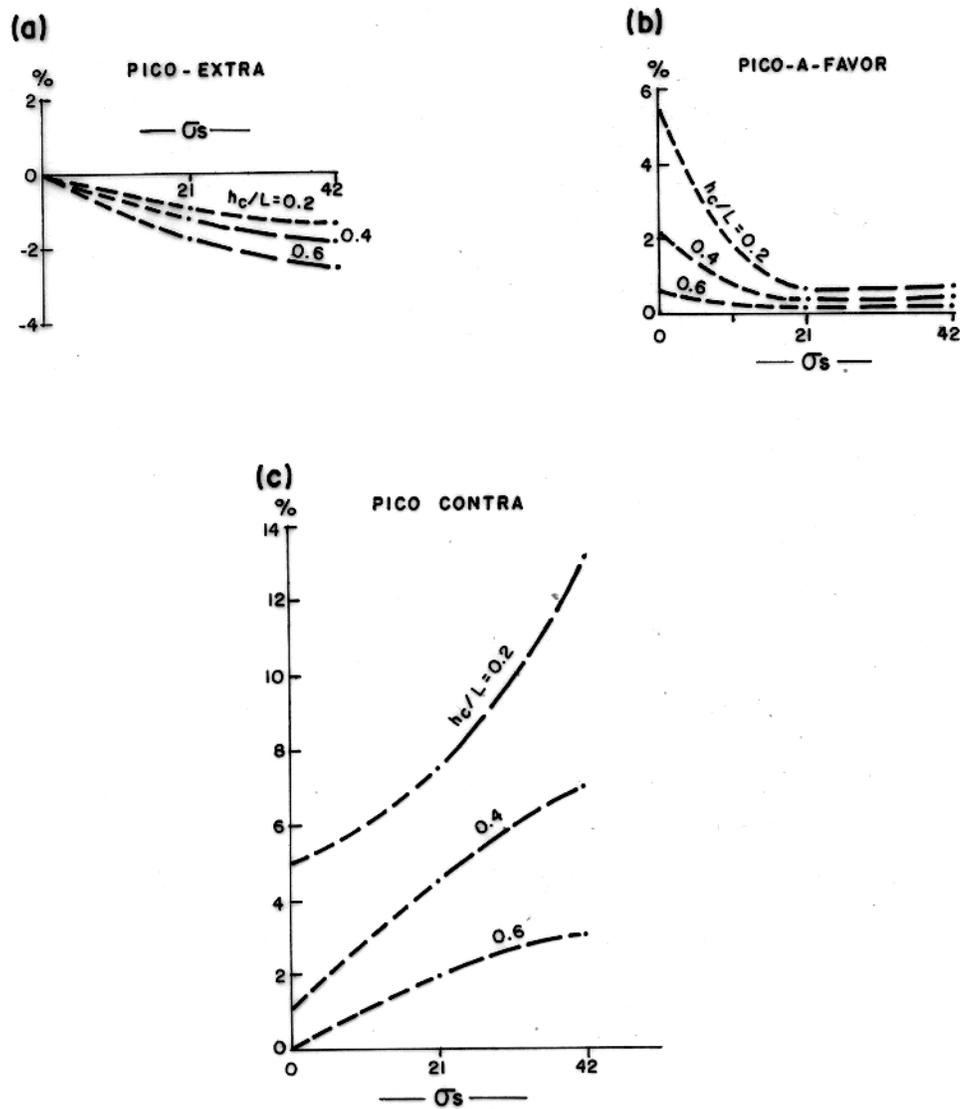
 $\alpha_{c3} = 131.9$ $\theta = 45^\circ$ QUADRATURA

FIG. 25 - VARIACÃO DOS PICOS: EXTRA, A-FAVOR E CONTRA COM O AUMENTO DE σ_s EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE h_c/L .

5.2.3 Amplitude normalizada A_n

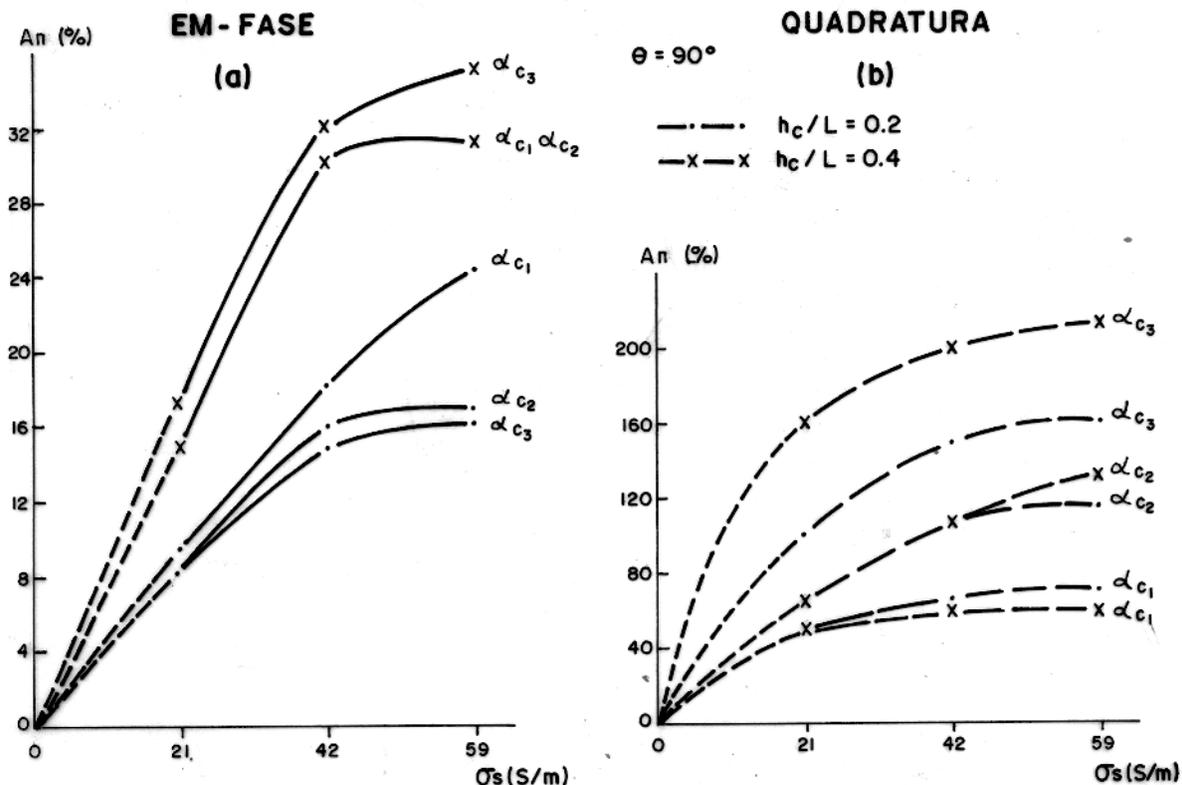
Com o aumento de σ_s , a em-fase cresce em todas as inclinações e profundidades de corpo, ocorrendo em ambos os picos a-favor e -contra. No pico-contra o crescimento maior ocorre nos altos valores de α_c e maior profundidade, enquanto no pico-a-favor ocorre nos baixos valores de α_c e pequenas profundidades de corpo, figuras 26(a,c); 27(a,c); 28(a,c) e 29a.

Na quadratura o pico-contra se comporta de modo análogo ao de em-fase, enquanto o pico-a-favor decresce e é maior nos altos valores de α_c e maior profundidade, figuras 26(b, d) 27(b,d); 28(b,d) e 29b.

5.2.4 Módulo de amplitude normalizada A_n *

Com o aumento de σ_s do manto-condutivo, o módulo cresce em todas as inclinações de corpo e profundidade, e em ambos os picos a-favor e -contra. Além disso esse crescimento é maior nos altos valores de α_c e em maiores profundidades à exceção no pico-contra onde o maior crescimento ocorre em menores valores de α_c , figuras 30(a,b,c,d) e 31(a,b,c).

MANTO CONDUTIVO (SITUAÇÃO 2)



PICO - A - FAVOR

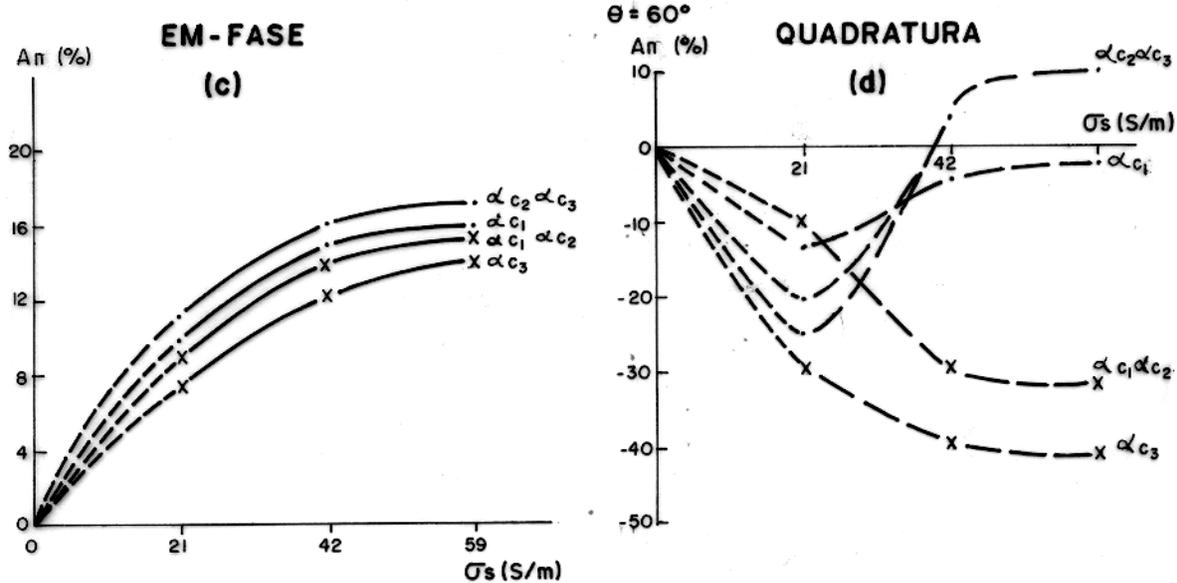


FIG. 26:- VARIAÇÃO DA AMPLITUDE NORMALIZADA A_n COM σ_s , EM FUNÇÃO DE α_c E h_c/L PARA $\theta = 90^\circ$ E $\theta = 60^\circ$.

MANTO CONDUTIVO (SITUAÇÃO 2)

PICO-A-FAVOR

--- $h_c/L = 0.2$ -x- $h_c/L = 0.4$

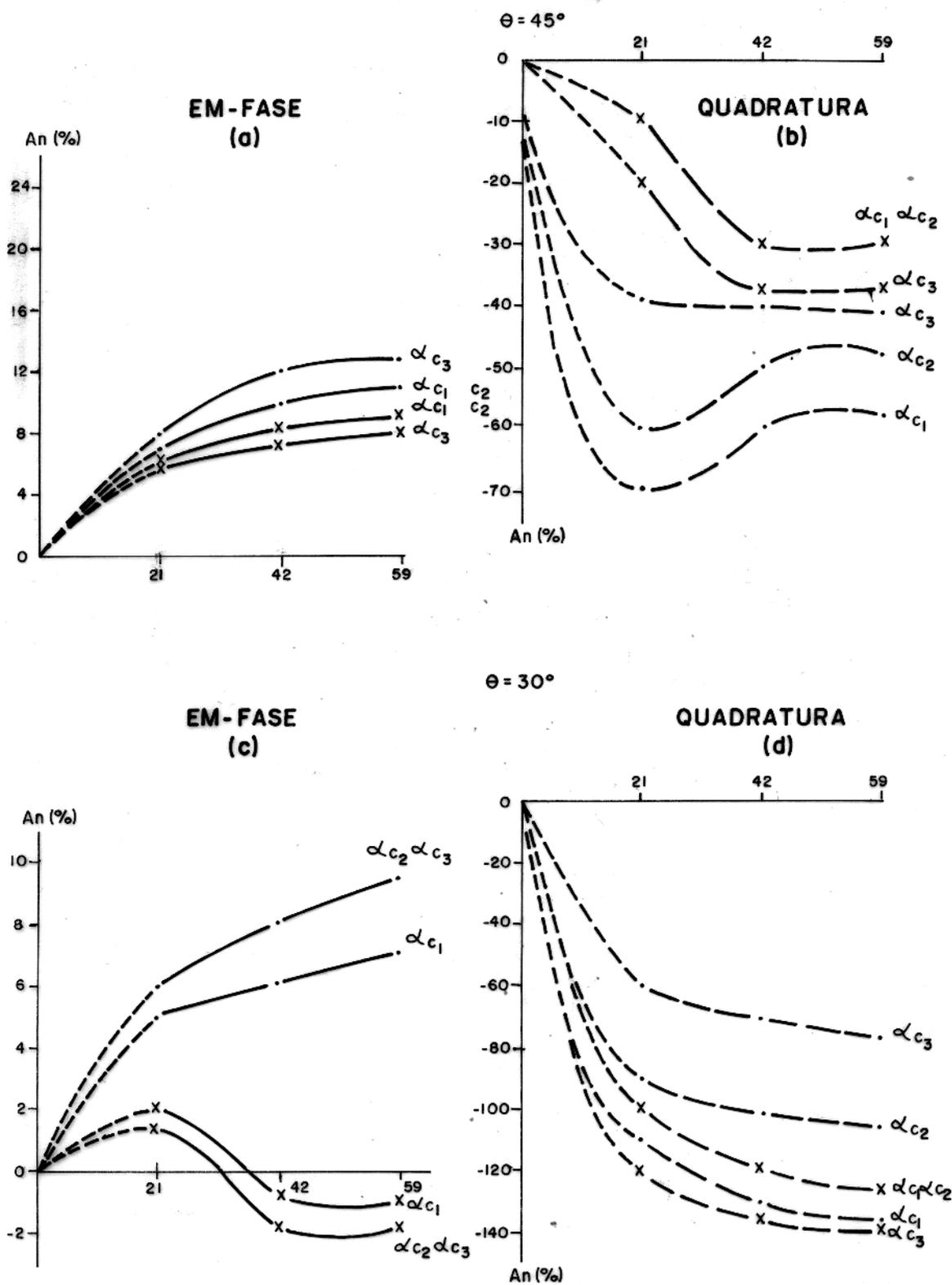


FIG.27 - VARIAÇÃO DA AMPLITUDE NORMALIZADA A_n COM σ_c EM FUNÇÃO DE α_c , h_c/L PARA $\theta = 45^\circ$ E $\theta = 30^\circ$.

MANTO CONDUTIVO (SITUAÇÃO 2)

PICO CONTRA

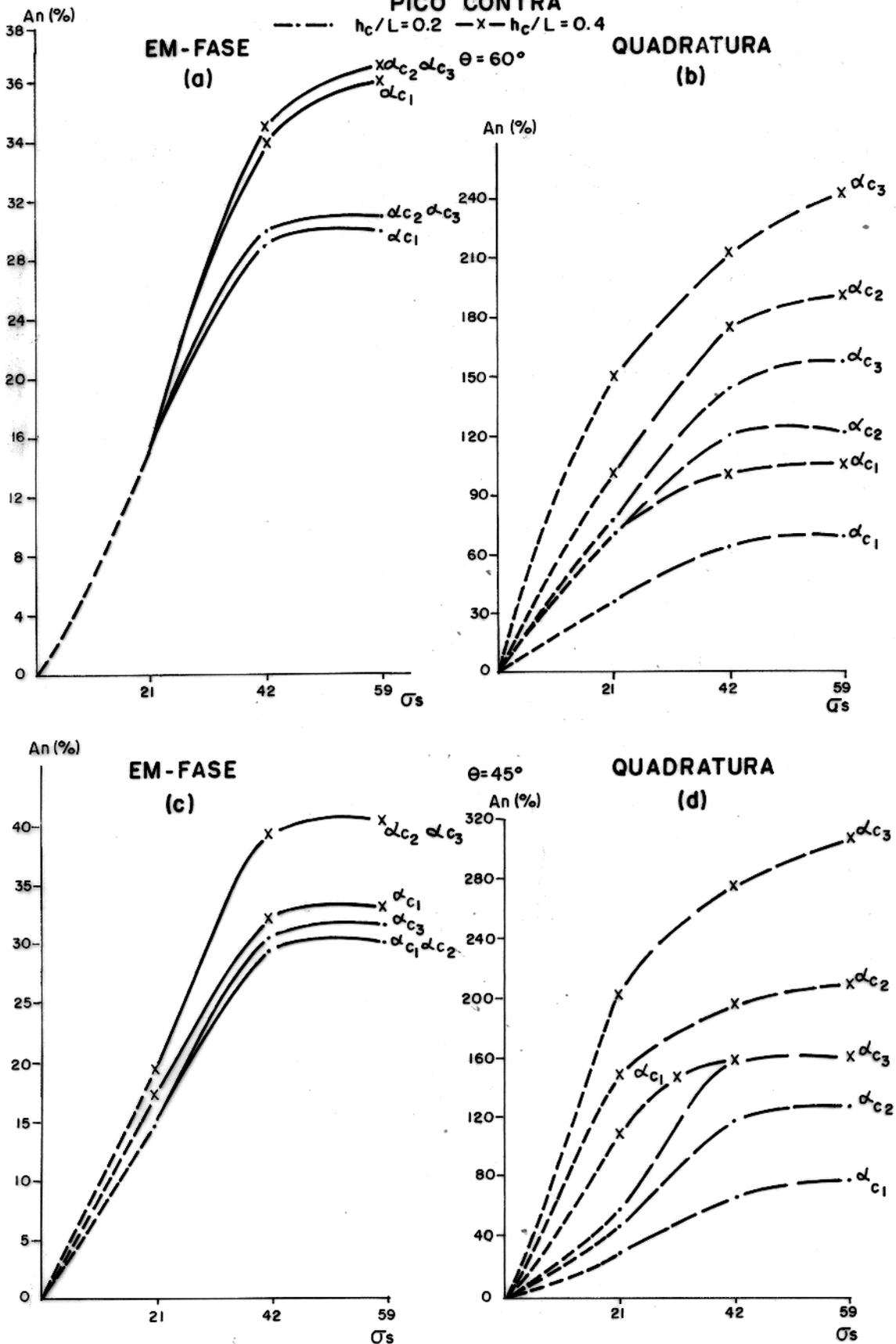


FIG. 28 - VARIÇÃO DA AMPLITUDE NORMALIZADA A_n COM σ_s , EM FUNÇÃO DE α_c E h_c/L PARA $\theta = 60^\circ$ E $\theta = 45^\circ$.

MANTO CONDUTIVO (SITUAÇÃO 2)

PICO CONTRA

$\theta = 30^\circ$

$\cdots h_c/L = 0.2$ $\text{---} \times \text{---} h_c/L = 0.4$

EM-FASE

QUADRATURA

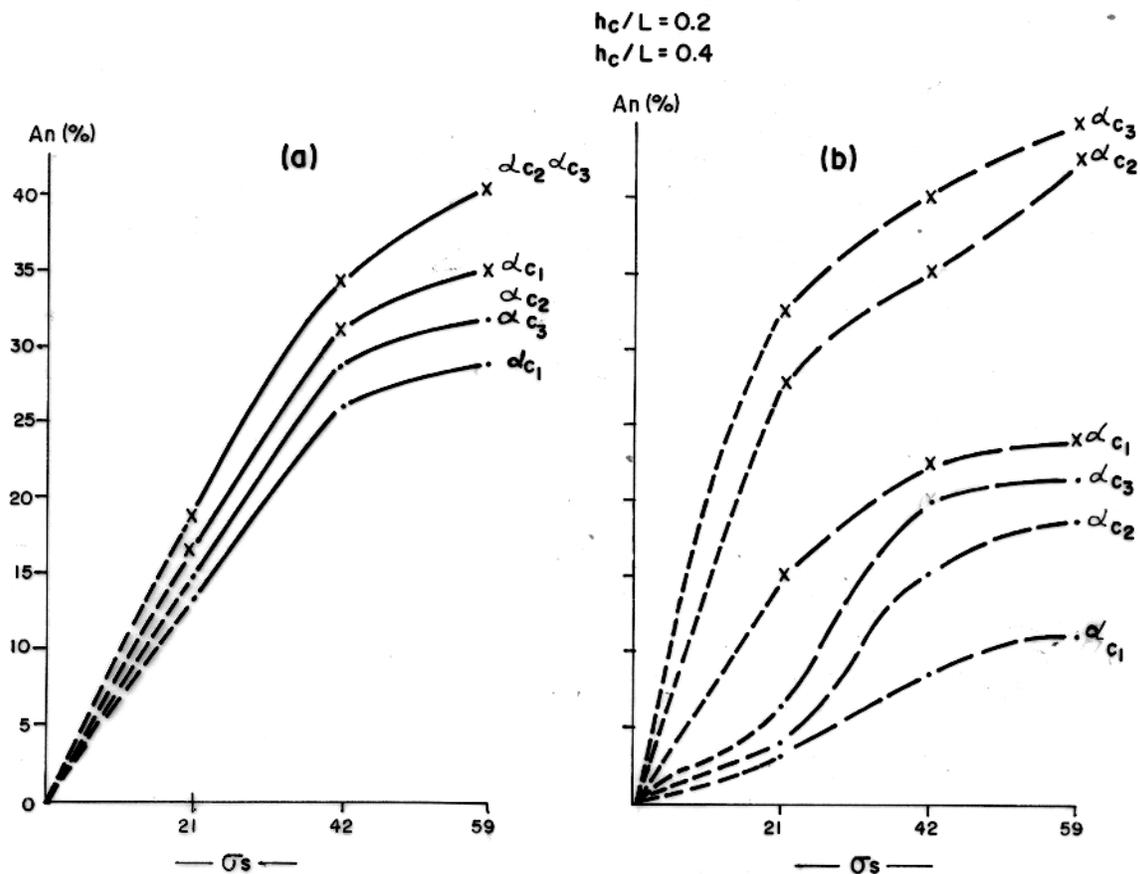


FIG. 29 - VARIÇÃO DA AMPLITUDE NORMALIZADA An , COM σ_s EM FUNÇÃO DE α_c E h_c/L PARA $\theta = 30^\circ$.

MANTO CONDUTIVO (SITUAÇÃO 2)
PICO-A-FAVOR

--- $h_c/L=0.2$ —x— $h_c/L=0.4$

$$An^* = \frac{|A_{Sol}|}{|A_{Ar}|} - 1$$

$$|A| = \sqrt{E_{pp}^2 + Q_{pp}^2}$$

E_{pp} - Em - fase
 Q_{pp} - Quadratura

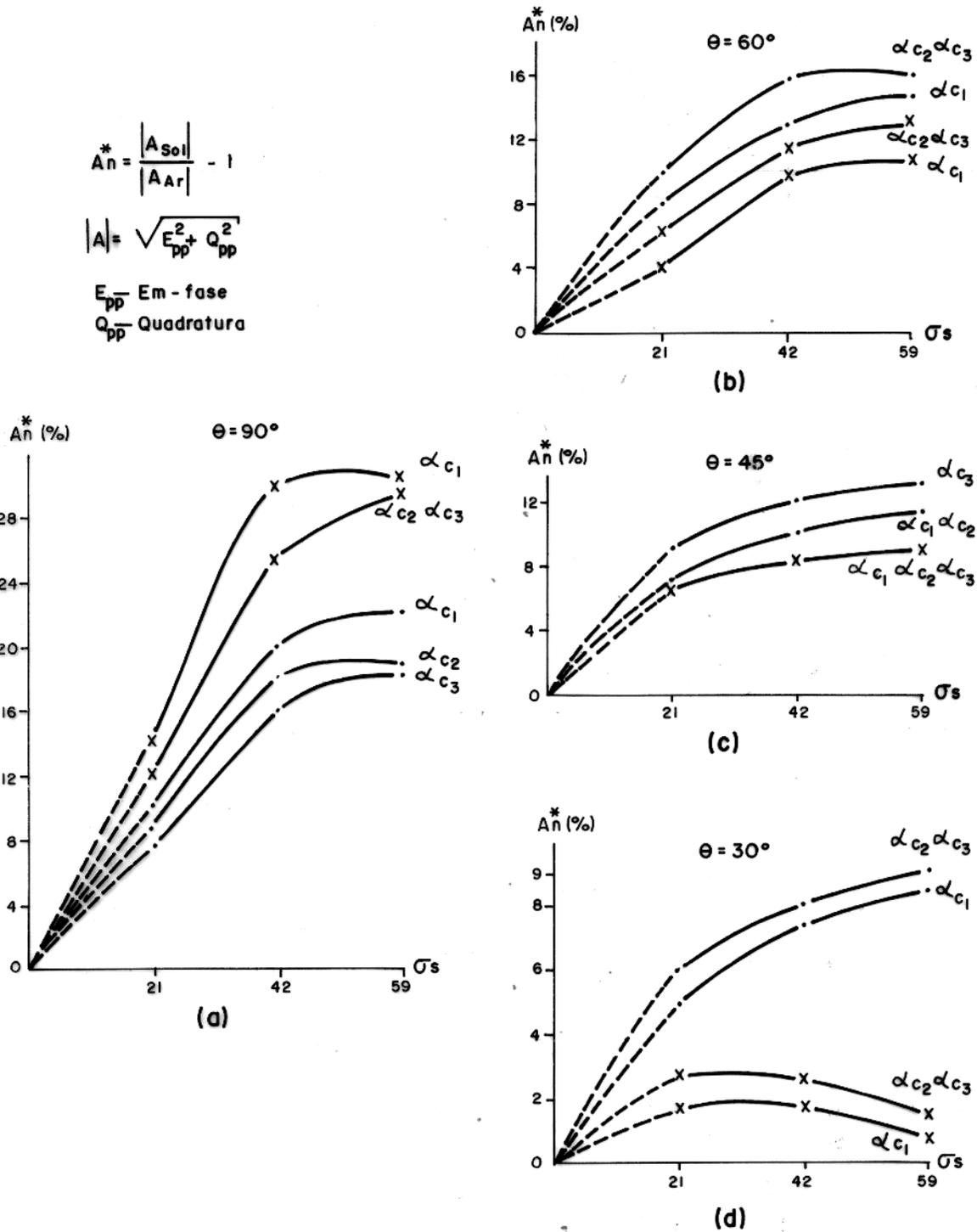


FIG. 30 - VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ANOMALIA NORMALIZADA An^* COM σ_s , EM FUNÇÃO DE α_c E h_c/L PARA $\theta=90^\circ$, $\theta=60^\circ$, $\theta=45^\circ$ E $\theta=30^\circ$.

MANTO CONDUTIVO (SITUAÇÃO 2)

PICO CONTRA

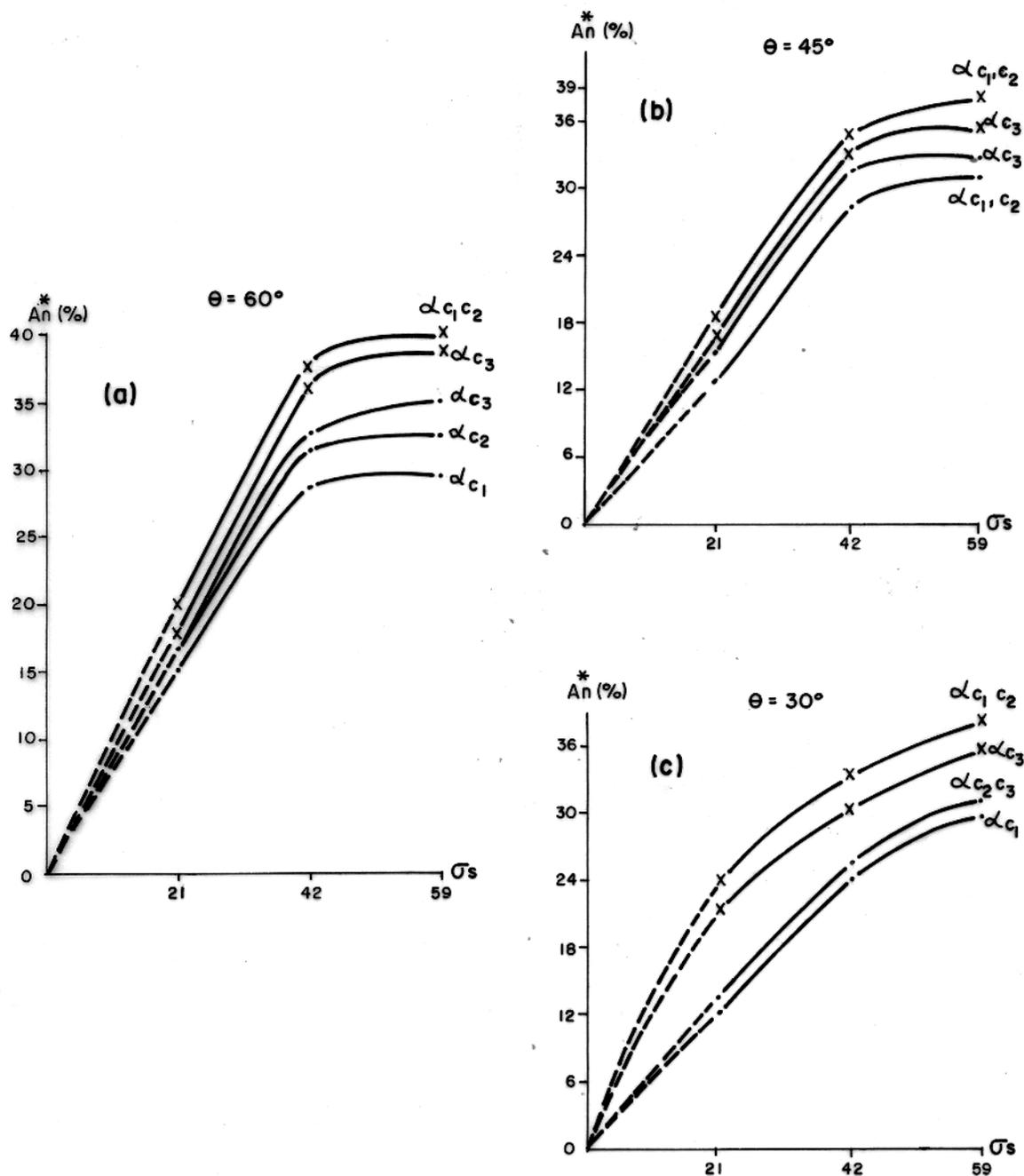


FIG. 31 - VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ANOMALIA NORMALIZADA An^* COM σ_s , EM FUNÇÃO DE α_c E h_c/L PARA $\theta = 60^\circ$, $\theta = 45^\circ$ E $\theta = 30^\circ$.

6. Modificações de anomalias EM

6.1 Causas de Transformação de Anomalias EM

- a) O campo primário sofre rotação de fase e uma atenuação de amplitude quando atravessa o manto condutivo. O mesmo ocorre com o campo secundário antes de chegar ao receptor.
- b) Ocorre interação entre as correntes induzidas no corpo e no manto. A medida que inclinamos menos o corpo esta interação vai se tornando maior isto explica o aparecimento de pico-extra na quadratura e outros fenômenos em corpos menos inclinados. No caso contrário quando o corpo fica mais vertical, essa interação é mínima visto que no manto o sentido de corrente é horizontal e no corpo vertical.
- c) Redistribuição de correntes
- c.1) Quando um corpo de condutividade maior é colocado num manto, existe uma canalização de corrente no corpo havendo portanto uma maior concentração. Conseqüentemente, aumenta a densidade de corrente e a anomalia aumenta com mudança de fase anti-horária, isto em função de; 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. Onde δ é a profundidade de penetração do campo magnético em um condutor, dada por:
- $$\delta = 503.3(1/f\sigma)^{1/2}$$
- O mesmo ocorrendo com o campo secundário ao atravessar o manto antes de alcançar o receptor.
- c.2) Na interface entre o meio condutivo e o corpo resistivo, ocorre uma concentração de corrente no meio condutivo próximo às bordas do corpo resistivo em função do desvio de corrente pelo corpo.

Quando um corpo condutivo revestido por uma película resistiva é colocado numa solução condutiva, existe um desvio de corrente tendendo haver uma concentração destas na solução próximas às bordas da película.

Além disso também ocorre interação entre estas correntes concentradas, assim como entre correntes induzidas no corpo.

Os fenômenos citados nos itens a) e b) são responsáveis pelas modificações de anomalias no caso de manto-indutivo (situação-1), quando o corpo estava totalmente fora do manto. Logo para o manto-indutivo (situação-2) os fenômenos responsáveis pelas modificações são, além dos itens a) e b) também o item c.2. Enquanto para o manto-condutivo ocorrem os fenômenos a), b) e c.1 .

Para estudar o grau de interação entre as correntes induzidas no corpo e manto, procuramos retirar os efeitos de concentração de correntes nas bordas e anomalias de corpo. Com este objetivo colocamos uma placa de acrílico na solução nas mesmas situações de corpo revestido de película, para representar as concentrações de correntes nas bordas. Subtraímos das anomalias obtidas com manto-indutivo (situação -2) as de ausência de manto e placa de acrílico nas mesmas condições, obtendo assim o efeito de interação de correntes induzidas no corpo com as correntes induzidas no manto e as correntes concentradas no manto próximo às bordas de película resistiva. Caracterizando então a rotação de fase e pico-extra na quadratura figuras 32 e 33.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 Efeitos Observados

7.1.1 Manto-indutivo

Para todas as profundidades do corpo as anomalias em-fase e quadratura obtidas para várias inclinações são levemente atenuadas, isto nos faz pensar que o corpo esteja a uma profundidade maior que a verdadeira.

Nos altos valores dos números de indução do corpo e do manto e em baixas inclinações, a rotação de fase ocorre no sentido horário, sendo mais intensa nos altos valores de α_c , figura 34. Isto nos leva a crer que o corpo é mais condutivo do que realmente é.

Por outro lado aparece o pico-extra no perfil de quadratura com diminuição de mergulho e aumento dos números de indução do corpo e do manto. Assim concluímos que o pico-extra é um bom indicador dos números de indução e de inclinação do corpo na presença de manto.

7.1.2 Manto-condutivo

Em todas as profundidades e inclinações estudadas, as anomalias em-fase e quadratura são maiores que as obtidas na ausência de manto. Assim podemos supor que o corpo esteja a uma profundidade inferior à verdadeira.

Com o aumento dos números de indução do corpo e do manto e em baixas inclinações, também se verifica o surgimento do pico-extra. Ocorre rotação de fase no sentido anti-horário, sendo mais intensa nos menores valores do número de indução do corpo. Isto nos faz acreditar que o corpo seja menos condutivo, figura 34.

7.2 Recomendações

Tendo em vista o exposto acima não podemos deixar de levar em conta a presença de manto, nas interpretações EM de corpo. Além disso identificar condições de corpo e manto e usar diagramas de Argand correspondente a essas situações.

Recomendamos estudos para manto indutivo e corpo resistivo, utilizar vários valores de número de indução do corpo, e desenvolver um esquema de interpretação com presença de manto para várias situações de manto e corpo. Além disso estudar para outros sistemas de bobinas particularmente os de acoplamento mínimo que tem resposta zero para os corpos horizontais.

Também podem ser representados mais diagramas de Argand, nas situações estudadas e testar várias geometrias de corpos tais como: cilindros, esferas e discos. Além disso estudar para manto não uniforme.

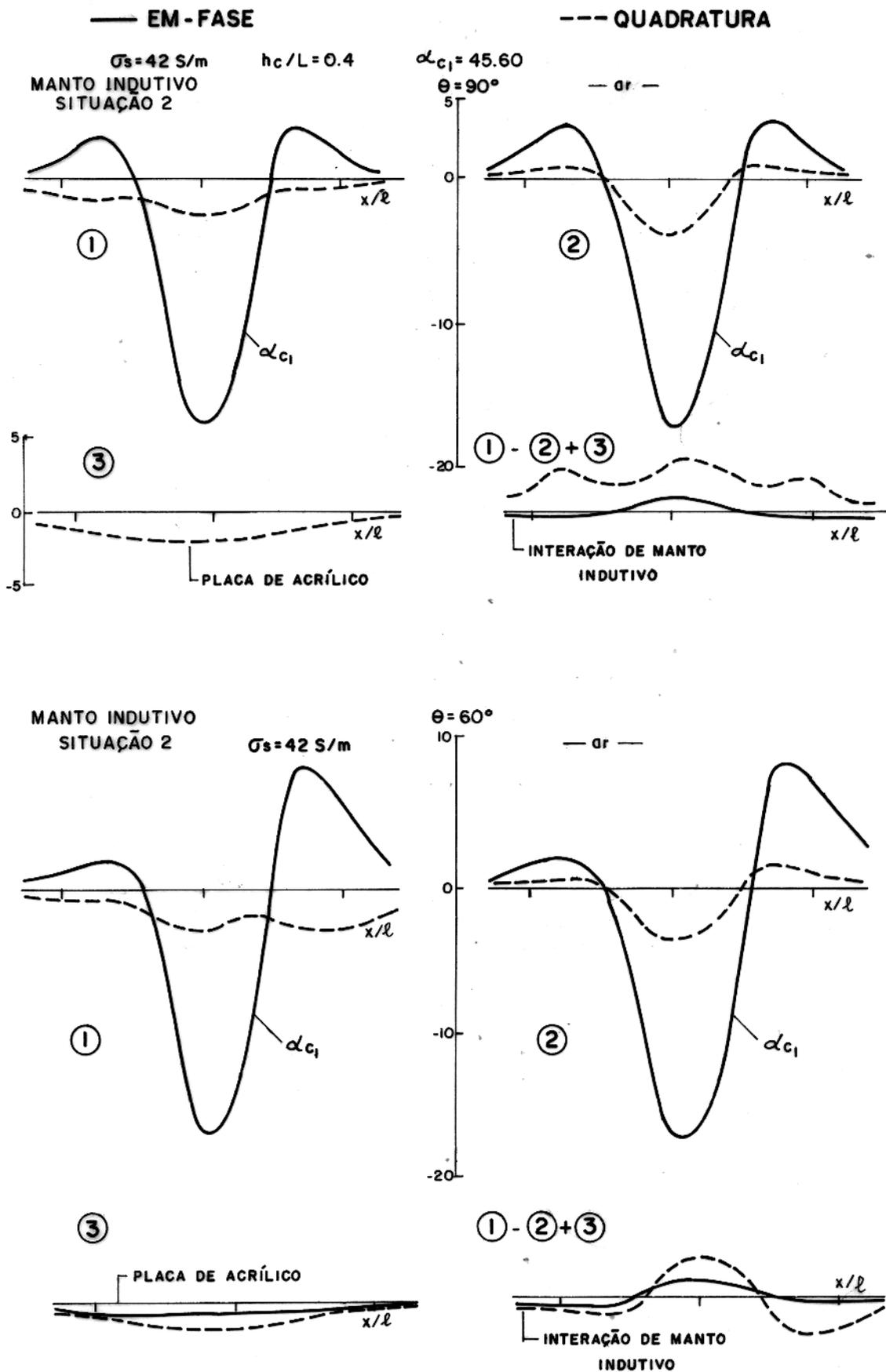


FIG. 32 - DETERMINAÇÃO DE INTERAÇÃO DE CORRENTES INDUZIDAS NO CORPO E MANTO E, AS CONCENTRADAS NO MANTO PRÓXIMO ÀS BORDAS DA PELÍCULA RESISTIVA.

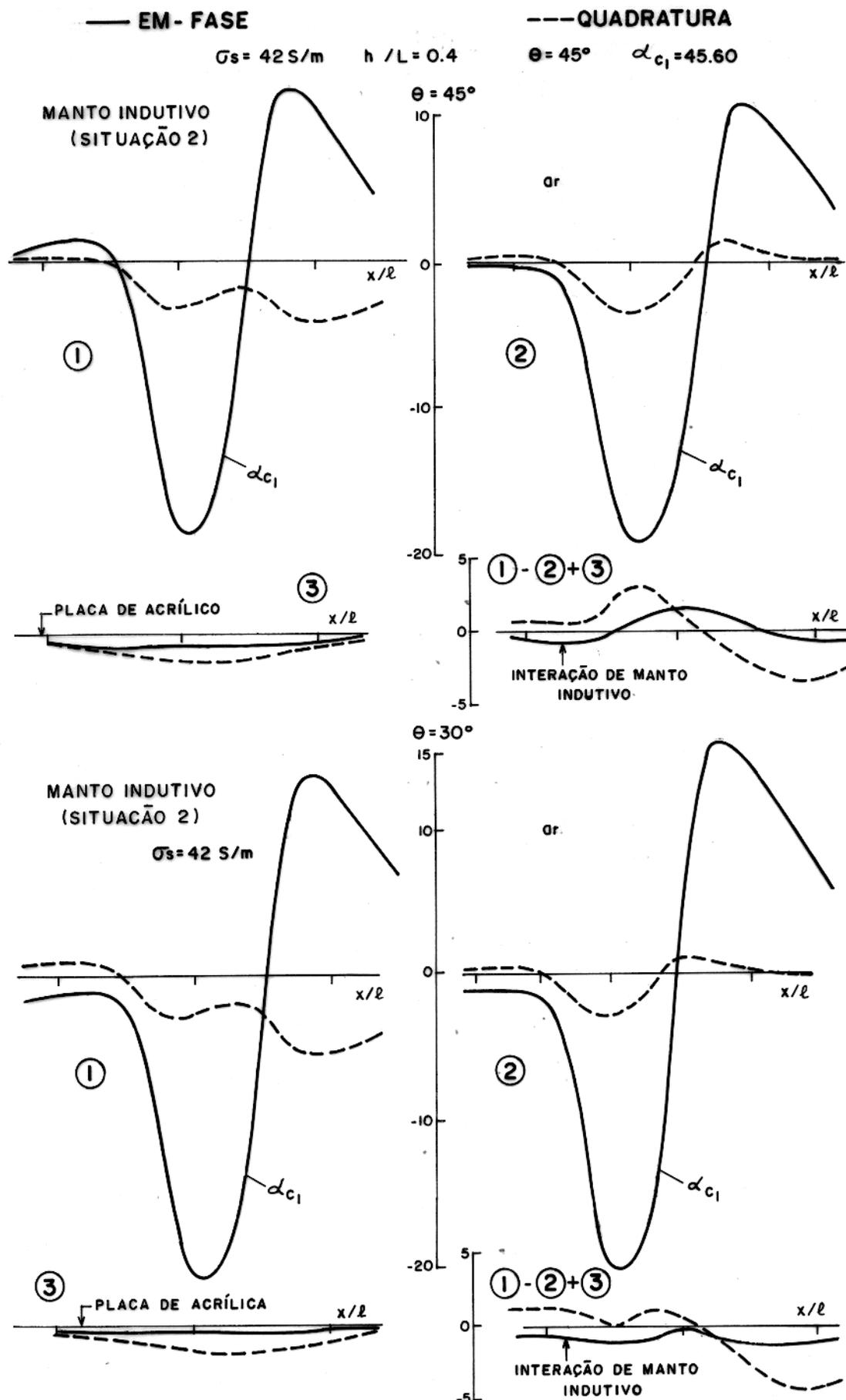


FIG. 33 - DETERMINAÇÃO DE INTERAÇÃO DE CORRENTES INDUZIDAS NO CORPO E MANTO E, AS CONCENTRADAS NO MANTO PRÓXIMO ÀS BORDAS DA PELÍCULA RESISTIVA.

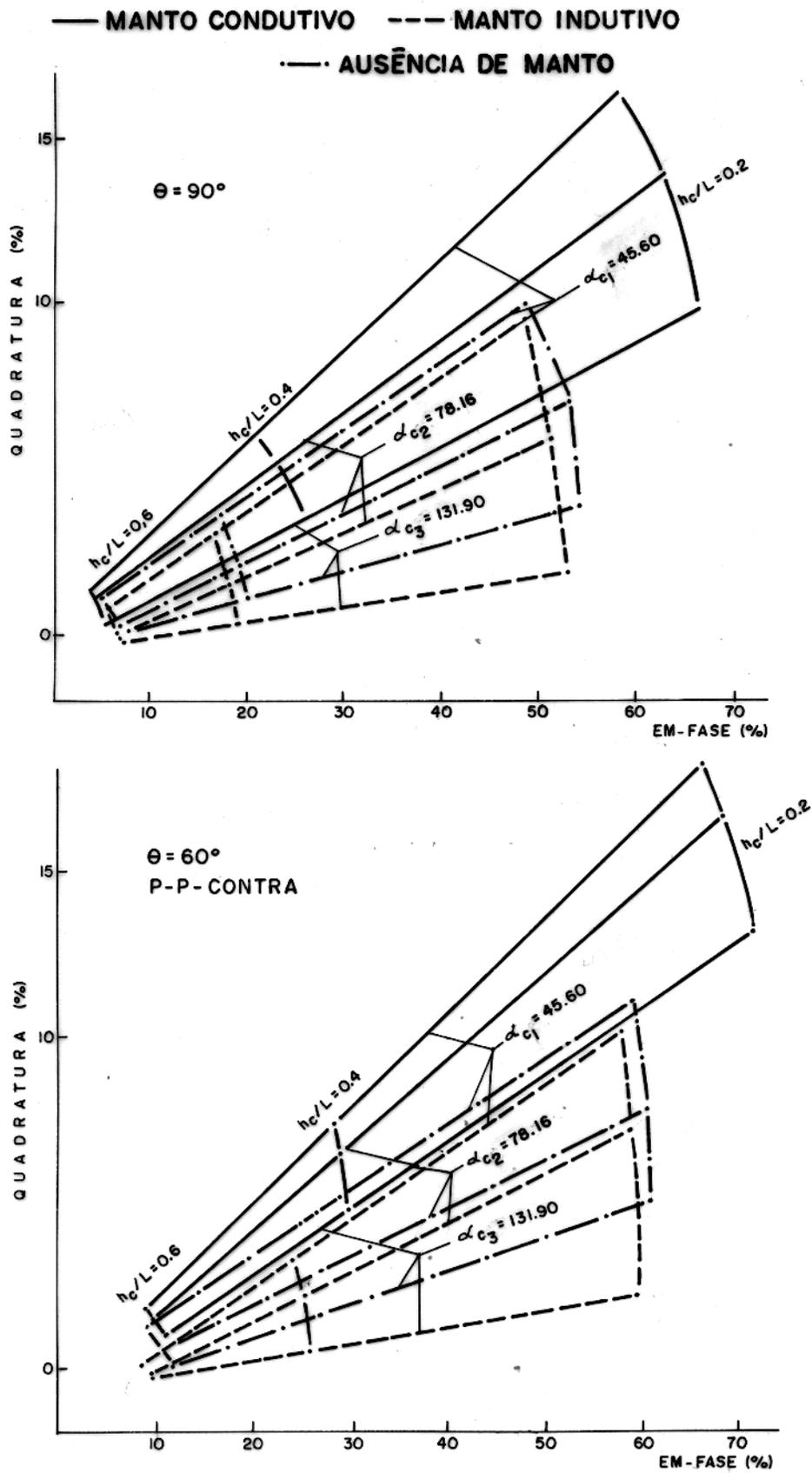


FIG. 34 - DIAGRAMA DE ARGAND CONSTRUÍDO COM VALORES PICO-A-PICO, $\alpha_m = 0.5$.

8. BIBLIOGRAFIA

- CABALLERO, A.- 1983 - Resposta HLEM de um cilindro horizontal envolto por um halo condutor obtido por modelamento analógico. Tese de Mestrado, Belém, UFPa - NCGG, 77p.
- D'YAKONOV, B.P. - 1959a - The diffraction of electromagnetic waves by a circular cylinder in a homogeneous half-space: Bull (Izv) Acad. Sci. U.S.S.R., Geophys Ser. No.9, 950-955.
- 1959b - The diffraction of electromagnetic waves by a sphere located in a half-space: Bull(Izv) Acad.Sci.U.S.S.R. Geophys Ser. No. 11, 1120-1125.
- GAUR, V.K. - 1959 - Model experiments simulating conditions encountered in airborne electromagnetic prospecting: Ph.D. thesis, University of London, 189p
- GRANT, F.S.; WEST,G.F. - 1965 - Interpretation theory in applied Geophysics. New York, Mcraw - Hill Book Company, 548p.
- GUPTA, SARMA,D.; MARU,V.M.- 1971- A study of some effects of conducting host rock with a new modelling apparatus, Geophysics, 36: 166-183.
- JOSHI,M.S.; GUPTA,O.P.; NEGI,J.G. - 1984 - Scale model response of a thin vertical conductor below a conductive, inductive or laterally inhomogeneous overburden layer. Geophysics 49(12) : 2159-2165.
- LAJOIE,J.J.; WEST,G.F.- 1977- Two selected field examples of electromagnetic anomalies in a conductive environment. Geophysics, 42 : 655-660.
- LAJOIE, J.J.-1973- The electromagnetic response of a conductive inhomogeneity in a layered earth. Ph.D. thesis, University of Toronto, 170p.

- LAMONTAGNE, Y.- 1975 - Applications of wideband, time domain E.M. measurements in mineral exploration. Ph.D. thesis University of Toronto. 329p
- LOWRIE, W.; WEST, G.F. - 1965 - The effect of a conducting overburden on electromagnetic prospecting measurements. Geophysics, 30 : 624-632.
- NEGI, J.G. - 1967 - Electromagnetic screening due to a disseminated spherical zone over a conducting sphere. Geophysics, 32(1): 69-87.
- PALACKY, G.J. - 1975 - Interpretation of INPUT AEM measurements in areas of conductive overburden. Geophysics, 40: 490-502.
- PARASNIS, D.S. - 1971 - Analysis of some multi-frequency, multi-separation electromagnetic surveys. Geop. Prosp. 19:163-179.
- PODDAR, M. - 1975 - Some experimental studies on the effect of a screen on the electromagnetic response of a cylinder. Geopl., 13: 57-67.
- PRESTON, B. - 1975 - Review-difficulties for the electromagnetic method in Australia: Geoexpl., 13: 29-43.
- SILVA, L.M. - 1981 - Efeitos do manto de intemperismo sobre anomalias eletromagnéticas provocadas por corpos tabulares inclinados um estudo através de modelamento reduzido. Tese de mestrado, Belém, UFPa - NCGG. 115p.
- SILVA, L.M.; VERMA, O.P. - 1986 - Efeitos do manto de intemperismo sobre anomalias eletromagnéticas HLEM geradas por corpos tabulares inclinados. Revista Brasileira de Geociências, 16(3): 285-293.
- SINCLAIR, G. - 1948 - Theory of models of electromagnetic systems. Proc. IRE, 46: 1364-1370.

VERMA, O.P.- 1972 - Electromagnetic model experiments simulating conditions encountered in geophysical prospec.: Ph.D. thesis, University of Rookee, India. 143p.

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 : 753- 759.