

**EFEITO DA TOPOGRAFIA EM SONDAGENS
ELETRÔMAGNÉTICAS BIDIMENSIONAIS
NOS DOMÍNIOS DA FREQUÊNCIA E DO TEMPO**

por

SÉRGIO BROCHADO RIBEIRO DE BARROS

Geólogo (Universidade Estadual Paulista/UNESP – 1987)

Tese submetida como requisito parcial ao grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

em

GEOFÍSICA

ao

Colegiado do Curso de Pós-Graduação em

Geofísica

da

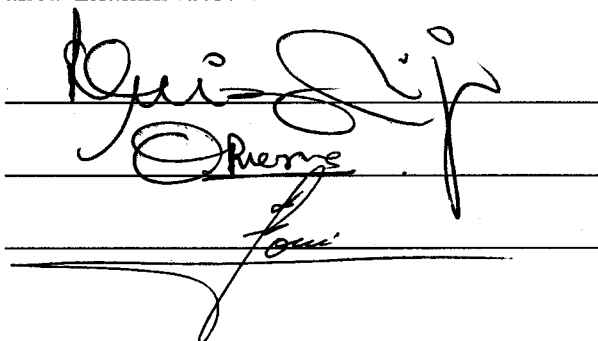
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Banca Examinadora :

Dr. Luis Rijo (Orientador)

Dr. Om Prakash Verma

Dr. Milton José Porsani



The image shows three horizontal lines representing the signature area for the examiners. The first line contains a large, stylized signature that appears to be 'Luis Rijo'. The second line contains a signature that appears to be 'Om Prakash Verma'. The third line contains a signature that appears to be 'Milton José Porsani'.

Aprovado : 28/11/1990

BARROS, Sérgio Brochado Ribeiro de. Efeito da topografia em sondagens eletromagnéticas bidimensionais nos domínios da frequência e do tempo. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1990. 61 p. il.

Tese (Mestrado em Geofísica) – Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa., 1990.

**1. SONDAGENS ELETROMAGNÉTICAS. 2. MODELA-
MENTO NUMÉRICO. 3. EFEITOS TOPOGRÁFICOS NO
MAGNETOTELÚRICO.**

ÍNDICE

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
CAPÍTULO 1 Introdução	1
1.1 Solução por Elementos Finitos do Modelo 2D–2D, Modo TE	2
1.2 Teste do Algoritmo Desenvolvido	4
CAPÍTULO 2 Efeito da Topografia no Domínio da Frequência	10
2.1 Vale num Meio Homogêneo (Modelo 1)	10
2.1.1 Análise das Respostas do Modelo 1	12
2.2 Vale com Corpo num Meio Homogêneo	15
2.2.1 Vale com Corpo Deslocado à Esquerda (Modelo 2A)	15
2.2.2 Vale com Corpo Centralizado (Modelo 2B)	20
2.2.3 Análise das Respostas dos Modelos 2A e 2B	20
2.3 Colina num Meio Homogêneo (Modelo 3)	23
2.3.1 Análise das Respostas do Modelo 3	23
2.4 Colina com Corpo num Meio Homogêneo	26
2.4.1 Colina com Corpo Deslocado à Esquerda (Modelo 4A)	26
2.4.2 Colina com Corpo Centralizado (Modelo 4B)	29
2.4.3 Análise das Respostas dos Modelos 4A e 4B	33

2.5	Declive num Meio Homogêneo (Modelo 5)	33
2.5.1	Análise das Respostas do Modelo 5	33
2.6	Aclive num Meio Homogêneo	36
2.6.1	Análise das Respostas do Modelo 6	36
CAPÍTULO 3	Efeito da Topografia no Domínio do Tempo	39
3.1	Vale num Meio Homogêneo (Modelo 1)	39
3.1.1	Análise das Respostas Transientes do Modelo 1	40
3.2	Vale com Corpo num Meio Homogêneo (Modelo 2)	40
3.2.1	Vale com Corpo Deslocado à Esquerda	40
3.2.2	Vale com Corpo Centralizado (Modelo 2B)	41
3.2.3	Análise das Respostas Transientes dos Modelos 2A e 2B	43
3.3	Colina num Meio Homogêneo (Modelo 3)	43
3.3.1	Análise das Respostas Transientes do Modelo 3	44
3.4	Colina com Corpo num Meio Homogêneo	44
3.4.1	Colina com Corpo Deslocado à Esquerda (Modelo 4A)	44
3.4.2	Colina com Corpo Centralizado (Modelo 4B)	44
3.4.3	Análise das Respostas dos Modelos 4A e 4B	46
CAPÍTULO 4	Conclusão	47
4.1	Desenvolvimento do Algoritmo para Modelos 2D–2D, Modo TE	47
4.2	Efeito da Topografia no Domínio da Freqüência	47
4.2.1	Meio Homogêneo	47
4.2.2	Corpo Condutivo num Meio Homogêneo	48

4.3	Efeito da Topografia no Domínio do Tempo	49
4.3.1	Meio Homogêneo	49
4.3.2	Corpo Condutivo num Meio Homogêneo	49
4.4	Modos de se Evitar o Efeito da Topografia	50
	AGRADECIMENTOS	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
	APÊNDICE	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 1	Parte central da malha utilizada para o teste com os resultados de Hohmann(1971) ...	5
Fig 2a	Comparação dos resultados obtidos com os de Hohmann(1971)	6
Fig 2b	Comparação dos resultados obtidos com os de Adhijaja et al (1985)	6
Fig 3a	Teste da resolução da equação diferencial do modelo 2D-2D, Modo TE, via campo elétrico secundário, quando a heterogeneidade é infinitamente resistiva	8
Fig 3b	Comparação dos resultados obtidos na Fig 3a com os obtidos resolvendo a mesma equação diferencial via campo elétrico total	8
Fig 4	Vale num meio homogêneo (Modelo 1)	11
Fig 5a	Efeito do vale na componente H_z para o modelo 1, onde o meio apresenta resistividades de 1000 e 100 Ω m	13
Fig 5b	Efeito do vale na componente H_z para o modelo 1, onde o meio apresenta resistividade de 10 Ω m	13
Fig 6a	Efeito da profundidade e inclinação do vale para o modelo 1 na componente H_z	14
Fig 6b	Efeito do vale na componente H_z para o modelo 1, utilizando as frequências de 1000 e 100 Hz	14
Fig 6c	Estabilidade numérica dos resultados	14
Fig 7	Vale com corpo deslocado à esquerda (modelo 2A)	16
Fig 8a	Efeito do vale na componente H_z para o modelo 2A, com o meio apresentando 1000 Ω m de resistividade	18
Fig 8b	Efeito do vale na componente H_z para o modelo 2A, com o meio apresentando 100 Ω m de resistividade	18
Fig 8c	Efeito do vale na componente H_z para o modelo 2A, com o meio apresentando 10 Ω m de resistividade	18

Fig 9a Efeito do vale na componente H_x para o modelo 2A, com o meio apresentando 1000 Ω m de resistividade	19
Fig 9b Estabilidade numérica dos resultados	19
Fig 10 Vale com corpo centralizado (modelo 2B)	21
Fig 11a Efeito do vale na componente H_z para o modelo 2B, com o meio apresentando 1000 Ω m de resistividade	22
Fig 11b Efeito do vale na componente H_x para o modelo 2B, com o meio apresentando 1000 Ω m de resistividade	22
Fig 12 Colina num meio homogêneo (modelo 3)	24
Fig 13a Efeito da colina na componente H_z para o modelo 3, com o meio apresentando 1000 e 100 Ω m de resistividade	25
Fig 13b Efeito da colina na componente H_z para o modelo 3, com o meio apresentando 10 Ω m de resistividade	25
Fig 14 Colina com corpo deslocado à esquerda (modelo 4A)	27
Fig 15a Efeito da colina na componente H_z para o modelo 4A, com o meio apresentando 1000 Ω m de resistividade	28
Fig 15b Efeito da colina na componente H_z para o modelo 4A, com o meio apresentando 100 Ω m de resistividade	28
Fig 16a Efeito da colina na componente H_z para o modelo 4A, com o meio apresentando 10 Ω m de resistividade	30
Fig 16b Efeito da colina na componente H_x para o modelo 4A, com o meio apresentando 1000 Ω m de resistividade	30
Fig 17 Colina com corpo centralizado (modelo 4B)	31
Fig 18a Efeito da colina na componente H_z para o modelo 4B, com o meio apresentando 1000 Ω m de resistividade	32

Fig 18b Efeito da colina na componente H_x para o modelo 4B, com o meio apresentando 1000 Ω m de resistividade	32
Fig 19 Declive num meio homogêneo (modelo 5)	34
Fig 20a Efeito do declive na componente H_z , com o meio apresentando 100 Ω m de resistividade	35
Fig 20b Efeito do declive na componente H_z , com o meio apresentando 10 Ω m de resistividade	35
Fig 21 Aclive num meio homogêneo (modelo 6)	37
Fig 22a Efeito do aclive na componente H_z , com o meio apresentando 100 Ω m de resistividade	38
Fig 22b Efeito do aclive na componente H_z , com o meio apresentando 10 Ω m de resistividade	38
Fig 23 Efeito do vale com 20 m de profundidade na resposta transiente do modelo 1	42
Fig 24 Efeito do vale com 80 m de profundidade na resposta transiente do modelo 1	42
Fig 25 Efeito do vale com 20 m de profundidade na resposta transiente do modelo 2A	42
Fig 26 Efeito do vale com 20 m de profundidade na resposta transiente do modelo 2B	42
Fig 27 Efeito da colina com 20 m de altura na resposta transiente do modelo 3	45
Fig 28 Efeito da colina com 80 m de altura na resposta transiente do modelo 3	45
Fig 29 Efeito da colina com 20 m de altura na resposta transiente do modelo 4A	45
Fig 30 Efeito da colina com 20 m de altura na resposta transiente do modelo 4B	45

**EFEITO DA TOPOGRAFIA EM SONDAGENS
ELETROMAGNÉTICAS BIDIMENSIONAIS
NOS DOMÍNIOS DA FREQUÊNCIA E DO TEMPO**
(TESE DE MESTRADO : NOVEMBRO/90)

SÉRGIO BROCHADO RIBEIRO DE BARROS

Orientador : Dr. Luiz Rijo

*Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFPa
Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brasil*

RESUMO

O efeito da topografia de um vale, uma colina, um declive e um aclave, em sondagens eletromagnéticas bidimensionais no domínio da frequência, causa uma variação nos valores da amplitude e da fase da componente H_z devido a um meio homogêneo. A amplitude é menos afetada que a fase. A parede do vale mais próxima da linha de corrente causa uma forte diminuição dos valores da fase, enquanto que a parede do vale mais distante da linha causa um forte aumento. Os efeitos de uma colina são opostos aos do vale. Os efeitos do declive e do aclave num meio homogêneo, são similares, respectivamente, aos observados pelas paredes do vale e da colina mais próximas da linha de corrente. A resposta de um corpo condutivo retangular num meio homogêneo próximo a uma linha de corrente sofre pequenas variações devido a presença de um vale ou de uma colina situada longe da linha de corrente. Porém, se essas feições topográficas estiverem sobre o corpo, elas afetam fortemente a fase e a amplitude da componente H_z e apenas a amplitude, no caso da componente H_x .

A resposta transiente não é afetada pela topografia para tempos muito baixos, pois nesse caso se investiga uma finíssima camada da superfície, assim como para tempos muito altos porque a profundidade de investigação é muito grande comparada com a dimensão da topografia. Para os modelos aqui estudados, a maior influência se dá para tempos intermediários, ao redor de 7 ms, ocasionando um retardo do ponto de "cross over" nas curvas de sondagens.

**TOPOGRAPHIC EFFECT ON BIDIMENSIONAL
FREQUENCY AND TIME DOMAIN
ELETROMAGNETIC SOUNDINGS**

(MASTER THESIS : NOVEMBER/90)

SÉRGIO BROCHADO RIBEIRO DE BARROS

Adviser : Dr. Luiz Rijo

Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/ UFPa

Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brazil

ABSTRACT

The topographic effects of a valley, a hill, a downward slope and an upward slope, on bidimensional frequency domain eletromagnetic soundings, cause a variation in the amplitude and the phase of H_z component due to a homogeneous medium. The amplitude is less affected than the phase. The wall of the valley nearer to the current line produces a reduction in the phase values while a farther wall causes an increase. The effects of a hill are opposite to that of a valley. The effects of a downward slope and of an upward slope in the homogeneous medium correspond to that of a single wall, nearer to the current line of the valley and of the hill respectively. The response of a conductive rectangular body placed in a homogeneous medium nearer to the current line sufferc small variations due to the presence of a valley or a hill farther away from the current source. However, if these topographic features lie above the body they affect strongly the phase and amplitude of H_z component and only the amplitude in the case of H_x component.

The transient response is not affected by topography at early times because only a small portion of earth is sounded; as well as at later times because the depth of investigation is very large compared to the topographic dimensions. For the models studied here, the major influence is at an intermediate time, about 7 ms, causing a retardation in cross-over positions in the sounding curves.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O modelamento de um meio geológico com variação da condutividade elétrica nas direções x e z , tendo como fonte uma linha infinita de corrente paralela à direção y (direção do "strike" das estruturas bidimensionais), modelo 2D-2D, já está bem estudado nos trabalhos de Coggon (1971), Hohmann (1971), Adhijaja, et. al (1985), Hohmann (1988), Rijo (1977) e Rijo (1990).

No trabalho de Coggon (1971), foi usado um modelamento numérico por elementos finitos para analisar o efeito de um corpo condutivo retangular imerso num meio homogêneo resistivo, no domínio da frequência, tendo como fonte uma linha infinita de corrente, enquanto Hohmann (1971) resolveu o mesmo modelo usando a técnica da equação integral. Em ambos os trabalhos foi observado que se pode inferir a distância do corpo em relação a fonte através da amplitude e fase, pois geralmente nas proximidades do corpo tanto a amplitude como a fase apresentam os valores mais altos. Outro aspecto importante desses dois trabalhos é a boa concordância dos resultados obtidos por diferentes técnicas numéricas, via elementos finitos e equação integral.

Adhijaja et al (1985) estudaram a resposta transiente de um modelo formado por um corpo condutivo retangular, imerso num meio resistivo, onde a fonte é formada por duas linhas de correntes de sentidos opostos, separadas de 500 m e energizadas por um impulso de corrente. Nesse trabalho foi obtida a resposta transiente pelo método direto no domínio do tempo, e comparada com a resposta obtida por uma transformada inversa de Fourier, do domínio da frequência para o domínio do tempo. Observa-se claramente que o ponto de "cross over" da resposta transiente serve para indicar a distância do corpo em relação a fonte, pois ele ocorre sempre próximo ao corpo. Constata-se também a boa concordância dos resultados da resposta transiente, obtidos por esses dois métodos diferentes. Nesses trabalhos não foi levado em consideração o efeito da topografia, sendo admitido uma superfície plana para a interface ar-terra. Rijo (1977) fez um estudo detalhado do efeito da topografia, em dados de resistividade aparente e polarização induzida, e Fox et al (1980) continuaram o trabalho de Rijo (1977) propondo uma forma de corrigir tal efeito. Em ambos, o modelamento da topografia foi feito por elementos finitos devido a flexibilidade do uso de elementos triangulares, sendo as outras principais técnicas numéricas, diferenças finitas e equação integral, de difícil utilização para tal estudo. Segundo esses autores, os efeitos da topografia são

causados tanto pelo fator geométrico no cálculo da resistividade aparente, quanto na distribuição das linhas de corrente. Essas linhas de corrente abaixo de uma colina divergem e abaixo de um vale convergem, bem como as superfícies equipotenciais associadas, produzindo respectivamente baixas e altas resistividades aparentes. Dessa forma, uma colina entre o transmissor e o receptor resulta uma diminuição da resistividade aparente, enquanto um vale causa um aumento da resistividade aparente.

Finalmente, num trabalho recente, Wannamaker et. al (1986), estudaram o efeito da topografia em modelos magnetotelúricos, usando a técnica dos elementos finitos.

O objetivo do presente trabalho é fazer o estudo do efeito da topografia em sondagens eletromagnéticas bidimensionais, tanto no domínio da frequência como no tempo, sendo o modelamento da topografia feito por elementos finitos, onde as estruturas bidimensionais são consideradas paralelas à linha de corrente (direção y do sistema de coordenadas).

1.1 Solução por Elementos Finitos do Modelo 2D–2D, Modo TE

De acordo com os objetivos deste trabalho, o estudo do efeito da topografia pode ser descrito pela equação diferencial do modelo 2D–2D modo TE, sendo sua solução obtida numericamente (Rijo, 1977 e Rijo, 1990). A resolução por elementos finitos exige a discretização de toda a região de estudo em elementos em cujos vértices obtem–se uma aproximação da solução da equação diferencial. Foi utilizado elementos triangulares por serem mais flexíveis para modelar a topografia

Por uma questão de estabilidade numérica, a equação diferencial é resolvida via campo elétrico secundário, e para isso admite–se que os campos elétrico e magnético totais são dados pela soma dos campos primários e secundários. O campo primário é devido a um meio estratificado, ou homogêneo, e o secundário devido as heterogeneidades inseridas nesse meio. A fonte de campo primário é a linha de corrente, enquanto as heterogeneidades funcionam como fontes de campo secundário. Por exemplo, no caso de um modelo formado por um corpo condutivo imerso num meio homogêneo, o corpo é a fonte dos campos secundários, bem como um vale ou uma colina caso fosse levada em consideração a topografia, enquanto o meio homogêneo, onde está imerso o corpo, é o modelo primário cuja solução é bem conhecida (vide Rijo, 1990). É importante esclarecer, que para o algoritmo de elementos finitos, uma heterogeneidade infinitamente resistiva funciona

como uma fonte fictícia de campo secundário, pois embora não ocorra corrente elétrica induzida dentro de tal heterogeneidade, o algoritmo de elementos finitos leva em consideração o contraste de condutividade entre o modelo primário e a heterogeneidade. No item 1.2 é feita uma análise da estabilidade numérica dos resultados obtidos para o caso de heterogeneidades infinitamente resistivas.

Dessa forma se pode dizer que o esquema do problema aqui exposto consiste em:

–Resolver via campo elétrico secundário a equação diferencial do modelo 2D–2D modo TE por elementos finitos.

–Calcular as componentes do campo magnético secundário via derivação numérica do campo elétrico secundário.

$$H_z^s = -\frac{1}{iw\mu_0} \frac{\partial E^s_y}{\partial x}$$

$$H_x^s = \frac{1}{iw\mu_0} \frac{\partial E^s_y}{\partial z}$$

onde w é a frequência angular de campo eletromagnético e μ_0 é a permeabilidade magnética do ar.

–Finalmente para se obter as componentes H_x e H_z do campo magnético total, basta somar as componentes do campo magnético secundário com as do campo magnético primário, este calculado analiticamente.

As componentes H_x e H_z do campo magnético primário são expressas por integrais do tipo transformada de Fourier, Rijo (1990), que são resolvidas usando a técnica dos filtros lineares, com 19 coeficientes para transformada cosseno (Rijo 1989), e 20 coeficientes para transformada seno (Nissen J. and Enmark T., 1986). Para as sondagens transientes, a passagem do domínio da frequência para o tempo é feita através de uma transformada inversa de Fourier, também calculada usando a técnica dos filtros lineares.

1.2 Testes do Algoritmo Desenvolvido

Antes do estudo dos modelos propostos nesse trabalho, foram feitos alguns testes do algoritmo e do programa desenvolvidos, bem como a calibração das dimensões da malha utilizada na discretização. Para isso foram utilizados os resultados de Hohmann (1971) no domínio da frequência e de Adhijaja et al (1985) no domínio do tempo.

A parte central da malha, utilizada neste trabalho para discretizar o modelo proposto por Hohmann (1971) é mostrada na Fig. 1, enquanto a Fig. 2a mostra os resultados obtidos. O modelo consiste de um corpo com uma resistividade de $2 \Omega \text{ m}$, com 15 m de largura e 150 m de espessura, imerso num meio com resistividade de $1000 \Omega \text{ m}$ e a 244 m da linha de corrente, situada na origem. A frequência utilizada é de 1000 Hz. Os resultados obtidos em termos de amplitude e fase da componente H_z do campo magnético, são normalizados pelo campo magnético de uma linha de corrente estacionária no ar. Tanto a curva de amplitude, como a de fase apresentam um ponto de máximo próximo ao corpo, porém o ponto de máximo da amplitude ocorre aproximadamente a 200 m da linha, enquanto na fase ocorre a 310 m da linha. Dessa forma pela posição do ponto de máximo da amplitude e da fase, pode-se inferir a localização do corpo.

Além disso pela Fig. 2a também pode ser observada a boa concordância dos resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido nesse trabalho com os de Hohmann (1971) indicando que, no domínio da frequência, o algoritmo funciona bem. A malha utilizada possui 3120 elementos, sendo consumido 27 segundos de CPU no sistema Disco-Vax 8600 da UFPa.

A comparação dos resultados obtidos neste trabalho, com os de Adhijaja et al (1985) é mostrada na Fig. 2b. O modelo é formado por um corpo retangular de 20 m de largura por 300 m de espessura, com resistividade de $0,3 \Omega \text{ m}$ e imerso num meio de resistividade $300 \Omega \text{ m}$. A fonte é formada por duas linhas infinitas de correntes de sentidos opostos, separadas de 500 m e energizadas por um impulso de corrente, onde as medidas são feitas a partir da linha mais próxima do corpo. Os resultados são em termos de dh_z/dt , e estão em escala logarítmica, estando as distâncias em escala aritmética. Como pode ser observado tanto para o tempo de 7 ms como para o de 35 ms, o ponto de "cross over" ocorre em 330 m, ou seja bem próximo do corpo, o que está de acordo com os resultados de Adhijaja et al (1985), mostrando que o algoritmo funciona também no domínio do tempo. A malha utilizada possui 3120 elementos, sendo consumido 8 minutos de CPU.

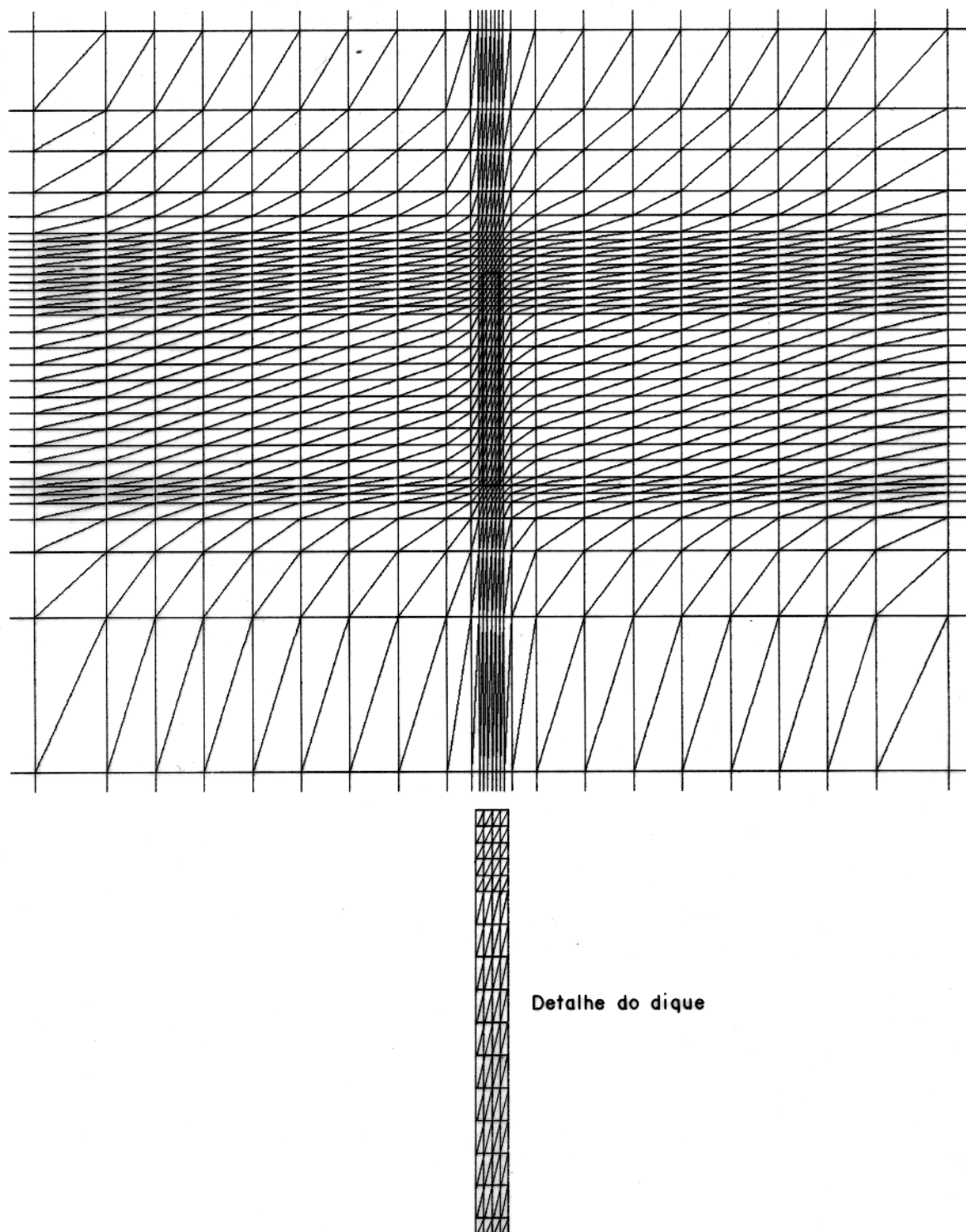


Figura 1 – Ponto central da malha utilizada na discretização de um modelo bidimensional com um dique num meio homogêneo.

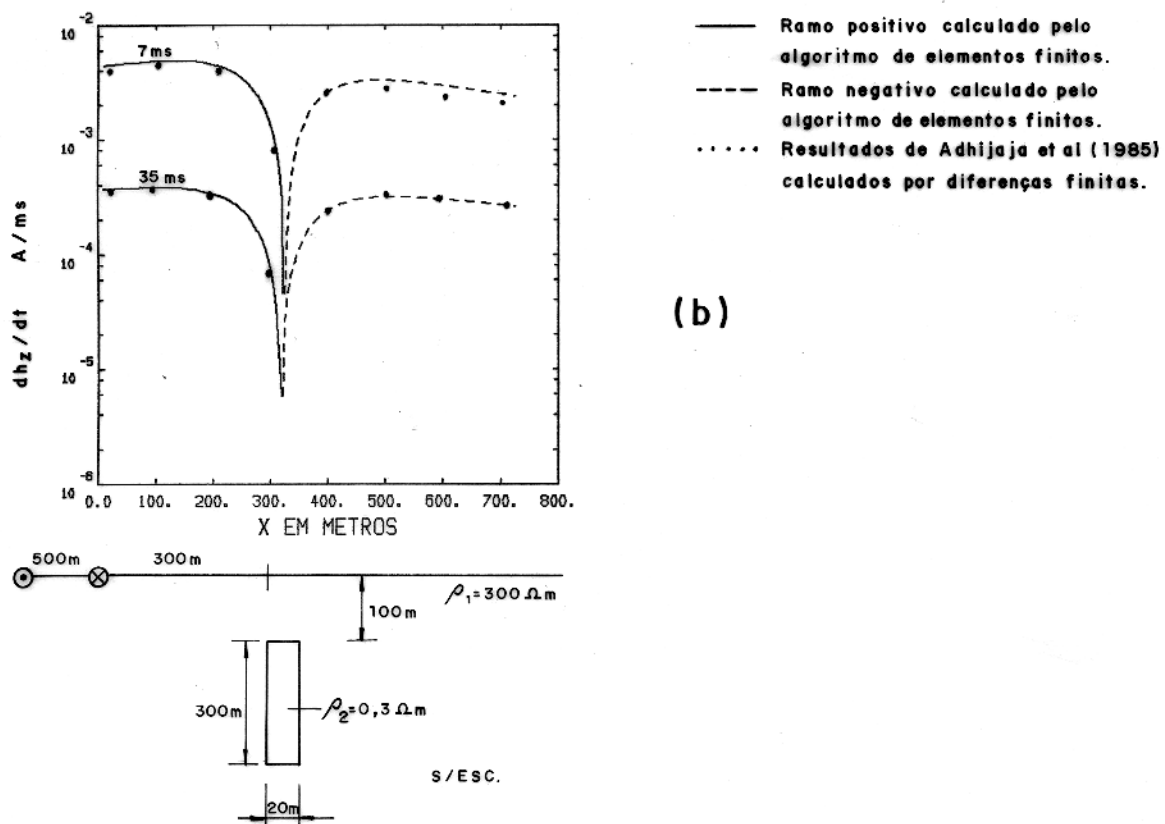
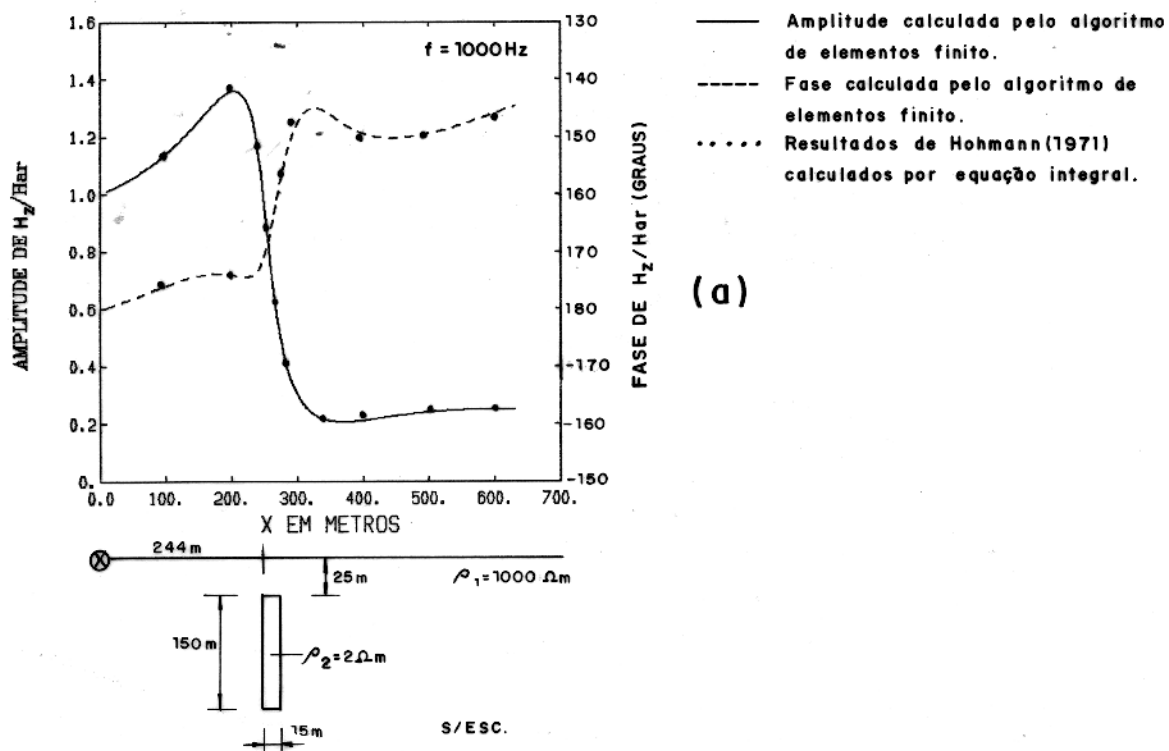


Figura 2—Teste do algoritmo de elementos finitos desenvolvido. (a) Domínio da frequência. (b) Domínio do tempo.

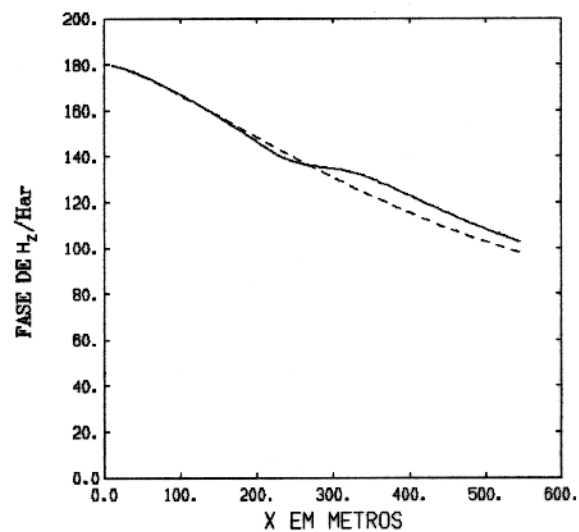
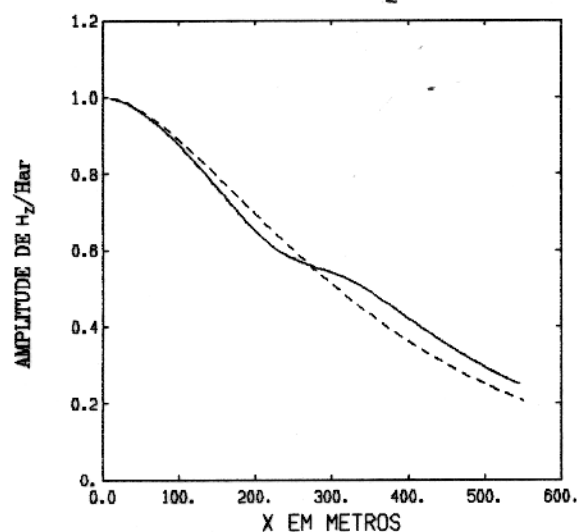
Tanto no modelo de Hohmann (1971), como no de Adhijaja et al (1985) a fonte de campo secundário foi um corpo condutivo, e a resolução numérica da equação diferencial do modelo $2D-2D$ modo TE via campo elétrico secundário funcionou muito bem, como evidenciada nos testes. Mas é necessário analisar se tal procedimento é numericamente válido, para o caso da fonte de campo secundário ser um corpo resistivo. Esse teste numérico é importante pois no estudo do efeito da topografia as fontes de campo secundário podem ser tanto corpos condutivos como resistivos. Um vale, por exemplo, corresponde a uma heterogeneidade infinitamente resistiva e é utilizada pelo algoritmo de elementos finitos como uma fonte fictícia de campo secundário.

Sendo assim é proposto um modelo bidimensional formado por um meio homogêneo de resistividade $100 \Omega \text{ m}$, que possui uma cavidade, não aflorante como se fosse uma caverna, retangular preenchida por ar, e medindo 100 m de largura por 150 m de espessura e a 225 m da linha de corrente. É utilizada uma frequência de 1000 Hz.

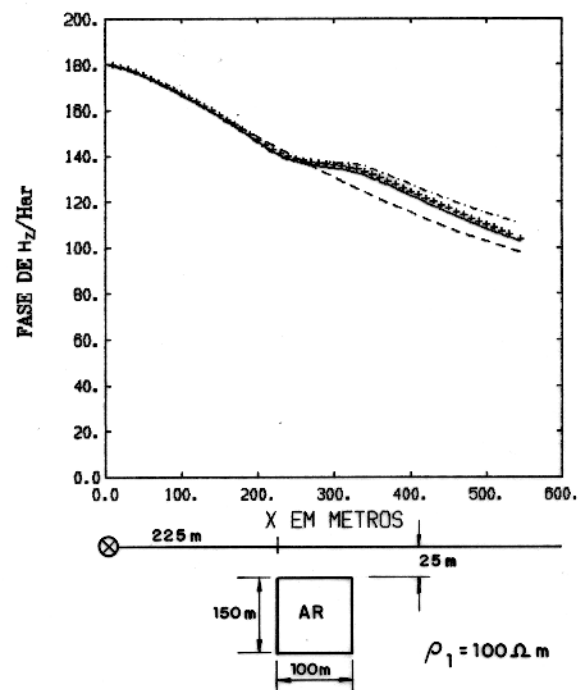
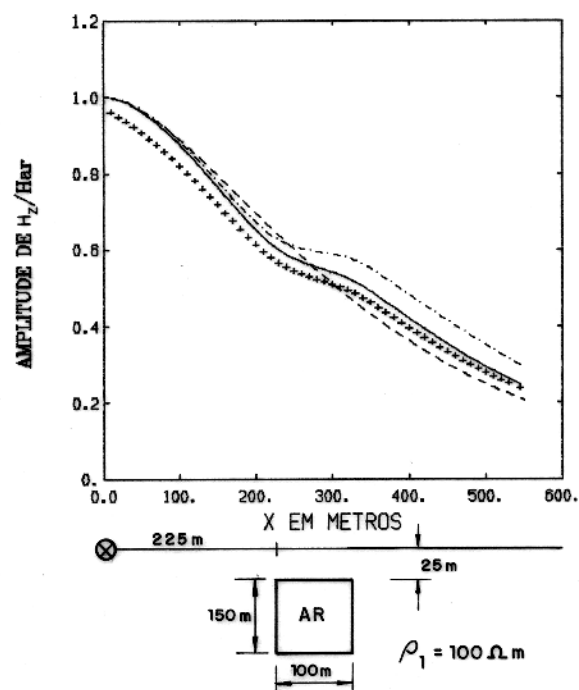
A Fig. 3a mostra o efeito da presença da cavidade no meio homogêneo, e nesse caso é resolvida a equação diferencial do modelo $2D-2D$ via campo elétrico secundário, onde a cavidade é a fonte de tal campo (o semi-espaço homogêneo é o modelo primário). Como pode ser observada a amplitude da componente H_z do campo magnético total, normalizada pelo campo magnético do ar devido uma linha infinita de corrente, apresenta valores inferiores ao da solução de um meio homogêneo para pontos entre a linha e a cavidade, e valores maiores para pontos localizados após a cavidade. A fase é menos influenciada que a amplitude, para pontos entre a linha e a cavidade, mas para pontos localizados após a cavidade, apresenta valores maiores que os da solução do meio homogêneo. Tanto a curva da amplitude como a da fase apresentam um patamar para pontos sobre a cavidade, e uma inflexão em relação a curva do meio homogêneo na direção do ponto médio da cavidade.

Para se certificar que os resultados obtidos na Fig. 3a estão numericamente acurados, é calculada a componente H_z do campo magnético total de mais duas formas:

- Resolvendo numericamente a equação diferencial do modelo $2D-2D$, modo TE, via campo elétrico secundário, onde o meio primário é o espaço livre e toda a terra é a heterogeneidade.
- Resolvendo numericamente a equação diferencial do modelo $2D-2D$, modo TE, via campo elétrico total.



(a)



(b)

Figura 3-Comparação dos resultados obtido usando campo elétrico total e campo elétrico secundário. +++ Usando campo elétrico total. — Usando campo elétrico secundário com o semi-espço homogêneo sendo o modelo primário. --- Usando campo elétrico secundário com o espaço livre sendo o modelo primário. ---- Semi-espço homogêneo.

Pela análise da Fig. 3b observa-se que a amplitude e fase da componente H_z obtida via campo elétrico total concordam bem com a obtida via campo elétrico secundário, quando o meio homogêneo é o modelo primário.

Entretanto, os resultados obtidos com o espaço livre sendo modelo primário, apresentam valores muito próximos dos obtidos pelos outros dois métodos para pontos antes da cavidade, mas para pontos após a cavidade ocorre uma diferença nos resultados, porém não chegando a comprometer a análise dos mesmos, e poderia ser tal diferença diminuída com um maior refinamento da malha. Sendo assim conclui-se que não há problema numérico em usar corpos resistivos como fontes de campos elétricos secundários.

CAPÍTULO 2

EFEITO DA TOPOGRAFIA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Para se estudar os efeitos da topografia no domínio da frequência são utilizados 6 modelos representando vale, colina, declive e aclave. Os gráficos são obtidos em termos de amplitude e fase das componentes H_x e H_z do campo magnético total, porém com os resultados normalizados pelo valor do campo magnético de uma linha infinita de corrente continua no ar. Todos os resultados apresentados nos gráficos são obtidos ao longo da superfície do terreno, no sentido da linha para o vale, ou colina, sendo a posição da linha a origem. Em todos os modelos a parte central do vale, ou da colina, está a 700 m da linha. Tanto o vale como a colina estão localizados entre os pontos de 200 m e 1200 m da linha de corrente e o fundo do vale, ou o topo da colina, estão localizados entre 600 m e 800 m. Os resultados obtidos com a presença da topografia são comparados com os calculados sem ela, ou seja, admitindo uma superfície plana para a interface ar-terra, onde o nível de referência do terreno é o da linha de corrente, que está localizada sobre a superfície da terra. No apêndice, encontram-se alguns resultados numéricos.

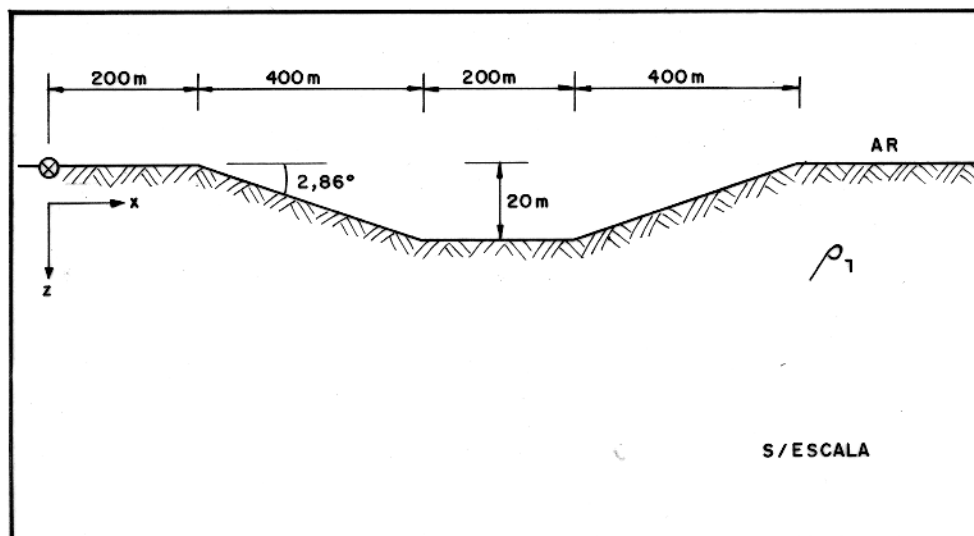
2.1 Vale num Meio Homogêneo (Modelo 1)

O modelo 1 (Fig. 4) é usado para estudar o efeito de um vale em relação a um meio homogêneo. O vale possui 1000 m de largura, 20 m de profundidade e uma inclinação de $2,86^\circ$ nas paredes laterais. São utilizados três valores de resistividade para o meio ($1000 \Omega \text{ m}$, $100 \Omega \text{ m}$ e $10 \Omega \text{ m}$) e dois valores de frequência (1000 Hz e 100 Hz).

Os gráficos da Fig. 5a mostram que para $\rho_1 = 1000 \Omega \text{ m}$ e frequência de 1000 Hz, tanto a amplitude como a fase da componente H_z são pouco afetadas pela topografia. Mesmo assim, para pontos localizados entre 200 m e 800 m, a amplitude e a fase apresentam valores ligeiramente menores que os do meio homogêneo, enquanto entre 800 m e 1300 m a amplitude e a fase apresentam valores ligeiramente maiores que os do meio homogêneo.

Diminuindo a resistividade do meio para $\rho_1 = 100 \Omega \text{ m}$ e mantendo a frequência em 1000 Hz, percebe-se pela Fig. 5a que a amplitude da componente H_z também é muito pouco afetada pelo vale, mas a fase é mais influenciada, principalmente para pontos entre 200 m e 1300 m. Entre 200 m e 760 m a fase apresenta uma diminuição dos valores em relação aos do meio

MODELO 1



Número de incremento na direção x = 76

Número de incremento na direção z = 38

Número de elementos triangulares da malha: 5776

Incremento na direção x (m): 14000 2400 480 120 40 20 10 * 5
20 25 6 * 20 45 * 25 40 120 480 2400 1400

Incrementos na direção z (m): 14000 2400 480 120 40 26 * 1,25
10 40 120 480 2400 14000

A linha de corrente (⊗) está localizada no nó 480

Figura 4 - Dimensões do modelo 1 e a malha utilizada na discretização.

homogêneo, enquanto entre 760 m e 1300 m a fase apresenta valores maiores que os do meio homogêneo.

Diminuindo ainda mais a resistividade do meio para $\rho_1 = 10 \Omega \text{ m}$ e mantendo a frequência de 1000 Hz, Fig. 5b, a amplitude da componente H_z praticamente não é modificada pelo vale. Porém, a fase é fortemente afetada pelo vale para pontos entre 200 m e 1300 m. Entre 200 m e 700 m a fase apresenta uma forte diminuição dos seus valores em relação aos do meio homogêneo, enquanto entre 700 m e 1300 m ocorre um forte aumento.

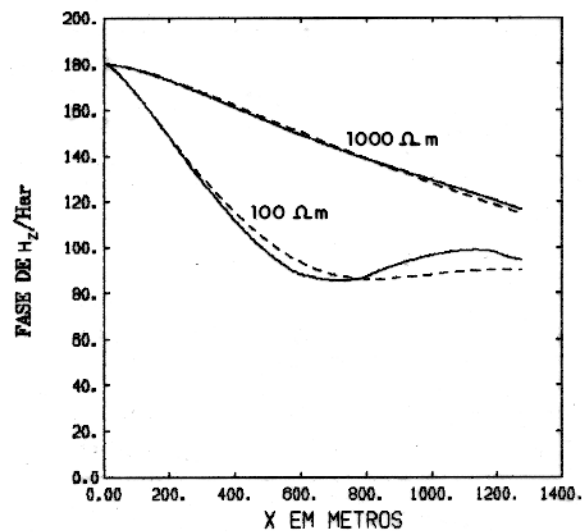
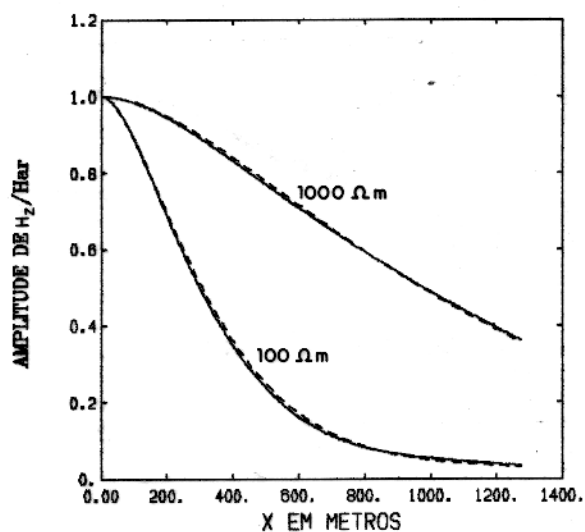
Os efeitos da inclinação e profundidade do vale em um meio de resistividade $\rho_1 = 1000 \Omega \text{ m}$, para uma frequência de 1000 Hz, são mostrados na Fig. 6a. Observa-se que os efeitos de um vale com 40 m de profundidade e inclinação de $5,71^\circ$ das paredes laterais, bem como para um vale de 80 m de profundidade e inclinação de $11,31^\circ$, são similares aos descritos na Fig. 5a, para um vale com 20 m de profundidade, apenas ocorre um aumento da intensidade dos efeitos à medida que se aumenta a profundidade e inclinação do vale.

Com a diminuição da frequência, o efeito do vale diminui, como mostra a Fig. 6b, que compara o efeito do vale para as frequências de 1000 Hz e 100 Hz, em um meio de $100 \Omega \text{ m}$ de resistividade. Esse comportamento está coerente, pois frequências baixas investigam profundidades maiores onde o vale não exerce tanta influência.

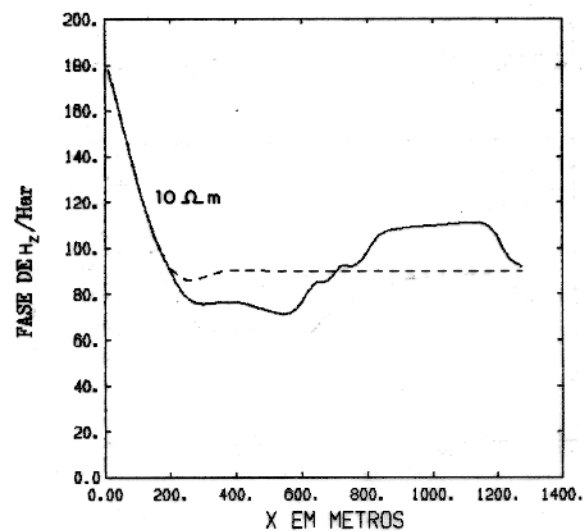
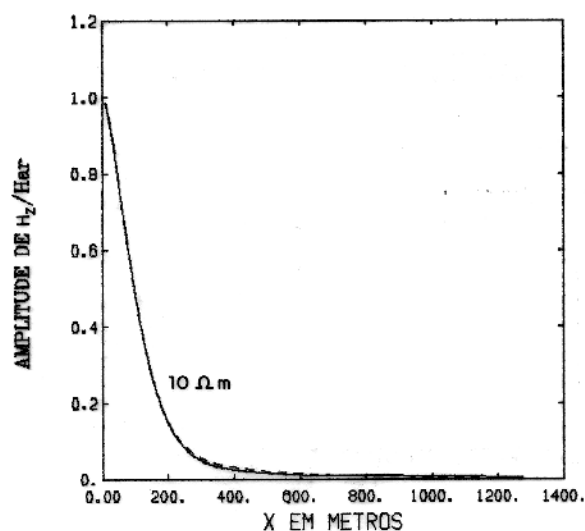
Para se certificar que os resultados estão numericamente estáveis, são comparados os resultados do meio homogêneo com $10 \Omega \text{ m}$ de resistividade e frequência de 1000 Hz, obtidos utilizando uma malha com 5776 elementos, com os obtidos com uma malha de 13068 elementos. Como pode-se observar pela Fig. 6c, ocorre uma excelente concordância dos resultados, mostrando que não há problema de estabilidade numérica.

2.1.1 Análise das Respostas do Modelo 1

A amplitude da componente H_z é pouco afetada pela variação do contraste de resistividade da terra com o ar (diminuição da resistividade da terra), pois mantendo o vale com 20 m de profundidade, inclinação de $2,86^\circ$ e usando valores de resistividade 1000, 100 e $10 \Omega \text{ m}$ para a terra, observa-se que a influência do vale na amplitude da componente H_z não se intensifica, chegando a ser quase imperceptível para resistividade de $10 \Omega \text{ m}$. Mas a amplitude da componente



(a)



(b)

Figura 5— Efeito do vale num meio homogêneo. Frequência de 1000 Hz. (a) Resposta para um meio de 100 e 1000 Ωm . (b) Resposta para um meio de 10 Ωm .

— Com o vale. --- Semi-espaço homogêneo.

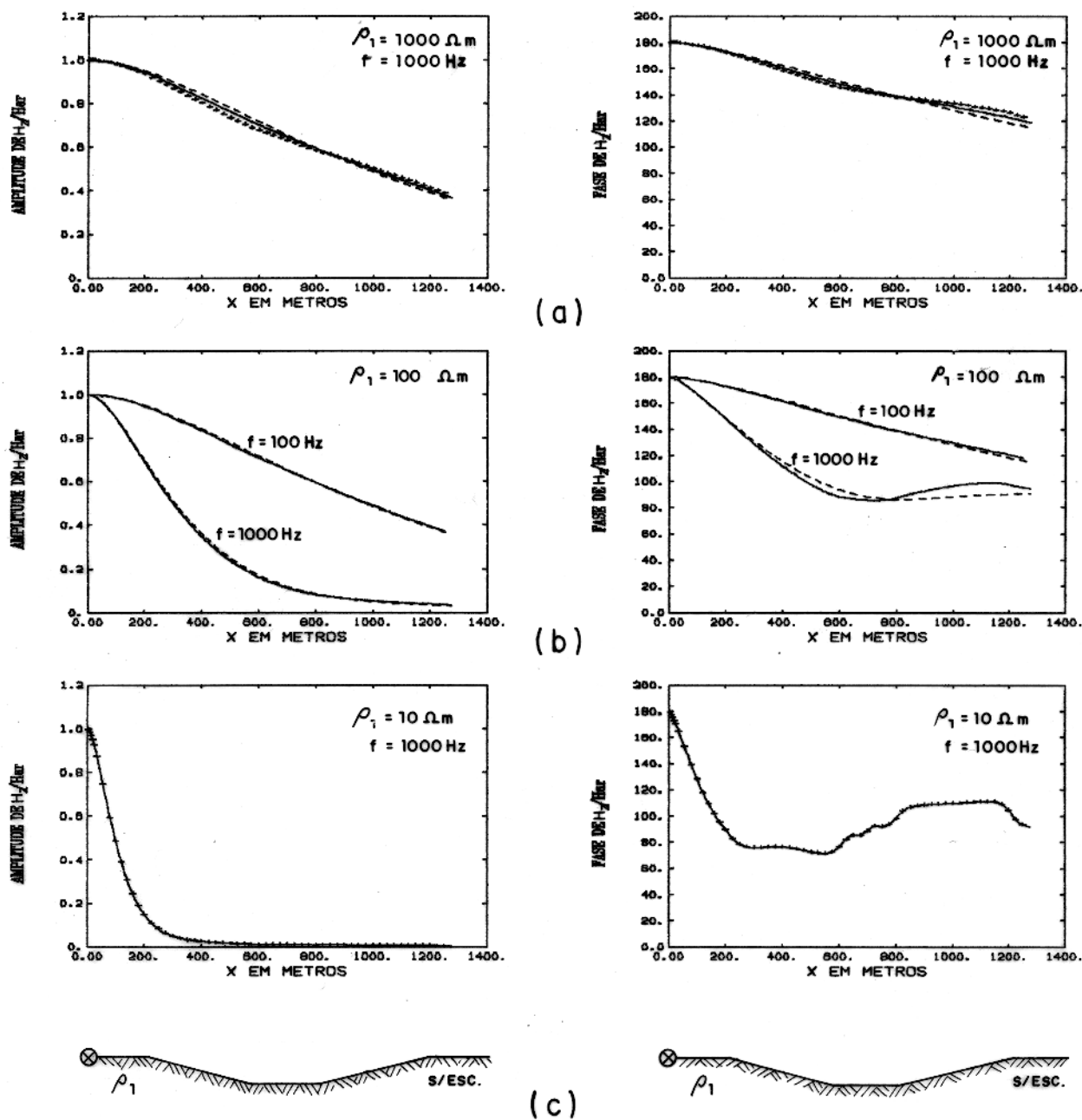


Figura 6— (a) Efeito da inclinação e profundidade do vale, (— vale com 40m de profundidade e $5,71^\circ$ de inclinação +++ 80m de profundidade e $11,30^\circ$ de inclinação ---- Semi-espaço homogêneo). (b) Efeito da frequência, (— vale com 20m de profundidade, ---- semi-espaço homogêneo). (c) Estabilidade numérica, (— Malha com 5776 elementos, +++ malha com 13068 elementos). Vale com 20m de profundidade.

H_z é muito mais influenciada pela variação da profundidade e inclinação das paredes do vale, pois mantendo o meio com resistividade de $1000 \Omega \text{ m}$ e variando a profundidade e inclinação das paredes, os efeitos na amplitude se intensificam.

A fase da componente H_z é tanto influenciada pela variação da profundidade e inclinação das paredes do vale, quanto pelo contraste de resistividade da terra com o ar. Num meio condutivo, a parede lateral do vale, que fica mais próxima da linha de corrente, causa uma forte diminuição dos valores da fase, enquanto a parede lateral mais distante da linha de corrente causa um forte aumento dos valores da fase.

Pode ser observado que em todos os gráficos, para diferentes valores de resistividade do meio ou frequência, as curvas são assimétricas em relação ao centro do vale. Isso é uma consequência do centro estar localizado a 700 m da linha, fazendo com que cada região do vale seja energizada diferentemente.

2.2 Vale com Corpo num Meio Homogêneo (Modelo 2)

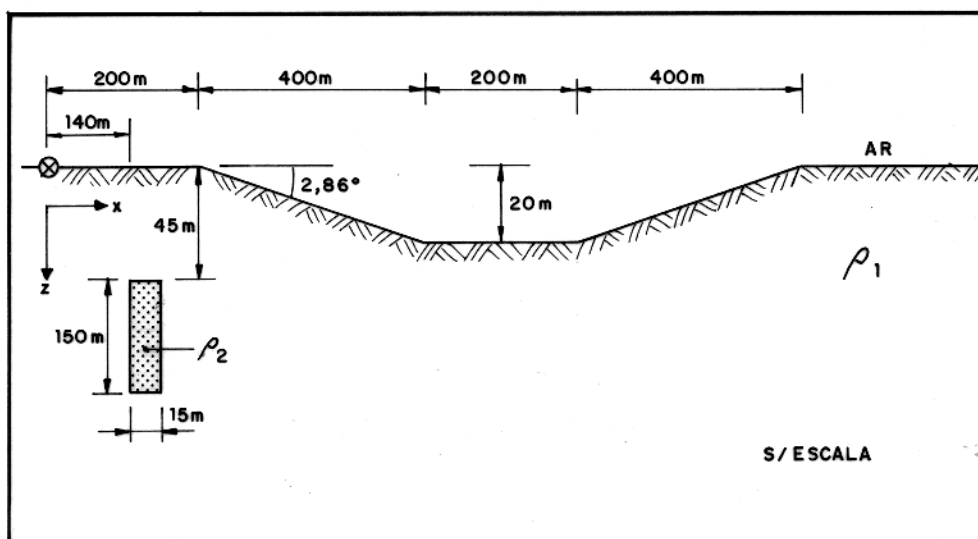
Esse modelo é formado por um corpo retangular condutivo, de resistividade $\rho_2 = 2 \Omega \text{ m}$, imerso num meio de resistividade $\rho_1 = 1000, 100 \text{ e } 10 \Omega \text{ m}$, na presença de um vale com 20 m de profundidade e $2,86^\circ$ de inclinação das paredes laterais. O corpo possui 150 m de espessura por 15 m de largura e pode estar deslocado à esquerda do centro do vale, modelo 2A (Fig. 7), ou abaixo do centro do vale, modelo 2B (Fig. 10). A frequência utilizada é de 1000 Hz.

2.2.1 Vale com Corpo Deslocado à Esquerda (Modelo 2A)

No modelo 2A, Fig. 7, o corpo está localizado a 140 m da linha de corrente, e encontra-se a uma profundidade de 45 m da superfície.

Para o caso de um meio com resistividade $\rho_1 = 1000 \Omega \text{ m}$ e o corpo com $\rho_2 = 2 \Omega \text{ m}$, Fig. 8a, pode-se observar que a amplitude e a fase da componente H_z não sofrem influência do vale para pontos entre a linha e o vale, mas para os pontos localizados entre 200 m e 840 m, a amplitude e a fase apresentam valores menores que os do mesmo modelo sem o vale. Para os pontos localizados entre 840 m e 1300 m, praticamente não há diferença entre as respostas da amplitude com ou sem o vale, porém a fase apresenta valores ligeiramente maiores que os do modelo sem o vale.

MODELO 2A



Número de incrementos na direção $x = 84$

Número de incrementos na direção $z = 61$

Número de elementos triangulares da malha 10248

Incrementos na direção x (m): 14400 2400 480 120 40 20 10
 10 * 5 20 20 25 2 * 20 10 * 5 10 20 45 * 25 40 120 480 14400

Incrementos na direção z (m): 12400 2400 480 120 40 10 22 * 1,25
 8,75 8 * 5 10 * 10 8 * 5 10 40 120 480 2400 12400

A linha de corrente ($\otimes$) está no nó 756

Figura 7 - Dimensões do modelo 2A e a malha utilizada na discretização.

Diminuindo a resistividade do meio para $\rho_1 = 100 \Omega \text{ m}$ e mantendo a do corpo em $\rho_2 = 2 \Omega \text{ m}$, Fig. 8b, percebe-se que a amplitude da componente H_z não sofre influência do vale para pontos entre a linha e o vale, entretanto para pontos entre 200 m e 800 m a amplitude apresenta valores menores que os do mesmo modelo sem o vale, enquanto para pontos entre 800 m e 1300 m praticamente não ocorre influência do vale. A fase da componente H_z também não sofre influência do vale para pontos entre a linha e o vale, mas para pontos entre 200 m e 760 m ocorre uma diminuição dos seus valores em relação ao mesmo modelo sem o vale, enquanto entre os pontos de 760 m e 1300 m ocorre um aumento.

Diminuindo a resistividade do meio para $\rho_1 = 10 \Omega \text{ m}$ e mantendo a do corpo em $\rho_2 = 2 \Omega \text{ m}$, Fig. 8c, pode-se observar que a amplitude da componente H_z praticamente não é afetada pelo vale. A fase da componente H_z não é influenciada pelo vale para pontos entre a linha e o vale, porém para pontos entre 200 m e 700 m ocorre uma forte diminuição dos valores da fase em relação aos do mesmo modelo sem o vale, e um forte aumento dos seus valores para pontos entre 700 m e 1300 m.

Todos os modelos estudados até agora estão analisados em termos da componente vertical H_z do campo magnético total, por ser essa componente a mais importante na prática. Entretanto, para fins de comparação é calculada a componente horizontal H_x do campo magnético total para $\rho_1 = 1000 \Omega \text{ m}$ e $\rho_2 = 2 \Omega \text{ m}$, como mostra a Fig. 9a. Como pode ser observada, a amplitude praticamente não é afetada pelo vale. Porém, a fase não é influenciada para pontos entre a linha e o vale, mas para pontos entre 300 m e 1000 m a fase apresenta valores ligeiramente menores que os do mesmo modelo sem o vale, enquanto entre 1000 m e 1300 m apresenta valores ligeiramente maiores.

Para se certificar que os resultados estão numericamente estáveis, é comparado os resultados obtidos com uma malha de 10248 elementos, para o caso do meio apresentar uma resistividade de $1000 \Omega \text{ m}$ e o corpo $2 \Omega \text{ m}$, com os obtidos para uma malha de 19866 elementos. A excelente concordância dos resultados, mostrada na Fig. 9b, revela que eles estão numericamente estáveis, e que não há necessidade de um maior refinamento da malha.

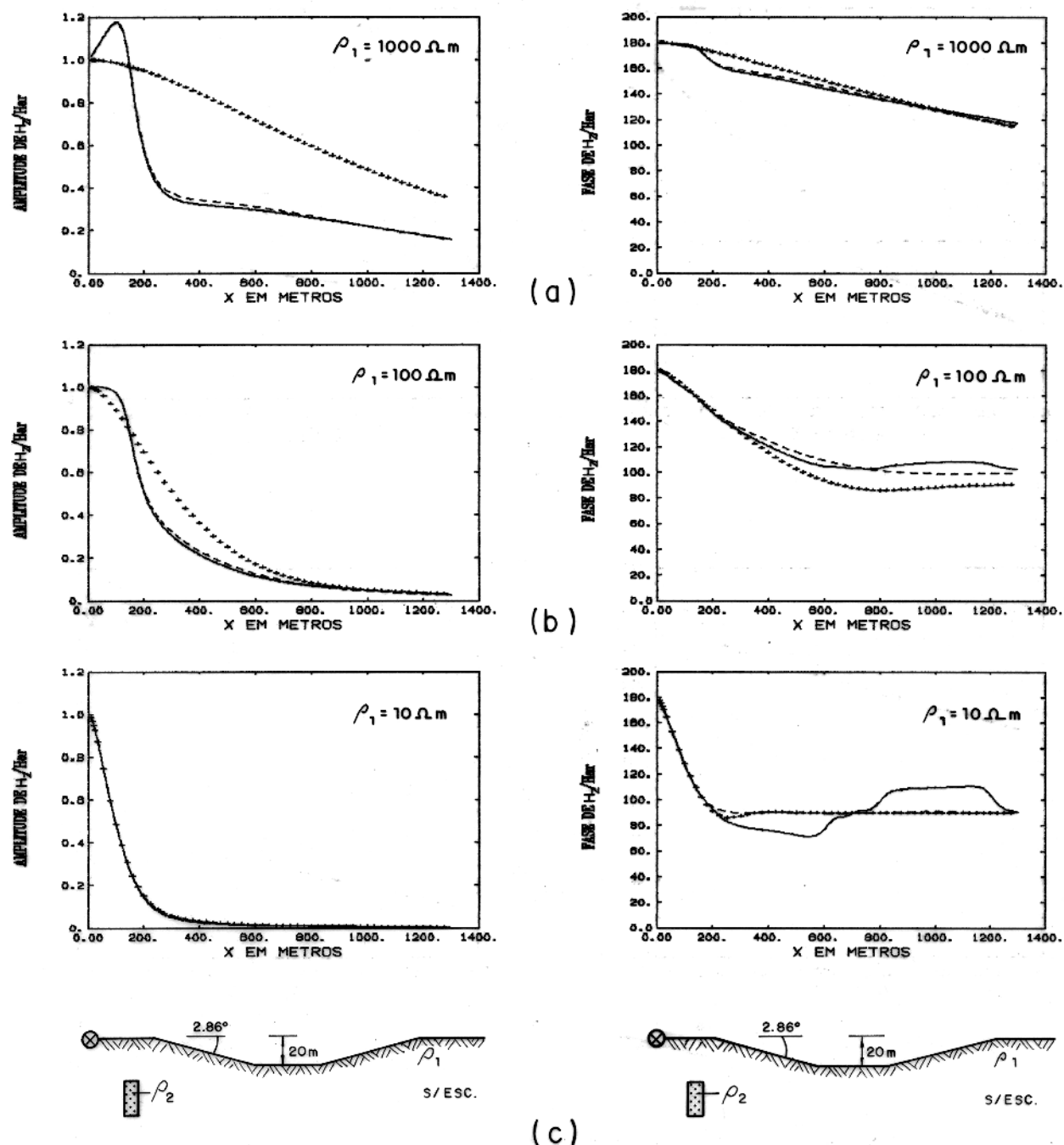
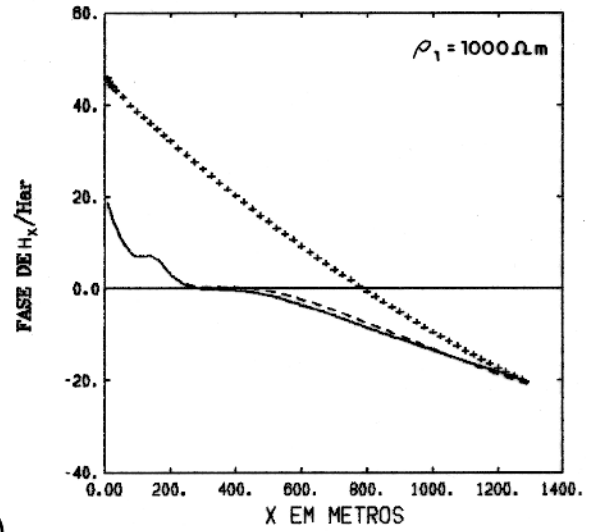
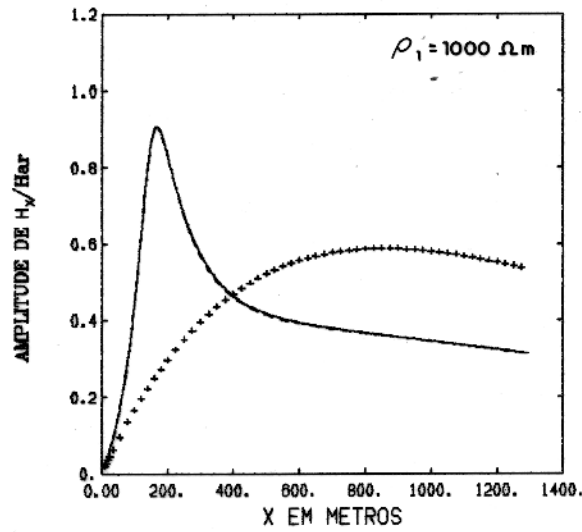
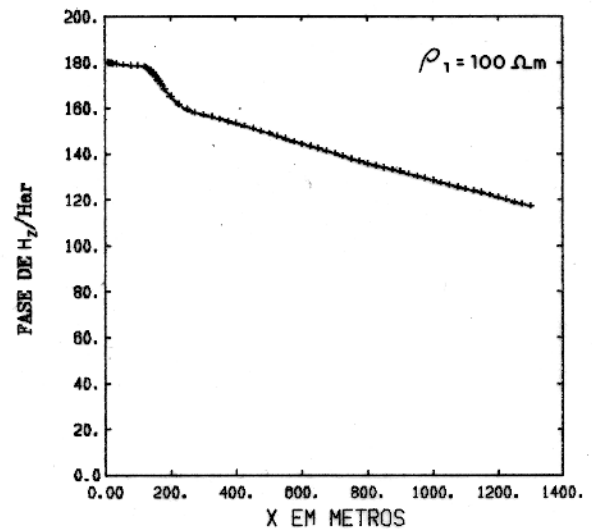
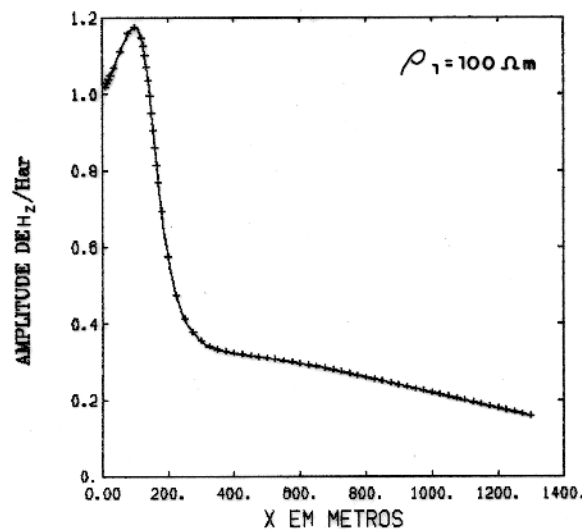


Figura 8 — Efeito do vale na presença de um dique de resistividade $\rho_2 = 2 \Omega m$ num meio de resistividade, $\rho_1 = 1000, 100$ e $10 \Omega m$. Frequência de 1000Hz.
 — Com o vale. ---- Sem o vale. +++ Semi-espaço homogêneo.



(a)



(b)

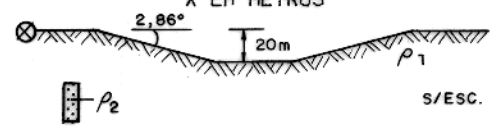
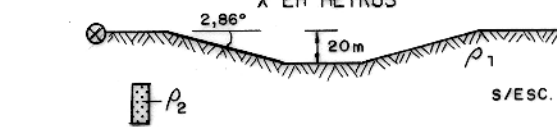


Figura 9 — (a) Componente H_x/H_{ar} (— com o vale ---- sem o vale +++ semi-espaço homogêneo). Frequência 1000 Hz. (b) Estabilidade numérica (— malha com 10 248 elementos +++ malha com 19866 elementos). Frequência 1000 Hz.

2.2.2 Vale com Corpo Centralizado (Modelo 2B)

O modelo 2B (Fig. 10), mostra o mesmo corpo retangular do modelo 2A, situado agora abaixo do centro do vale, a uma profundidade de 25 m e à distância de 692,5 m da linha. A resistividade do meio é $1000 \Omega \text{ m}$ e frequência de 1000 Hz. Deve ser lembrado que a profundidade do corpo em relação a linha é a mesma do modelo 2A (45 m).

Tanto a amplitude da componente H_z , como a fase só são afetadas pelo vale na região próxima ao corpo.

A amplitude da componente H_z apresenta um ponto de maior intensidade em 640 m e um ponto de menor intensidade em 800 m, porém o mesmo modelo sem o vale, apresenta o ponto de maior intensidade para a amplitude em 620 m e o de menor intensidade em 820 m. Além disso, o vale causa um aumento dos valores da amplitude para os pontos localizados antes do corpo e uma diminuição dos valores para os pontos localizados após o corpo. A fase da componente H_z apresenta um ligeiro aumento de seus valores em 700 m e uma forte diminuição em 760 m.

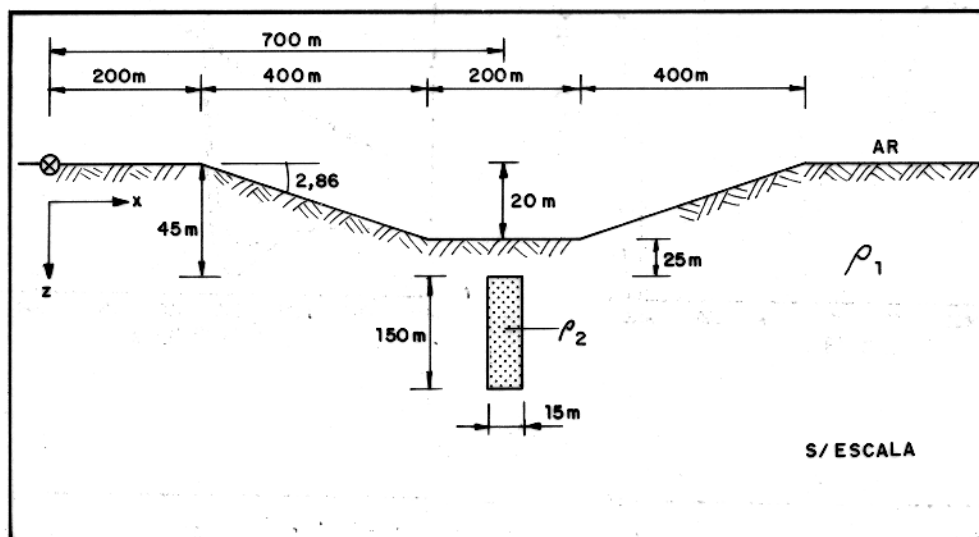
Quanto a componente H_x , observa-se pela Fig. 11b, que a amplitude só é afetada na região próxima ao corpo e apresentando valores maiores que os do mesmo modelo sem o vale, enquanto a fase pouca influência sofre com a presença do vale.

2.2.3 Análise das Respostas dos Modelos 2A e 2B

A amplitude de H_z não é modificada pelo vale, o mesmo acontecendo com a amplitude de H_x no caso do modelo 2A. Mas no modelo 2B, pelo fato do corpo ficar mais próximo da superfície do terreno, a amplitude da componente H_z sofre uma influência maior, sendo que nos pontos localizados antes do corpo ocorre um aumento dos valores da amplitude, enquanto nos pontos localizados após o corpo ocorre uma diminuição dos valores da amplitude. A componente H_x apresenta apenas um forte aumento dos seus valores na região sobre o corpo.

Nas curvas correspondentes ao modelo 2A, a fase de H_z e H_x apresentam-se mais influenciadas pelo vale do que as respectivas amplitudes. Além disso, nos meios condutivos, a fase da componente H_z apresenta uma forte diminuição dos seus valores para os pontos dentro do vale, como consequência da influência da parede lateral do vale próxima à linha de corrente, enquanto a parede lateral do vale mais distante da linha de corrente causa um aumento dos valores da fase.

MODELO 2B



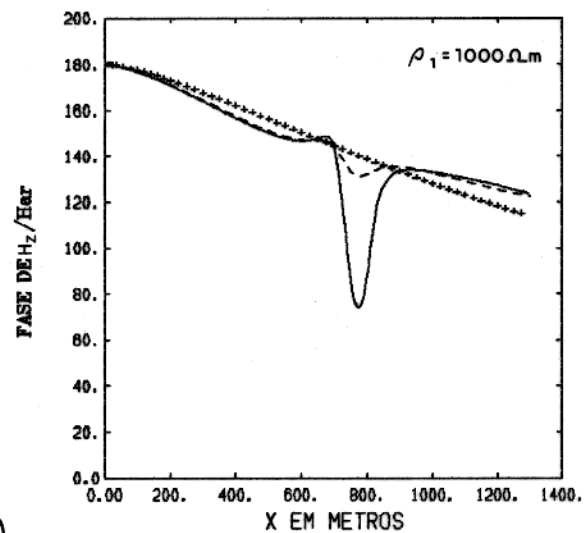
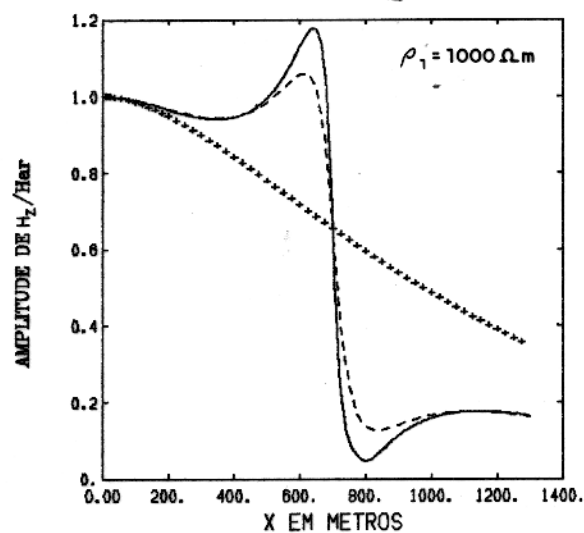
Número de incrementos na direção $x = 83$
 Número de incrementos na direção $z = 61$
 Número de elementos triangulares da malha: 10126

Incrementos na direção x (m): 14000 2400 480 120 40 20 10
 10 * 10 10 20 25 6 * 20 19 * 25 10 5 2,5 3 * 5 2,5 5
 10 24 * 25 40 120 480 2400 14000

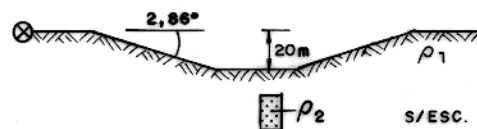
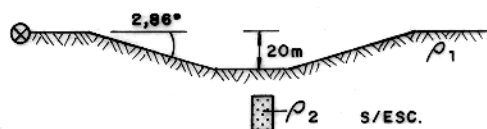
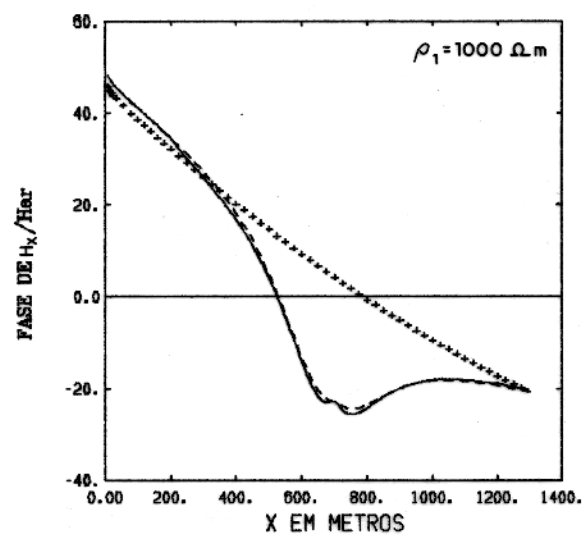
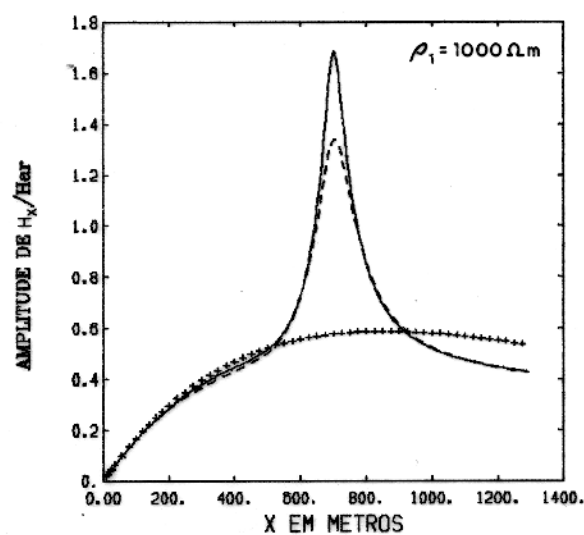
Incrementos na direção z (m): 14000 2400 480 120 40 10 26 * 1,25
 8,75 8 * 5 10 * 10 8 * 5 10 40 120 480 2400 14000

A linha de corrente ($\otimes$) está no nó 756

Figura 10 — Dimensões do modelo 2B e a malha utilizada na discretização.



(a)



(b)

Figura 11— Efeito do vale na presença de um dique de resistividade $\rho_2 = 2 \Omega \cdot m$ localizado abaixo do vale. Frequência de 1000 Hz. — Com o vale. ---- Sem o vale. +++ Semi- espaço homogêneo.

Para o modelo 2B, a curva da fase de H_z praticamente não é influenciada para pontos fora do vale, mas para pontos dentro do vale e próximos ao corpo, ocorre uma forte diminuição de seus valores. A fase da componente H_x não é afetada pela presença do vale no modelo 2B, revelando que o fato do corpo ficar mais próximo da superfície do terreno, quando se leva em consideração a topografia, não influencia a fase da componente H_x .

2.3 Colina num Meio Homogêneo (Modelo 3)

A finalidade do modelo 3, Fig. 12, é analisar a influência de uma colina na resposta de um meio homogêneo de resistividade 1000 Ω m, 100 Ω m e 10 Ω m, sendo a frequência de 1000 Hz e a inclinação das paredes da colina de 2,86°.

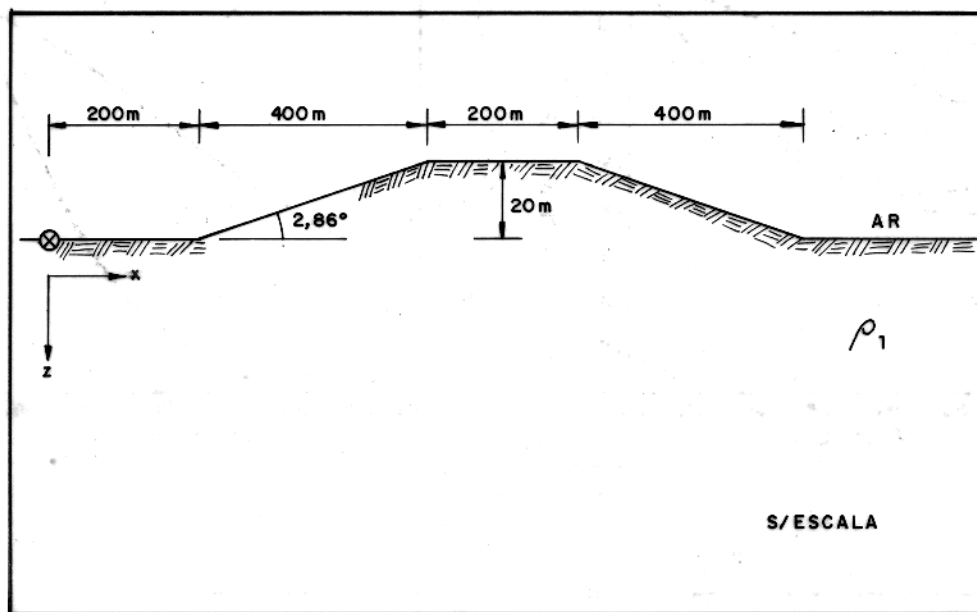
Para o caso de um meio de resistividade 1000 Ω m, Fig. 13a, a amplitude e a fase da componente H_z praticamente não sofrem influência da colina, para pontos localizados entre a linha e o início da colina. Para pontos entre 200 m e 800 m, a amplitude e a fase apresentam valores ligeiramente maiores que os do meio homogêneo, enquanto que para os pontos entre 800 m e 1300 m apresentam valores ligeiramente menores que os do meio homogêneo. A Fig. 13a também mostra que para um meio de 100 Ω m, a amplitude da componente H_z apresenta valores maiores que os do meio homogêneo para pontos entre 200 m e 800 m, e praticamente não é influenciada para pontos entre 800 m e 1300 m. Porém, a fase de H_z apresenta um aumento dos seus valores para pontos entre 200 m e 760 m, como consequência da influência da parede lateral da colina mais próxima da linha de corrente, enquanto entre 760 m e 1300 m ocorre uma diminuição dos valores da fase em virtude da influência da parede lateral da colina mais distante da linha de corrente.

Para um meio de resistividade 10 Ω m, Fig. 13b, a amplitude de H_z praticamente não é afetada pela colina. Porém, a fase da componente H_z apresenta um forte aumento dos seus valores para pontos entre 200 m e 700 m, devido à parede lateral da colina mais próxima da linha de corrente, enquanto entre 700 m e 1300 m ocorre uma forte diminuição dos valores da fase como consequência da parede lateral da colina mais distante da linha de corrente.

2.3.1 Análise das Respostas do Modelo 3

O efeito de uma colina, na amplitude e fase de H_z , para um meio homogêneo é o oposto ao observado para o vale.

MODELO 3



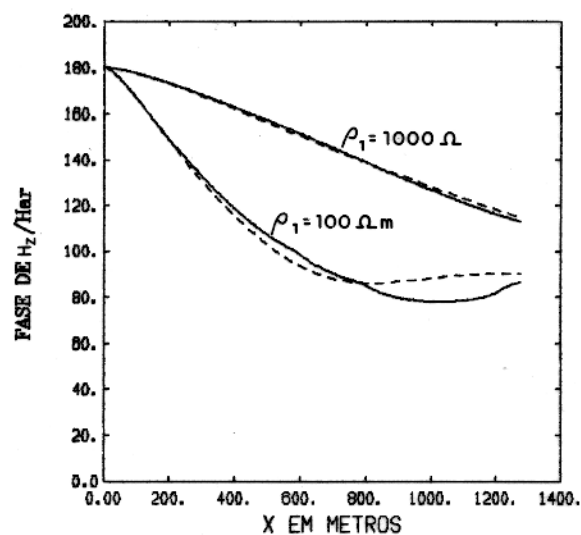
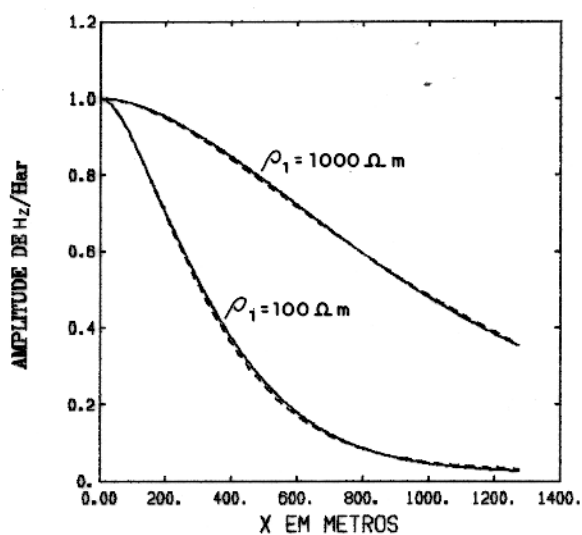
Número de incrementos na direção $x = 76$
 Número de incrementos na direção $z = 38$
 Número de elementos triangulares da malha = 5776

Incrementos na direção x (m): 14000 2400 480 120 40 20 10 10 * 5
 10 20 25 6 * 20 45 * 25 40 120 480 2400 14000

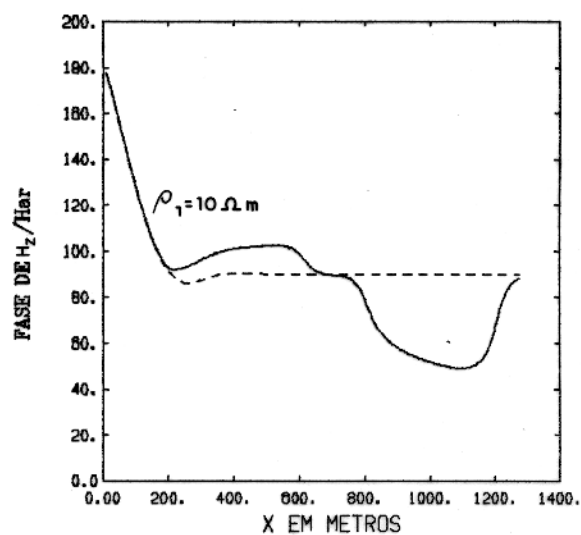
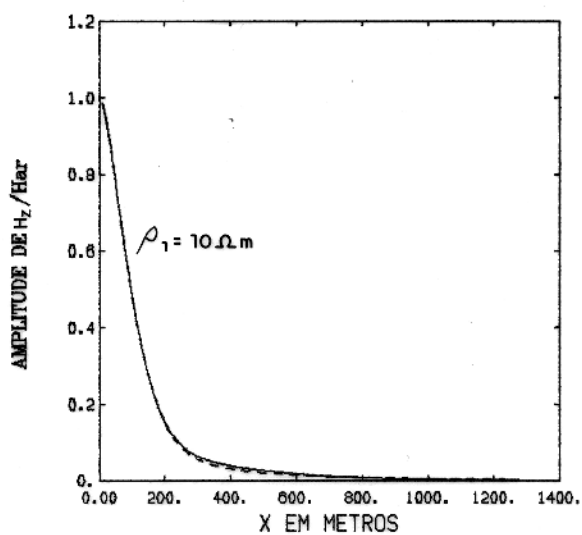
Incremento na direção z (m): 14000 2400 480 120 40 10 26 * 1,25
 10 40 120 480 2400 14000

A linha de corrente (⊗) está no nó 496

Figura 12 - Dimensões do modelo 3 e a malha utilizada na discretização.



(a)



(b)

Figura 13 - Efeito da colina num meio homogêneo. Frequência 1000 Hz. (a) Resposta para um meio com resistividade 100 e 1000 $\Omega \cdot m$. (b) Resposta para um meio com resistividade 10 $\Omega \cdot m$. — Com a colina ---- Semi-espaco homogêneo.

Esse fato é muito mais nítido na fase, pois a amplitude quase não é influenciada pela colina ou pelo vale. Além disso o efeito oposto da colina e do vale é também mais intenso para meios condutivos, onde percebe-se claramente que a parede lateral do vale mais próxima da linha de corrente provoca uma diminuição dos valores da fase, enquanto na colina ocorre um aumento dos valores da fase. Por outro lado, a parede lateral do vale mais distante da linha de corrente causa um aumento dos valores da fase, enquanto na colina ocorre uma diminuição.

2.4 Colina com Corpo num Meio Homogêneo (Modelo 4)

Esse modelo é formado por um corpo retangular condutivo, de resistividade $\rho_2 = 2 \Omega \text{ m}$, imerso num meio de resistividade $\rho_1 = 1000, 100 \text{ e } 10 \Omega \text{ m}$, e por uma colina de 20 m de altura com paredes laterais de $2,86^\circ$ graus de inclinação. O corpo possui 150 m de espessura por 15 m de largura, estando deslocado do centro da colina, modelo 4A (Fig. 14), ou localizado na direção do centro da colina, modelo 4B (Fig. 17).

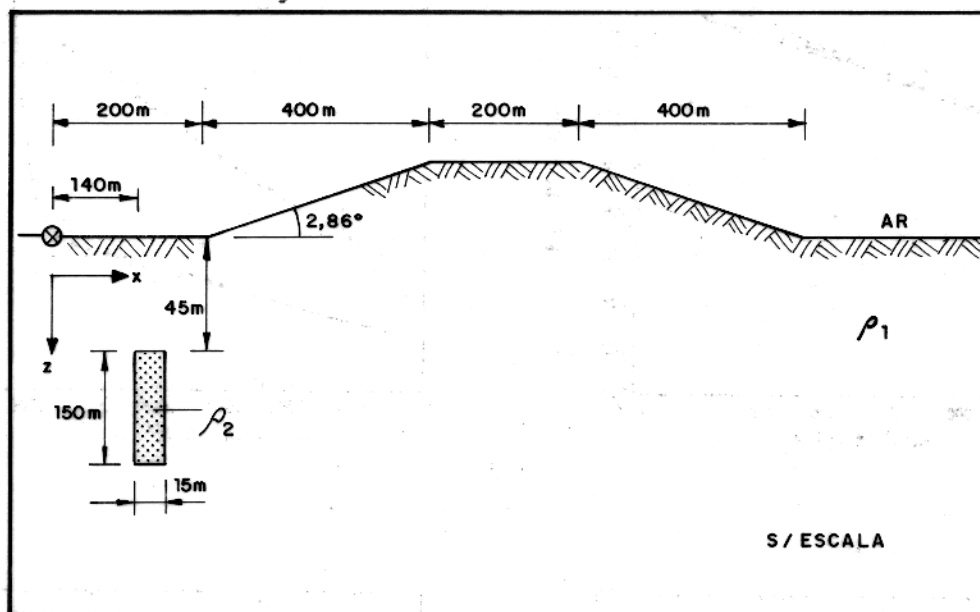
2.4.1 Colina com Corpo Deslocado à Esquerda (Modelo 4A)

No modelo 4A, Fig. 14, o corpo está a 140m da linha de corrente e localizado a 45m de profundidade.

Para o caso de $\rho_1 = 1000 \Omega \text{ m}$ e $\rho_2 = 2 \Omega \text{ m}$, Fig. 15a, a amplitude de H_z não sofre influência da colina para pontos entre a linha e a colina, o mesmo acontecendo com a fase, mas para pontos entre 200 m e 900 m, a amplitude e a fase possuem valores maiores que os do modelo sem a colina. Para pontos entre 900 m e 1300 m praticamente não há influência da colina nas respostas da amplitude e fase da componente H_z .

Diminuindo a resistividade do meio para $\rho_1 = 100 \Omega \text{ m}$, e mantendo a do corpo em $\rho_2 = 2 \Omega \text{ m}$, Fig. 15b, observa-se que para pontos entre 200 m e 740 m, a amplitude da componente H_z apresenta valores maiores que os do modelo sem a colina. Para os demais pontos a amplitude não é praticamente influenciada pela colina. A fase da componente H_z não é influenciada pela colina para pontos entre a linha e a colina, porém para pontos localizados entre 200 m e 780 m apresenta um aumento dos seus valores em relação ao mesmo modelo sem a colina, enquanto para pontos entre 780 m e 1300 m ocorre uma forte diminuição dos valores da fase em relação ao mesmo modelo sem a colina.

MODELO 4A



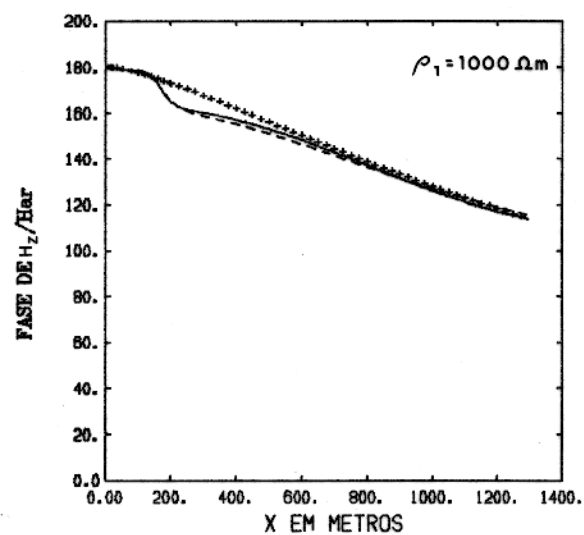
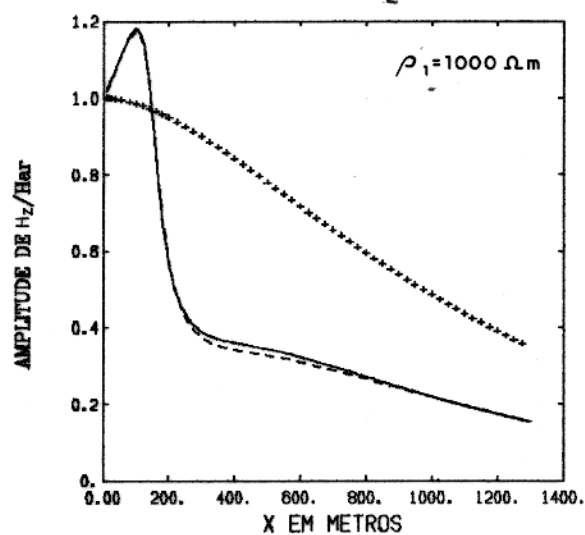
Número de incrementos na direção x(m) = 84
 Número de incrementos na direção z(m) = 65
 Número de elementos triangulares da malha 10920

Incrementos na direção x (m): 14400 2400 480 120 40 20 *
 10 10 * 5 10 20 25 2 * 20 10 5 10 20 45
 25 25 40 120 480 2400 14400

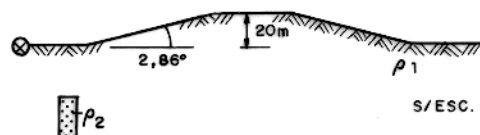
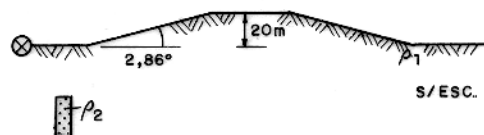
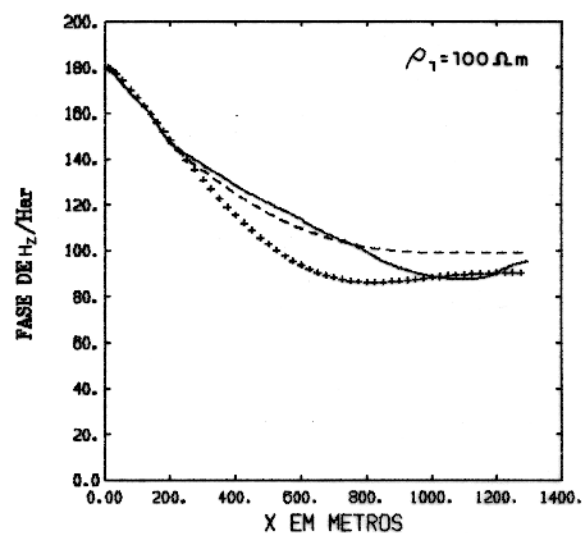
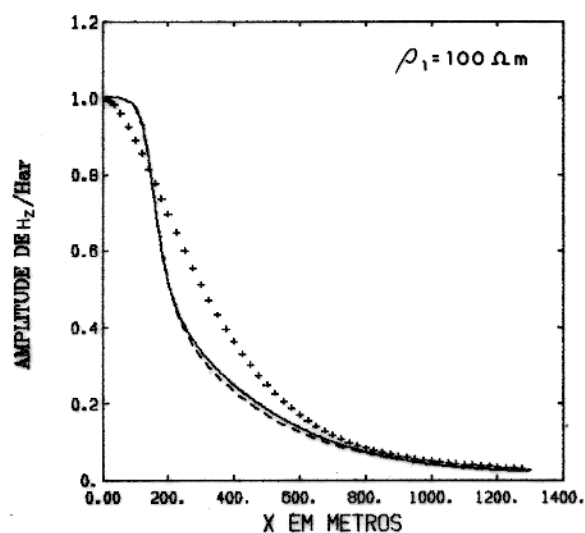
Incrementos na direção z (m) 12400 2400 480 120 40 10
 22 * 1,25 8,75 12 * 5 10 * 10 8 * 5 10 40 120 480 2400
 12200

A linha de corrente (⊗) está no nó 820

Figura 14 - Dimensões do modelo 4A e a malha utilizada na discretização.



(a)



(b)

Figura 15 – Efeito de uma colina na presença de um dique de resistividade $\rho_2 = 2 \Omega m$ num meio de resistividade $\rho_1 = 1000$ e $100 \Omega m$. Frequência de 1000Hz. — com a colina. ---- Sem a colina. +++ Semi-espaço homogêneo.

Diminuindo ainda mais a resistividade do meio para $\rho_1 = 10 \Omega \text{ m}$ e mantendo a do corpo em $\rho_2 = 2 \Omega \text{ m}$, Fig. 16a, observa-se que a amplitude da componente H_z praticamente não sofre influência da colina. A fase da componente H_z não é influenciada pela colina para pontos entre a linha e a colina, porém para pontos entre 200 m e 700 m ocorre um forte aumento dos valores da fase, enquanto entre 700 m e 1300 m ocorre uma forte diminuição dos valores da fase em relação ao mesmo modelo sem a colina.

Para $\rho_1 = 1000 \Omega \text{ m}$ e $\rho_2 = 2 \Omega \text{ m}$, Fig. 16b, a amplitude de H_x praticamente não é afetada pela colina, enquanto a fase de H_x apresenta valores maiores que os do mesmo modelo sem a colina para pontos entre 260 m e 900 m e valores ligeiramente menores entre os pontos de 900 m e 1300 m.

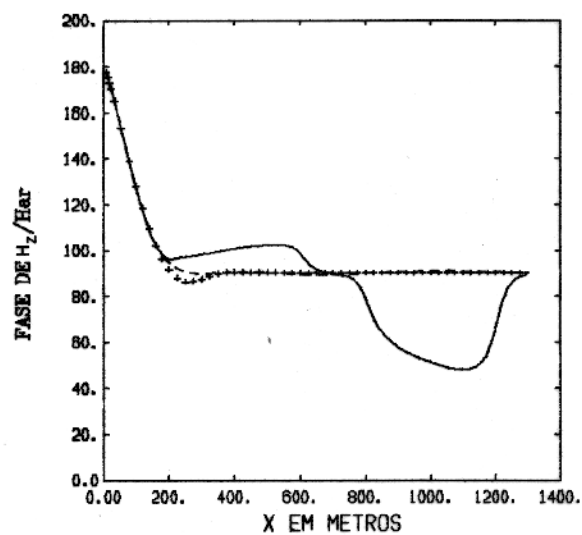
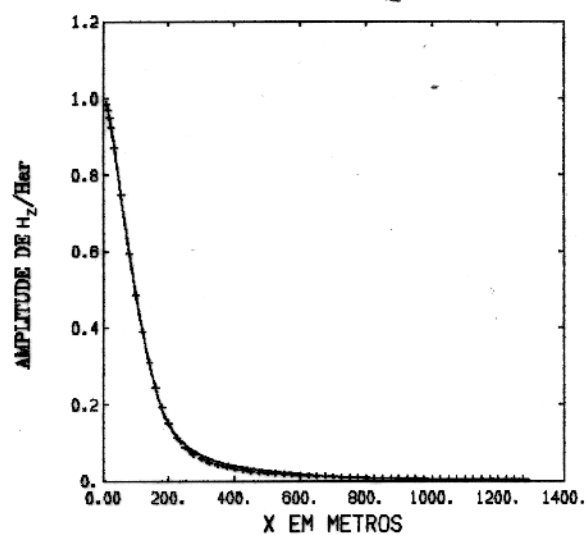
2.4.2 Colina com Corpo Centralizado (Modelo 4B)

O modelo 4B, Fig. 17, é usado para analisar o efeito de uma colina localizada bem acima de um corpo retangular condutivo, de 150 m de espessura por 15 m de largura, e localizado a 65 m da superfície do terreno e a 692,5 m da linha de corrente. Para $\rho_1 = 1000 \Omega \text{ m}$, $\rho_2 = 2 \Omega \text{ m}$ e frequência de 1000 Hz. Observa-se que o corpo está a uma profundidade de 45 m em relação a linha de corrente.

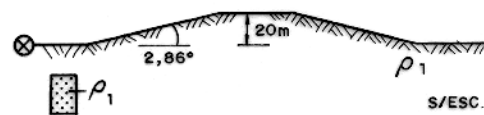
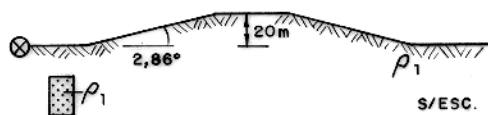
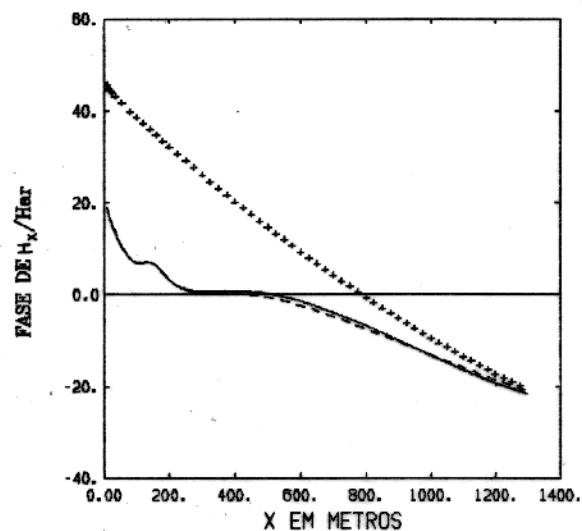
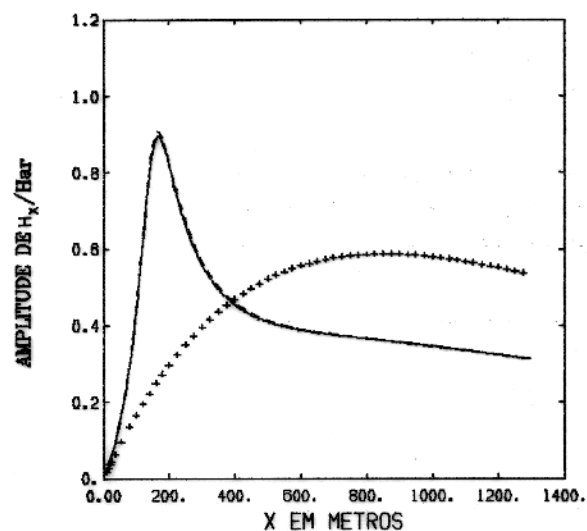
Tanto a amplitude da componente H_z , como a fase, só são influenciadas pela colina na região próxima ao corpo.

A amplitude da componente H_z apresenta um ponto de maior intensidade em 600 m e um ponto de menor intensidade em 880 m, porém o mesmo modelo sem a colina apresenta o ponto de maior intensidade da amplitude em 620 m e o de menor intensidade em 820 m. Além disso a colina provoca uma diminuição dos valores da amplitude para os pontos localizados antes do corpo e um aumento dos valores da amplitude para os pontos localizados após o corpo.

Quanto à componente H_x pode-se observar, pela Fig. 18b, que a amplitude é afetada pela colina na região próxima ao corpo, e apresenta valores menores do que os do mesmo modelo sem a colina. Por outro lado, a fase da componente H_x não é praticamente influenciada pela colina.



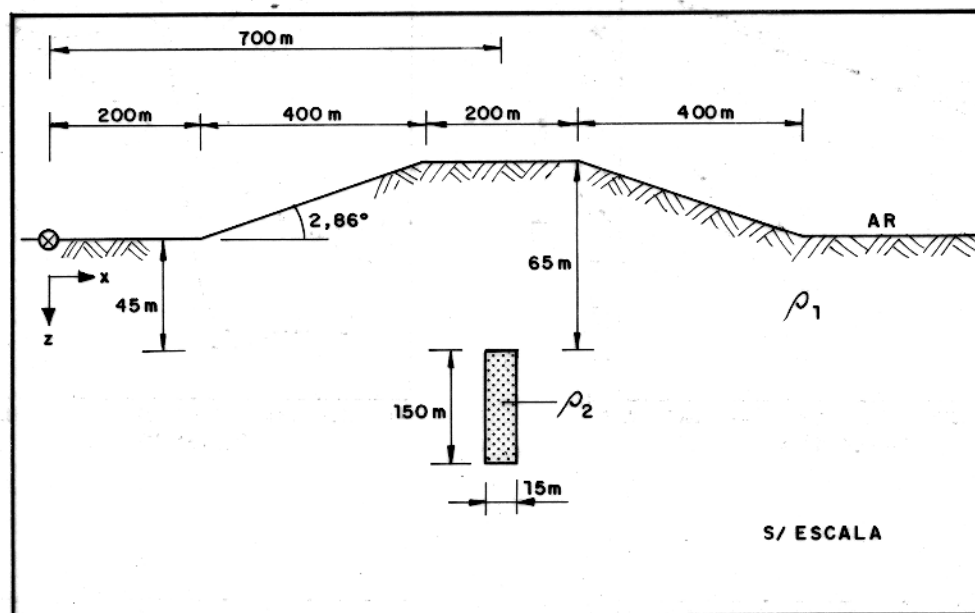
(a)



(b)

Figura 16 — (a) Componente H_z/H_{ar} para $\rho_1 = 10 \Omega m$. Frequência 1000 Hz. (b) Componente H_x/H_{ar} para $\rho_1 = 1000 \Omega m$. Frequência 1000 Hz. — Com a colina. --- Sem a colina. ++++ Semi-espaço homogêneo.

MODELO 4B



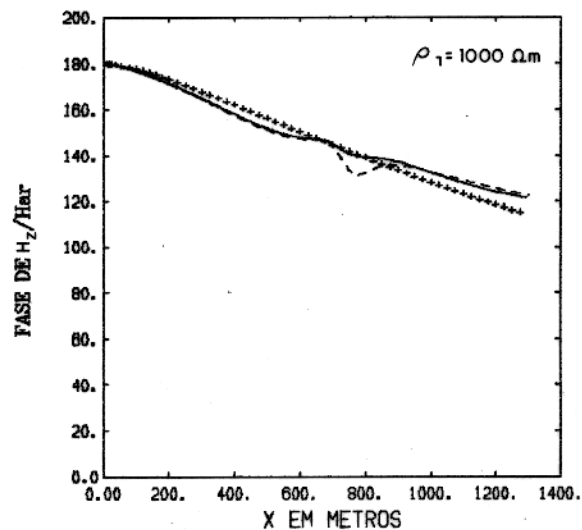
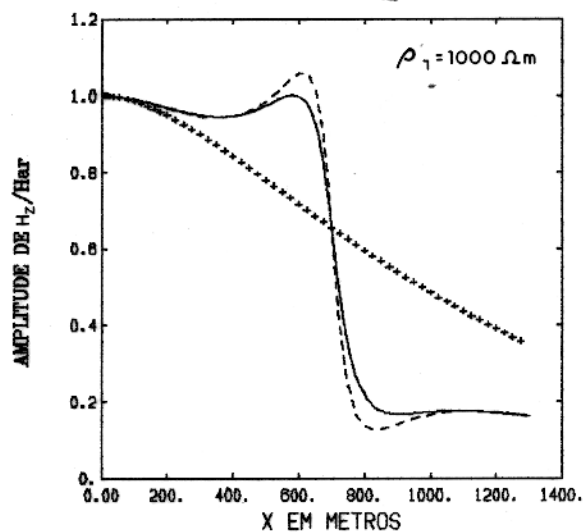
Número de incrementos na direção x = 83
 Número de incrementos na direção z = 65
 Número de elementos triangulares da malha 10790

Incrementos na direção x (m): 14400 2400 480 120 40 20 10
 10 * 5 10 20 25 6 * 20 19 * 25 10 5 2,5 3 * 5 2,5 5 10
 19 * 25 5 * 25 40 120 480 2400 14400

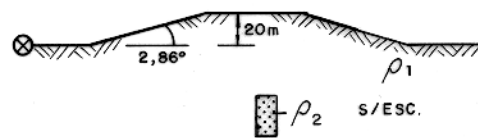
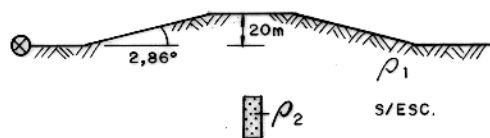
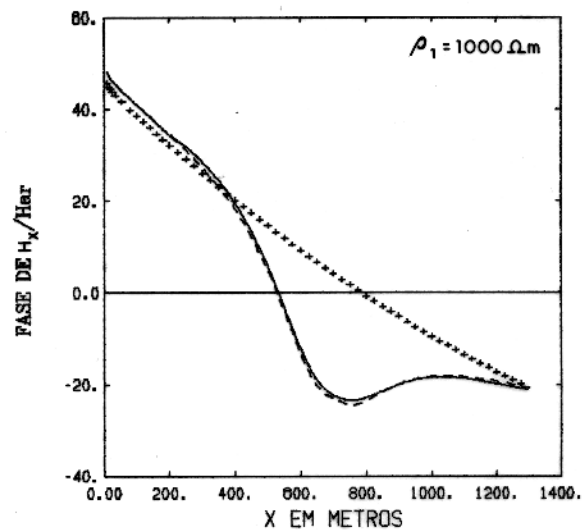
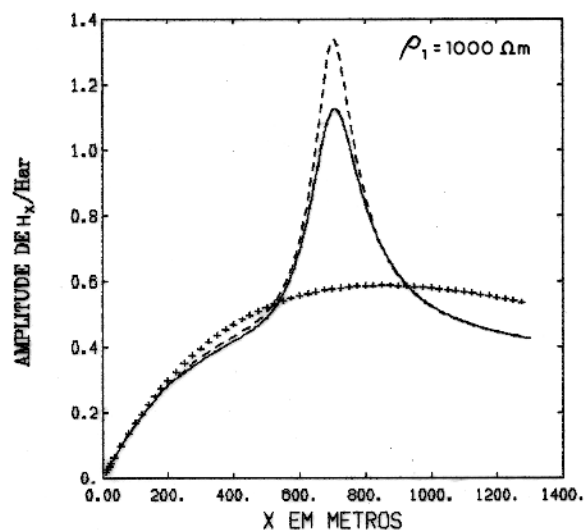
Incrementos na direção z (m): 12200 2400 480 120 40 10
 22 * 1,25 8,75 12 * 5 10 * 10 8 * 5 10 40 120 480 2400 12200

A linha de corrente (⊗) está no nó 820

Figura 17 — Dimensões do modelo 4B e a malha utilizada na discretização.



(a)



(b)

Figura 18 — Efeito da colina na presença de um dique de resistividade $\rho_2 = 2 \Omega m$ localizada abaixo da colina. Frequência 1000 Hz. — Com a colina. ---- Sem a colina. +++ Semi-espaço homogêneo.

2.4.3 Análise das Respostas dos Modelos 4A e 4B

O efeito da colina nos modelos 4A e 4B é o oposto ao do vale nos modelos 2A e 2B.

No modelo 4A a influência da colina é maior na fase da componente H_z , enquanto no modelo 4B tanto a amplitude como a fase da componente H_z são fortemente afetadas.

A componente H_x só é fortemente influenciada na amplitude para o modelo 4B.

2.5 Declive num Meio Homogêneo (Modelo 5)

Com o modelo 5, Fig. 19, tem-se a finalidade de estudar o efeito de um declive em um meio homogêneo, onde as resistividades utilizadas são de 100 Ω m e 10 Ω m, para uma frequência de 1000 Hz. O declive está a 200 m da linha de corrente, possui 2,86° de inclinação e 20 m de profundidade. Pode-se dizer que o declive corresponde a lateral esquerda do vale.

A Fig. 20a mostra o efeito do declive na amplitude e fase da componente H_z , para um meio de resistividade 100 Ω m. Como se pode observar, a amplitude praticamente não é influenciada pelo declive, apenas para pontos entre 200 m e 800 m apresenta valores ligeiramente menores que os do meio homogêneo. A fase da componente H_z , não é influenciada para pontos entre a linha e o início do declive, mas para pontos entre 200 m e 900 m, a fase apresenta valores menores que os do meio homogêneo. Para pontos entre 900 m e 1300 m a fase praticamente não é influenciada pelo declive.

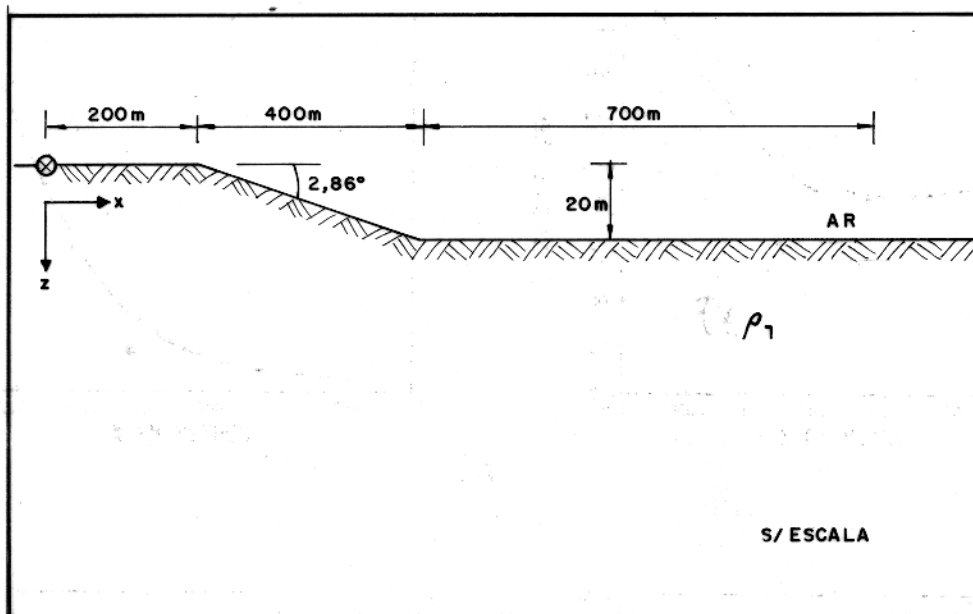
Diminuindo a resistividade do meio para 10 Ω m, Fig. 20b, a amplitude de H_z praticamente não é afetada pelo declive. Para pontos entre a linha de corrente e o declive, a fase da componente H_z praticamente não é influenciada, porém a fase apresenta uma forte diminuição dos seus valores entre os pontos de 200 m e 780 m, enquanto entre 780 m e 1300 m o declive praticamente não influencia na resposta da fase.

2.5.1 Análise das Respostas do Modelo 5

O efeito do declive em um meio homogêneo corresponde ao efeito da parede do vale mais próxima da linha de corrente.

A análise dos efeitos do modelo 5 permite afirmar que os efeitos causados pelo vale (modelos 1, 2A e 2B) são devidos às paredes laterais e não pelo fundo do vale. A profundidade do

MODELO 5



Número de incrementos na direção x = 156

Número de incrementos na direção z = 38

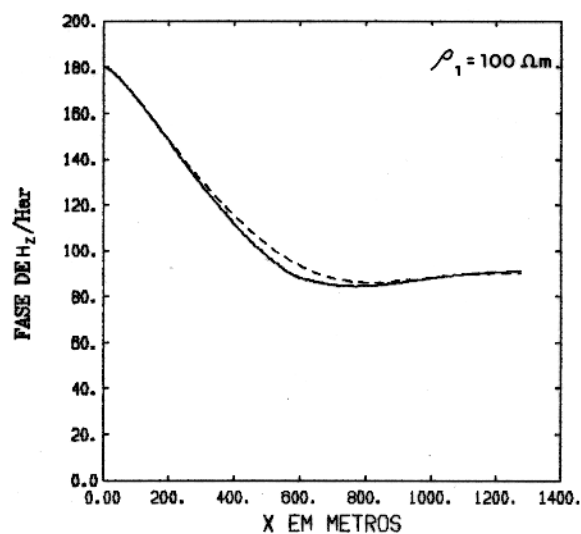
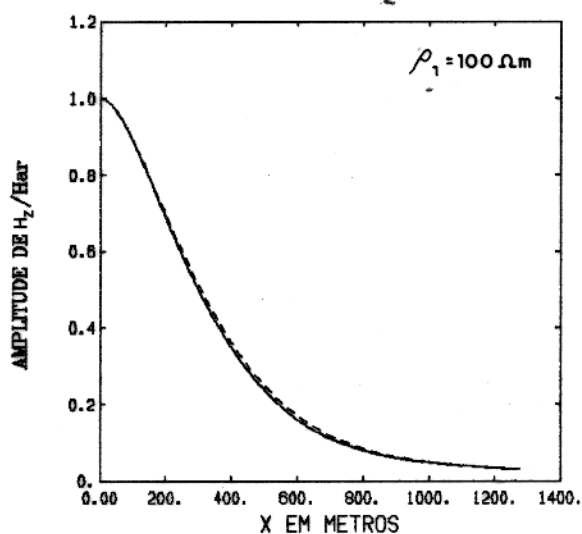
Número de elementos triangulares da malha 11856

Incrementos na direção x (m): 14 400 240 480 120 40 10 10 * 5
 10 20 25 6 * 20 125 * 25 40 120 480 2400 14400

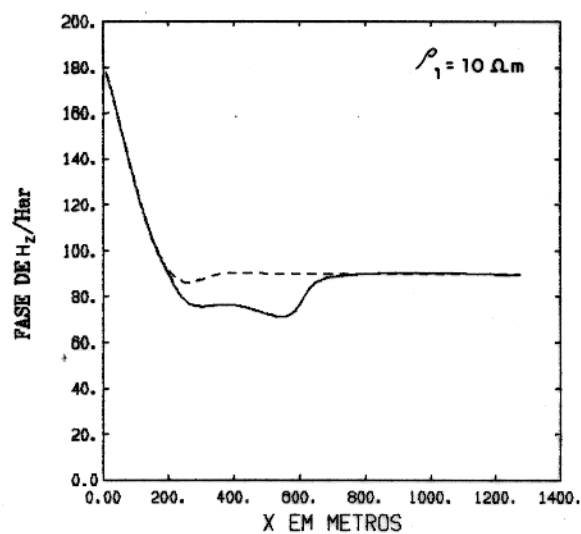
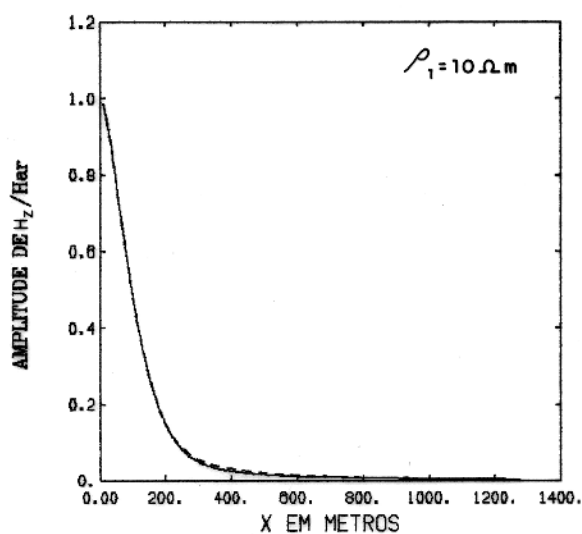
Incrementos na direção z (m): 12 400 2400 480 120 40 10
 26 * 1,25 10 40 120 480 2400 12400

A linha de corrente (⊗) está no nó 480

Figura 19 — Dimensões do modelo 5 e a malha utilizada na discretização.



(a)



(b)

Figura 20 – Efeito do declive em um meio de resistividade $\rho_1 = 100$ e $10 \Omega m$. Frequência de 1000 Hz.

vale só é importante no sentido de aumentar ou diminuir o comprimento das paredes laterais, mas se as medidas forem feitas suficientemente longe das paredes laterais, o vale não influenciará nas respostas obtidas.

2.6 Aclive num Meio Homogêneo

Com o modelo 6, Fig. 21, tem-se a finalidade de estudar o efeito de um aclive num meio homogêneo, usando os mesmos valores de resistividade e frequência do estudo do modelo 5. O aclive corresponde a lateral esquerda da colina, e portanto está a 200 m da linha de corrente, possui $2,86^\circ$ de inclinação e 20 m de altura.

Num meio de resistividade $100 \Omega \text{ m}$, Fig. 22a, a amplitude da componente H_z não é influenciada para pontos entre a linha e o aclive, mas para pontos entre 200 m e 720 m, a amplitude apresenta valores maiores que os do meio homogêneo. A fase da componente H_z também não é influenciada para pontos entre a linha e o aclive, mas para pontos entre 200 m e 820 m, apresenta valores maiores que os do meio homogêneo, enquanto que para pontos entre 820 m e 1300 m o aclive praticamente não influencia na resposta da fase.

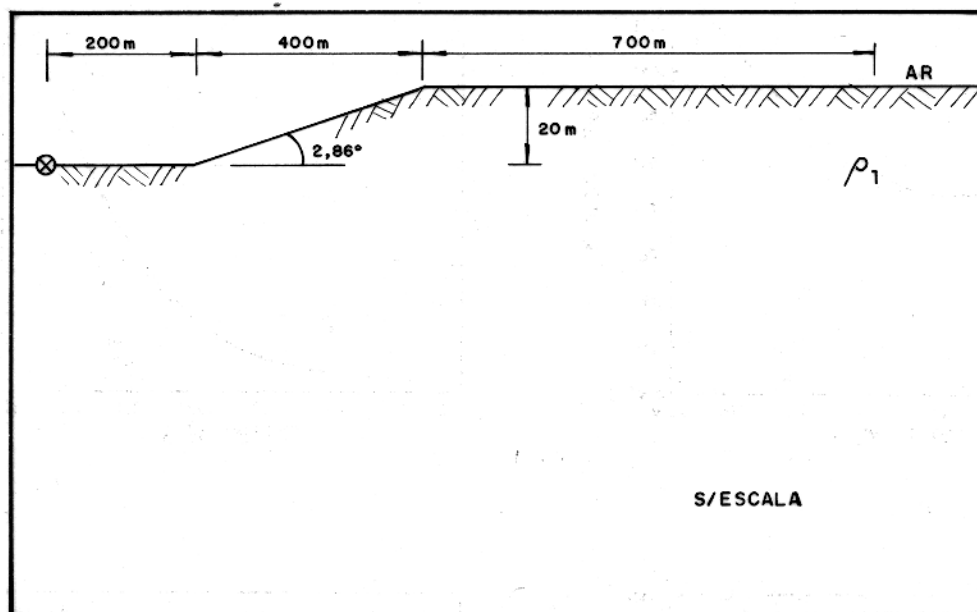
Diminuindo a resistividade do meio para $10 \Omega \text{ m}$, figura 22b, a amplitude de H_z é muito pouco influenciada pelo aclive, enquanto a fase só é afetada para pontos entre 200 m e 680 m, apresentando uma forte diminuição dos seus valores.

2.6.1 Análise das Respostas do Modelo 6

O efeito do aclive corresponde ao efeito da parede lateral da colina mais próxima da linha de corrente.

A análise do modelo 6 permite afirmar que o efeito da colina (modelos 3, 4A e 4B) é causado pelas paredes laterais da colina e não pela altura do topo da colina. A altura da colina é apenas importante no sentido de aumentar ou diminuir o comprimento das paredes laterais, mas se as medidas forem feitas suficientemente longe das paredes laterais, a colina não influenciará nas respostas obtidas.

MODELO 6



Número de incrementos na direção x = 156

Número de incrementos na direção z = 38

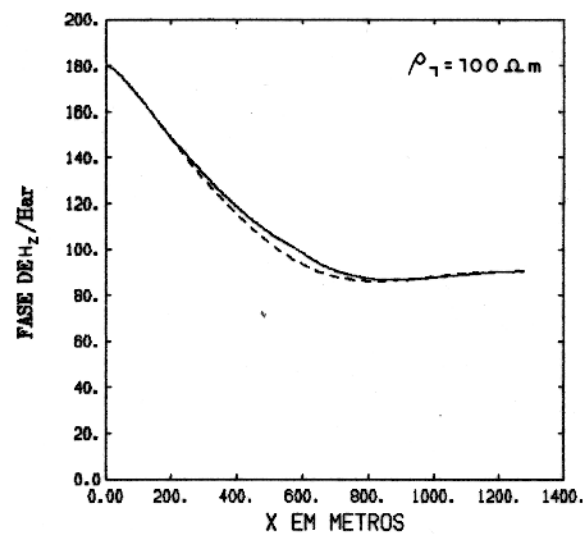
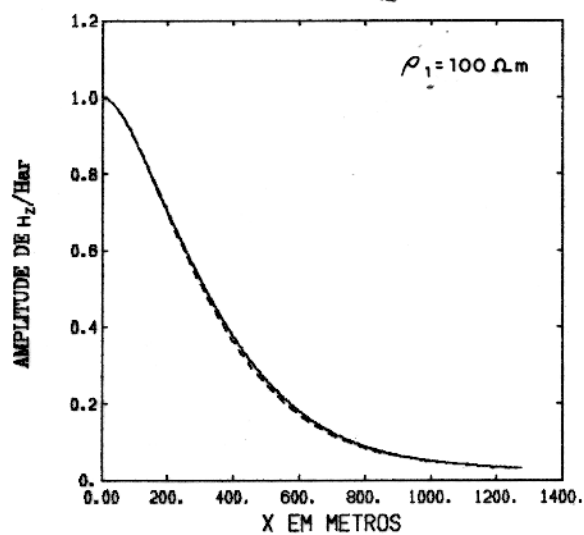
Número de elementos triangulares da malha 11856

Incrementos na direção x (m): 14400 2400 480 120 40 20
 10 10 * 5 10 20 25 6 * 20 125 * 25 40 120 480
 2400 14400

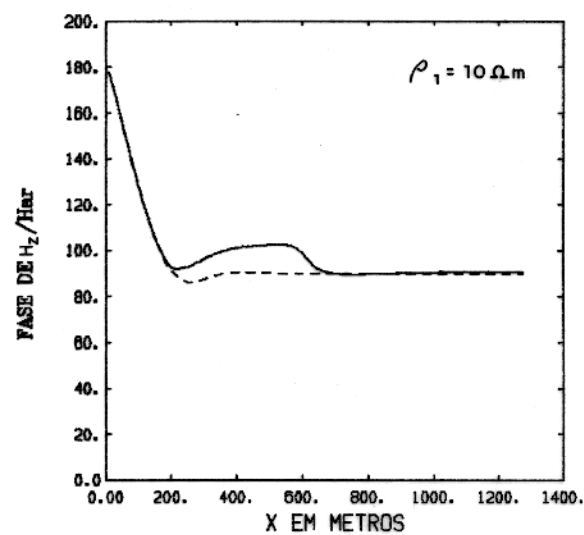
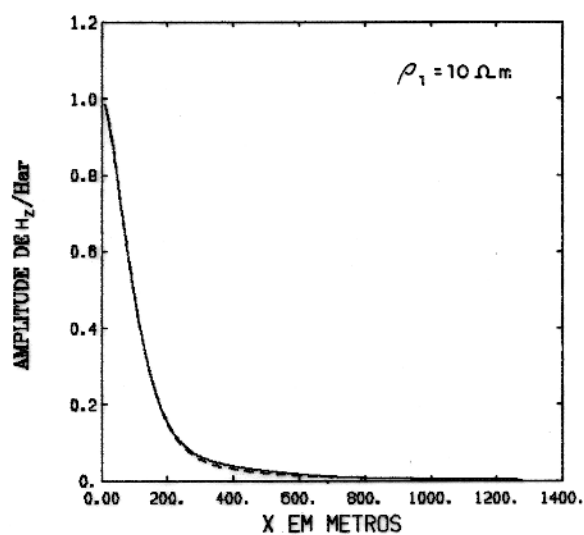
Incrementos na direção z (m): 12400 2400 480 120 40 10
 26 * 1,25 10 40 120 480 2400 12400

A linha de corrente (⊗) está no nó 496

Figura 21—Dimensões do modelo 6 e a malha utilizada na discretização.



(a)



(b)

Figura 22 - Efeito do active em um meio de resistividade $\rho_1 = 100$ e $10 \Omega \cdot m$. Frequência 1000 Hz.

CAPÍTULO 3

EFEITO DA TOPOGRAFIA NO DOMÍNIO DO TEMPO

No estudo do efeito da topografia no domínio do tempo são utilizados alguns dos 6 modelos do domínio da frequência, porém usando duas linhas de correntes de sentidos opostos, onde a segunda linha está a 400 m de distância, à esquerda da linha usada nos outros modelos, como se as linhas fossem as laterais de um grande "loop" retangular energizado por um impulso de corrente. As respostas no domínio do tempo são obtidas em termos de dh_z/dt , que como se sabe é proporcional à voltagem no receptor. As respostas são calculadas para os tempos de decaimento de 1 ms, 7 ms e 15 ms e traçadas em escala logarítmica com a distância em escala aritmética, onde a linha mais próxima do vale, ou da colina, é a origem. Como os resultados de dh_z/dt são traçados em escala logarítmica, os valores negativos são analisados em termos de valor absoluto da resposta transiente. Da mesma forma que no domínio da frequência, alguns resultados numéricos estão no apêndice.

3.1 Vale num Meio Homogêneo (Modelo 1)

O efeito, na resposta transiente, para um vale com 20 m de profundidade, $2,86^\circ$ de inclinação num meio de resistividade $\rho_1 = 100 \Omega \text{ m}$, é mostrado na Fig 23.

Como pode ser observado, para o tempo de 1 ms o vale só influencia os pontos próximos ao "cross over", que se encontra deslocado para direita, fazendo com que os pontos do ramo positivo apresentem valores maiores que os do meio homogêneo, enquanto os do ramo negativo apresentem valores menores.

Para o tempo de 7 ms, a influência do vale já é maior, sendo notada a partir de 600 m, região central do vale, onde os valores do ramo positivo da curva são maiores que os do meio homogêneo. O "cross over" do meio homogêneo está a 1140 m, enquanto com a presença do vale, tal ponto se desloca de 60 m para a direita. Os pontos localizados entre 1200 e 1300 m, ramo negativo da curva, possuem valores menores que os do meio homogêneo, porém a curva que representa os valores com o vale tende à curva do meio homogêneo à medida que se afasta do vale.

Para o tempo de 15 ms, só ocorre o ramo positivo da curva, porém para esse tempo praticamente não se observa o efeito do vale na resposta transiente.

Aumentando a profundidade do vale para 80 m, e a inclinação para $11,31^\circ$, Fig 24, observa-se que para o tempo de 1 ms a influência do vale continua pequena, limitando-se a deslocar o "cross over" de 20 m à esquerda do ponto do meio homogêneo. O ramo positivo da curva praticamente não é influenciado com a presença do vale, enquanto o ramo negativo apresenta valores maiores que os do meio homogêneo entre 300 m e 800 m.

Para o tempo de 7 ms, o vale com 80 m de profundidade apenas intensifica os efeitos descritos no vale com 20 m de profundidade. O "cross over" no vale com 80 m está em 1250 m, enquanto no vale com 20 m de profundidade está em 1200 m.

3.1.1 Análise das Respostas Transientes do Modelo 1

A maior influência do vale se dá nos pontos próximos ao "cross over" das curvas da resposta transiente.

O tempo de 7 ms é o que mostra a maior influência do vale.

O vale com 20 m de profundidade desloca o "cross over" para a direita, enquanto o vale com 80 m de profundidade desloca o "cross over" do tempo de 1 ms para a esquerda e do tempo de 7 ms para a direita.

O tempo de 15 ms só apresenta o ramo positivo das curvas, e a influência do vale só é notada para o vale com 80 m de profundidade, onde apresenta um aumento da intensidade da resposta transiente.

3.2 Vale com Corpo num Meio Homogêneo (Modelo 2)

Modelo formado por um corpo condutivo retangular de resistividade $\rho_2 = 2 \Omega \text{ m}$, imerso num meio homogêneo de resistividade $\rho_1 = 1000 \Omega \text{ m}$. O corpo tanto pode estar deslocado em relação ao vale (modelo 2A) ou centralizado em relação ao vale (Modelo 2B). As dimensões são as mesmas usadas no domínio da frequência.

3.2.1 Vale com Corpo Deslocado à Esquerda (Modelo 2A)

O efeito do vale na resposta transiente do modelo 2A é mostrado na Fig 25.

Percebe-se que para o tempo de 1 ms os valores do ramo positivo, bem como o ramo

negativo, praticamente não sofrem a influência do vale, além de não haver deslocamento do ponto de "cross over".

Para o tempo de 7 ms, observa-se que ocorre um ramo negativo entre dois ramos positivos. Para os pontos pertencentes ao ramo negativo, pode ser observado que os valores são menores que os do mesmo modelo sem o vale, para pontos entre 200 m e 260 m, e maiores para os pontos localizados entre 260 m e 500 m. O ramo positivo, localizado à esquerda do ramo negativo praticamente não sofre a influência do vale, enquanto o situado à direita possui valores menores que os do mesmo modelo sem o vale. Ocorrem dois pontos de "cross over", estando o correspondente ao primeiro ramo positivo deslocado 20 m à direita, e ao segundo ramo positivo deslocado 40 m à direita.

Para o tempo de 15 ms, ocorre apenas o ramo positivo da curva, e percebe-se que praticamente o vale não influencia na resposta transiente.

3.2.2 Vale com Corpo Centralizado (Modelo 2B)

O efeito do vale na resposta transiente do modelo 2B é mostrado na Fig 26.

Para o tempo de 1 ms, o ramo positivo das curvas praticamente não é influenciado pelo vale. Apenas na vizinhança do "cross over", os valores são maiores que os do modelo sem o vale. O ramo negativo é ligeiramente mais afetado, pois nos pontos próximos ao "cross over", apresenta valores maiores que os do mesmo modelo sem o vale entre 700 m e 1200 m, porém a influência diminui à medida que se afasta do vale. Quanto ao "cross over", não ocorre deslocamento, estando a 700 m da linha de corrente.

Para o tempo de 7 ms, ocorre um ramo negativo entre dois positivos. O primeiro ramo positivo, localizado entre a linha e o ponto de 740 m, não é muito influenciado pelo vale, apenas entre os pontos de 600 m e 700 m, os valores são maiores que os do modelo sem o vale. O segundo ramo positivo apresenta valores menores que os do modelo sem o vale, entre os pontos 960 m e 1140 m, enquanto que à medida que se afasta do vale, menor é o efeito. Para os pontos correspondentes ao ramo negativo, entre 760 m e 960 m, os valores são maiores que os do modelo sem o vale. O primeiro "cross over" não é deslocado e ocorre em 740 m, enquanto o segundo "cross over" ocorre em 960 m, estando deslocado 50 m à direita.

Para o tempo de 15 ms, só há o ramo positivo da curva e praticamente o vale não influencia

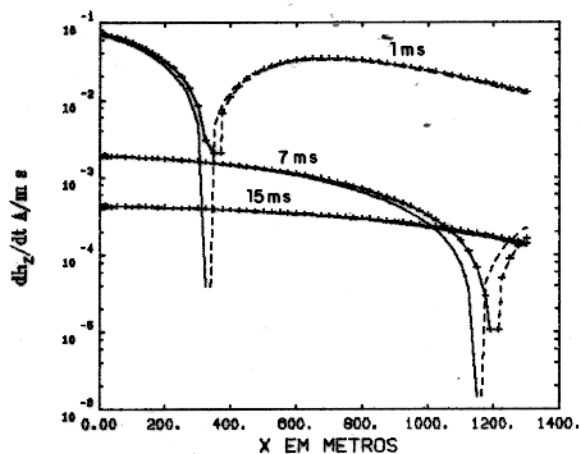


Figura 23—Efeito do vale de 20m de profundidade na resposta transiente do meio homogêneo.

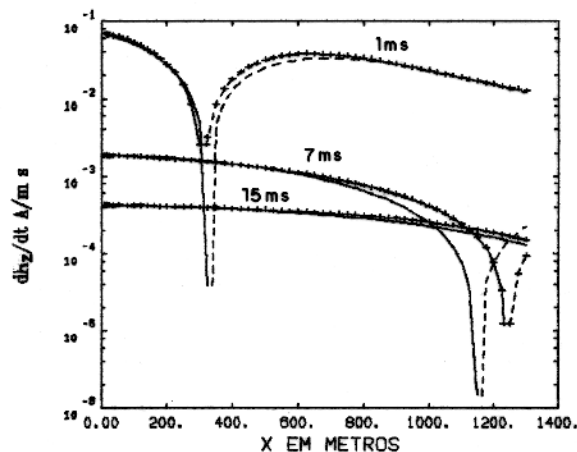


Figura 24—Efeito do vale de 80m de profundidade na resposta do meio homogêneo.

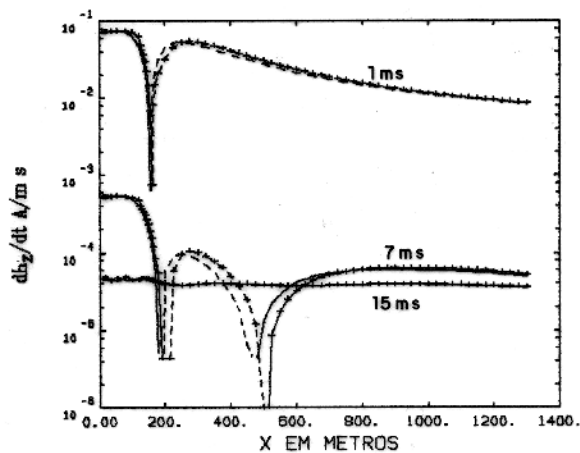


Figura 25—Efeito do vale na resposta transiente com o dique deslocado em relação ao vale.

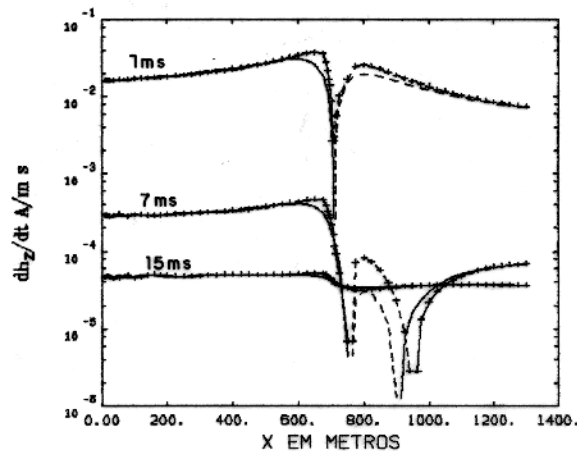


Figura 26—Efeito do vale na resposta transiente com o dique em baixo do vale.

- ++++ Ramo positivo com o vale
- +--+ Ramo negativo com o vale
- Ramo positivo sem o vale
- Ramo negativo sem o vale

o modelo 2B.

3.2.3 Análise das Respostas Transientes dos Modelos 2A e 2B

O vale influencia muito pouco as respostas transientes dos modelos 2A e 2B.

A maior influência se dá para o tempo de 7 ms. Para este tempo ocorre um ramo negativo entre dois positivos, sendo que o "cross over" mais distante da linha de corrente sofre um deslocamento para a direita. Em geral nos pontos do ramo negativo, os valores da resposta transiente são maiores que os do mesmo modelo sem o vale.

3.3 Colina num Meio Homogêneo (Modelo 3)

O efeito de uma colina, com 20 m de altura e $2,86^\circ$ de inclinação das paredes laterais num meio homogêneo de resistividade $100 \Omega \text{ m}$, é mostrado na Fig 27.

Para o tempo de 1 ms, observa-se que a colina praticamente só afeta a resposta transiente nos pontos próximos ao "cross over" das curvas, onde o ramo positivo apresenta valores maiores que os do meio homogêneo e o ramo negativo apresenta valores menores que os do meio homogêneo. O "cross over" das curvas está em 360 m e encontra-se deslocado 20 m à direita.

Para o tempo de 7 ms e 15 ms observa-se que a colina praticamente não afeta a resposta transiente.

Aumentando a altura da colina para 80 m e a inclinação para $11,31^\circ$, Fig 28, observa-se que para o tempo de 1 ms ocorre uma intensificação dos efeitos descritos para a colina com 20 m de altura, além de deslocar o "cross over" mais para a direita (40 m em relação ao ponto do vale com 20 m de profundidade).

Para o tempo de 7 ms, a colina com 80 m de altura desloca o "cross over" de 30 m à esquerda em relação ao ponto do meio homogêneo, uma vez que a colina com 20 m de altura praticamente não afeta a resposta para o tempo de 7 ms. Dessa forma os pontos do ramo positivo da curva apresentam valores menores que os do meio homogêneo, para pontos localizados ao redor do "cross over", enquanto os pontos do ramo negativo apresentam valores maiores que os do meio homogêneo.

Para o tempo de 15 ms, a colina com 80 m de altura não afeta a resposta transiente.

3.3.1 Análise das Respostas Transientes do Modelo 3

A colina com 20 m de altura praticamente não afeta a resposta transiente do meio homogêneo.

A colina com 80 m de altura causa um efeito oposto ao do vale com 80 m de profundidade, pois enquanto o vale desloca o "cross over" do tempo de 1 ms para a esquerda, a colina o desloca para a direita. E para o tempo de 7 ms o vale provoca um deslocamento do "cross over" à direita, enquanto a colina desloca à esquerda.

3.4 Colina com Corpo num Meio Homogêneo (Modelo 4)

Modelo formado por um corpo de resistividade $\rho_2 = 2 \Omega \text{ m}$, imerso num meio de resistividade $\rho_1 = 1000 \Omega \text{ m}$. O efeito da colina é estudado para o caso do corpo estar deslocado à esquerda da colina (modelo 4A), e para o caso do corpo estar centralizado em relação a colina (modelo 4B). As dimensões são as mesmas das usadas no domínio da frequência.

3.4.1 Colina com Corpo Deslocado à Esquerda (Modelo 4A)

Os efeitos da colina na resposta transiente do modelo 4A estão na Fig 29.

Para o tempo de 1 ms, a colina praticamente não influencia na resposta do modelo 4A, o mesmo acontecendo com os tempos de 7 ms e 15 ms.

3.4.2 Colina com Corpo Centralizado (Modelo 4B)

Os efeitos da colina na resposta transiente do modelo 4B estão na Fig 30.

Pode-se observar que para o tempo de 1 ms a colina não afeta os valores do ramo positivo e praticamente não desloca o ponto de "cross over". Os pontos do ramo negativo, na região próxima ao "cross over", apresentam valores menores que os do mesmo modelo sem a colina.

Para o tempo de 7 ms, percebe-se que ocorre apenas o ramo positivo, enquanto a curva do modelo sem a colina apresenta um ramo negativo entre dois positivos. Entre a linha de corrente e o ponto de 700 m praticamente não ocorre influência da colina, enquanto entre os pontos de 900 m e 1300 m os valores são menores que os do modelo sem a colina, diminuindo o efeito à medida que se afasta da colina. O maior efeito da colina está justamente entre os pontos de 740 m e

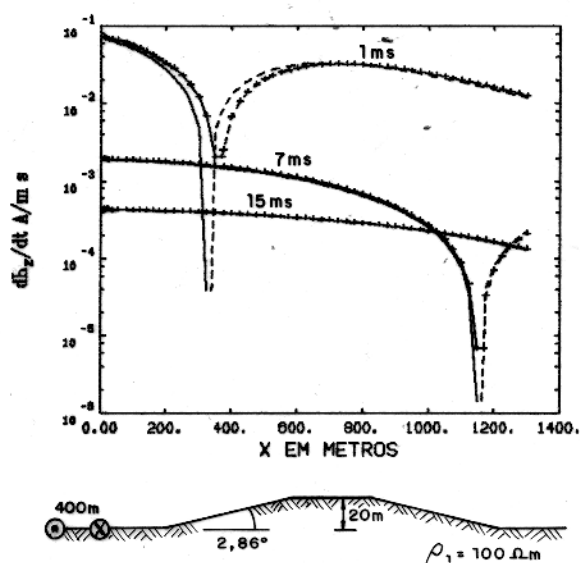


Figura 27 - Efeito da colina de 20m de altura na resposta transiente do meio homogêneo.

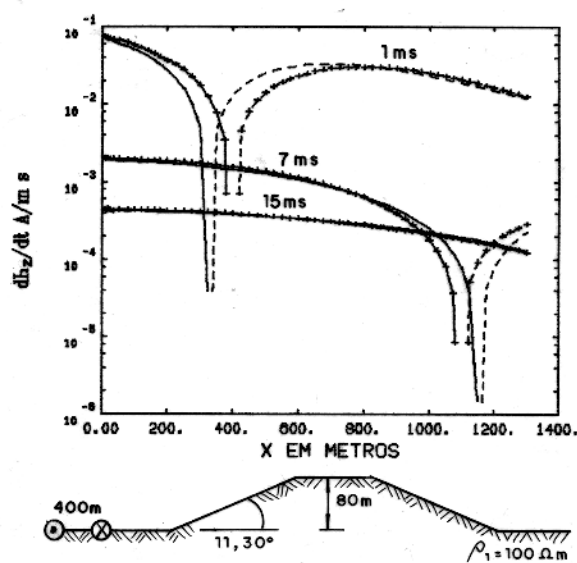


Figura 28 - Efeito da colina de 80m de altura na resposta transiente do meio homogêneo.

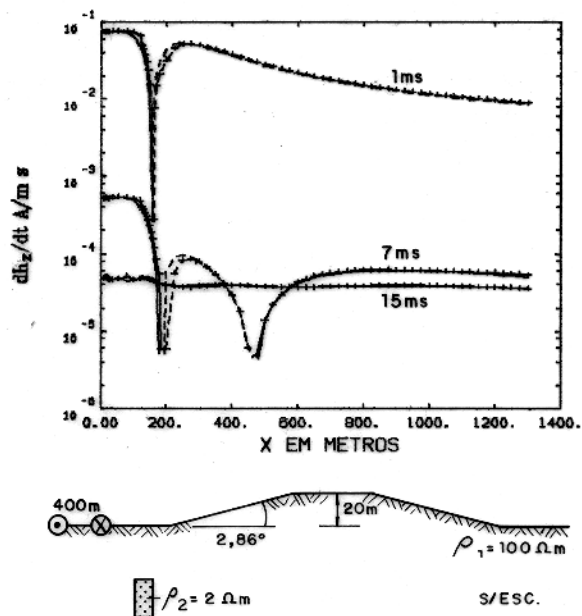


Figura 29 - Efeito da colina na resposta transiente com o dique deslocado em relação à colina.

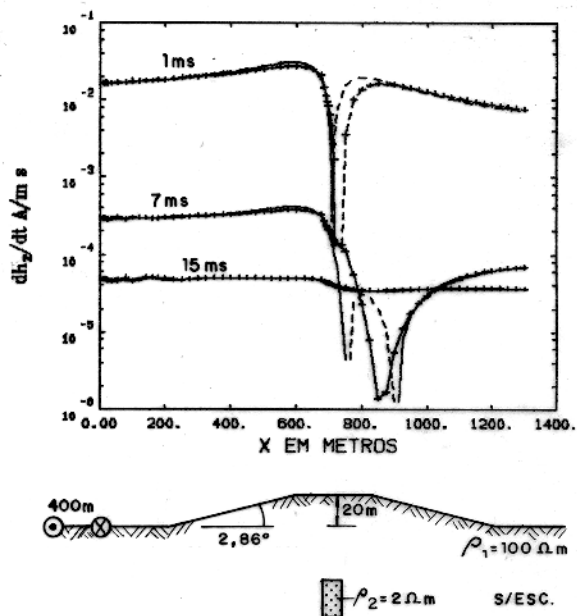


Figura 30 - Efeito da colina na resposta transiente com o dique em baixo da colina.

- Ramo positivo com a colina
- +--+ Ramo negativo com a colina
- Ramo positivo sem a colina
- Ramo negativo sem a colina

900 m, onde ocorre no modelo sem a colina o ramo negativo. Tal fato não ocorre com a presença da colina, pois entre esses pontos, os valores da resposta transiente tende a diminuir à medida que se afasta da linha, apresentando em 830 m um ponto de mínimo. Mas não há mudança de sinal da curva, como consequência do aumento da distância do corpo à superfície da terra, na região correspondente ao topo da colina.

Para o tempo de 15ms, a colina praticamente não afeta a resposta transiente do modo 4B.

3.4.3 Análise das Respostas dos Modelos 4A e 4B

A colina influencia muito pouco as respostas transientes dos modelos 4A e 4B.

A maior influência se dá para o tempo de 7 ms no modelo 4B. Para este tempo, ocorre um ramo negativo entre dois positivos quando não se leva em conta a colina. Mas com a colina apenas aparece o ramo positivo, pois para os pontos sobre a colina, a distância do corpo à superfície do terreno aumenta. Sendo assim, a intensidade da resposta transiente diminui até atingir um valor mínimo em 830 m, porém não ocorre a mudança de sinal das curvas.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÃO

4.1 Desenvolvimento do Algoritmo para Modelos 2D–2D, Modo TE

Os testes efetuados mostram que o algoritmo, aqui desenvolvido para resolver a equação diferencial do modelo 2D–2D, modo TE, por elementos finitos, funciona perfeitamente tanto no domínio da frequência, como no domínio do tempo.

Os testes também mostram que não há problema numérico em resolver a equação diferencial do modelo 2D–2D, modo TE, via campo elétrico secundário, mesmo que a heterogeneidade do modelo primário seja um corpo infinitamente resistivo. Isso é possível, pois embora uma fonte infinitamente resistível não apresente correntes induzidas, o algoritmo de elementos finitos leva em consideração o contraste de condutividade entre o modelo primário e a heterogeneidade. Esses testes são fundamentais para o estudo do efeito da topografia, pois um vale corresponde a uma heterogeneidade infinitamente resistiva.

A presença de um corpo infinitamente resistivo em um meio homogêneo provoca uma redistribuição das correntes induzidas ao redor desse corpo, o que acarreta a anomalia observada.

A presença de um patamar nas curvas da amplitude e fase da componente H_z sobre o ponto médio do corpo, representado por uma cavidade preenchida por ar como se fosse uma caverna, é um bom indicativo da sua localização.

4.2 Efeito da Topografia no Domínio da Frequência

4.2.1 Meio Homogêneo

A amplitude da componente H_z é pouco afetada pela variação do contraste de resistividade da terra com o ar, mas é influenciada pela variação da profundidade e inclinação das paredes do vale, pois mantendo o meio com resistividade de $1000 \Omega \text{ m}$ e variando a profundidade e inclinação das paredes, os efeitos na amplitude se intensificam.

A fase de H_z é tanto influenciada pela variação da profundidade e inclinação das paredes do vale, quanto pelo contraste de resistividade da terra com o ar. Em um meio condutivo, a parede lateral do vale, que fica mais próxima da linha de corrente, causa uma forte diminuição dos valores

da fase, enquanto a parede lateral mais distante da linha de corrente provoca um forte aumento dos valores da fase.

Os pontos localizados entre a linha de corrente e o início do vale, ou da colina, não apresentam alteração nas respostas da amplitude e fase da componente H_z .

O efeito da colina na amplitude e fase da componente H_z é o oposto ao observado com o vale, pois nos pontos onde o vale provoca uma diminuição dos valores da amplitude ou da fase, a colina causa um aumento desses valores, e vice-versa.

Os efeitos observados pelo vale e pela colina num meio homogêneo são causados pela redistribuição das correntes induzidas ao redor das paredes laterais do vale ou da colina. Para o caso do vale, ocorre uma redistribuição das correntes pelo lado de fora do vale, pois o ar é infinitamente resisitivo, enquanto para o caso da colina ocorre uma redistribuição das correntes induzidas pelo lado de dentro, pois na colina há correntes induzidas. Sendo assim, a profundidade do vale ou a altura da colina, influenciam apenas no comprimento das paredes laterais.

O fato de que no caso do declive, ou do aclave, num meio homogêneo, só ocorrer alteração dos valores da amplitude e da fase da componente H_z para pontos próximos de tais feições, reafirma que a redistribuição das correntes induzidas só ocorre ao redor das laterais do vale ou da colina. Além disso demonstra que a profundidade do vale e a altura da colina só influenciam no comprimento das paredes laterais, pois os pontos localizados no fundo do declive, ou no topo do aclave, mas longe da parede lateral (aproximadamente 500 m para os modelos aqui estudados), não têm suas respostas alteradas em relação as do meio homogêneo.

4.2.2 Corpo Condutivo num Meio Homogêneo

A mesma influência que o vale, ou a colina, exercem na componente H_z para o meio homogêneo, ocorre também na resposta de um meio formado por um corpo retangular condutivo imerso num meio homogêneo. Apenas que, mantendo constante a profundidade do corpo em relação ao nível da linha de corrente, ocorre uma maior influência nos pontos próximos do corpo quando este está localizado embaixo do vale, ou da colina. Pois nesses casos, modelos 2B (vale) e modelos 4B (colina), ocorre uma diminuição da distância do corpo em relação à superfície do terreno para os pontos dentro do vale, e um aumento da distância em relação à superfície do terreno para os

pontos sobre o topo da colina.

Nos modelos 2A e 4A onde o vale ou a colina estão deslocados para a direita do corpo, a componente H_x é menos influenciada do que a componente H_z . Apenas a amplitude de H_x é fortemente influenciada nos modelos 2B e 4B, em que o corpo está localizado embaixo do vale e da colina. Nesses casos ocorre um forte aumento dos valores da amplitude para pontos próximos do corpo, no caso do modelo 2B, e uma forte diminuição dos valores da amplitude para o caso do modelo 4B. O motivo é o mesmo descrito para a componente H_z .

4.3 Efeito da Topografia no Domínio do Tempo

4.3.1 Meio Homogêneo

A maior influência do vale se dá nos pontos próximos ao "cross over" das curvas da resposta transiente.

O tempo de 7 ms é o que mostra a maior influência do vale.

O vale com 20 m de profundidade desloca os pontos de "cross over" para a direita, enquanto o vale com 80 m de profundidade desloca o "cross over" da curva de 1 ms para a esquerda e da curva de 7 ms para a direita.

O tempo de 15 ms praticamente não mostra influência do vale ou da colina.

A colina com 20 m de altura praticamente não afeta a resposta transiente do meio homogêneo.

A colina com 80 m de altura causa um efeito oposto ao do vale com 80 m de profundidade, pois enquanto o vale desloca o "cross over" da resposta de 1 ms para a esquerda, a colina o desloca para a direita. E para o tempo de 7 ms o vale provoca um deslocamento do "cross over" à direita, enquanto a colina desloca à esquerda.

4.3.2 Corpo Condutivo num Meio Homogêneo

O vale influencia muito pouco as respostas transientes dos modelos 2A e 2B.

A maior influência se dá para o tempo de 7 ms. Para este tempo ocorre um ramo negativo entre dois positivos, sendo que o "cross over" mais distante da linha de corrente sofre um desloca-

mento para a direita. Em geral nos pontos do ramo negativo, os valores da resposta transiente são maiores que os do mesmo modelo sem o vale.

A colina influencia muito pouco as respostas transientes dos modelos 4A e 4B.

A maior influência se dá para o tempo de 7 ms no modelo 4B. Para este tempo, ocorre um ramo negativo entre dois positivos quando não se leva em conta a colina. Mas com a colina apenas aparece o ramo positivo, pois para os pontos sobre a colina, a distância do corpo à superfície do terreno aumenta. Sendo assim a intensidade da resposta transiente diminui até atingir um valor mínimo em 830 m, porém não ocorre a mudança de sinal das curvas.

4.4 Modos de se Evitar o Efeito da Topografia

Para as sondagens eletromagnéticas no domínio da frequência, uma forma de se evitar o efeito da topografia é escolher frequências baixas, pois o efeito topográfico é um efeito de superfície.

Se as estruturas a serem estudadas não são profundas, as frequências a serem utilizadas normalmente são altas e conseqüentemente a topografia influenciará nos resultados. Neste caso, não se deve fazer medidas ao longo das paredes laterais do vale, da colina, do declive ou do aclave.

As medidas que forem feitas entre a linha de corrente e o início do vale, ou da colina, não são afetadas, mas as medidas feitas dentro do vale, ou sobre o topo da colina, devem ser feitas longe das paredes laterais. Nos modelos aqui estudados, essa distância varia de 500 m a 700 m. Sendo assim deve-se evitar medidas dentro de vales, ou colinas, muito estreitos. É importante lembrar que mesmo quando o vale é muito profundo, ou a colina é muito elevada, podem ser feitas medidas no fundo do vale, ou no topo da colina, desde que as medidas sejam feitas longe das paredes laterais, pois não é o desnível entre a linha de corrente e o ponto de medida que afeta as respostas, e sim a redistribuição das correntes induzidas ao longo das paredes laterais do vale ou da colina. Analogamente para o caso do declive e aclave.

Para as sondagens eletromagnéticas no domínio do tempo, a influência da topografia é menor que no domínio da frequência, mas de qualquer forma deve-se evitar tempos de decaimento intermediários, onde o efeito da topografia é maior (nos modelos estudados aqui esse tempo é de 7 ms).

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Luiz Rijo pela excelente orientação e sobretudo pela dedicação e paciência na difícil tarefa em fazer de um Geólogo, que possuía conceitos Matemáticos confusos, em um Geofísico. Apenas o fato de ter sido aluno do professor Rijo, já teria justificado minha vinda a Belém do Pará, pois dentro do ambiente universitário brasileiro é muito comum se encontrar "estrelas", que se prevalecem pela arrogância extravagante com que se dirigem àqueles que estão iniciando, mas realmente é muitíssimo raro se encontrar numa universidade brasileira alguém com a qualificação e humildade do professor Rijo. Tenho certeza que as "estrelas" deveriam um dia, pelo menos um dia, assistir uma aula do professor Rijo para aprenderem como se ensina.

Ao professores Dr. Om Prakash Verma e Dr. Milton José Porsani pelas críticas e sugestões que permitiram melhorar muito este trabalho.

Ao convênio UFPa/PETROBRÁS/FADESP/CAPES/FINEP/CNPq pelo apoio financeiro e pagamento de bolsa de estudo.

Aos amigos Antônio Abel Gonzalez Carrasquilla e Walter Eugênio de Medeiros pelas sugestões dadas durante a elaboração do texto.

Aos amigos Joaquim Perminio de Oliveira Mota e André Luiz da Costa Vieira pelo auxílio na utilização das rotinas gráficas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADHIJAJA, J. A. ; HOHMANN G. W. ; ORISTAGLIO M. L., 1985, Two-Dimensional transiente eletromagnetic response. *Geophysics*, 50, 2849-2861
- COGGON, J. H., 1971, Electromagnetic and eletrical modeling by the finite element method. *Geophysics*, 36, 132-155
- FOX, R. C. ; HOMANN G. W. ; KILLPACK, T. J. ; RIJO, L., 1980, Topographic effects in resistivity and induced-polarization surveys. *Geophysics*, 45, 75-93
- HOHMANN, G. W., 1971, Electromagnetic scattering by conductors in the earth near a line source of current . *Geophysics*, 36, 101-131 .
- HOHMANN, G. W., 1988, Numerical modeling for electromagnetic methods of geophysics, *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Nabighian M. N. SEG., Tulsa
- NISSEN, J. & ENMARK T., 1986, An optimized digital filter for the Fourier transform. *Geophysical Prospecting* 30, 501-514
- RIJO, L., 1977, Modelling of eletric and electromagnetic data . Ph.D. Thesis . Salt Lake City, University of Utah, 242 p.
- RIJO, L., 1989, (em preparação) Um filtro digital ótimo para a transformada cosseno . *Anais do 1º. Cong. Bras. Geof.*
- RIJO, L., 1990, Teoria dos Métodos Eletromagnéticos I e II , Notas de aula. Belém , Universidade Federal do Pará
- WANNAMAKER, P. E. ; STODT, J. A. ; RIJO, L., 1986 ,Two-dimensional topographic response in magnetotellurics model using finite elements. *Geophysics*, 51, 2131-2144

APÊNDICE

MODELO 1

real=parte real da componente H_z do campo magnético total

imag=parte imaginária da componente H_z

ampl=amplitude da componente H_z

fase=fase da componente H_z

f=1000 Hz meio com $10 \Omega m$ de resistividade

x(m)=distância em metros apartir da linha de corrente

z(m)=profundidade em metros apartir do nível da linha de corrente

x(m)	z(m)	real	imag	ampl	fase
10.00	0.00	-0.9848E+00	0.4227E-01	0.9857E+00	0.1775E+03
20.00	0.00	-0.9423E+00	0.1156E+00	0.9494E+00	0.1730E+03
35.00	0.00	-0.8406E+00	0.2276E+00	0.8709E+00	0.1648E+03
80.00	0.00	-0.4478E+00	0.3910E+00	0.5945E+00	0.1389E+03
120.00	0.00	-0.1844E+00	0.3427E+00	0.3891E+00	0.1183E+03
160.00	0.00	-0.5005E-01	0.2379E+00	0.2432E+00	0.1019E+03
200.00	0.00	0.1919E-03	0.1492E+00	0.1492E+00	0.8993E+02
250.00	2.50	0.1621E-01	0.8008E-01	0.8170E-01	0.7855E+02
300.00	5.00	0.1209E-01	0.4764E-01	0.4915E-01	0.7577E+02
350.00	7.50	0.7902E-02	0.3263E-01	0.3358E-01	0.7639E+02
400.00	10.00	0.5936E-02	0.2454E-01	0.2525E-01	0.7641E+02
450.00	12.50	0.5194E-02	0.1924E-01	0.1993E-01	0.7490E+02
475.00	13.75	0.4987E-02	0.1717E-01	0.1788E-01	0.7380E+02
500.00	15.00	0.4795E-02	0.1539E-01	0.1612E-01	0.7269E+02
525.00	16.25	0.4562E-02	0.1387E-01	0.1460E-01	0.7179E+02
550.00	17.50	0.4224E-02	0.1260E-01	0.1329E-01	0.7147E+02
575.00	18.75	0.3630E-02	0.1157E-01	0.1213E-01	0.7259E+02
600.00	20.00	0.2588E-02	0.1076E-01	0.1106E-01	0.7647E+02
625.00	20.00	0.1390E-02	0.1036E-01	0.1046E-01	0.8236E+02
650.00	20.00	0.8340E-03	0.9973E-02	0.1001E-01	0.8522E+02
675.00	20.00	0.7614E-03	0.9624E-02	0.9654E-02	0.8548E+02
700.00	20.00	0.1864E-03	0.9293E-02	0.9295E-02	0.8885E+02
725.00	20.00	-0.3674E-03	0.8986E-02	0.8993E-02	0.9234E+02
750.00	20.00	-0.2946E-03	0.8719E-02	0.8724E-02	0.9194E+02
775.00	20.00	-0.5584E-03	0.8470E-02	0.8489E-02	0.9377E+02
800.00	20.00	-0.1214E-02	0.8289E-02	0.8378E-02	0.9833E+02
825.00	18.75	-0.2061E-02	0.8305E-02	0.8557E-02	0.1039E+03
850.00	17.50	-0.2467E-02	0.8267E-02	0.8627E-02	0.1066E+03
875.00	16.25	-0.2626E-02	0.8167E-02	0.8578E-02	0.1078E+03
900.00	15.00	-0.2677E-02	0.8016E-02	0.8451E-02	0.1085E+03
925.00	13.75	-0.2676E-02	0.7830E-02	0.8275E-02	0.1089E+03
950.00	12.50	-0.2649E-02	0.7620E-02	0.8068E-02	0.1092E+03
975.00	11.25	-0.2611E-02	0.7398E-02	0.7845E-02	0.1094E+03
1000.00	10.00	-0.2568E-02	0.7168E-02	0.7615E-02	0.1097E+03
1025.00	8.75	-0.2524E-02	0.6936E-02	0.7381E-02	0.1100E+03
1050.00	7.50	-0.2477E-02	0.6700E-02	0.7143E-02	0.1103E+03
1075.00	6.25	-0.2427E-02	0.6458E-02	0.6899E-02	0.1106E+03
1100.00	5.00	-0.2367E-02	0.6203E-02	0.6640E-02	0.1109E+03
1125.00	3.75	-0.2281E-02	0.5929E-02	0.6353E-02	0.1110E+03
1150.00	2.50	-0.2136E-02	0.5627E-02	0.6019E-02	0.1108E+03
1175.00	1.25	-0.1842E-02	0.5291E-02	0.5603E-02	0.1092E+03
1200.00	0.00	-0.1272E-02	0.4935E-02	0.5096E-02	0.1045E+03
1225.00	0.00	-0.6165E-03	0.4505E-02	0.4547E-02	0.9779E+02
1250.00	0.00	-0.2829E-03	0.4124E-02	0.4134E-02	0.9392E+02
1275.00	0.00	-0.1359E-03	0.3806E-02	0.3809E-02	0.9204E+02
1300.00	0.00	-0.6219E-04	0.3544E-02	0.3545E-02	0.9101E+02

MODELO 1

real=parte real da componente Ey do campo elétrico secundário

imag=parte imaginária da componente Ey

ampl=amplitude da componente Ey

fase=fase da componente Ey

f=1000 Hz meio com 10 Ω m de resistividade

x(m)=distância em metros apartir da linha de corrente

z(m)=profundidade em metros apartir do nível da linha de corrente

x(m)	z(m)	real	imag	ampl	fase
10.00	0.00	0.7465E-04	0.2834E-05	0.7470E-04	0.2174E+01
15.00	0.00	0.7696E-04	0.2873E-05	0.7701E-04	0.2138E+01
25.00	0.00	0.8200E-04	0.2947E-05	0.8205E-04	0.2058E+01
55.00	0.00	0.1014E-03	0.3762E-05	0.1014E-03	0.2125E+01
120.00	0.00	0.1836E-03	0.1943E-04	0.1847E-03	0.6041E+01
140.00	0.00	0.2287E-03	0.3769E-04	0.2318E-03	0.9358E+01
160.00	0.00	0.2882E-03	0.7304E-04	0.2973E-03	0.1422E+02
180.00	0.00	0.3654E-03	0.1408E-03	0.3916E-03	0.2108E+02
200.00	0.00	0.4627E-03	0.2852E-03	0.5435E-03	0.3165E+02
250.00	2.50	0.7518E-03	0.8523E-03	0.1137E-02	0.4859E+02
300.00	5.00	0.9928E-03	0.1167E-02	0.1532E-02	0.4962E+02
350.00	7.50	0.1139E-02	0.1264E-02	0.1701E-02	0.4798E+02
400.00	10.00	0.1207E-02	0.1246E-02	0.1735E-02	0.4592E+02
450.00	12.50	0.1221E-02	0.1175E-02	0.1694E-02	0.4389E+02
500.00	15.00	0.1197E-02	0.1080E-02	0.1612E-02	0.4205E+02
550.00	17.50	0.1144E-02	0.9744E-03	0.1503E-02	0.4042E+02
600.00	20.00	0.1062E-02	0.8471E-03	0.1359E-02	0.3857E+02
625.00	20.00	0.1018E-02	0.8054E-03	0.1298E-02	0.3834E+02
650.00	20.00	0.9693E-03	0.7551E-03	0.1229E-02	0.3792E+02
675.00	20.00	0.9181E-03	0.7071E-03	0.1159E-02	0.3760E+02
700.00	20.00	0.8643E-03	0.6681E-03	0.1092E-02	0.3770E+02
725.00	20.00	0.8104E-03	0.6118E-03	0.1015E-02	0.3705E+02
750.00	20.00	0.7555E-03	0.5650E-03	0.9433E-03	0.3679E+02
775.00	20.00	0.7009E-03	0.5215E-03	0.8737E-03	0.3665E+02
800.00	20.00	0.6464E-03	0.4752E-03	0.8022E-03	0.3632E+02
825.00	18.75	0.5961E-03	0.4459E-03	0.7444E-03	0.3680E+02
850.00	17.50	0.5453E-03	0.4101E-03	0.6823E-03	0.3694E+02
875.00	16.25	0.4953E-03	0.3731E-03	0.6201E-03	0.3699E+02
900.00	15.00	0.4468E-03	0.3367E-03	0.5595E-03	0.3700E+02
925.00	13.75	0.4006E-03	0.3017E-03	0.5015E-03	0.3699E+02
950.00	12.50	0.3569E-03	0.2683E-03	0.4465E-03	0.3693E+02
975.00	11.25	0.3160E-03	0.2365E-03	0.3947E-03	0.3681E+02
1000.00	10.00	0.2779E-03	0.2062E-03	0.3460E-03	0.3657E+02
1025.00	8.75	0.2424E-03	0.1772E-03	0.3003E-03	0.3617E+02
1050.00	7.50	0.2097E-03	0.1495E-03	0.2576E-03	0.3549E+02
1075.00	6.25	0.1797E-03	0.1231E-03	0.2178E-03	0.3441E+02
1100.00	5.00	0.1523E-03	0.9777E-04	0.1810E-03	0.3270E+02
1125.00	3.75	0.1277E-03	0.7376E-04	0.1475E-03	0.3001E+02
1150.00	2.50	0.1061E-03	0.5138E-04	0.1179E-03	0.2584E+02
1175.00	1.25	0.8768E-04	0.3145E-04	0.9315E-04	0.1973E+02
1200.00	0.00	0.7273E-04	0.1629E-04	0.7453E-04	0.1263E+02
1225.00	0.00	0.6003E-04	0.7785E-05	0.6053E-04	0.7389E+01
1250.00	0.00	0.5036E-04	0.4109E-05	0.5053E-04	0.4665E+01
1275.00	0.00	0.4305E-04	0.2412E-05	0.4312E-04	0.3206E+01
1300.00	0.00	0.3749E-04	0.1627E-05	0.3752E-04	0.2485E+01

MODELO 4

real=parte real da componente H_z do campo magnético total

imag=parte imaginaria da componente H_z

ampl=amplitude da componente H_z

fase=fase da componente H_z

f=1000 Hz meio com $10\Omega m$ de resisitividade

x(m)=distância em metros apartir da linha de corrente

z(m)=profundiade em metros apartir do nível da linha de corrente

x(m)	z(m)	real	imag	ampl	fase
10.00	0.00	-0.9848E+00	0.4229E-01	0.9857E+00	0.1775E+03
20.00	0.00	-0.9423E+00	0.1156E+00	0.9494E+00	0.1730E+03
35.00	0.00	-0.8406E+00	0.2277E+00	0.8709E+00	0.1648E+03
80.00	0.00	-0.4478E+00	0.3914E+00	0.5948E+00	0.1388E+03
120.00	0.00	-0.1847E+00	0.3436E+00	0.3901E+00	0.1183E+03
160.00	0.00	-0.5166E-01	0.2401E+00	0.2456E+00	0.1021E+03
200.00	0.00	-0.7297E-02	0.1534E+00	0.1536E+00	0.9272E+02
250.00	-2.50	-0.4593E-02	0.9309E-01	0.9320E-01	0.9282E+02
300.00	-5.00	-0.6834E-02	0.6347E-01	0.6383E-01	0.9615E+02
350.00	-7.50	-0.7804E-02	0.4776E-01	0.4839E-01	0.9928E+02
400.00	-10.00	-0.7432E-02	0.3804E-01	0.3876E-01	0.1011E+03
450.00	-12.50	-0.6560E-02	0.3116E-01	0.3184E-01	0.1019E+03
500.00	-15.00	-0.5652E-02	0.2584E-01	0.2645E-01	0.1023E+03
525.00	-16.25	-0.5202E-02	0.2357E-01	0.2413E-01	0.1024E+03
550.00	-17.50	-0.4690E-02	0.2146E-01	0.2197E-01	0.1023E+03
575.00	-18.75	-0.3941E-02	0.1949E-01	0.1988E-01	0.1014E+03
600.00	-20.00	-0.2703E-02	0.1764E-01	0.1785E-01	0.9871E+02
625.00	-20.00	-0.1171E-02	0.1564E-01	0.1568E-01	0.9428E+02
650.00	-20.00	-0.3620E-03	0.1391E-01	0.1391E-01	0.9149E+02
675.00	-20.00	-0.2518E-04	0.1247E-01	0.1247E-01	0.9012E+02
700.00	-20.00	0.7564E-04	0.1123E-01	0.1123E-01	0.8961E+02
725.00	-20.00	0.1143E-03	0.1015E-01	0.1015E-01	0.8935E+02
750.00	-20.00	0.2586E-03	0.9183E-02	0.9187E-02	0.8839E+02
775.00	-20.00	0.6589E-03	0.8238E-02	0.8265E-02	0.8543E+02
800.00	-20.00	0.1413E-02	0.7345E-02	0.7479E-02	0.7911E+02
825.00	-18.75	0.2277E-02	0.6350E-02	0.6745E-02	0.7027E+02
850.00	-17.50	0.2627E-02	0.5514E-02	0.6108E-02	0.6453E+02
875.00	-16.25	0.2702E-02	0.4838E-02	0.5541E-02	0.6082E+02
900.00	-15.00	0.2669E-02	0.4297E-02	0.5058E-02	0.5816E+02
925.00	-13.75	0.2591E-02	0.3862E-02	0.4651E-02	0.5614E+02
950.00	-12.50	0.2501E-02	0.3508E-02	0.4308E-02	0.5452E+02
975.00	-11.25	0.2409E-02	0.3215E-02	0.4018E-02	0.5315E+02
1000.00	-10.00	0.2323E-02	0.2969E-02	0.3770E-02	0.5196E+02
1025.00	-8.75	0.2243E-02	0.2761E-02	0.3557E-02	0.5091E+02
1050.00	-7.50	0.2168E-02	0.2585E-02	0.3374E-02	0.5002E+02
1075.00	-6.25	0.2094E-02	0.2442E-02	0.3217E-02	0.4938E+02
1100.00	-5.00	0.2015E-02	0.2331E-02	0.3081E-02	0.4916E+02
1125.00	-3.75	0.1917E-02	0.2258E-02	0.2962E-02	0.4967E+02
1150.00	-2.50	0.1770E-02	0.2227E-02	0.2845E-02	0.5152E+02
1175.00	-1.25	0.1498E-02	0.2242E-02	0.2696E-02	0.5625E+02
1200.00	0.00	0.9938E-03	0.2295E-02	0.2501E-02	0.6659E+02
1225.00	0.00	0.4628E-03	0.2425E-02	0.2469E-02	0.7920E+02
1250.00	0.00	0.1982E-03	0.2512E-02	0.2520E-02	0.8549E+02
1275.00	0.00	0.8887E-04	0.2552E-02	0.2553E-02	0.8801E+02
1300.00	0.00	0.4242E-04	0.2552E-02	0.2553E-02	0.8905E+02

 modelq 2A

domínio do tempo

resposta em termos de dhz/dt

x(m)	z(m)	t=1 ms	t=7 ms	t=15 ms
10.00	0.00	0.7158E-01	0.5290E-03	0.4630E-04
15.00	0.00	0.7216E-01	0.5339E-03	0.4697E-04
20.00	0.00	0.7285E-01	0.5284E-03	0.4742E-04
25.00	0.00	0.7313E-01	0.5243E-03	0.4610E-04
35.00	0.00	0.7363E-01	0.5327E-03	0.4389E-04
80.00	0.00	0.7483E-01	0.5310E-03	0.4923E-04
100.00	0.00	0.7186E-01	0.5231E-03	0.4419E-04
120.00	0.00	0.6423E-01	0.4868E-03	0.4503E-04
135.00	0.00	0.3661E-01	0.3418E-03	0.4681E-04
140.00	0.00	0.2979E-01	0.3077E-03	0.4662E-04
145.00	-1.25	0.2245E-01	0.2706E-03	0.4626E-04
155.00	-3.75	0.6968E-02	0.1925E-03	0.4528E-04
165.00	-6.25	-0.8143E-02	0.1196E-03	0.4369E-04
180.00	-8.75	-0.2120E-01	0.5512E-04	0.4246E-04
200.00	-10.00	-0.3162E-01	0.4364E-05	0.4101E-04
225.00	-11.25	-0.4507E-01	-0.5938E-04	0.3916E-04
275.00	-13.75	-0.5505E-01	-0.1056E-03	0.3822E-04
300.00	-15.00	-0.5371E-01	-0.1015E-03	0.3889E-04
325.00	-16.25	-0.5098E-01	-0.9098E-04	0.3972E-04
350.00	-17.50	-0.4774E-01	-0.7817E-04	0.4009E-04
400.00	-20.00	-0.4117E-01	-0.5008E-04	0.4018E-04
425.00	-20.00	-0.3816E-01	-0.3691E-04	0.3992E-04
450.00	-20.00	-0.3540E-01	-0.2477E-04	0.3951E-04
475.00	-20.00	-0.3289E-01	-0.1211E-04	0.3900E-04
500.00	-20.00	-0.3062E-01	-0.1009E-05	0.3855E-04
550.00	-20.00	-0.2673E-01	0.1753E-04	0.3791E-04
575.00	-20.00	-0.2507E-01	0.2506E-04	0.3775E-04
600.00	-20.00	-0.2358E-01	0.3231E-04	0.3763E-04
625.00	-20.00	-0.2223E-01	0.3866E-04	0.3754E-04
675.00	-20.00	-0.1985E-01	0.4877E-04	0.3774E-04
700.00	-20.00	-0.1883E-01	0.5223E-04	0.3795E-04
725.00	-20.00	-0.1790E-01	0.5469E-04	0.3824E-04
750.00	-20.00	-0.1706E-01	0.5680E-04	0.3847E-04
775.00	-20.00	-0.1629E-01	0.5873E-04	0.3865E-04
825.00	-17.50	-0.1494E-01	0.6172E-04	0.3899E-04
850.00	-16.25	-0.1434E-01	0.6262E-04	0.3913E-04
875.00	-15.00	-0.1379E-01	0.6319E-04	0.3926E-04
900.00	-13.75	-0.1328E-01	0.6343E-04	0.3936E-04
925.00	-12.50	-0.1281E-01	0.6305E-04	0.3937E-04
975.00	-10.00	-0.1199E-01	0.6263E-04	0.3929E-04
1000.00	-8.75	-0.1162E-01	0.6272E-04	0.3916E-04
1025.00	-7.50	-0.1127E-01	0.6263E-04	0.3907E-04
1050.00	-6.25	-0.1095E-01	0.6220E-04	0.3890E-04
1075.00	-5.00	-0.1066E-01	0.6153E-04	0.3870E-04
1125.00	-2.50	-0.1012E-01	0.6016E-04	0.3818E-04
1150.00	-1.25	-0.9867E-02	0.5929E-04	0.3792E-04
1175.00	0.00	-0.9635E-02	0.5849E-04	0.3766E-04
1225.00	0.00	-0.9217E-02	0.5613E-04	0.3707E-04
1250.00	0.00	-0.9031E-02	0.5508E-04	0.3676E-04
1275.00	0.00	-0.8854E-02	0.5380E-04	0.3646E-04

 modelo 2B

domínio do tempo

resposta em termos de dhz/dt

x(m)	z(m)	t=1 ms	t=7 ms	t=15 ms
10.00	0.00	0.1617E-01	0.2925E-03	0.4650E-04
20.00	0.00	0.1637E-01	0.2861E-03	0.4757E-04
25.00	0.00	0.1618E-01	0.2803E-03	0.4626E-04
35.00	0.00	0.1627E-01	0.2865E-03	0.4418E-04
80.00	0.00	0.1659E-01	0.2829E-03	0.4953E-04
100.00	0.00	0.1699E-01	0.2942E-03	0.4491E-04
140.00	0.00	0.1742E-01	0.2935E-03	0.4918E-04
160.00	0.00	0.1762E-01	0.2900E-03	0.5019E-04
200.00	0.00	0.1821E-01	0.2953E-03	0.4830E-04
250.00	-2.50	0.1899E-01	0.3065E-03	0.4692E-04
275.00	-3.75	0.1946E-01	0.3107E-03	0.4732E-04
300.00	-5.00	0.1996E-01	0.3142E-03	0.4812E-04
350.00	-7.50	0.2113E-01	0.3209E-03	0.4949E-04
375.00	-8.75	0.2182E-01	0.3256E-03	0.4977E-04
425.00	-11.25	0.2352E-01	0.3397E-03	0.4982E-04
450.00	-12.50	0.2456E-01	0.3490E-03	0.4971E-04
475.00	-13.75	0.2574E-01	0.3600E-03	0.4960E-04
500.00	-15.00	0.2709E-01	0.3728E-03	0.4961E-04
525.00	-16.25	0.2862E-01	0.3871E-03	0.4977E-04
550.00	-17.50	0.3035E-01	0.4032E-03	0.5009E-04
600.00	-20.00	0.3435E-01	0.4403E-03	0.5123E-04
625.00	-20.00	0.3640E-01	0.4595E-03	0.5204E-04
650.00	-20.00	0.3747E-01	0.4700E-03	0.5256E-04
675.00	-20.00	0.3629E-01	0.4612E-03	0.5234E-04
690.00	-20.00	0.2171E-01	0.3349E-03	0.4747E-04
697.50	-20.00	0.1435E-01	0.2698E-03	0.4488E-04
702.50	-20.00	0.8620E-02	0.2189E-03	0.4288E-04
707.50	-20.00	0.2668E-02	0.1665E-03	0.4075E-04
710.00	-20.00	-0.3014E-02	0.1165E-03	0.3878E-04
715.00	-20.00	-0.5643E-02	0.9323E-04	0.3785E-04
750.00	-20.00	-0.1700E-01	-0.6763E-05	0.3395E-04
775.00	-20.00	-0.2470E-01	-0.7310E-04	0.3165E-04
800.00	-20.00	-0.2591E-01	-0.8302E-04	0.3157E-04
825.00	-18.75	-0.2488E-01	-0.7372E-04	0.3216E-04
850.00	-17.50	-0.2288E-01	-0.5649E-04	0.3303E-04
900.00	-15.00	-0.1899E-01	-0.2321E-04	0.3454E-04
925.00	-13.75	-0.1732E-01	-0.9121E-05	0.3514E-04
950.00	-12.50	-0.1586E-01	0.2814E-05	0.3563E-04
975.00	-11.25	-0.1458E-01	0.1320E-04	0.3603E-04
1000.00	-10.00	-0.1347E-01	0.2241E-04	0.3633E-04
1025.00	-8.75	-0.1251E-01	0.3054E-04	0.3667E-04
1050.00	-7.50	-0.1167E-01	0.3722E-04	0.3690E-04
1100.00	-5.00	-0.1031E-01	0.4795E-04	0.3705E-04
1125.00	-3.75	-0.9758E-02	0.5253E-04	0.3704E-04
1150.00	-2.50	-0.9272E-02	0.5661E-04	0.3703E-04
1175.00	-1.25	-0.8848E-02	0.5975E-04	0.3698E-04
1225.00	0.00	-0.8155E-02	0.6459E-04	0.3688E-04
1250.00	0.00	-0.7882E-02	0.6641E-04	0.3677E-04
1275.00	0.00	-0.7638E-02	0.6790E-04	0.3661E-04
1300.00	0.00	-0.7419E-02	0.6917E-04	0.3650E-04

 modelg 4A

domínio do tempo

resposta em termos de dHz/dt

x(m)	z(m)	t=1 ms	t=7 ms	t=15 ms
10.00	0.00	0.7340E-01	0.5209E-03	0.4882E-04
15.00	0.00	0.7401E-01	0.5264E-03	0.4964E-04
20.00	0.00	0.7473E-01	0.5213E-03	0.4991E-04
35.00	0.00	0.7559E-01	0.5249E-03	0.4641E-04
55.00	0.00	0.7663E-01	0.5398E-03	0.4722E-04
100.00	0.00	0.7411E-01	0.5184E-03	0.4648E-04
125.00	0.00	0.5027E-01	0.4003E-03	0.4844E-04
130.00	0.00	0.4457E-01	0.3716E-03	0.4838E-04
140.00	0.00	0.3119E-01	0.3064E-03	0.4773E-04
145.00	-1.25	0.2361E-01	0.2698E-03	0.4712E-04
150.00	-2.50	0.1569E-01	0.2312E-03	0.4631E-04
155.00	-3.75	0.7645E-02	0.1926E-03	0.4557E-04
165.00	-6.25	-0.7869E-02	0.1194E-03	0.4370E-04
170.00	-7.50	-0.1495E-01	0.8573E-04	0.4291E-04
200.00	-10.00	-0.3197E-01	0.5955E-05	0.4055E-04
225.00	-11.25	-0.4554E-01	-0.5622E-04	0.3812E-04
250.00	-12.50	-0.5165E-01	-0.8265E-04	0.3667E-04
300.00	-15.00	-0.5027E-01	-0.7899E-04	0.3738E-04
325.00	-16.25	-0.4735E-01	-0.6745E-04	0.3806E-04
350.00	-17.50	-0.4414E-01	-0.5446E-04	0.3866E-04
400.00	-20.00	-0.3793E-01	-0.2982E-04	0.3910E-04
425.00	-20.00	-0.3515E-01	-0.1820E-04	0.3885E-04
450.00	-20.00	-0.3262E-01	-0.6143E-05	0.3834E-04
500.00	-20.00	-0.2828E-01	0.1397E-04	0.3762E-04
525.00	-20.00	-0.2643E-01	0.2206E-04	0.3719E-04
575.00	-20.00	-0.2330E-01	0.3724E-04	0.3684E-04
600.00	-20.00	-0.2197E-01	0.4249E-04	0.3680E-04
650.00	-20.00	-0.1974E-01	0.5130E-04	0.3699E-04
675.00	-20.00	-0.1880E-01	0.5395E-04	0.3720E-04
725.00	-20.00	-0.1715E-01	0.5776E-04	0.3778E-04
750.00	-20.00	-0.1641E-01	0.5945E-04	0.3800E-04
800.00	-18.75	-0.1514E-01	0.6169E-04	0.3827E-04
825.00	-17.50	-0.1459E-01	0.6158E-04	0.3842E-04
875.00	-15.00	-0.1363E-01	0.6166E-04	0.3859E-04
900.00	-13.75	-0.1320E-01	0.6143E-04	0.3860E-04
925.00	-12.50	-0.1279E-01	0.6138E-04	0.3860E-04
950.00	-11.25	-0.1242E-01	0.6140E-04	0.3859E-04
975.00	-10.00	-0.1206E-01	0.6109E-04	0.3859E-04
1000.00	-8.75	-0.1173E-01	0.6073E-04	0.3855E-04
1025.00	-7.50	-0.1142E-01	0.5995E-04	0.3843E-04
1050.00	-6.25	-0.1113E-01	0.5937E-04	0.3822E-04
1075.00	-5.00	-0.1086E-01	0.5920E-04	0.3792E-04
1100.00	-3.75	-0.1059E-01	0.5873E-04	0.3768E-04
1125.00	-2.50	-0.1034E-01	0.5805E-04	0.3747E-04
1150.00	-1.25	-0.1010E-01	0.5744E-04	0.3719E-04
1175.00	0.00	-0.9881E-02	0.5689E-04	0.3696E-04
1200.00	0.00	-0.9669E-02	0.5651E-04	0.3674E-04
1225.00	0.00	-0.9465E-02	0.5604E-04	0.3647E-04
1250.00	0.00	-0.9268E-02	0.5536E-04	0.3618E-04
1275.00	0.00	-0.9084E-02	0.5438E-04	0.3587E-04

MODELO 4

real=parte real da componente Ey do campo elétrico secundário

imag=parte imaginária da componente Ey

ampl=amplitude da componente Ey

fase=fase da componente Ey

f=1000 Hz meio com 10 μ m de resistividade

x(m)=distância em metros apartir da linha de corrente

z(m)=profundidade em metros apartir do nível da linha de corrente

x(m)	z(m)	real	imag	ampl	fase
10.00	0.00	-0.7255E-04	-0.3722E-05	0.7264E-04	-0.1771E+03
20.00	0.00	-0.7719E-04	-0.3766E-05	0.7729E-04	-0.1772E+03
35.00	0.00	-0.8520E-04	-0.3837E-05	0.8529E-04	-0.1774E+03
80.00	0.00	-0.1202E-03	-0.5531E-05	0.1203E-03	-0.1774E+03
120.00	0.00	-0.1774E-03	-0.1739E-04	0.1782E-03	-0.1744E+03
160.00	0.00	-0.2794E-03	-0.6803E-04	0.2876E-03	-0.1663E+03
200.00	0.00	-0.4515E-03	-0.2729E-03	0.5276E-03	-0.1489E+03
250.00	-2.50	-0.8730E-03	-0.1116E-02	0.1417E-02	-0.1280E+03
300.00	-5.00	-0.1066E-02	-0.1394E-02	0.1755E-02	-0.1274E+03
350.00	-7.50	-0.1176E-02	-0.1507E-02	0.1911E-02	-0.1280E+03
400.00	-10.00	-0.1225E-02	-0.1531E-02	0.1961E-02	-0.1287E+03
450.00	-12.50	-0.1231E-02	-0.1511E-02	0.1949E-02	-0.1292E+03
500.00	-15.00	-0.1206E-02	-0.1466E-02	0.1899E-02	-0.1294E+03
525.00	-16.25	-0.1183E-02	-0.1436E-02	0.1861E-02	-0.1295E+03
550.00	-17.50	-0.1151E-02	-0.1400E-02	0.1812E-02	-0.1294E+03
575.00	-18.75	-0.1111E-02	-0.1347E-02	0.1746E-02	-0.1295E+03
600.00	-20.00	-0.1063E-02	-0.1268E-02	0.1655E-02	-0.1300E+03
625.00	-20.00	-0.1063E-02	-0.1268E-02	0.1655E-02	-0.1300E+03
650.00	-20.00	-0.1012E-02	-0.1184E-02	0.1558E-02	-0.1305E+03
675.00	-20.00	-0.9582E-03	-0.1100E-02	0.1459E-02	-0.1310E+03
700.00	-20.00	-0.9037E-03	-0.1023E-02	0.1365E-02	-0.1315E+03
725.00	-20.00	-0.8485E-03	-0.9528E-03	0.1276E-02	-0.1317E+03
750.00	-20.00	-0.7944E-03	-0.8886E-03	0.1192E-02	-0.1318E+03
775.00	-20.00	-0.7401E-03	-0.8261E-03	0.1109E-02	-0.1319E+03
800.00	-20.00	-0.6849E-03	-0.7600E-03	0.1023E-02	-0.1320E+03
825.00	-18.75	-0.5730E-03	-0.6077E-03	0.8353E-03	-0.1333E+03
850.00	-17.50	-0.5182E-03	-0.5352E-03	0.7450E-03	-0.1341E+03
875.00	-16.25	-0.4654E-03	-0.4680E-03	0.6600E-03	-0.1348E+03
900.00	-15.00	-0.4152E-03	-0.4066E-03	0.5811E-03	-0.1356E+03
925.00	-13.75	-0.3680E-03	-0.3507E-03	0.5084E-03	-0.1364E+03
950.00	-12.50	-0.3242E-03	-0.3000E-03	0.4417E-03	-0.1372E+03
975.00	-11.25	-0.2836E-03	-0.2539E-03	0.3807E-03	-0.1382E+03
1000.00	-10.00	-0.2462E-03	-0.2121E-03	0.3249E-03	-0.1393E+03
1025.00	-8.75	-0.2119E-03	-0.1740E-03	0.2741E-03	-0.1406E+03
1050.00	-7.50	-0.1805E-03	-0.1393E-03	0.2280E-03	-0.1423E+03
1075.00	-6.25	-0.1521E-03	-0.1078E-03	0.1864E-03	-0.1447E+03
1100.00	-5.00	-0.1266E-03	-0.7929E-04	0.1494E-03	-0.1479E+03
1125.00	-3.75	-0.1041E-03	-0.5387E-04	0.1172E-03	-0.1526E+03
1150.00	-2.50	-0.8475E-04	-0.3204E-04	0.9060E-04	-0.1593E+03
1175.00	-1.25	-0.6875E-04	-0.1548E-04	0.7047E-04	-0.1673E+03
1200.00	0.00	-0.5613E-04	-0.6758E-05	0.5653E-04	-0.1731E+03
1225.00	0.00	-0.5613E-04	-0.6758E-05	0.5653E-04	-0.1731E+03
1250.00	0.00	-0.4746E-04	-0.3828E-05	0.4762E-04	-0.1754E+03
1275.00	0.00	-0.4086E-04	-0.2509E-05	0.4093E-04	-0.1765E+03
1300.00	0.00	-0.3574E-04	-0.1905E-05	0.3579E-04	-0.1769E+03

 modelo 4B

domínio do tempo

resposta em termos de dhz/dt

x(m)	z(m)	t=1 ms	t=7 ms	t=15 ms
10.00	0.00	0.1627E-01	0.2913E-03	0.4707E-04
20.00	0.00	0.1647E-01	0.2859E-03	0.4811E-04
25.00	0.00	0.1628E-01	0.2796E-03	0.4670E-04
35.00	0.00	0.1636E-01	0.2859E-03	0.4456E-04
80.00	0.00	0.1668E-01	0.2825E-03	0.4983E-04
100.00	0.00	0.1708E-01	0.2942E-03	0.4531E-04
120.00	0.00	0.1734E-01	0.2980E-03	0.4677E-04
160.00	0.00	0.1773E-01	0.2904E-03	0.5071E-04
180.00	0.00	0.1800E-01	0.2916E-03	0.5013E-04
200.00	0.00	0.1832E-01	0.2959E-03	0.4887E-04
250.00	-2.50	0.1907E-01	0.3069E-03	0.4742E-04
275.00	-3.75	0.1949E-01	0.3106E-03	0.4777E-04
300.00	-5.00	0.1994E-01	0.3134E-03	0.4855E-04
350.00	-7.50	0.2093E-01	0.3186E-03	0.4991E-04
375.00	-8.75	0.2150E-01	0.3222E-03	0.5021E-04
400.00	-10.00	0.2213E-01	0.3271E-03	0.5025E-04
450.00	-12.50	0.2357E-01	0.3397E-03	0.4991E-04
475.00	-13.75	0.2437E-01	0.3476E-03	0.4966E-04
500.00	-15.00	0.2519E-01	0.3561E-03	0.4946E-04
550.00	-17.50	0.2671E-01	0.3717E-03	0.4928E-04
575.00	-18.75	0.2722E-01	0.3772E-03	0.4930E-04
600.00	-20.00	0.2731E-01	0.3789E-03	0.4930E-04
650.00	-20.00	0.2498E-01	0.3600E-03	0.4852E-04
675.00	-20.00	0.2131E-01	0.3284E-03	0.4730E-04
685.00	-20.00	0.1476E-01	0.2715E-03	0.4491E-04
690.00	-20.00	0.1130E-01	0.2411E-03	0.4363E-04
697.50	-20.00	0.8480E-02	0.2168E-03	0.4258E-04
702.50	-20.00	0.6548E-02	0.2001E-03	0.4183E-04
707.50	-20.00	0.4608E-02	0.1834E-03	0.4113E-04
710.00	-20.00	0.2673E-02	0.1666E-03	0.4052E-04
725.00	-20.00	-0.1371E-03	0.1413E-03	0.3935E-04
750.00	-20.00	-0.3589E-02	0.1118E-03	0.3814E-04
775.00	-20.00	-0.1011E-01	0.5571E-04	0.3599E-04
825.00	-18.75	-0.1548E-01	0.7817E-05	0.3422E-04
850.00	-17.50	-0.1618E-01	0.1381E-05	0.3408E-04
900.00	-15.00	-0.1567E-01	0.5401E-05	0.3452E-04
925.00	-13.75	-0.1499E-01	0.1106E-04	0.3491E-04
975.00	-11.25	-0.1348E-01	0.2349E-04	0.3561E-04
1000.00	-10.00	-0.1275E-01	0.2917E-04	0.3586E-04
1050.00	-7.50	-0.1142E-01	0.3965E-04	0.3617E-04
1075.00	-6.25	-0.1084E-01	0.4418E-04	0.3636E-04
1100.00	-5.00	-0.1031E-01	0.4861E-04	0.3644E-04
1125.00	-3.75	-0.9834E-02	0.5256E-04	0.3644E-04
1150.00	-2.50	-0.9409E-02	0.5607E-04	0.3647E-04
1175.00	-1.25	-0.9025E-02	0.5930E-04	0.3651E-04
1200.00	0.00	-0.8680E-02	0.6203E-04	0.3651E-04
1225.00	0.00	-0.8370E-02	0.6414E-04	0.3644E-04
1250.00	0.00	-0.8079E-02	0.6604E-04	0.3634E-04
1275.00	0.00	-0.7820E-02	0.6784E-04	0.3622E-04
1300.00	0.00	-0.7591E-02	0.6918E-04	0.3608E-04