

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ELETROJATO
EQUATORIAL NA INTERPRETAÇÃO DE DADOS
MAGNETOTELÚRICOS BIDIMENSIONAIS**

por

JOAQUIM PERMINIO DE OLIVEIRA MOTA

Bacharel em Física (Universidade de Brasília – 1986)

Tese submetida como requisito parcial ao grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

em

GEOFÍSICA

ao

Colegiado do Curso de Pós-Graduação em

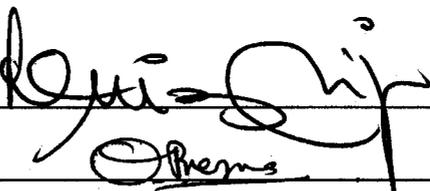
Geofísica

da

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Banca Examinadora :

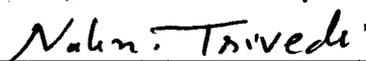
Dr. Luiz Rijo (Orientador)



Dr. Om Prakash Verma



Dr. Nalin Babulal Trivedi



Data da Homologação : 19/02/1991

MOTA, Joaquim Perminio de Oliveira. Avaliação da influência do eletrojato equatorial na interpretação de dados magnetotelúricos bidimensionais. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1991. 93 p. il.

Tese (Mestrado em Geofísica) – Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa., 1991.

1. ELETROJATO EQUATORIAL. 2. INTERPRETAÇÃO DE DADOS MAGNETOTELÚRICOS. 3. MÉTODOS MAGNETOTELÚRICOS.

ÍNDICE

Índice	i
Figuras.....	ii
Resumo	x
Abstract.....	xi
CAPÍTULO 1. Introdução.....	1
CAPÍTULO 2. Método de solução	3
2.1 Formulação do problema	3
2.2 Campo primário de uma linha de corrente	4
2.3 Campo primário de eletrojato gaussiano	6
2.4 Solução por elementos finitos	7
CAPÍTULO 3. Testes numéricos.....	10
CAPÍTULO 4. Análise dos resultados	17
CAPÍTULO 5. Conclusão	89
Agradecimentos	91
Referências	92

FIGURAS

Fig. 1	Modelo para a formulação teórica	3
Fig. 2	Sistema de coordenadas e fontes de corrente. A - linha de corrente, B - eletrojato gaussiano)	5
Fig. 3	Exemplo de malha de elementos finitos utilizada na solução de problema 2D.	9
Fig. 4	Teste numérico calculando ρ_a usando uma linha de corrente com fonte e comparando com os resultados de <i>Hermance e Peltier</i> (1970).	11
Fig. 5	Teste da solução numérica do campo de um eletrojato gaussiano, calculando a resistividade aparente e fase e comparando com os resultados de <i>Peltier e Hermance</i> (1971)	13
Fig. 6	Teste da solução numérica do campo de um eletrojato gaussiano, calculando a resistividade aparente e fase para o <u>modelo 2</u> de <i>Hermance e Peltier</i> (1971)	14
Fig. 7	Teste da solução numérica do campo de um eletrojato gaussiano, calculando a resistividade aparente e fase para o <u>modelo 3</u> de <i>Hermance e Peltier</i> (1971)	15
Fig. 8	Comparação entre os resultados de elementos finitos e equações intergrais (Hohmann, 1970) para um modelo 2D com linha de corrente.	16
Fig. 9	Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um semi-espaço de resistividade $10 \Omega m$. A) Freq.1000 a 0.001Hz e B) 0.0001Hz.	19
Fig. 10	Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um semi-espaço de resistividade $100 \Omega m$. A) Freq.1000 a 0.1Hz e B) 0.01Hz.	21
Fig. 11	Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um semi-espaço de resistividade $100 \Omega m$. A) Freq. 0.001Hz e B) 0.0001Hz.	22

- Fig. 12** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um semi-espaço de resistividade $1000 \Omega m$. A) Freq.1000 a 0.1Hz e B) 0.0001Hz. 23
- Fig. 13** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um semi-espaço de resistividade $1000 \Omega m$. A) Freq. 0.001Hz e B) 0.0001Hz. 24
- Fig. 14** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 1000 Hz e B) 100 Hz. 26
- Fig. 15** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 10 Hz e B) 1 Hz. 27
- Fig. 16** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 0.1 Hz e B) 0.01 Hz. 28
- Fig. 17** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 0.001 Hz e B) 0.0001 Hz. 29
- Fig. 18** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 1000 \Omega m$). A) Freq.1000 a 10 Hz e B) 1 Hz. 30
- Fig. 19** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 1000 \Omega m$). A) Freq. 0.1Hz e B) 0.01 Hz. 31
- Fig. 20** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 1000 \Omega m$). A) Freq. 0.001 e B) 0.0001 Hz. 32

- Fig. 21** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m, h_1 = 50Km, \rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 1000 e B) 100 Hz. 34
- Fig. 22** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m, h_1 = 50Km, \rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 10 e B) 1 Hz. 35
- Fig. 23** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m, h_1 = 50Km, \rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 0.1 e B) 0.01 Hz. 36
- Fig. 24** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m, h_1 = 50Km, \rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 0.001 e B) 0.0001 Hz. 37
- Fig. 25** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m, h_1 = 50Km, \rho_2 = 1000 \Omega m$). A) Freq. 1000 a 0.1 e B) 0.01 Hz. 38
- Fig. 26** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m, h_1 = 50Km, \rho_2 = 1000 \Omega m$). A) Freq. 0.001 e B) 0.0001 Hz. 39
- Fig. 27** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 1000 \Omega m, h_2 = 50Km, \rho_3 = 10\Omega m$). A) Freq. 1000 a 10 e B) 1 Hz..... 40
- Fig. 28** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 1000 \Omega m, h_2 = 50Km, \rho_3 = 10\Omega m$). A) Freq. 0.1 e B) 0.01 Hz. 41
- Fig. 29** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 1000 \Omega m, h_2 = 50Km, \rho_3 = 10\Omega m$). A) Freq. 0.001 e B) 0.0001 Hz..... 42

- Fig. 30** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 10 \Omega m, h_2 = 50Km, \rho_3 = 1000\Omega m$). A) Freq. 1000 e B) 100 Hz. 44
- Fig. 31** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 10 \Omega m, h_2 = 50Km, \rho_3 = 1000\Omega m$). A) Freq. 10 e B) 1 Hz. 45
- Fig. 32** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 10 \Omega m, h_2 = 50Km, \rho_3 = 1000\Omega m$). A) Freq. 0.1 e B) 0.01 Hz. 46
- Fig. 33** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m, h_1 = 5Km, \rho_2 = 10 \Omega m, h_2 = 50Km, \rho_3 = 1000\Omega m$). A) Freq. 0.001 e B) 0.0001 Hz. 47
- Fig. 34** Modelo de um dique de resistividade $2 \Omega m$ em um meio de resistividade 100 ou $1000 \Omega m$ 48
- Fig. 35** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TE). A) 1000 Hz e B) 100Hz. 49
- Fig. 36** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TE). A) 10 Hz e B) 1Hz. 50
- Fig. 37** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TE). A) 0.1 Hz e B) 0.01Hz. 51
- Fig. 38** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TE). A) 0.001 Hz e B) 0.0001Hz. 52

- Fig. 39** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TM). A) 1000 Hz e B) 100Hz..... 53
- Fig. 40** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TM). A) 10 Hz e B) 1Hz..... 54
- Fig. 41** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TM). A) 0.1 Hz e B) 0.01Hz..... 55
- Fig. 42** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TM). A) 0.001 Hz e B) 0.0001Hz..... 56
- Fig. 43** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TE). A) 1000 Hz e B) 100Hz..... 58
- Fig. 44** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TE). A) 10 Hz e B) 1Hz..... 59
- Fig. 45** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TE). A) 0.1 Hz e B) 0.01Hz..... 60
- Fig. 46** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TE). A) 0.001 Hz e B) 0.0001Hz..... 61
- Fig. 47** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TM). A) 1000 Hz e B) 100Hz..... 62

- Fig. 48** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TM). A) 10 Hz e B) 1 Hz. 63
- Fig. 49** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TM). A) 0.1 Hz e B) 0.01Hz. 64
- Fig. 50** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TM). A) 0.001 Hz e B) 0.0001Hz. 65
- Fig. 51** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente de um dique ($\rho = 1 \Omega m$) em um meio de duas camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m$, $h_1 = 2250 m$, $\rho_2 = 1 \Omega m$). A) Modo TE e B) Modo TM. 66
- Fig. 52** Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente de um dique ($\rho = 1 \Omega m$) em um meio de duas camadas (SMT) ($\rho_1 = 10 \Omega m$, $h_1 = 2250 m$, $\rho_2 = 1000 \Omega m$). A) Modo TE e B) Modo TM. 68
- Fig. 53** Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de uma semi-camada aflorante ($\rho_3 = 10 \Omega m$). SMT-1 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM. 69
- Fig. 54** Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de uma semi-camada aflorante ($\rho_3 = 10 \Omega m$). SMT-2 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM. 70
- Fig. 55** Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de uma semi-camada aflorante ($\rho_3 = 1000 \Omega m$). SMT-1 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM. 71
- Fig. 56** Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de uma semi-camada aflorante ($\rho_3 = 1000 \Omega m$). SMT-2 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM. 72

Fig. 57 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo <u>8A</u> . <u>SMT-1</u> ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.....	74
Fig. 58 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo <u>8A</u> . <u>SMT-2</u> ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.....	75
Fig. 59 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo <u>8B</u> . <u>SMT-1</u> ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.....	76
Fig. 60 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo <u>8B</u> . <u>SMT-2</u> ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.....	78
Fig. 61 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo <u>9A</u> . <u>SMT-1</u> ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.....	79
Fig. 62 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo <u>9A</u> . <u>SMT-2</u> ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.....	80
Fig. 63 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo <u>9B</u> . <u>SMT-1</u> ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.....	81
Fig. 64 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo <u>9B</u> . <u>SMT-2</u> ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.....	82
Fig. 65 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo <u>10A</u> . <u>SMT-1</u> ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.....	84

Fig. 66 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 10A. SMT-2 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM. 85

Fig. 67 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 10B. SMT-1 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM. 86

Fig. 68 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 10B. SMT-2 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM. 87

TABELAS

Tab. 1 Exemplo de problemas descritos pela equação 2. 4

Tab. 2 Parâmetros físicos-geométricos dos modelos. 12

Tab. 3 Parâmetros dos modelos unidimensionais estudados. 18

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ELETROJATO EQUATORIAL NA INTERPRETAÇÃO DE DADOS MAGNETOTELÚRICOS

BIDIMENSIONAIS

(TESE DE MESTRADO : Fev/91)

Joaquim Perminio de Oliveira Mota

Orientador : Dr. Luiz Rijo

Departamento de Geofísica – Centro de Geociências /UFPA

Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brasil

RESUMO

O campo magnetotelúrico em regiões equatoriais viola a condição de ondas planas por causa de uma fonte fortemente concentrada na direção E–W na ionosfera, denominada eletrojato equatorial. No presente trabalho, procurou-se analisar a resposta magnetotelúrica de fontes que simulam o efeito do eletrojato equatorial. Foram considerados dois tipos de fontes para simular o eletrojato: uma linha infinita de corrente e uma distribuição gaussiana de densidade de corrente em relação a uma das coordenadas horizontais. A resistividade aparente foi obtida através da relação de Cagniard e comparada com os resultados de ondas planas. É mostrada também a comparação entre a fase da impedância na superfície, para os três tipos de fontes (ondas planas, eletrojato gaussiano e linha de corrente). O problema de meios com heterogeneidades laterais foi resolvido em termos de campos secundários, sendo as equações diferenciais solucionadas através da técnica de elementos finitos bidimensionais.

Os resultados mostram que o eletrojato tem pouca influência nas respostas (resistividade aparente e fase) de estruturas geológicas rasas. Entretanto, a influência pode ser considerável nas estruturas profundas (maior que 5000 m), principalmente se suas resistividades são altas (maior que 100 $\Omega.m$). Portanto, a influência do eletrojato equatorial deve ser considerada na interpretação de dados magnetotelúricos de bacias sedimentares profundas ou no estudo da crosta terrestre.

INFLUENCE OF THE EQUATORIAL ELECTROJET ON THE INTERPRETATION OF MT TWO-DIMENSIONAL DATA

(MASTER THESIS : Feb/91)

Joaquim Perminio de Oliveira Mota
Adviser : Dr. Luiz Rijo

*Departamento de Geofísica – Centro de Geociências /UFPA
Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brazil*

ABSTRACT

The magnetotelluric field in equatorial regions violates the plane wave condition due to a strongly concentrated electrical source of current in the ionosphere, called equatorial electrojet. In this thesis, it is analyzed the magnetotelluric responses of electrical sources in order to simulate the effects of the equatorial electrojet. There were used two types of sources: an infinite current line and a gaussian distribution of current density along one the horizontal cartesian coordinates. The apparent resistivities were computed using the Cagniard relationship and compared with the plane wave results. It was also carried out a comparison of the phase of the surface impedance for all three types of sources (plane wave, gaussian electrojet and line source). The differential equation of the models with lateral inhomogeneities were solved by the secondary field technique using the finite element method.

The results show that the electrojet has minor influence in the MT responses (apparent resistivity and phase) of shallow geological structure. However, the effect can be very large in the case of deep structures (more than 5000 m), mainly if their resistivities are larger than $100 \Omega m$. Therefore, the influence of the equatorial electrojet must be taken in consideration in the interpretation of the magnetotelluric data from sedimentary basins and from crustal studies.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O Método Magnetotelúrico proposto por *Thikhonov* (1950) e *Cagniard* (1953) assume o campo eletromagnético como ondas planas incidente sobre um meio estratificado. Vários pesquisadores, (*Price* (1962) & *Wait* (1962)) questionaram sobre a influência da fonte (correntes elétricas localizadas na ionosfera) nas observações. Acreditava-se que a complexidade do comportamento da impedância observada na superfície do terreno era, em grande parte, devido a variações da fonte, e por isso, a hipótese de se supor o campo como uma onda plana não era totalmente válida. *Madden & Nelson* (1965) mostraram que a complexidade comumente observada nos dados magnetotelúricos era, em grande parte, devido a maneira como as medidas de impedância eram feitas e não devido a variações na fonte. *Dmitriev* (1979), analisando cuidadosamente o modelo de *Thikhonov* e *Cagniard*, confirmou a validade nos trabalhos de exploração geofísica, principalmente quando a área prospectada é relativamente pequena em relação a curvatura da terra.

Entretanto, em regiões equatoriais a condição de ondas planas é violada devido a uma fonte fortemente concentrada de corrente localizada na ionosfera, denominada eletrojato equatorial (*Trivedi*, 1989). Mesmo assim, os especialistas têm sido relutantes em abandonar a hipótese de ondas planas devido a sua fácil aplicabilidade prática.

Diversos autores utilizaram o modelamento numérico para definir a resposta de um dado substrato simples e fontes que simulem o efeito do eletrojato. *Hermance & Peltier* (1970) para testar se a relação de *Cagniard*, para a resistividade aparente, é válida, propuseram uma linha infinita de corrente colocada sobre um meio estratificado. As expressões integrais do campo eletromagnético foram calculadas numericamente. A investigação para estruturas de duas camadas, sendo modelos apropriados para representar meios continentais e áreas tectonicamente ativas, indicaram a validade da hipótese de *Cagniard* para o último caso. Para regiões continentais, as mesmas conclusões permanecem válidas, sendo o eletrojato representado por uma linha de corrente localizada a uma altura de 500Km.

Peltier & Hermance (1971) propuseram uma extensão ao trabalho anterior, sendo a fonte representada por um eletrojato cuja a densidade de corrente tenha uma dependência gaussiana

sobre as coordenadas horizontais. Eles concluíram que o efeito da fonte cresce com a resistividade da subsuperfície, o que indica que as técnicas convencionais de interpretação podem ser piores em áreas continentais do que em áreas tectonicamente ativas. Para um dado substrato, o efeito da fonte aumenta com o período em uma dada localização, porém decresce com a distância ao centro do eletrojato. As medidas feitas em longos períodos em um ponto diretamente abaixo do eletrojato tendem a subestimar os valores de resistividades e superestimar os valores da fase, enquanto o inverso é verdadeiro para pontos distantes do centro.

Hibbs & Jones (1973a,b) generalizaram o método utilizado por *Hermance & Peltier* (1971) para incluir o efeito de fontes simétricas bem como o de assimétricas. Nestes trabalhos, foram utilizadas as técnicas de diferenças finitas para determinar a distribuição dos campos eletromagnéticos. Tendo como modelo um terreno contendo heterogeneidades laterais, os resultados demonstram que para períodos longos, a configuração da fonte influencia consideravelmente no cálculo da resistividade aparente.

Hermance (1984) descreve uma solução aproximada para a indução eletromagnética por uma fonte bidimensional diretamente paralela ao "strike" de um corpo anômalo bidimensional. Mostrou-se que, sob certas condições, o campo somente é perturbado na vizinhança da heterogeneidade lateral. Porém, com a distância do contato, a resposta é mais influenciada pelas dimensões da fonte.

No presente trabalho, procurou-se descrever uma solução aproximada da resposta magnetotélúrica para meios estratificados e bidimensionais e fontes que simulem o eletrojato equatorial. Foram obtidas a resposta para a situação em que a fonte esteja paralela ao "strike" de um corpo anômalo bidimensional, bem como para a situação em que a fonte esteja perpendicular ao "strike" do corpo; essas geometrias representam os modo transversos elétrico (TE ou E paralelo) e transversos magnético (TM ou H paralelo). Foi utilizada a técnica de separação do campo eletromagnético em primário e secundário. Após determinar o valor do campo secundário, somamos esse ao campo primário para obtermos o campo total do modelo. Foi empregado o método numérico dos elementos finitos para a resolução das equações diferenciais envolvidas no problema. Foi estudado o caso em que a fonte é representada por uma linha infinita de corrente e também um eletrojato gaussiano, onde a corrente tenha uma dependência harmônica com o tempo ($e^{i\omega t}$).

CAPÍTULO 2

MÉTODO DE SOLUÇÃO

2.1 Formulação do problema

Os problemas tratados neste trabalho podem ser classificados como problemas 1D-2D e 2D-2D de modelos geoeletricos. Sendo que o primeiro caso trata de modelos de terreno em que as propriedades físicas sejam invariantes em relação a uma coordenada horizontal (Fig. 1), sendo energizado por uma fonte unidimensional (ondas Planas). O segundo caso trata de um meio bidimensional energizado por uma fonte bidimensional (linha de corrente, eletrojato gaussiano). Para melhor estabilidade numérica da solução de tais problemas é conveniente (Rijo, 1989) empregar a técnica de separação dos campos em campo primário e campo secundário. O campo primário é considerado a resposta do meio sem as heterogeneidades laterais. O campo secundário é considerado a resposta das heterogeneidades. Sendo o campo total dado por:

$$\vec{U} = \vec{U}^p + \vec{U}^s \quad (1)$$

onde \vec{U}^p = campo primário (fonte+meio estratificado) e \vec{U}^s = campo secundário (heterogeneidades).

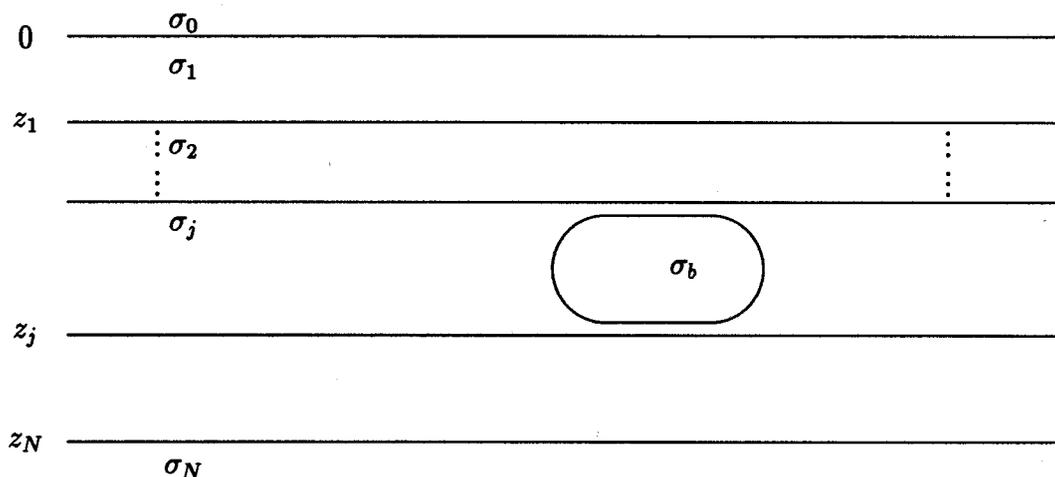


Fig. 1. Modelo para formulação teórica

A partir das equações de Maxwell, no domínio da frequência, o problema de campos secundários se reduz à equação diferencial de segunda ordem (equação de Helmholtz)

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{p} \frac{\partial U^s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{p} \frac{\partial U^s}{\partial z} \right) + qU^s = \mathcal{F}. \quad (2)$$

A fonte \mathcal{F} é justamente o campo primário. Os parâmetros p e q dependem das propriedades eletromagnéticas do meio. Exemplos de problemas descritos pela equação (2) são mostrados na tabela abaixo. Devido a atenuação na terra e as frequências de interesse serem baixas, as correntes de deslocamento podem ser desprezadas. Para os modelos considerados, a permeabilidade magnética será igual a do ar ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$).

Problema	U^s	p	q	\mathcal{F}
modo-TE	E_y	$i\omega\mu_0$	σ	$(-\Delta\sigma)E_y^p$
modo-TM	H_y	σ	$i\omega\mu_0$	$-i\omega\mu_0(\Delta\sigma/\sigma)H_y^p + [\partial(\Delta\sigma/\sigma)/\partial z]E_x^p$

Tab. 1. Exemplo de problemas descritos pela eq. 2.

$\Delta\sigma$ é o contraste de condutividades entre o meio primário e as heterogeneidades. E_y^p , E_x^p e H_y^p são as componentes do campo primário.

2.2 Campo primário de uma linha de corrente

O problema da indução eletromagnética em um meio estratificado, por um fonte de corrente dependente do tempo, foi estudado por *Wait* (1953) e *Hermance & Peltier* (1970) para uma linha de corrente e *Peltier & Hermance* (1971) para um eletrojato gaussiano.

Supondo em princípio uma linha infinita de corrente posicionada em $z = -|h_0|$ e $x = x_0$ paralela à direção y , conforme a Fig. 2A. Sendo a intensidade de corrente igual a $I(\omega)$. Neste caso, o campo elétrico reduz-se à componente E_y e o campo magnético às componentes H_x , H_z . O campo na j -ésima camada é dado por (*Rijo*, 1989)

$$E_y^{p,(j)} = \frac{i\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^\infty E_j G_1^{(j)}(k_x) \cos(k_x(x - x_0)) dk_x, \quad (3)$$

$$H_x^{p,(j)} = -\frac{1}{2\pi} \int_0^\infty E_j u_j G_2^{(j)}(k_x) \cos(k_x(x - x_0)) dk_x, \quad (4)$$

$$H_z^{p,(j)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty E_j k_x G_1^{(j)}(k_x) \sin(k_x(x - x_0)) dk_x. \quad (5)$$

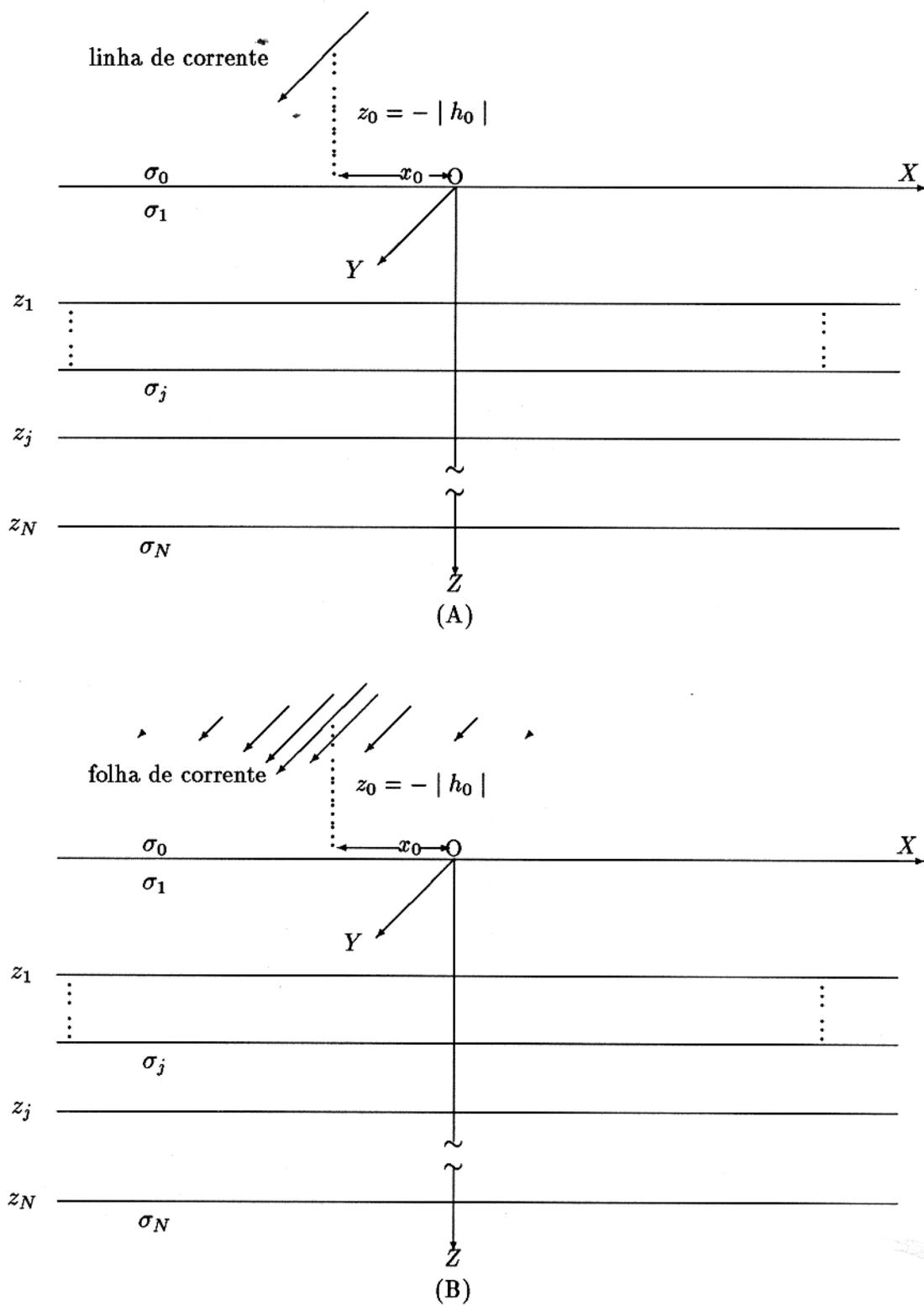


Fig. 2. Sistema de coordenadas e fontes de corrente. A) linha de corrente e B) eletrojato gaussiano

onde

$$G_1^{(j)}(k_x) = e^{-u_j(z-z_j)} + R_{TE}^{(j)} e^{u_j(z-z_j)}, \quad j = 1, 2, \dots, N-1,$$

$$G_2^{(j)}(k_x) = e^{-u_j(z-z_j)} - R_{TE}^{(j)} e^{u_j(z-z_j)}, \quad j = 1, 2, \dots, N-1,$$

$$G_1^{(N)}(k_x) = e^{-u_N(z-z_{(N-1)})},$$

$$G_2^{(N)}(k_x) = e^{-u_N(z-z_{(N-1)})}.$$

Sendo $u_j^2 = k_x^2 + k_j^2$; $k_j^2 = -i\omega\mu_0\sigma_j$, $j = 1, 2, \dots, N$.

$R_{TE}^{(j)}$ é o coeficiente de reflexão da camada-j dado por

$$R_{TE}^{(j)} = \frac{Y_i - \hat{Y}_{j+1}}{Y_j + \hat{Y}_{j+1}}. \quad (6)$$

$Y_j = u_j/(i\omega\mu_0)$ é a admitância característica da camada j e \hat{Y}_j a admitância aparente que é obtida através da recorrência

$$\hat{Y}_n = Y_j \frac{\hat{Y}_{j+1} + Y_j \tanh(u_j h_j)}{Y_{j+1} + \hat{Y}_j \tanh(u_j h_j)}, \quad (7)$$

onde o primeiro passo é dado por $\hat{Y}_n = Y_n$.

As constantes E_j são determinadas através da continuidade das componentes tangenciais do campo elétrico e campo magnético nas interfaces, e são expressas pela recorrência

$$E_0 = -\frac{I(\omega)e^{u_0 h_0}}{u_0}. \quad (8)$$

$$E_j = E_{j-1} \frac{(1 + R_{TE}^{(j-1)})e^{-u_j}}{1 + R_{TE}^{(j-1)}}, \quad j = 1, 2, \dots, N-1 \quad (9)$$

$$E_N = E_{N-1}(1 + R_{TE}^{(N-1)}), \quad (10)$$

2.3 Campo primário de um eletrojato gaussiano

Considerando o caso de uma folha de corrente localizada a uma altura $z = -|h_0|$ (Fig. 2B) e intensidade em x_0 igual a

$$I_y(\omega) = I_0(\omega) \exp(-x_0^2/(2s^2)) \quad (11)$$

I_0 é intensidade no centro e s desvio padrão da fonte.

A fonte pode ser vista como uma distribuição de linhas de corrente de intensidade $I_y(\omega)$, e o campo para cada linha dado por

$$dE_y^{(j)} = \frac{i\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^\infty E_j G_1^{(j)}(k_x) \exp(-x_0/(2s^2)) \cos(k_x(x - x_0)) dk_x. \quad (12)$$

Para determinar o campo total, é necessário fazer uma superposição de todas as fontes com intensidade I_y integrando para todo x_0 ,

$$E_y^{(j)} = \frac{i\omega\mu}{2\pi} \int_0^\infty E_j G_1^{(j)}(k_x) \left[\int_{-\infty}^\infty \exp(-x_0/(2s^2)) \cos(k_x(x - x_0)) dx_0 \right] dk_x \quad (13)$$

O que resulta em

$$E_y^{(j)} = -\frac{i\omega\mu}{s\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty E_j G_1^j(k_x) \exp(-k_x^2 s^2/2) \cos(k_x x) dk_x. \quad (14)$$

Analogamente as componentes H_x e H_z são dadas por :

$$H_x^{(j)} = -\frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty E_j u_j G_1^j(k_x) \exp(-k_x^2 s^2/2) \cos(k_x(x)) dk_x, \quad (15)$$

$$H_z^{(j)} = -\frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty E_j G_1^{(j)}(k_x) k_x \exp(-k_x^2 s^2/2) \sin(k_x x) dk_x. \quad (16)$$

Infelizmente, as integrais que descrevem os campos primários não podem ser resolvidas algebricamente. Para resolver essas integrais, foi empregada a técnica de filtros de lineares digitais (*Nissen & Enmark, 1986; Rijo, 1989*).

2.4 Solução por elementos finitos

A solução da equação diferencial (2) é obtida numericamente através da técnica de elementos finitos bidimensionais. Este método consiste em substituir a equação diferencial por um sistema de equações algébricas governado pela equação diferencial, denominado sistema global. O domínio é dividido em números finitos de subdomínios, denominados elementos. Os elementos

possuem propriedades físicas definidas e são interligados pelos nós, formando uma malha. A Fig. 2 mostra um exemplo da parte central de uma malha empregada para a solução de problemas 2D. As condições de contornos são incorporadas nas bordas da malha e no sistema global. A solução do sistema global traz a resposta em cada nó da malha. Uma análise detalhada da aplicação deste método em problemas de geofísica pode ser encontrada em *Rijo* (1977). No presente trabalho foram considerados elementos triangulares.

Para modelos bidimensionais foram determinadas, através do algoritmo de elementos finitos, as componentes paralelas ao "strike" do corpo (E_{\parallel} modo-TE e H_{\parallel} modo-TM). As componentes perpendiculares foram determinadas através da derivação numérica das equações de Maxwell

$$H_{\perp} = \frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{\partial E_{\parallel}}{\partial z} \rightarrow \text{modo-TE}, \quad (17)$$

$$E_{\perp} = -\frac{1}{\sigma} \frac{\partial H_{\parallel}}{\partial z} \rightarrow \text{modo-TM}. \quad (18)$$

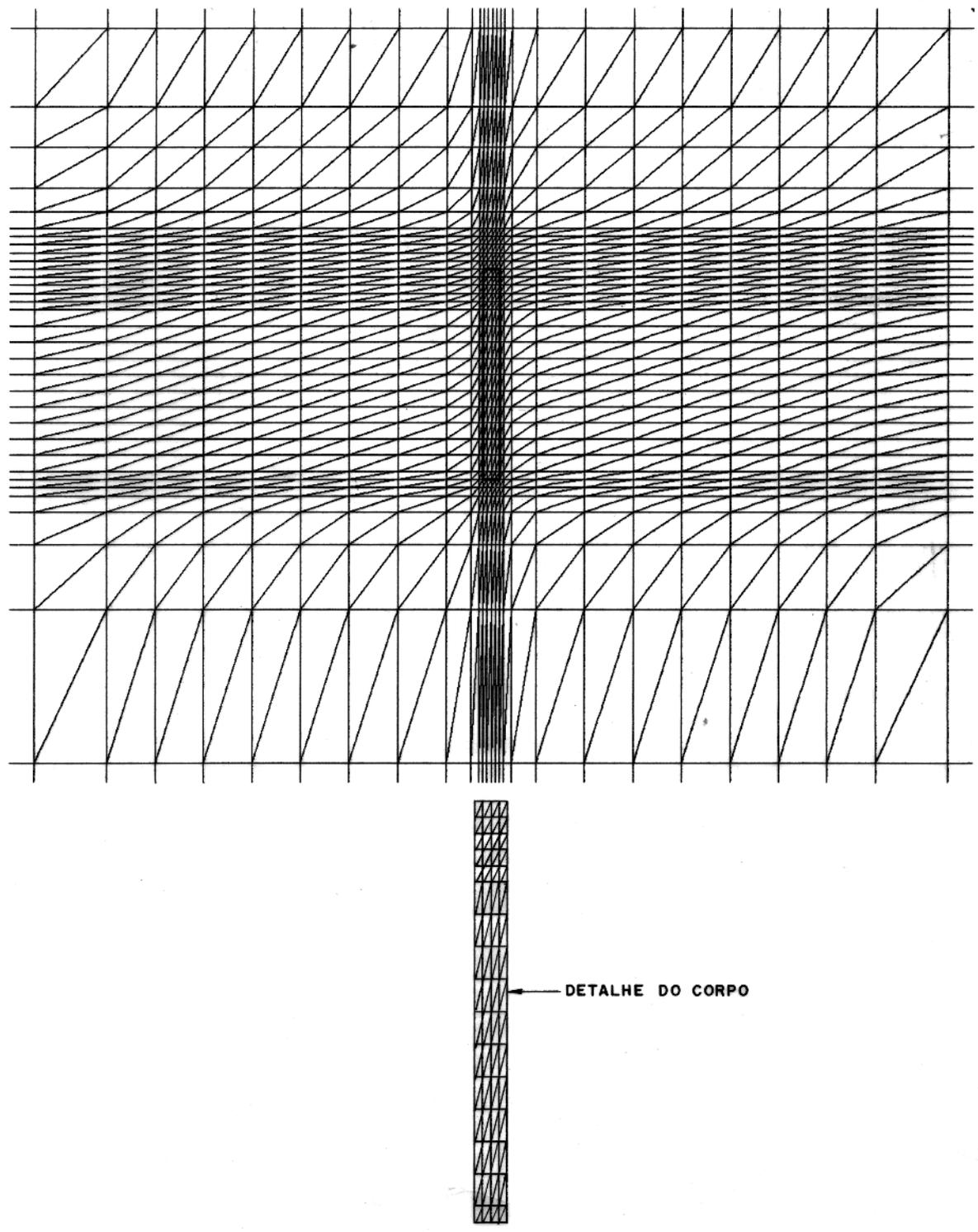


Fig. 3 Exemplo de malha de elementos finitos utilizada na soluao de um problema 2D.

CAPÍTULO 3

TESTES NUMÉRICOS

Nesta seção, apresentamos alguns testes realizados durante o desenvolvimento do trabalho, com o objetivo de confirmar a validade dos cálculos realizados. As integrais que descrevem as componentes do campo eletromagnético, foram calculadas numericamente através da técnica de filtros lineares digitais para pontos afastados do centro da fonte ($x_0 \neq 0$). Para pontos diretamente abaixo da fonte, nesse caso $x = 0$, as integrais foram solucionadas através de uma quadratura de Gauss-Laguerre. É apresentado também um teste feito com algoritmo de elementos finitos. Os resultados foram comparados com outros previamente conhecidos.

O teste da solução numérica do campo primário de uma linha de corrente foi feito de maneira indireta, comparando os resultados de resistividade aparente de uma linha e ondas planas, do mesmo modo que foi desenvolvido por *Hermance e Peltier* (1970), para o campo magnetotelúrico de uma linha de corrente. Em outras palavras, após determinar o valor numérico das componentes do campo, calcula-se a resistividade aparente através da relação de Cagniard e compara-se com os resultados de *Hermance & Peltier*. A Fig. 4A mostra a comparação entre a resistividade aparente de uma linha de corrente, e de ondas planas para um meio composto por uma camada com resistividade $\rho_1 = 1000 \Omega m$ e espessura h_1 de $10 Km$, sobre um substrato com resistividade de $\rho_2 = 10 \Omega m$. A resposta para um meio composto de uma camada com resistividade $\rho_1 = 1000 \Omega m$, espessura $h_1 = 25 Km$ sobre um substrato de resistividade de $10 \Omega m$ é ilustrado na Fig. 4B. Para ambas as figuras, o resultado de ondas planas está representado pela linha contínua, e os parâmetros altura da fonte (h) e ponto de medida (x) foram abreviadas por (x, h) , dados em Km. Foram calculadas as curvas para os seguintes parâmetros $(x, h) = (250, 100), (500, 100), (0, 250)$ e $(0, 100)$. O bom ajuste destas curvas demonstra a validade dos métodos utilizados para se obter a solução do campo primário de uma linha de corrente.

O teste com campo primário de um eletrojato gaussiano, foi feito do mesmo modo que o caso anterior, ou seja, comparando os resultados de resistividade aparente e fase, com resultados de ondas planas para os modelos de *Peltier & Hermance* (1971). A fonte considerada possui um desvio padrão de $240 Km$ localizada a uma altura de $110 Km$ acima da superfície. As curvas de re-

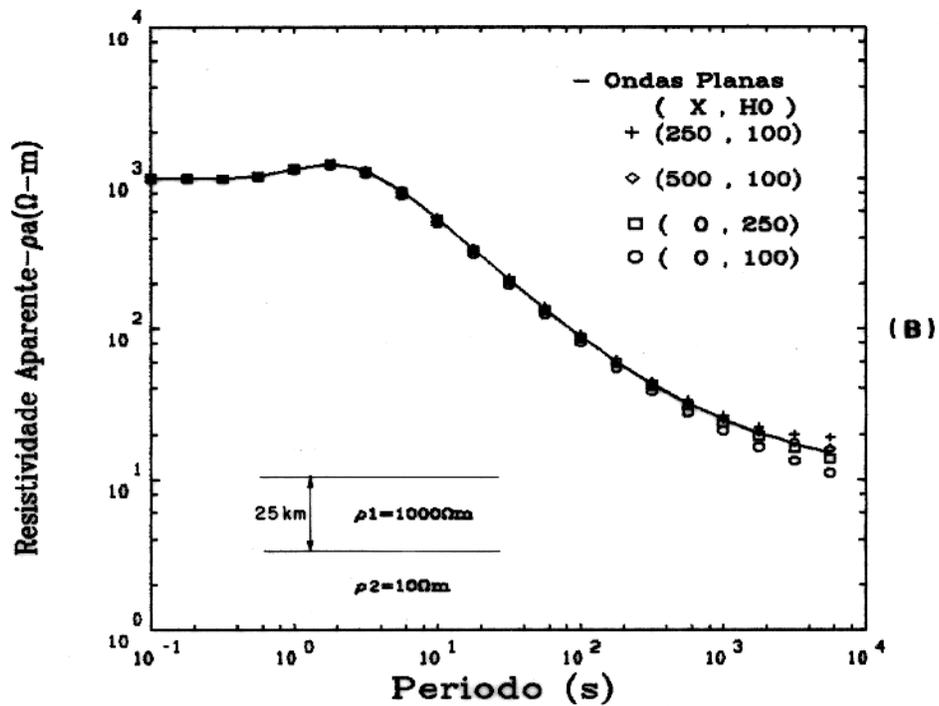
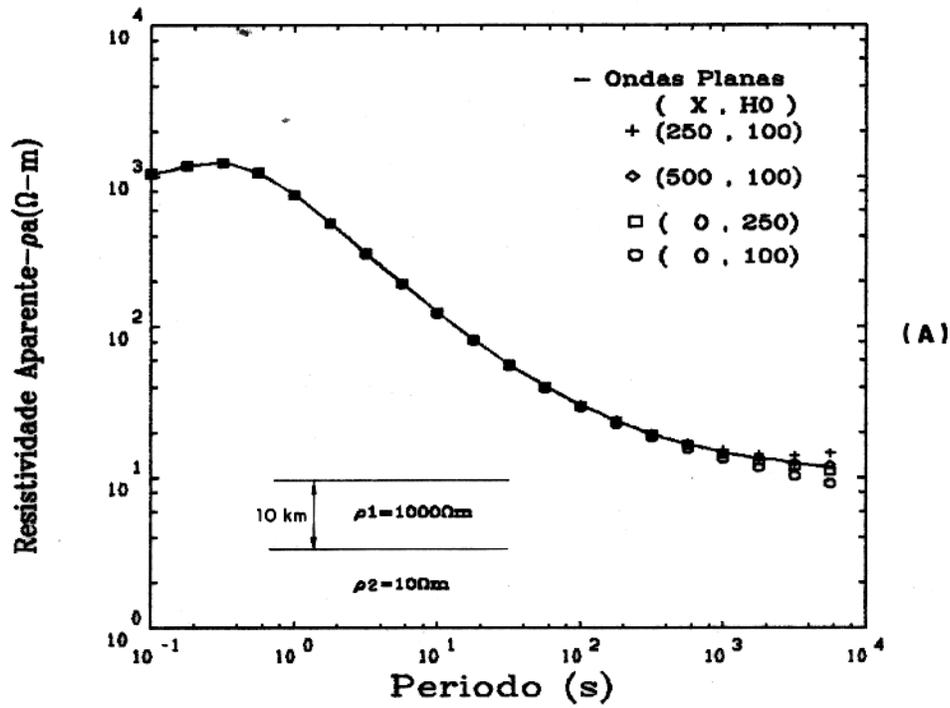


Fig. 4 Teste numérico calculando ρ_a usando uma linha de corrente como fonte e comparado com os resultados de *Hermance & Peltier* (1970). A) $h=10$ Km e B) $h=25$ Km

sistividade aparente e fase para o modelo 1 (Tab. 2) são ilustradas na Fig. 5. O resultado de ondas planas é representado na figura pela linha tracejada. As sondagens foram feitas para vários pontos de observação, sendo representados nas figuras pelos números 0–3, que correspondem a distância ao ponto verticalmente abaixo do centro do eletrojato, dada em desvios padrões da fonte. As curvas de resistividade e fase para o modelo 2 e 3 (Tab. 2) são ilustrados, respectivamente, nas Fig. 6 e 7. Os resultados foram os mesmos obtidos por *Peltier & Hermance*(1971), que demonstram a validade dos métodos empregados na solução numérica do campo primário de um eletrojato gaussiano.

Modelo	Camada	ρ ($\Omega.m$)	h (Km)
1	1	100	50
	2	10	∞
2	1	10	5
	2	1000	∞
3	1	10	5
	2	1000	500
	3	10	∞

Tab. 2 Parâmetros físicos-geométricos dos modelos.

Para o teste do algoritmo de elementos finitos, foram obtidas as respostas de amplitude de fase da componente horizontal e vertical de um modelo 2D–2D e comparadas com a resposta obtida por *Hohmann* (1971) através do método de equações integrais (Fig.8), sendo o modelo constituído por um corpo com resistividade $2 \Omega m$, com largura de 15 m e espessura de 150 m localizado a 25m de profundidade em um semi-espaço homogêneo com resistividade de $1000 \Omega - m$. A situação deste modelo corresponde ao modo TE, onde foi determinada a componente E_y pelo algoritmo de elementos finitos. As componentes H_x e H_z foram determinadas pela derivação numérica de E_y .

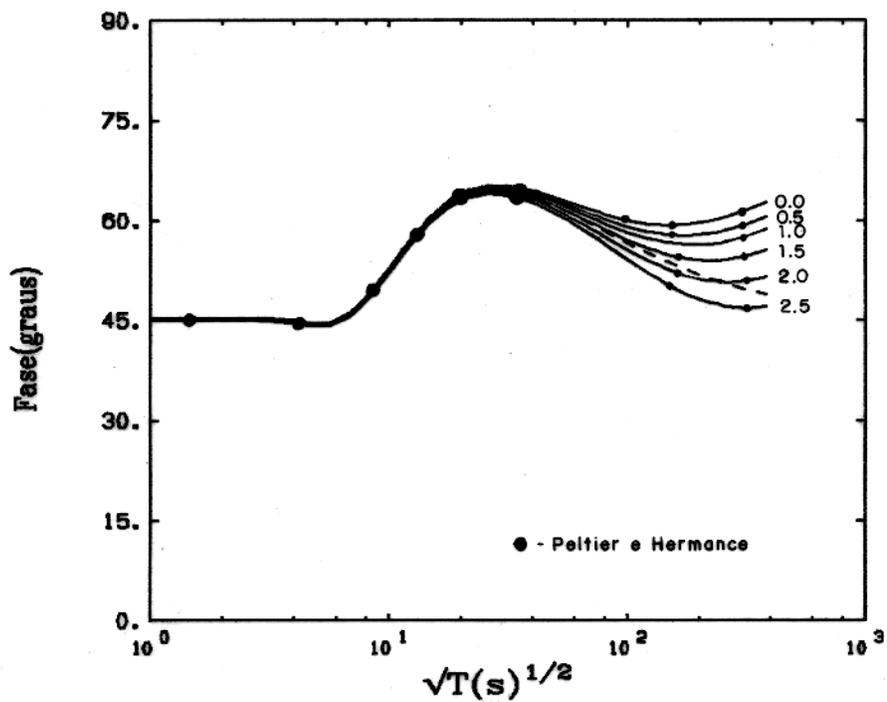
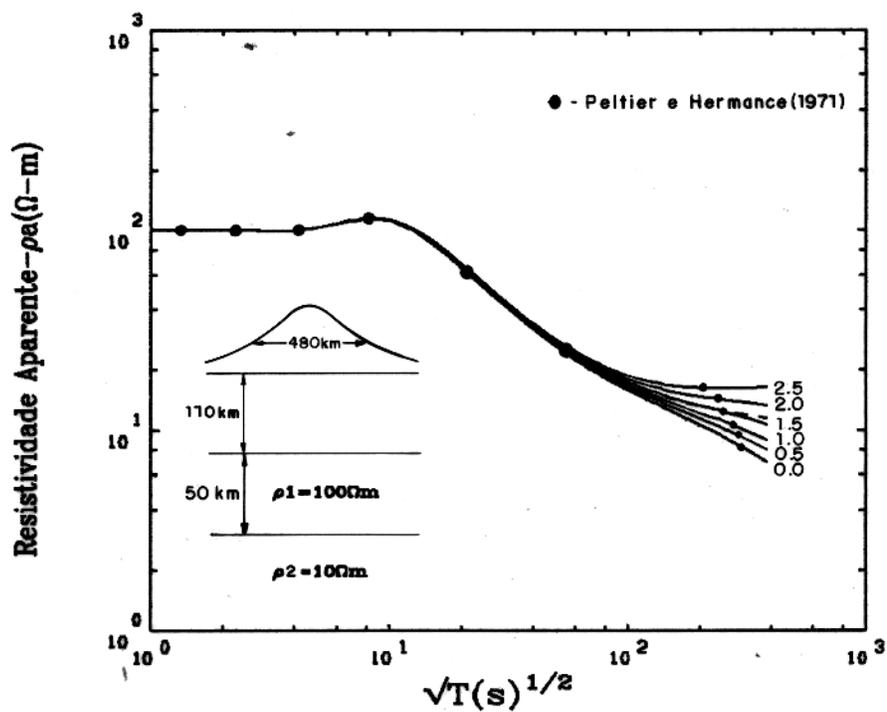


Fig. 5 Teste da solução numérica do campo, calculando resistividade aparente e fase de um eletrojato gaussiano e comparando com os resultados de *Peltier & Hermance* (1971).

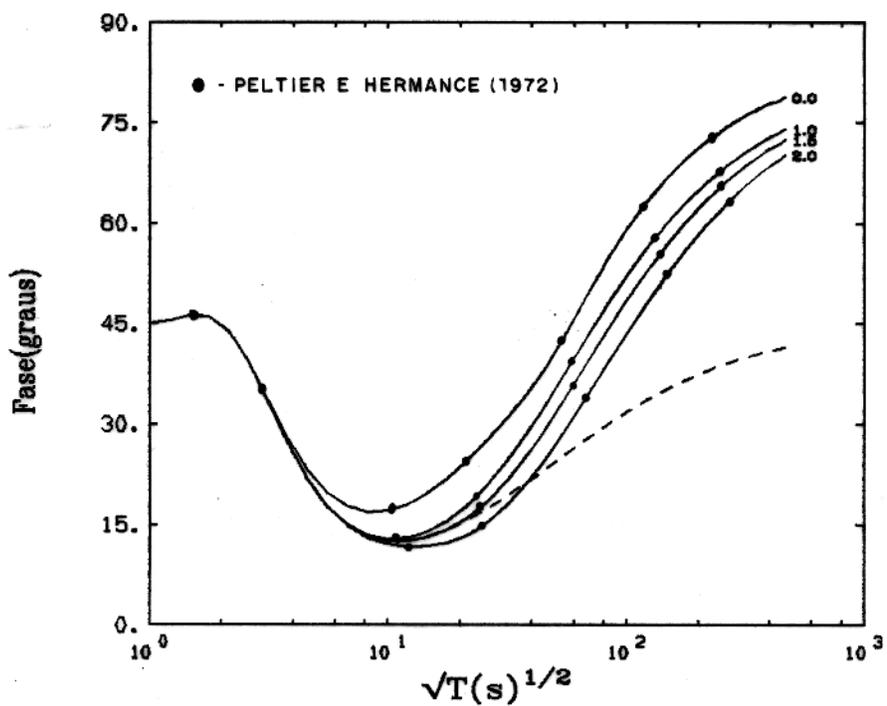
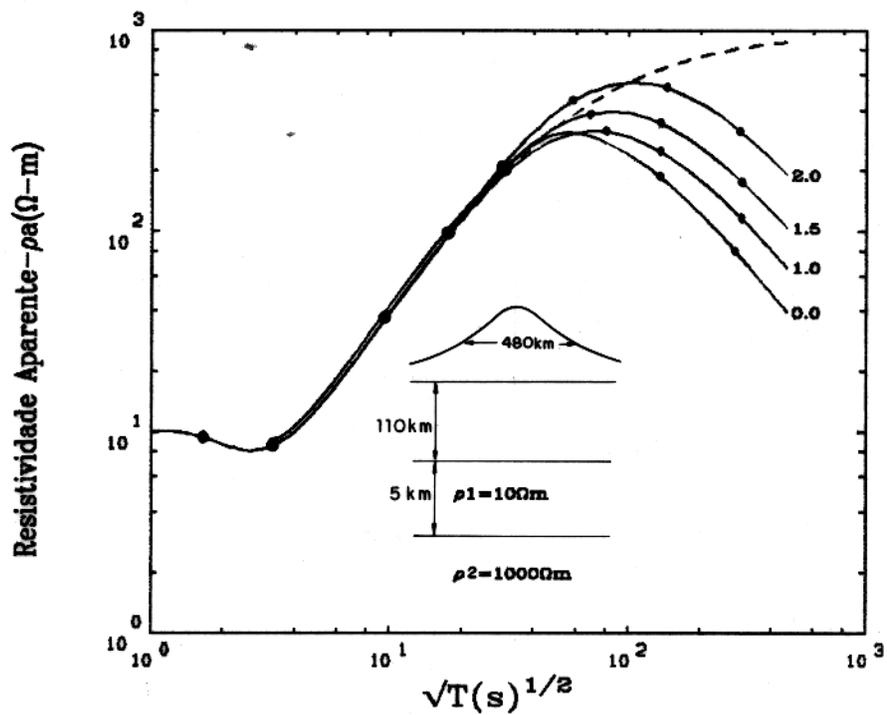


Fig. 6 Teste da solução numérica do campo, calculando resistividade aparente e fase de um eletrojato gaussiano para o modelo 2 de Peltier & Hermance (1971).

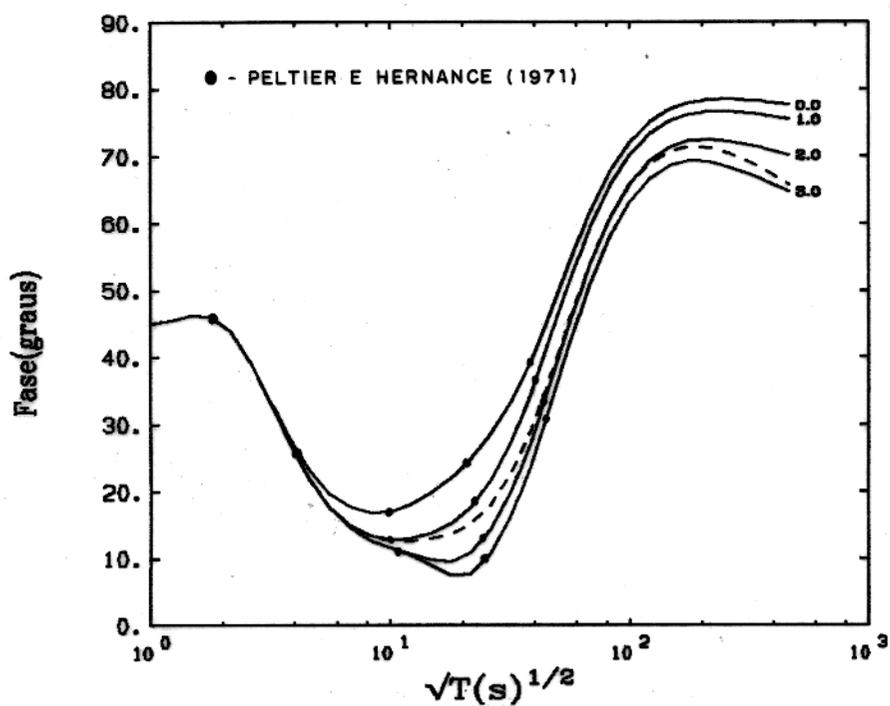
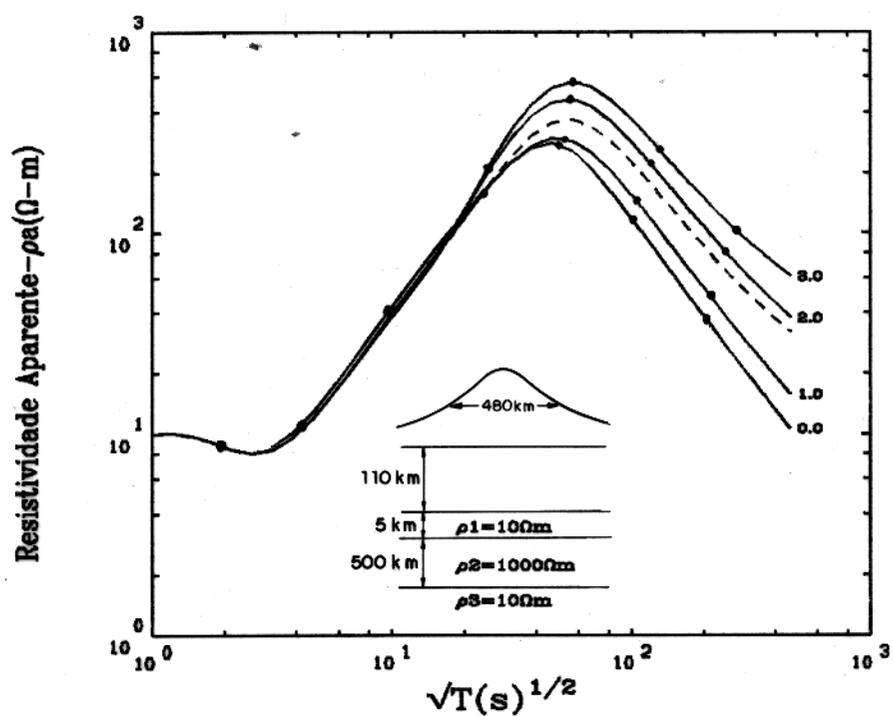


Fig. 7 Teste da solução numérica do campo, calculando resistividade aparente e fase de um eletrojato gaussiano para o modelo 3 de Peltier & HERNANCE (1971).

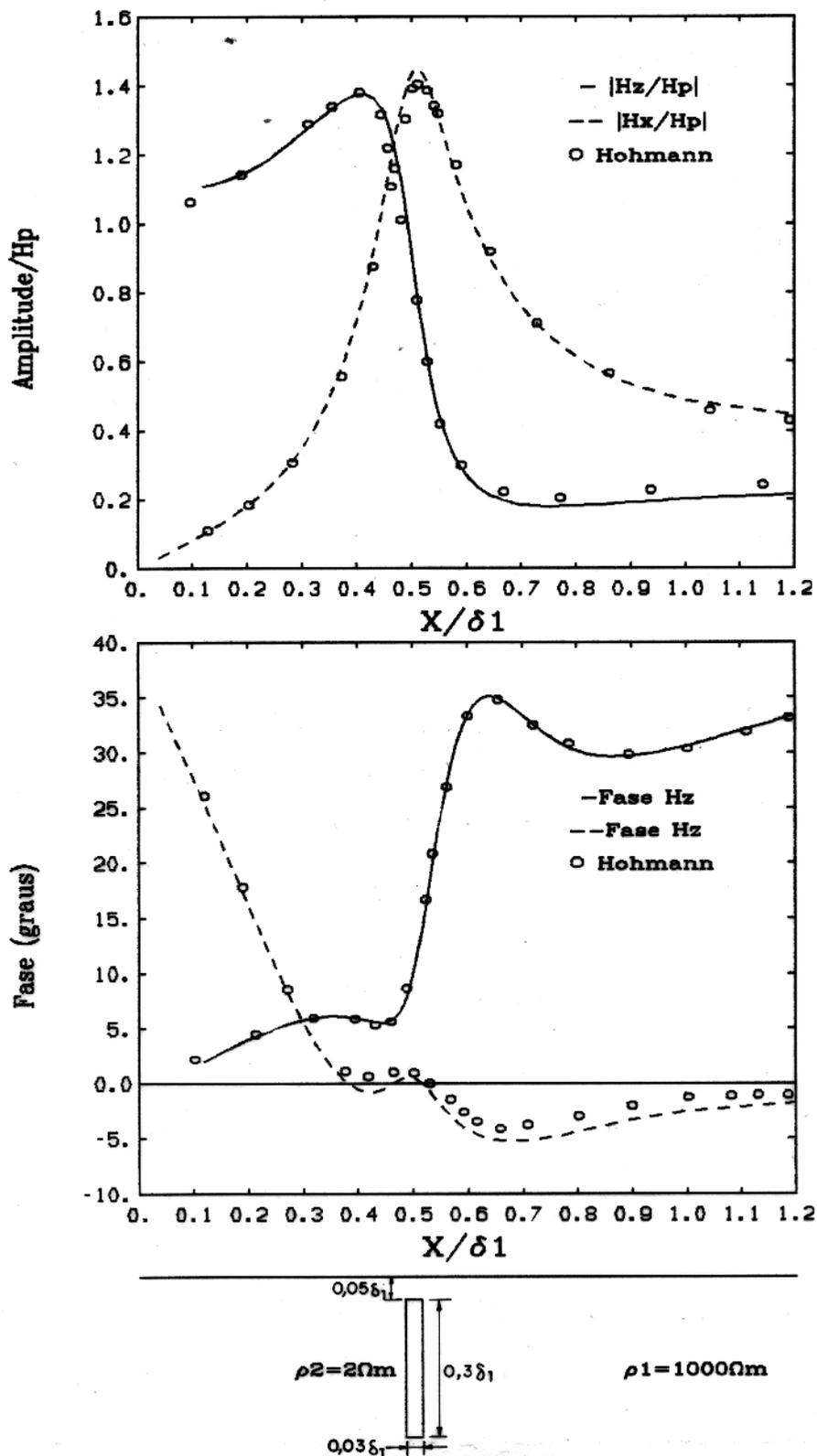


Fig. 8 Comparação entre os resultados de elementos finitos e equações integrais (Hohmann - 1970) para um modelo de linha de corrente.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS RESULTADOS

O eletrojato foi simulado por dois tipos de fontes: uma linha de corrente localizada a 110 Km acima da superfície do terreno, e uma distribuição plana gaussiana de corrente também a 110 Km de altura e desvio padrão de 240 Km. O cálculo da resistividade aparente ρ_a foi determinado através da relação de Cagniard

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z|^2 \quad (20)$$

e a fase $\Phi(\omega)$ dada por

$$\Phi(\omega) = \frac{\text{Imag}(Z)}{\text{Real}(Z)} \quad (21)$$

onde Z é a impedância na superfície determinada por

$$Z = \frac{E_{\parallel}}{H_{\perp}} \rightarrow \text{Modo} - TE$$

$$Z = -\frac{E_{\perp}}{H_{\parallel}} \rightarrow \text{Modo} - TM$$

O modo TE corresponde ao caso em que a direção da fonte de correntes é paralela ao "strike" das estruturas bidimensionais, e no modo TM as correntes da fonte são perpendiculares às estruturas. Para meios unidimensionais (homogêneo ou estratificado), é indiferente a escolha da direção, ou seja, a resposta é a mesma para ambos os modos.

Para analisar o efeito do eletrojato, as curvas de resistividade aparente ρ_a e $\Phi(\omega)$ de vários modelos uni e bidimensionais, correspondem aos três tipos de fontes: a) linha, b) distribuição gaussiana, denominada eletrojato nesse trabalho, e c) ondas planas, formas comparadas entre si.

Inicialmente, serão analisados perfis magnetotéluricos em função da distância a um ponto diretamente abaixo da linha ou centro da fonte (eletrojato), localizado a 110 Km de altura. Em seguida, serão analisadas sondagens magnetotéluricas deslocadas em relação à fonte de corrente.

Em todas as figuras os resultados correspondentes a ondas planas são representados pela linha cheia, os da linha de corrente pelo sinal + e os de eletrojato por retângulos □. Os modelos unidimensionais estudados estão descritos na Tab. 3.

Modelo	Camada	ρ ($\Omega.m$)	h (Km)
1A	1	10	∞
1B	1	100	∞
1C	1	1000	∞
2A	1	1000	5
	2	10	∞
2B	1	10	5
	2	1000	∞
3A	1	1000	50
	2	10	∞
3B	1	10	50
	2	1000	∞
4A	1	10	5
	2	1000	50
	3	10	∞
4B	1	1000	5
	2	10	50
	3	1000	∞

Tab. 3 Parâmetros dos modelos unidimensionais estudados.

MEIO HOMOGENEO

Os primeiros modelos estudados correspondem a um meio homogêneo de resistividade igual a 10, 100, 1000 Ωm . Nesses modelos, a linha de corrente e o centro do eletrojato estão acima da estação 0.0 (no canto esquerdo das Figs. 9–13).

Modelo 1A - $\rho = 10 \Omega m$

Observando a Fig. 9A, que mostra os perfis de resistividade aparente e fase, em relação à distância um ponto diretamente abaixo da linha ou do centro do eletrojato, sendo o meio com resistividade de $10 \Omega m$, verifica-se que os perfis correspondentes à linha, ao eletrojato e à onda plana são indistiguíveis para frequências de 1000 a 0.001 Hz, isto qualquer que seja a distância do ponto de observação à fonte. Para frequência de 0.0001 Hz, observa-se que ocorre um deslocamento dos

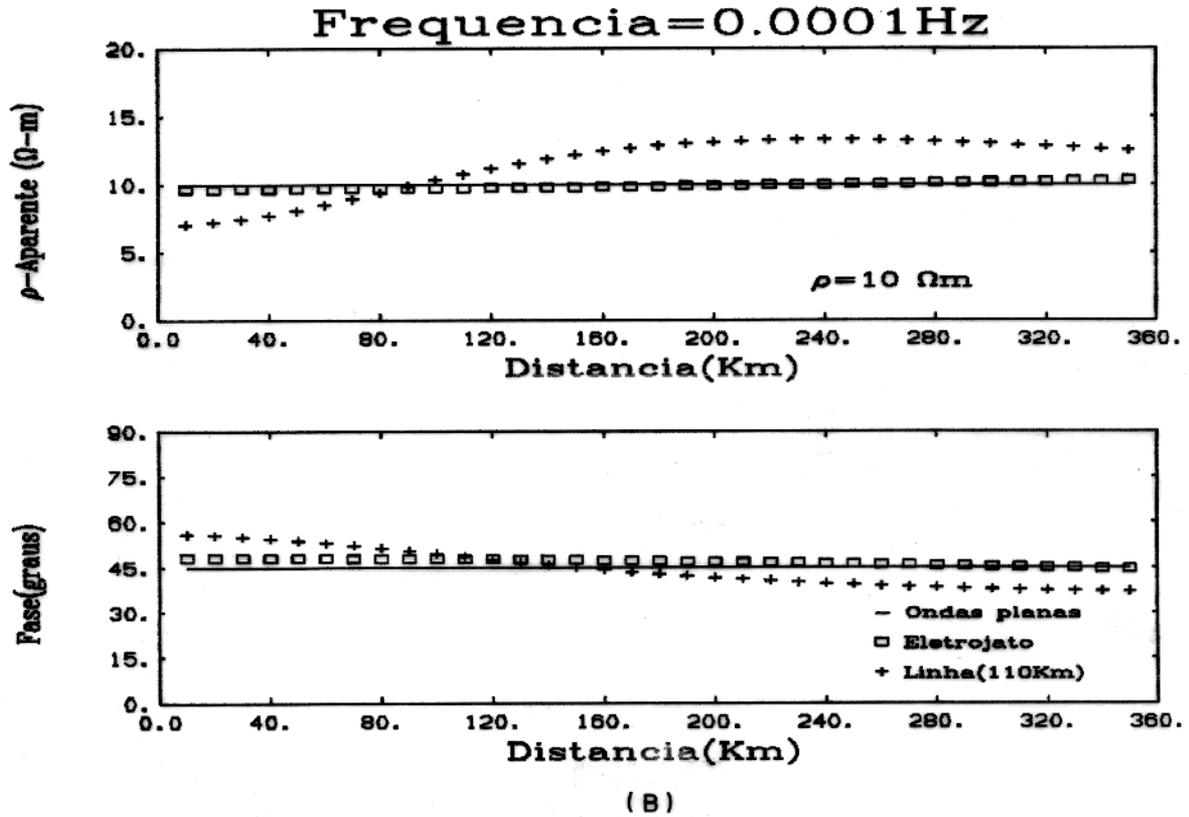
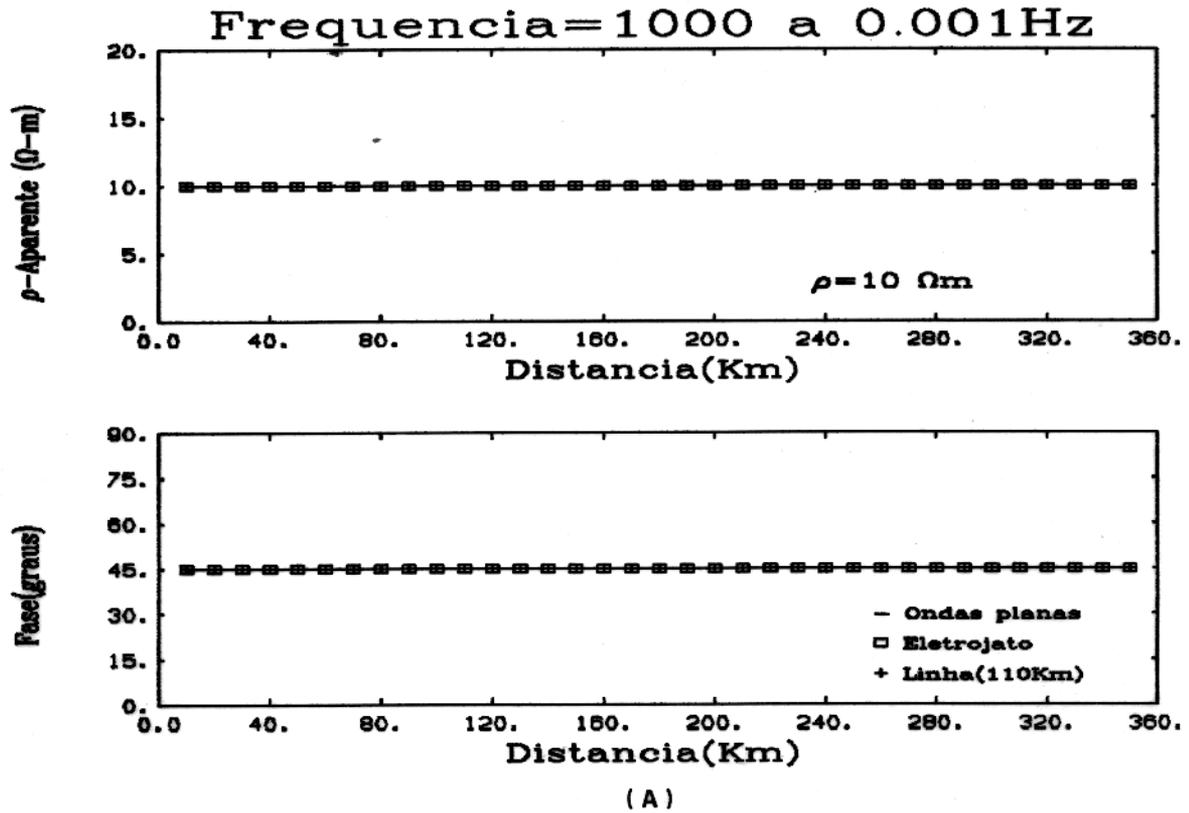


Fig. 9 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um semi-espago de resistividade $10 \Omega\text{m}$. A) Freq.1000 a 0.001Hz e B) 0.0001Hz.

perfis de resistividade aparente e fase, para linha e para o eletrojato em relação ao da onda plana (Fig. 9B). Como é de se esperar, o deslocamento é maior quando a fonte é a linha de corrente, por ser esta uma fonte mais concentrada do que o eletrojato gaussiano. Os valores de resistividade aparente são deslocados para baixo, em relação a onda plana, em pontos próximos a um ponto diretamente abaixo da fonte (centro) e crescendo com a distância até valores maiores que os de onda plana. O inverso é observado na curva da fase, ou seja, deslocamento para cima em pontos próximos ao centro da fonte e decrescendo com a distância.

Modelo 1B - $\rho = 100 \Omega m$

Aumentando a resistividade do meio para $100 \Omega m$, verifica-se o mesmo comportamento do caso anterior. Contudo, a divergência entre os resultados é observado para valores de frequências maiores que o modelo anterior. Com efeito, para frequências entre 1000 e 0.1 Hz, os resultados devidos aos três tipos de fontes são indistinguíveis (Fig. 10A). A divergência entre os resultados é observada a partir de 0.01Hz para linha de corrente, como ilustra a Fig. 10B. O efeito se intensifica para frequências 0.001 e 0.0001 Hz (Fig. 11A e 11B). A exemplo do caso anterior, pode-se observar o deslocamento para baixo nos perfis de resistividade aparente e para cima nos perfis de fase, em pontos próximos ao centro da fonte, sendo invertidos com a distância.

Modelo 1C - $\rho = 1000 \Omega m$

Finalmente, se aumentarmos ainda mais a resistividade do meio, o efeito da fonte se intensifica para frequências mais altas do que nos casos anteriores. De fato, observando as Fig. 12B, 13A e B, nota-se que para um meio de resistividade igual a $1000 \Omega m$, os perfis de resistividade aparente e fase correspondentes à linha e ao eletrojato, são bem diferentes do da onda plana, já à partir da frequência 0.01 Hz.

MEIO ESTRATIFICADO

A resposta de um meio composto por camadas, pode ser vista como uma generalização dos casos anteriores, o que pode-se esperar resultados semelhantes, ou seja, para baixo valor de

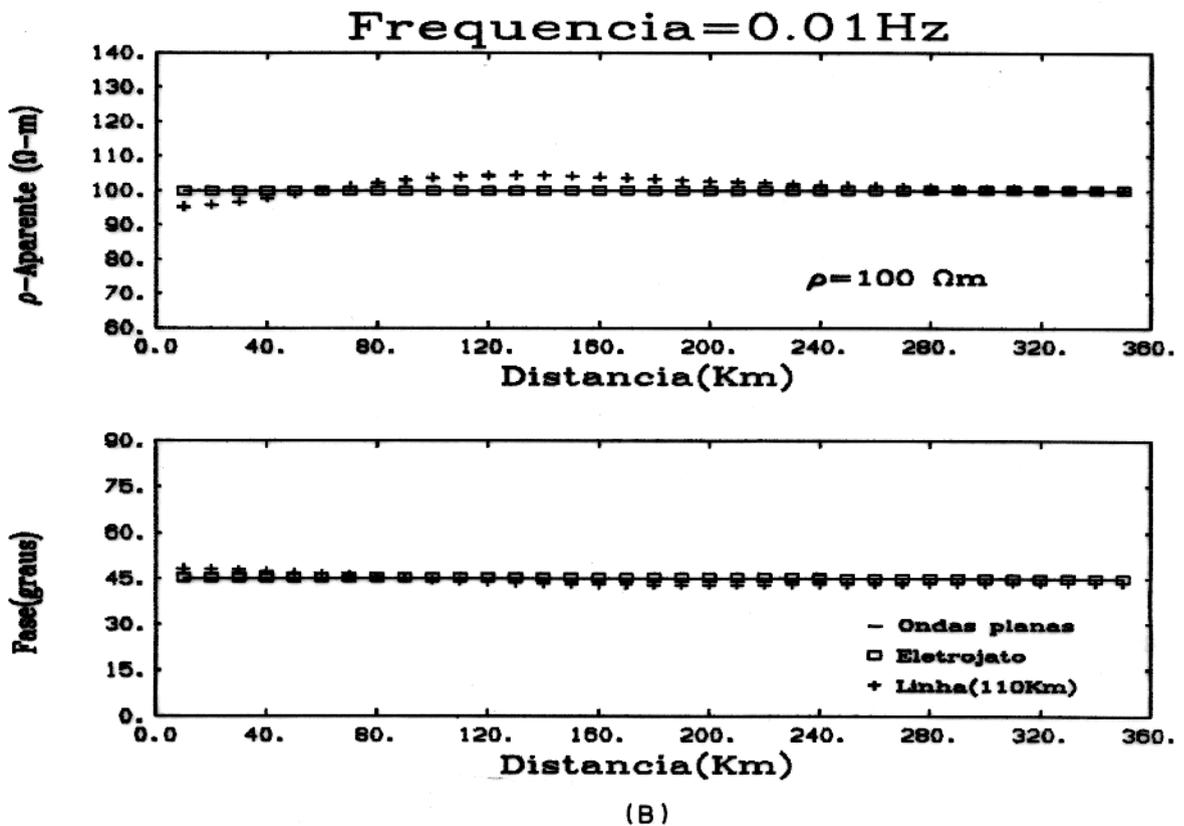
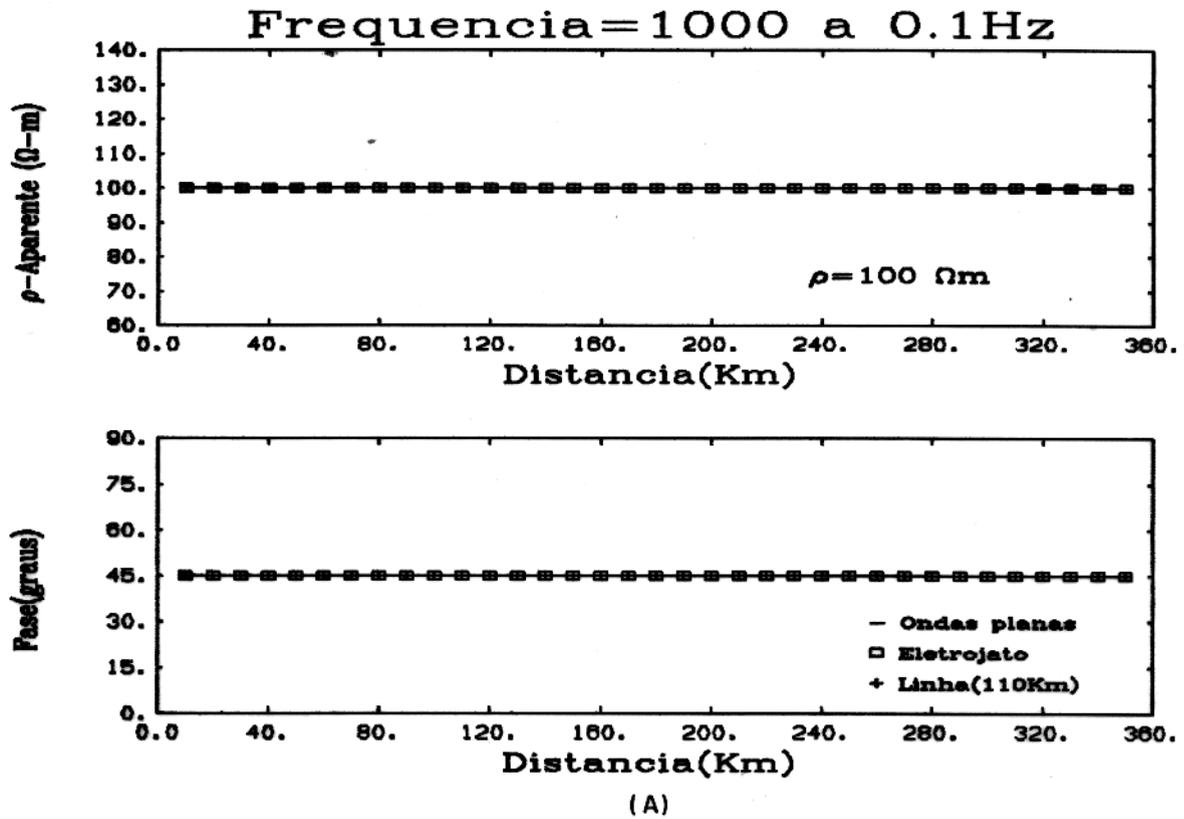


Fig. 10 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um semi-espaço de resistividade $100 \Omega m$. A) Freq.1000 a 0.1Hz e B) 0.01Hz.

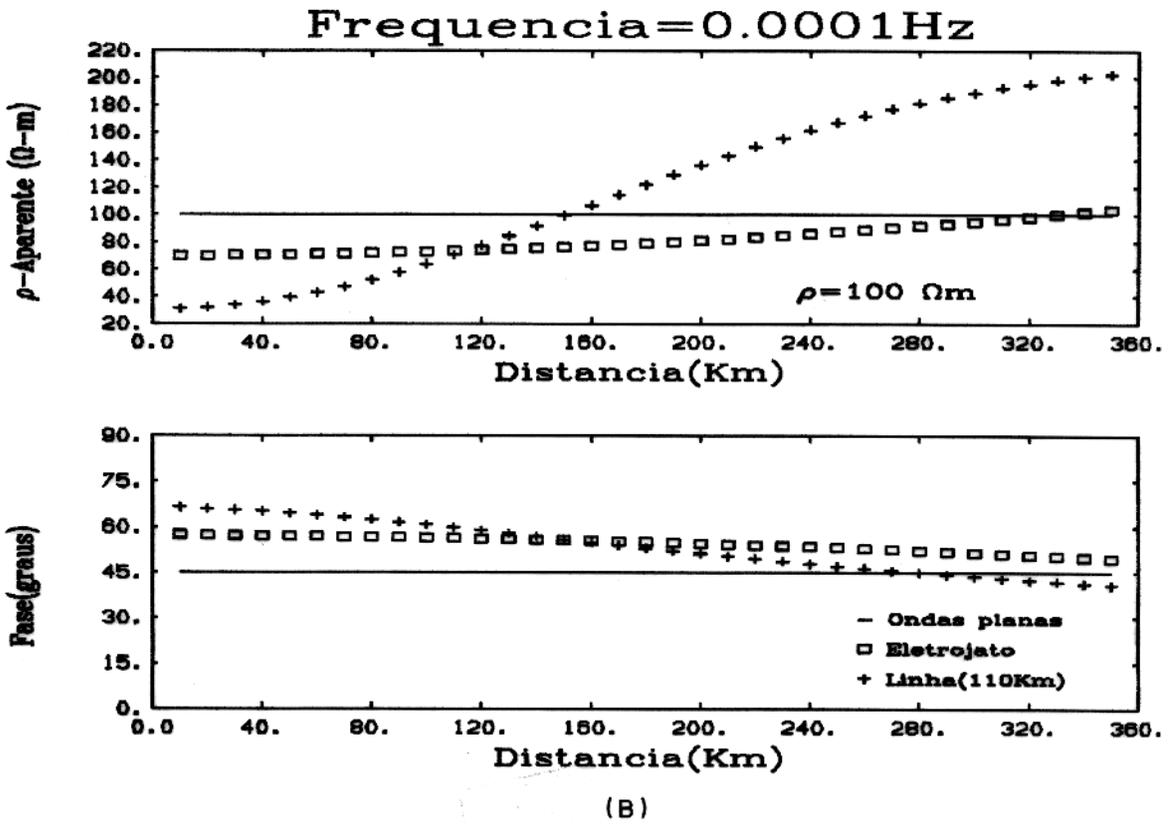
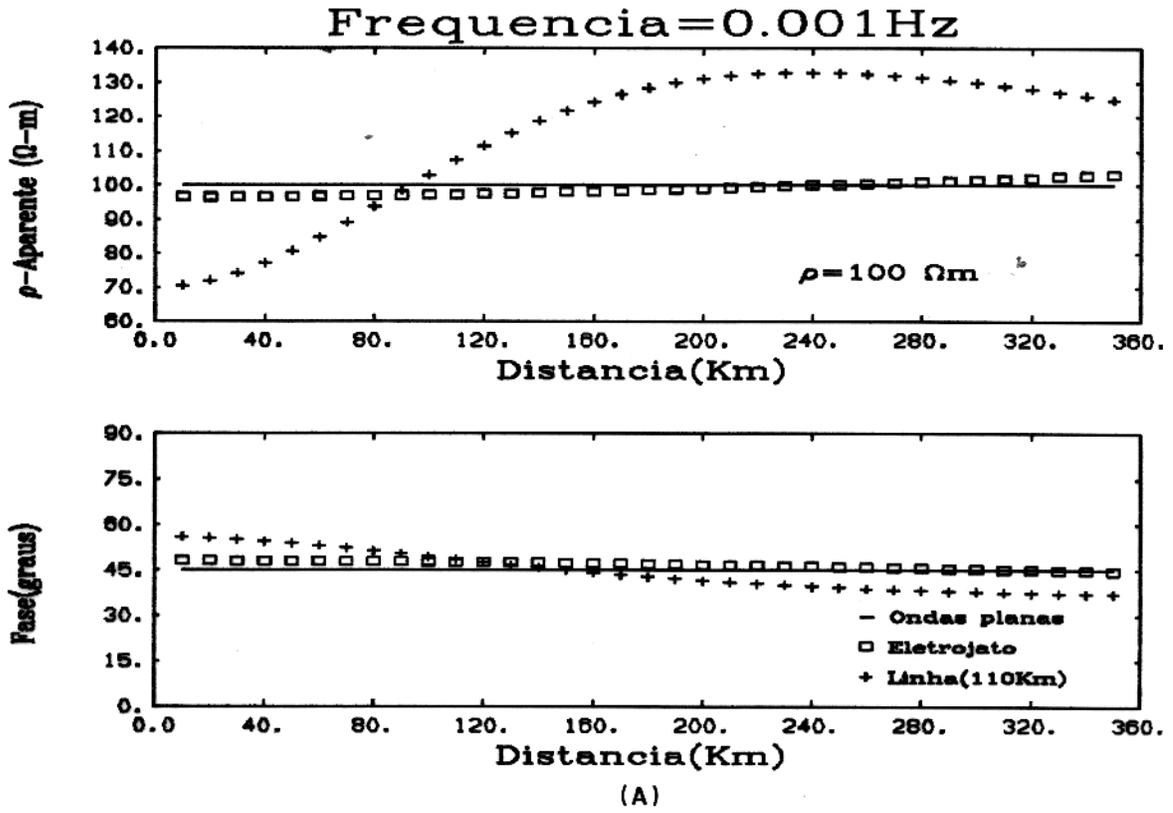


Fig. 11 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um semi-espaço de resistividade 100 Ωm. A) Freq. 0.001Hz e B) 0.0001Hz.

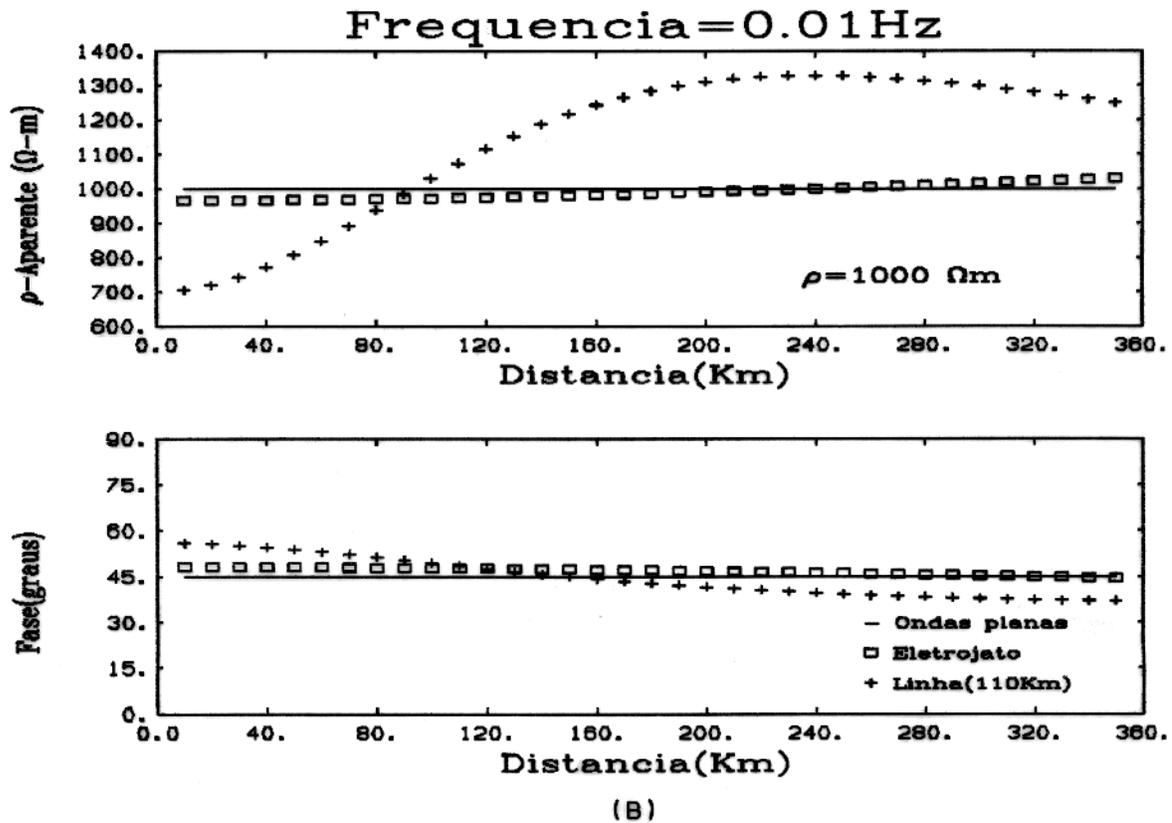
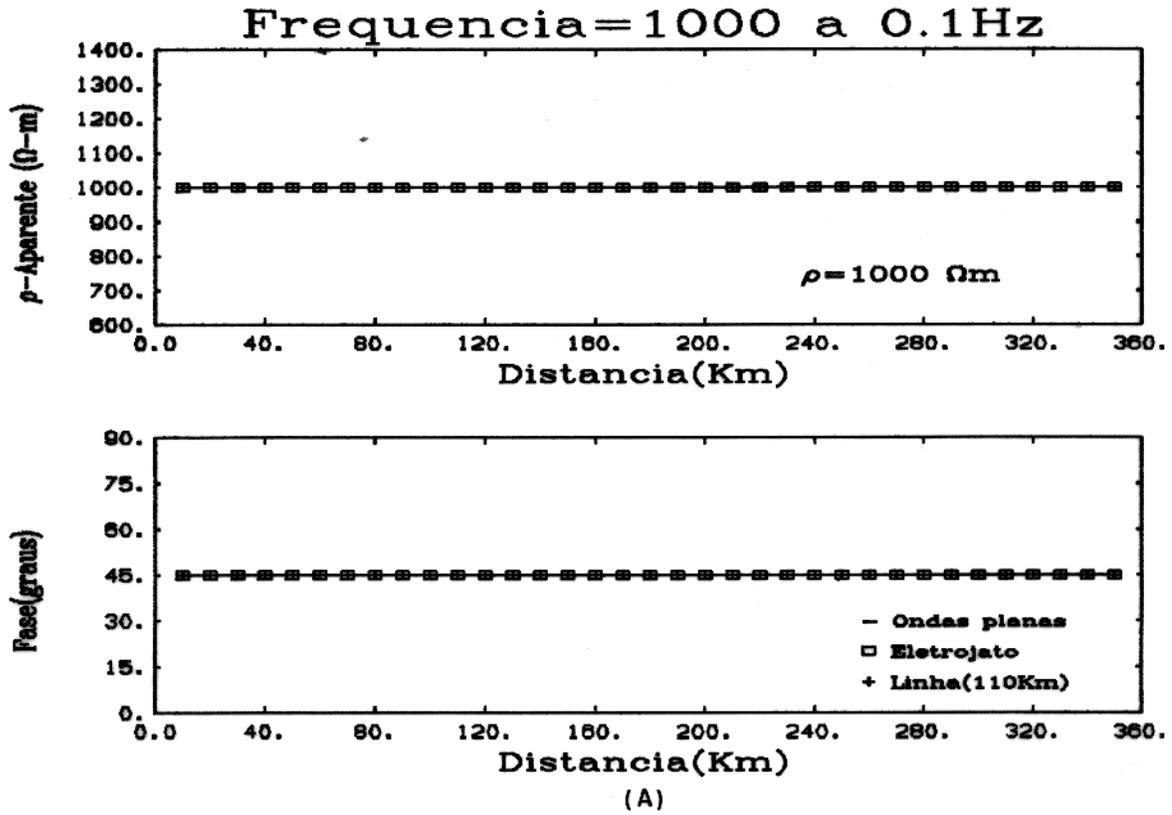
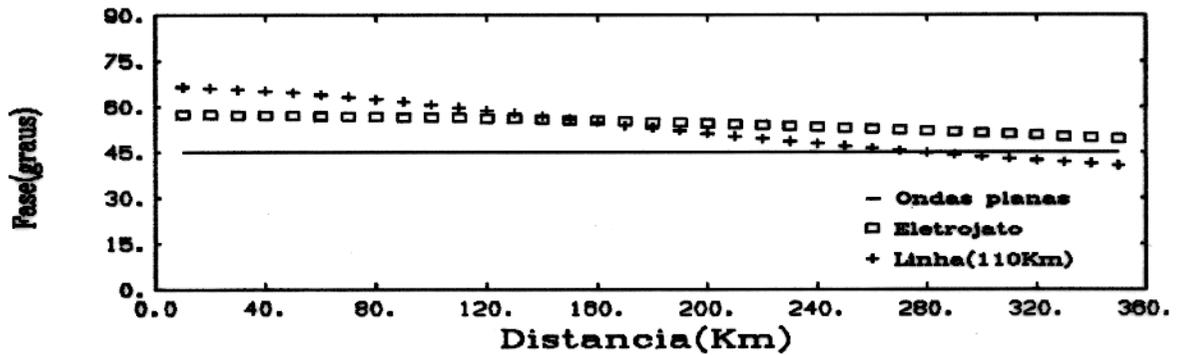
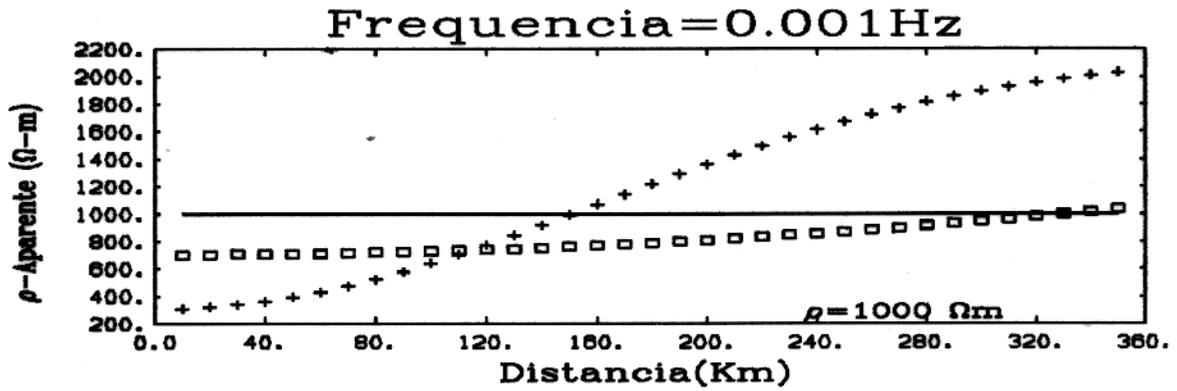
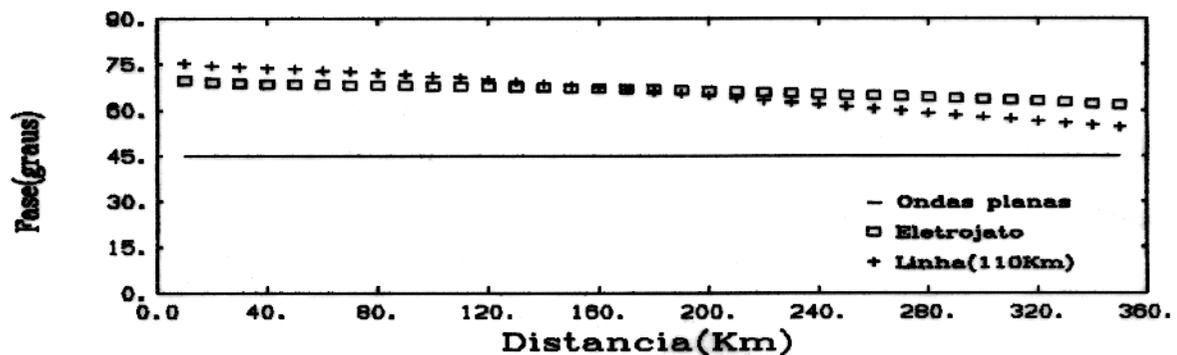
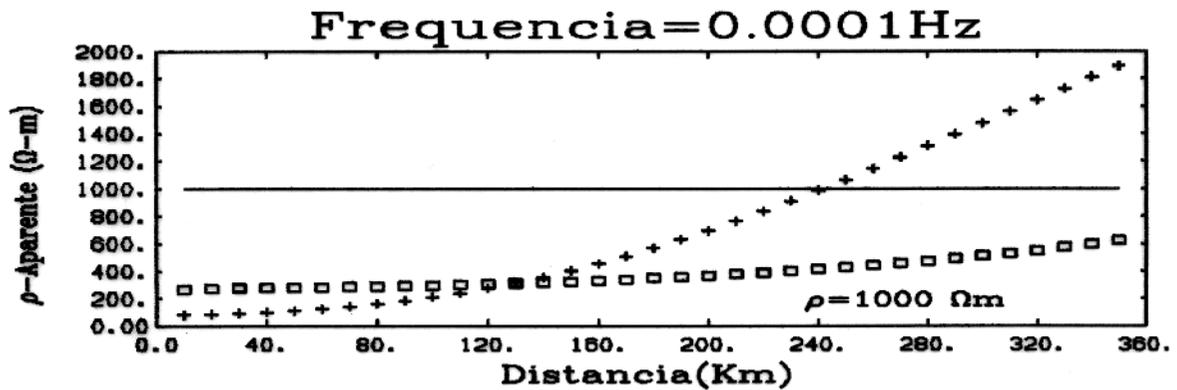


Fig. 12 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um semi-espaço de resistividade $1000 \Omega m$. A) Freq.1000 a 0.1Hz e B) 0.0001Hz.



(A)



(B)

Fig. 13 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um semi-espaco de resistividade $1000 \Omega m$. A) Freq. 0.001Hz e B) 0.0001Hz.

frequência, os perfis de resistividade aparente e fase são deslocados em relação aos da onda plana.

Modelo 2A - $\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 5 Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$

As respostas do Modelo 2A, composto por uma camada de resistividade $1000 \Omega m$ e espessura de $5 Km$ sobre um substrato de resistividade $10 \Omega m$, são ilustradas nas Figs. 14 a 17. Como é de se esperar, nas frequências de 1000 a $100 Hz$ as respostas são influenciadas principalmente pela resistividade da primeira camada (Figs. 14A e 14B). Com a redução da frequência (10 a $1 Hz$), os perfis de resistividade aparente e fase tornam-se também influenciados pela resistividade do substrato, sem, contudo, apresentarem nenhum efeito da fonte (Figs. 15A a 16B). Entretanto, a partir da frequência de $0.001 Hz$, observa-se divergência entre os resultados da linha de corrente e da onda plana e um diminuto efeito devido ao eletrojato (Fig 17).

Modelo 2B - $\rho_1 = 10 \Omega m$, $h_1 = 5 Km$, $\rho_2 = 1000 \Omega m$

No modelo 2B, a resistividade do substrato é agora igual a $1000 \Omega m$, enquanto que a resistividade da camada de $5 Km$ de espessura é $10 \Omega m$. Pode-se observar que para frequências acima de $1 Hz$, a resposta contém somente informação da resistividade da primeira camada, não ocorrendo divergências entre os perfis para os três tipos de fontes (Fig.18). A medida que se reduz a frequência, as respostas sofrem influência da camada inferior, sem, contudo, apresentarem influência da fonte (Fig. 19A). Para a frequência de $0.01 Hz$, a resposta de uma linha de corrente apresenta um pequeno deslocamento em relação ao perfil devido a onda plana. O perfil do eletrojato, praticamente, não sofre nenhuma alteração. Para frequência de 0.001 a $0.0001 Hz$, os perfis mostram maior influência da resistividade do substrato e conseqüentemente uma maior intensidade do efeito, resultando num deslocamento maior nas curvas de resistividade aparente (Fig. 20). Comparando os resultados desse modelo com os do modelo 2A, observa-se uma ampliação da intensidade do efeito da fonte, na medida que o substrato torna-se mais resistivo, o que vem corroborar os os resultados dos modelos anteriores.

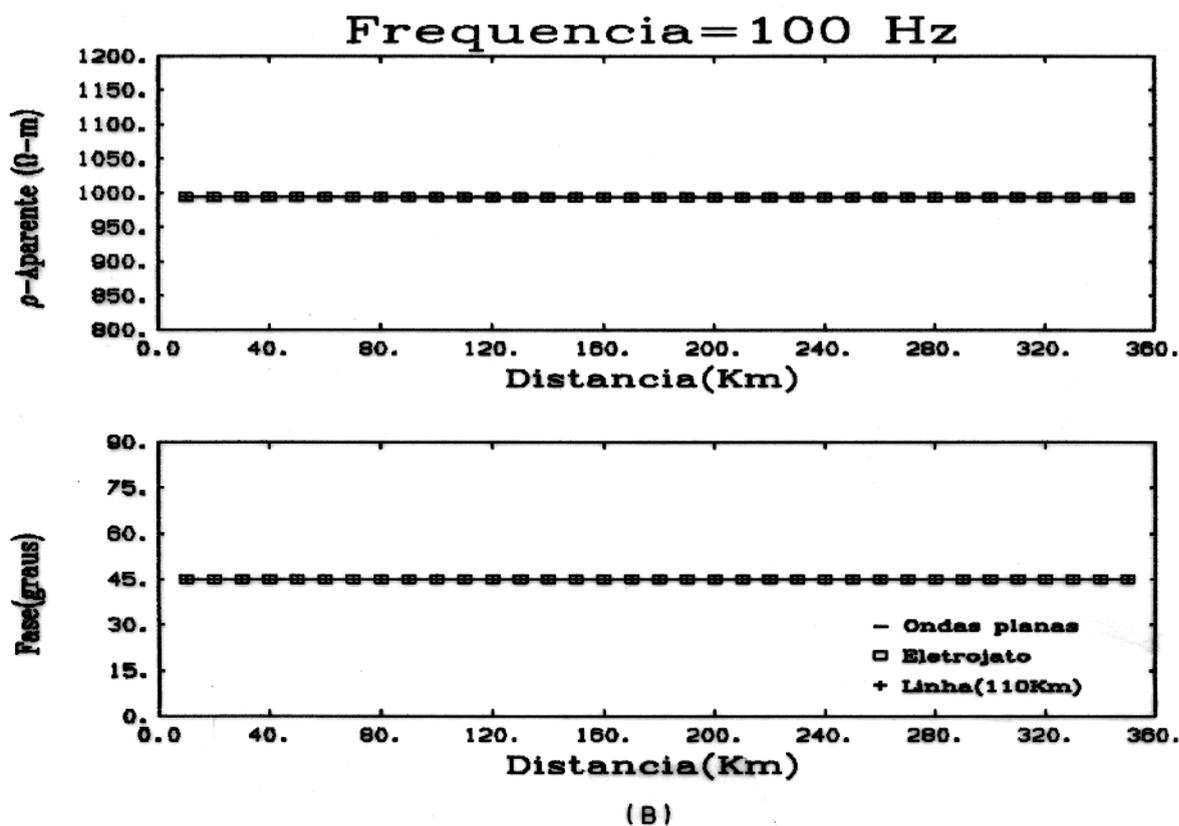
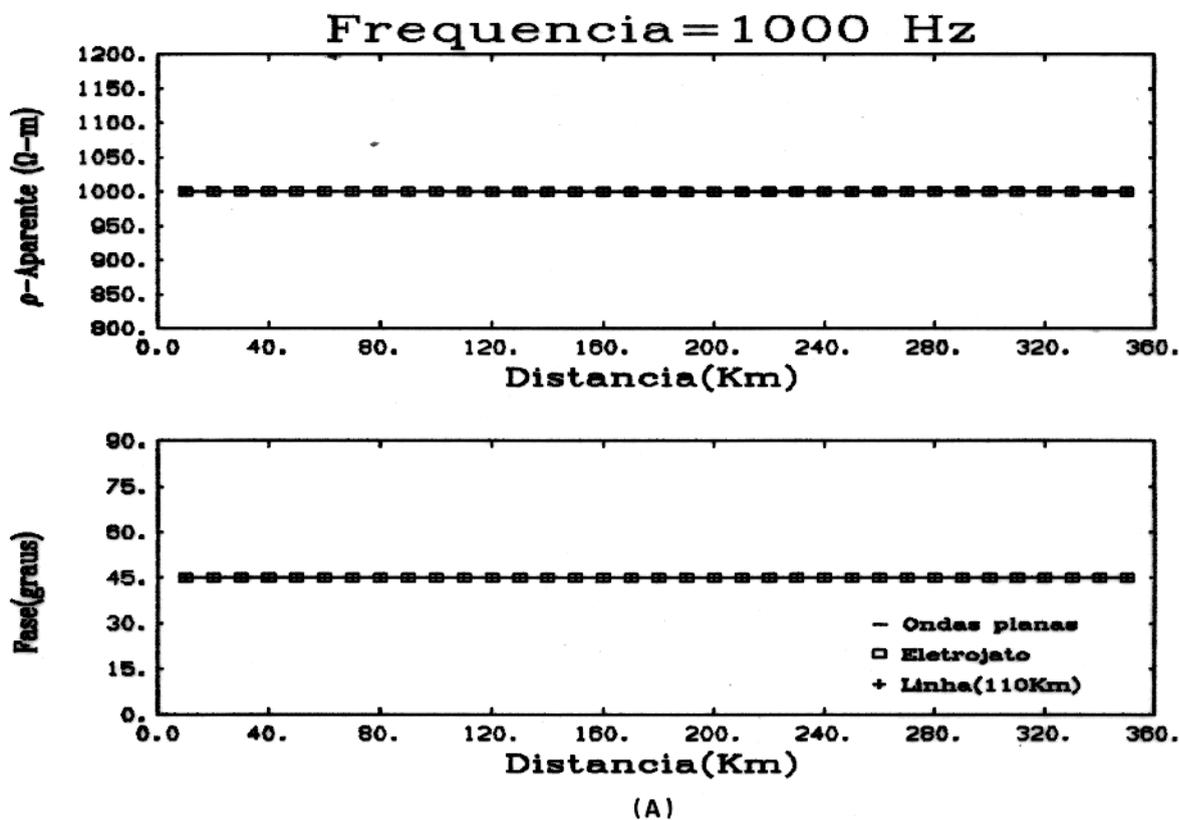


Fig. 14 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m, h_1 = 5 Km, \rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 1000 Hz e B) 100 Hz.

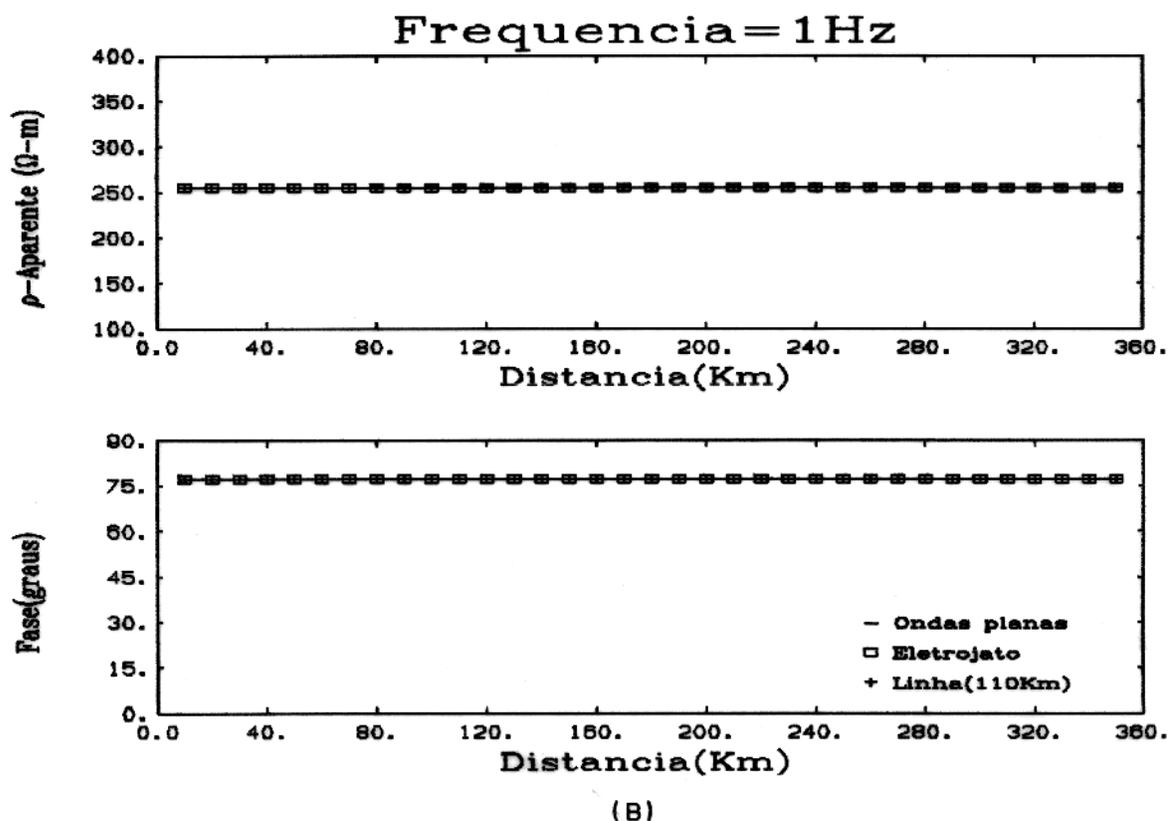
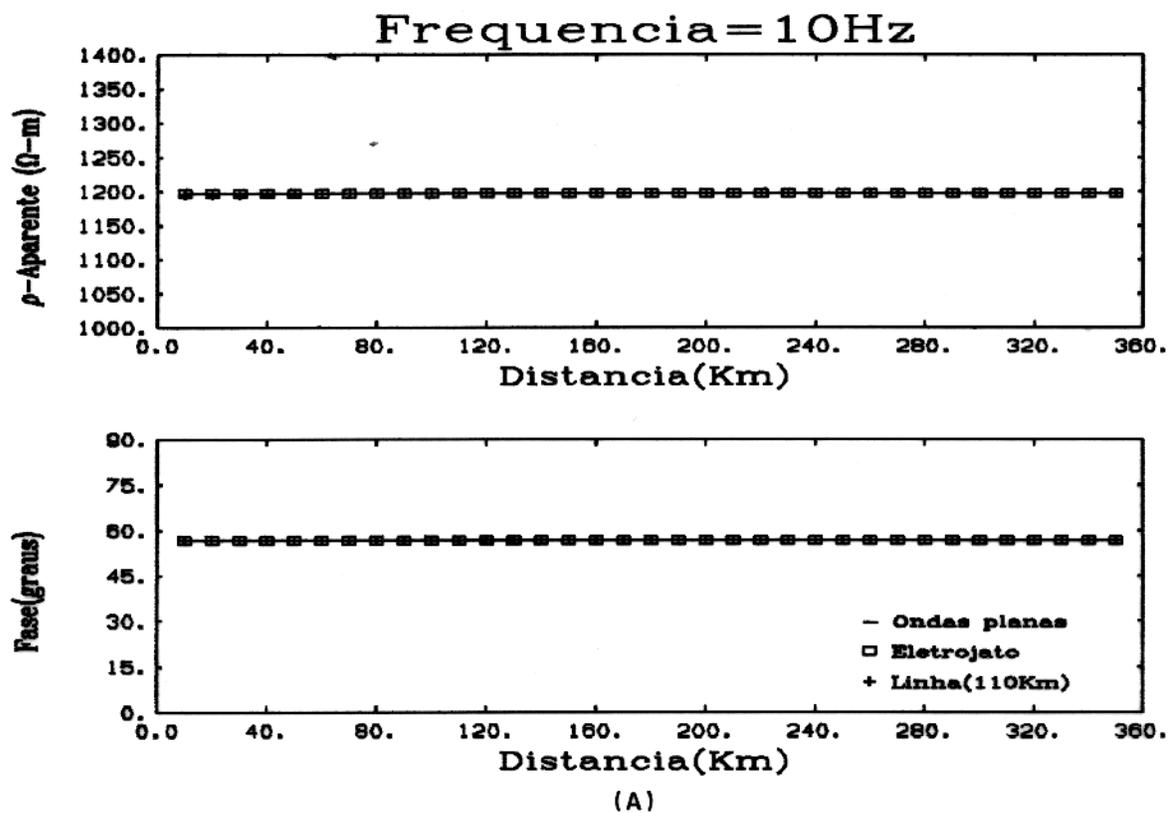
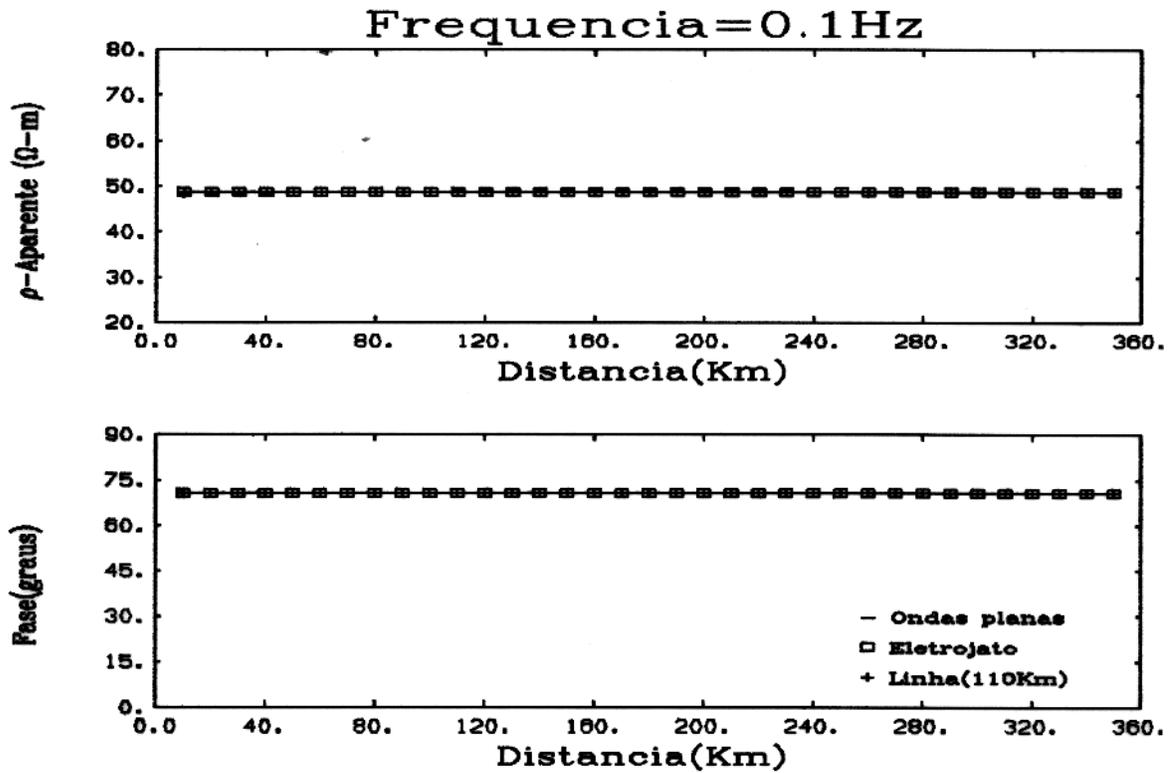
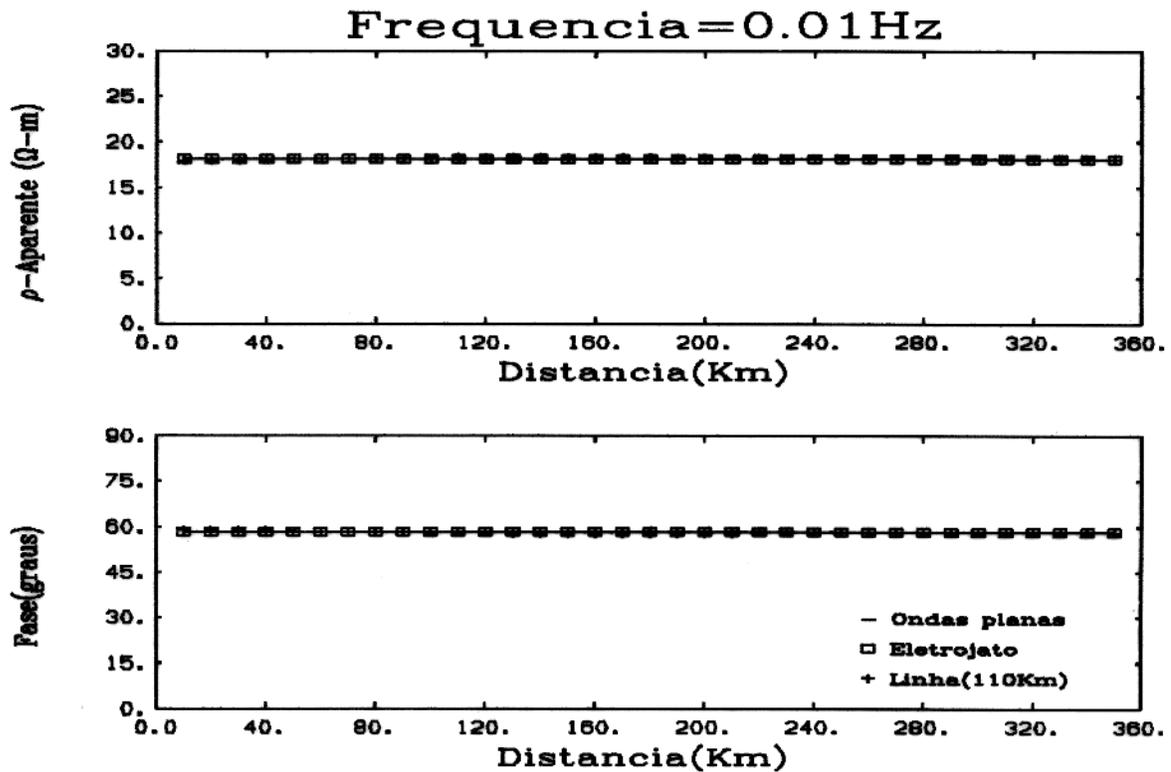


Fig. 15 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 5 Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 10 Hz e B) 1 Hz.



(A)



(B)

Fig. 16 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 5 Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 0.1 Hz e B) 0.01 Hz.

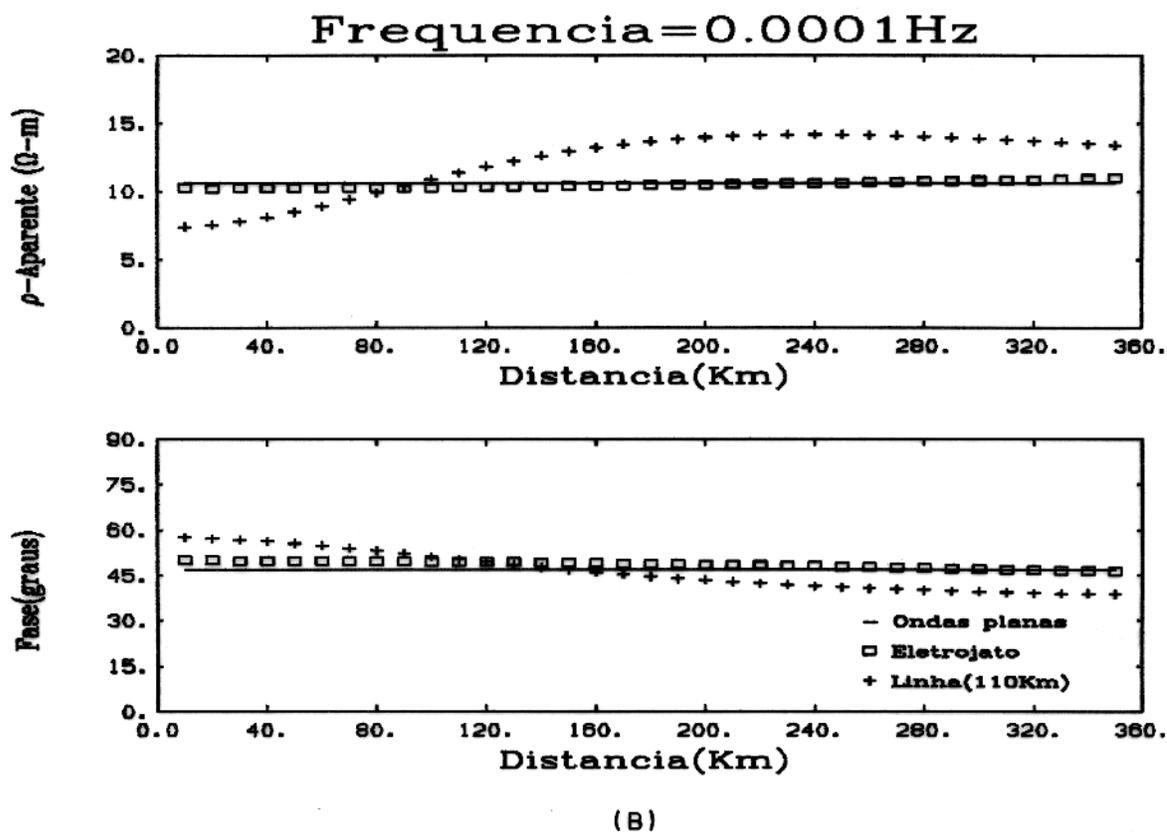
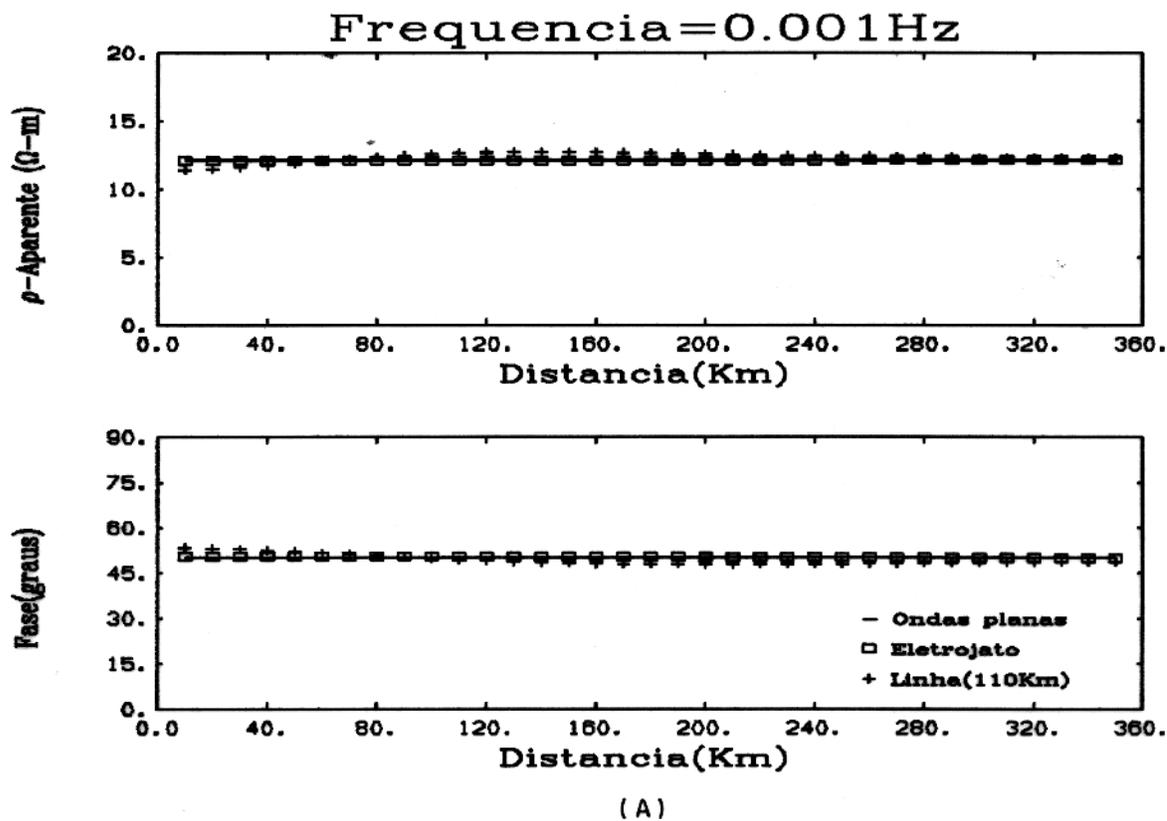


Fig. 17 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 5 Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 0.001 Hz e B) 0.0001 Hz.

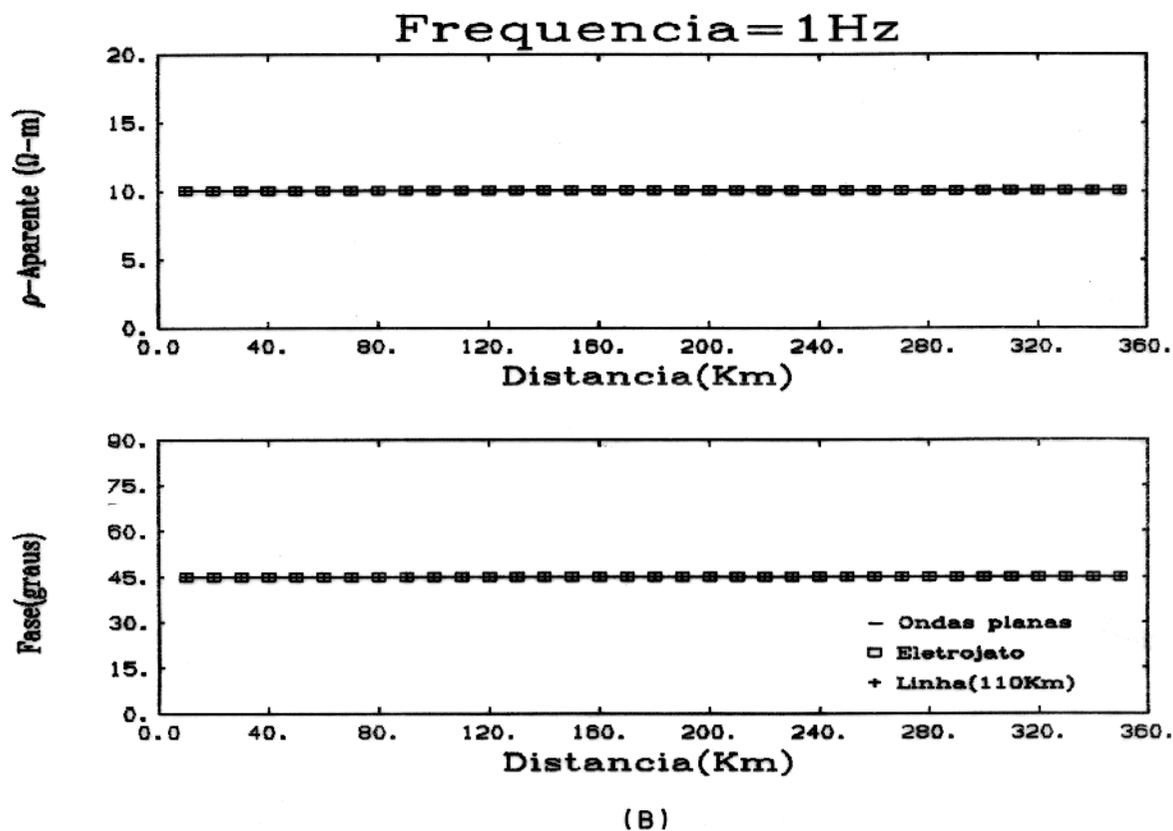
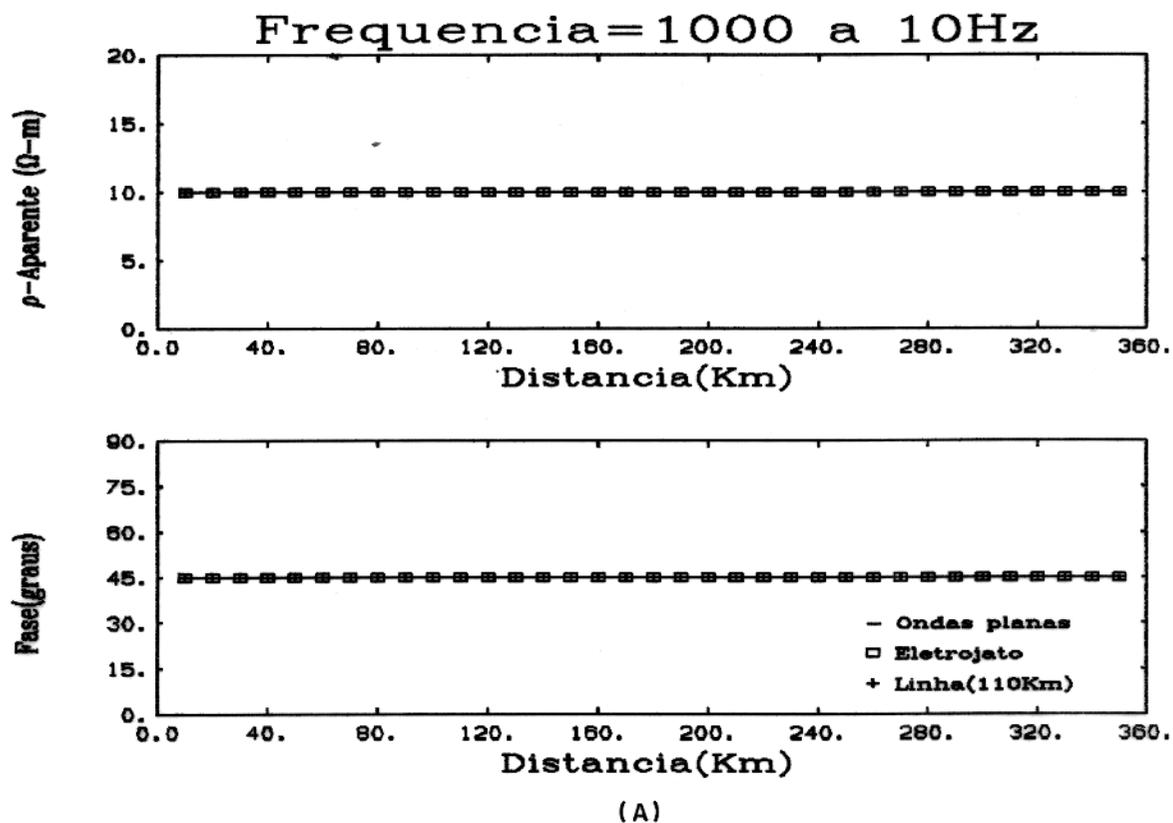


Fig. 18 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m$, $h_1 = 5 Km$, $\rho_2 = 1000 \Omega m$). A) Freq.1000 a 10 Hz e B) 1 Hz.

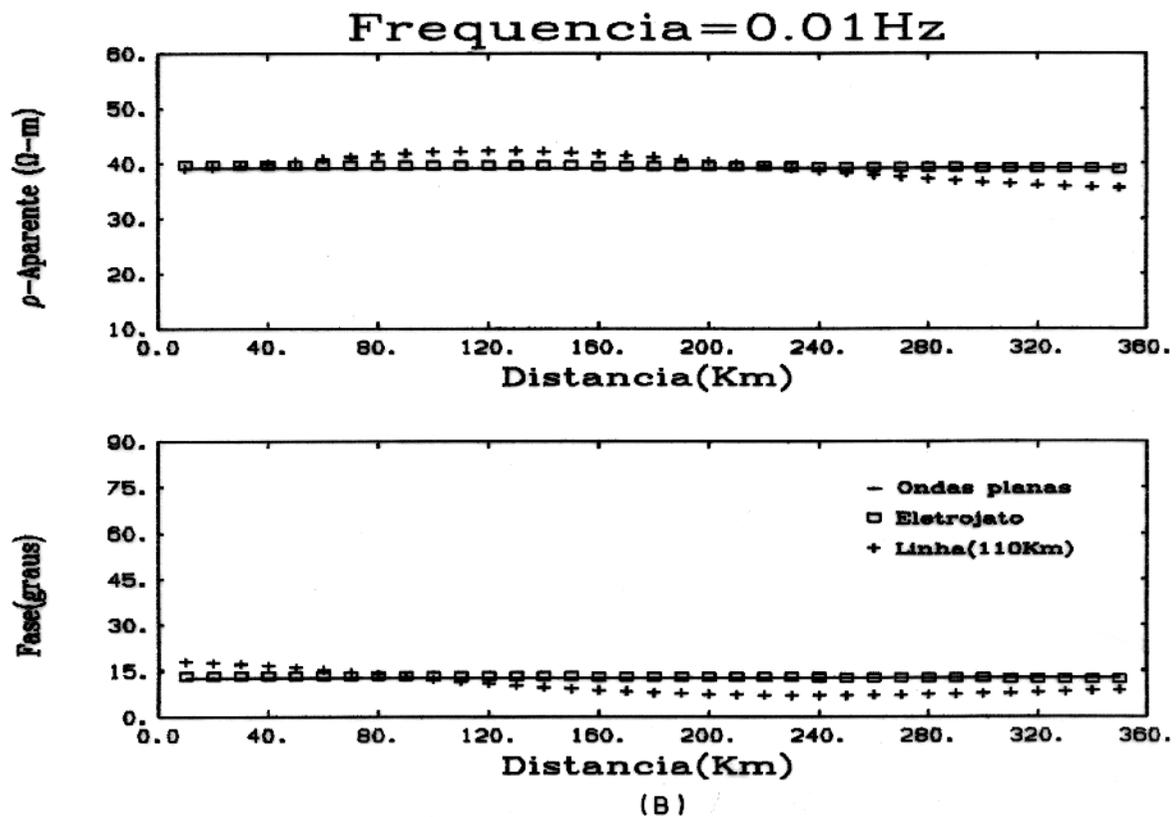
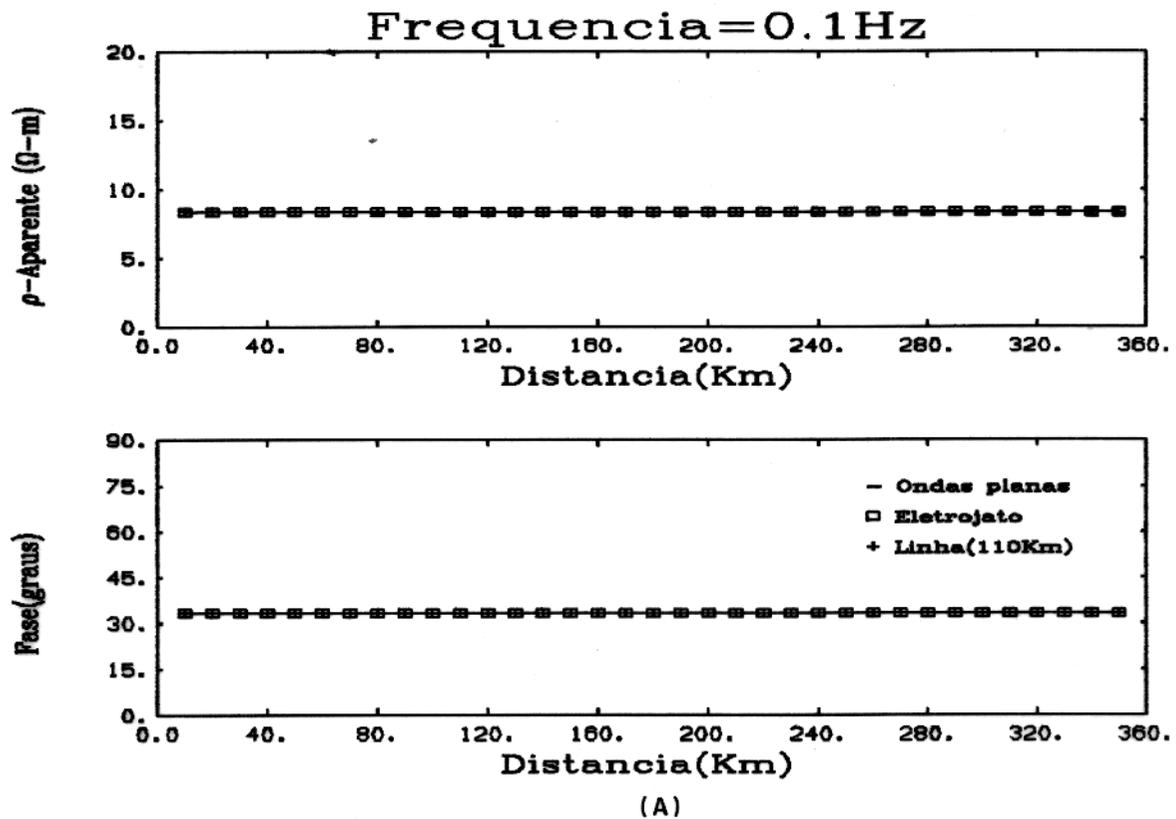


Fig. 19 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m, h_1 = 5 Km, \rho_2 = 1000 \Omega m$). A) Freq. 0.1Hz e B) 0.01 Hz.

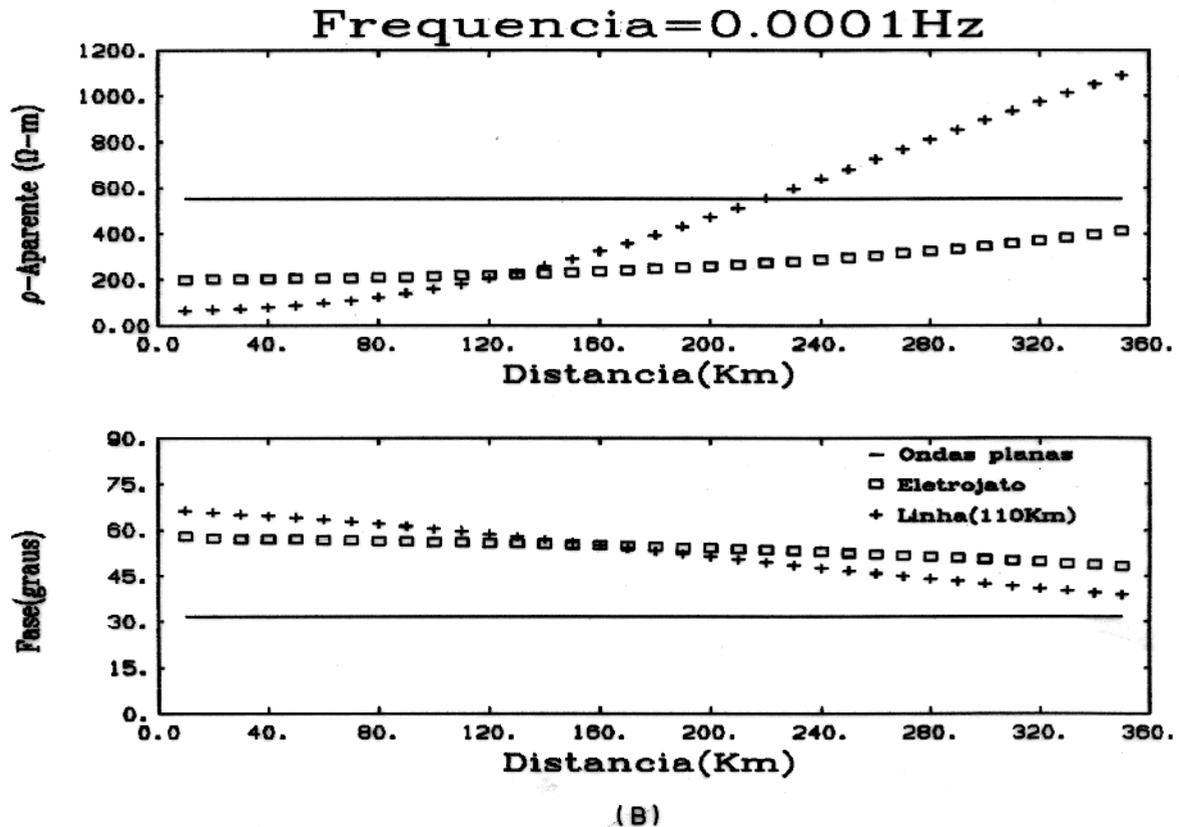
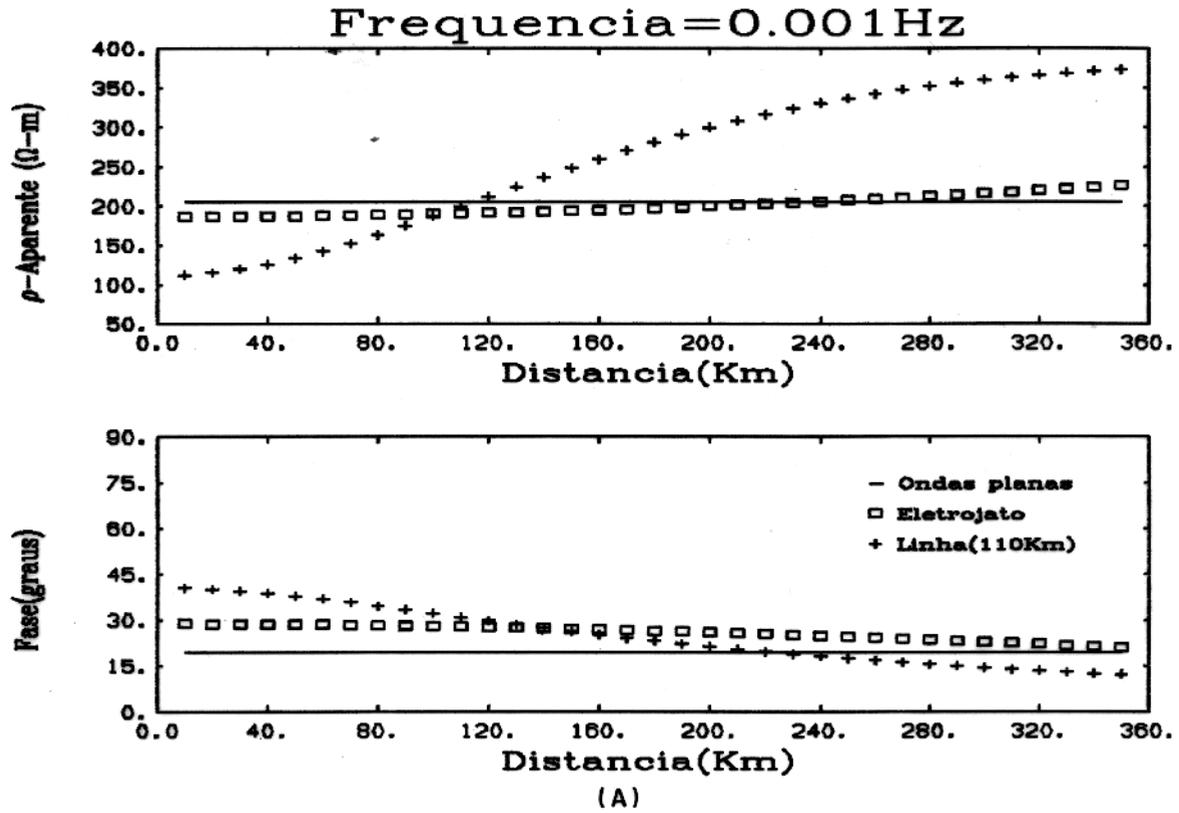


Fig. 20 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m$, $h_1 = 5 Km$, $\rho_2 = 1000 \Omega m$). A) Freq. 0.001 e B) 0.0001 Hz.

Modelo 3A - $\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 50 Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$

Os resultados de resistividade aparente e fase, para um modelo composto por uma camada de resistividade $1000 \Omega m$, e espessura de $50 Km$ sobre um substrato de resistividade $10 \Omega m$, são ilustrados nas Figs. 21 a 24. Comparativamente ao modelo 2A, observa-se um comportamento semelhante das curvas de resistividade aparente e fase para altos valores de frequência (Fig 21) e, devido a maior espessura da primeira camada, a influência do substrato ocorre para valores de frequência menores que para o modelo 2A (Fig 22). Observa-se também um aumento na intensidade do efeito em frequências maiores que para o modelo 2A (Figs. 23 e 24). É observado, também, um maior deslocamento das curvas de resistividade aparente para linha de corrente e com menor intensidade no perfil de fase. Para o eletrojato, o efeito da fonte tem menor intensidade provocando um pequeno deslocamento nas curvas de resistividade aparente e fase (Fig.24).

Modelo 3B - $\rho_1 = 10 \Omega m$, $h_1 = 50 Km$, $\rho_2 = 1000 \Omega m$

Os resultados de resistividade aparente e fase para um meio composto por uma camada com resistividade de $10 \Omega m$, e espessura de $50 Km$ sobre um substrato com resistividade de $1000 \Omega m$, são ilustrados nas Figs. 25 e 26. Comparando esses resultados com os resultados para o modelo 2B, observa-se uma maior influência da resistividade da primeira camada (Fig.25). É observado, também, uma redução na intensidade do efeito, em relação ao modelo 2B, só sendo observado divergência entre os resultados para os três tipos de fontes a partir da frequência da ordem de $0.001 Hz$ (Fig 26). Finalmente, pode-se afirmar que, a intensidade do efeito do eletrojato e da linha diminui com o aumento da influência das camadas com baixo valor de resistividade.

Modelo 4A - $\rho_1 = 10 \Omega m$, $h_1 = 5 Km$, $\rho_2 = 1000 \Omega m$, $h_2 = 50 Km$, $\rho_3 = 10 \Omega m$

As respostas de resistividade aparente e fase para um meio composto de uma camada de resistividade $10 \Omega m$, e espessura de $5 Km$, uma camada com resistividade de $1000 \Omega m$ e espessura de $50 Km$, e um substrato com resistividade de $10 \Omega m$, são mostradas nas Figs. 27 a 29. Para frequências de 1000 a $0.1 Hz$ ocorre um perfeito ajuste entre as curvas de resistividade aparente e fase para os três tipos de fontes (Figs. 27-28a). Em termos de comparação, até a frequência de

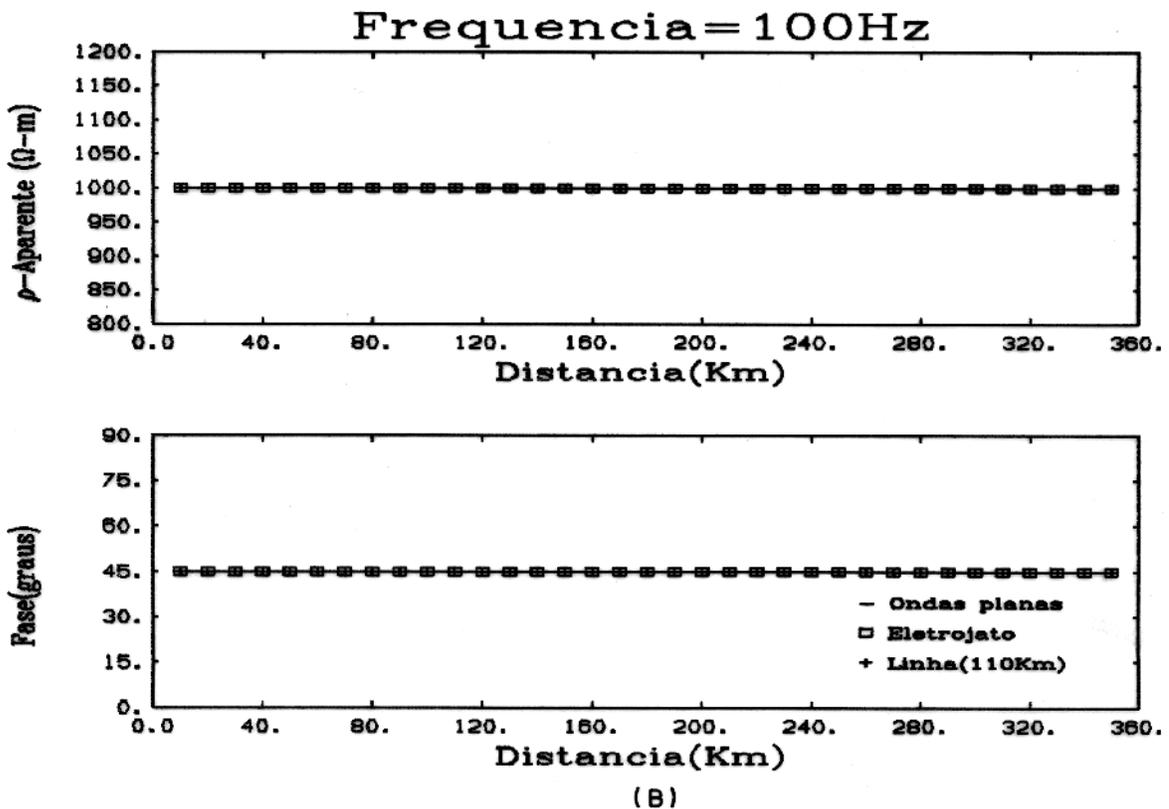
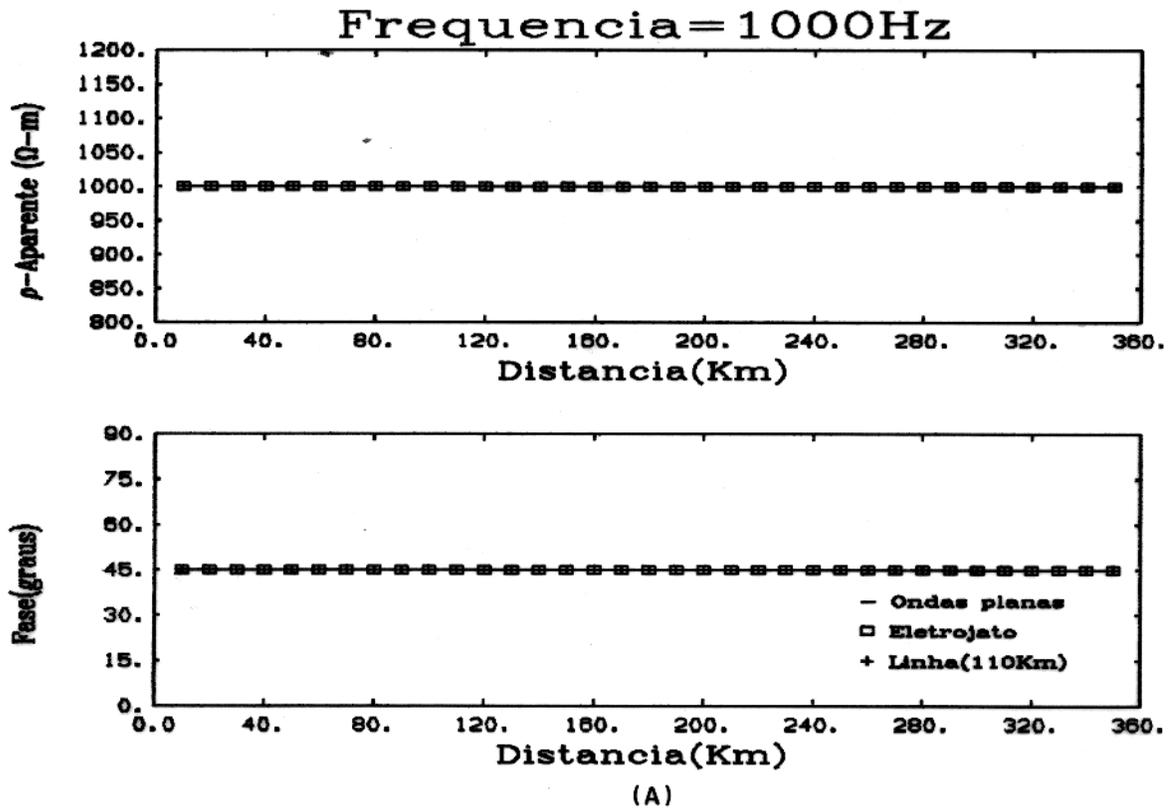


Fig. 21 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 50 Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 1000 e B) 100 Hz.

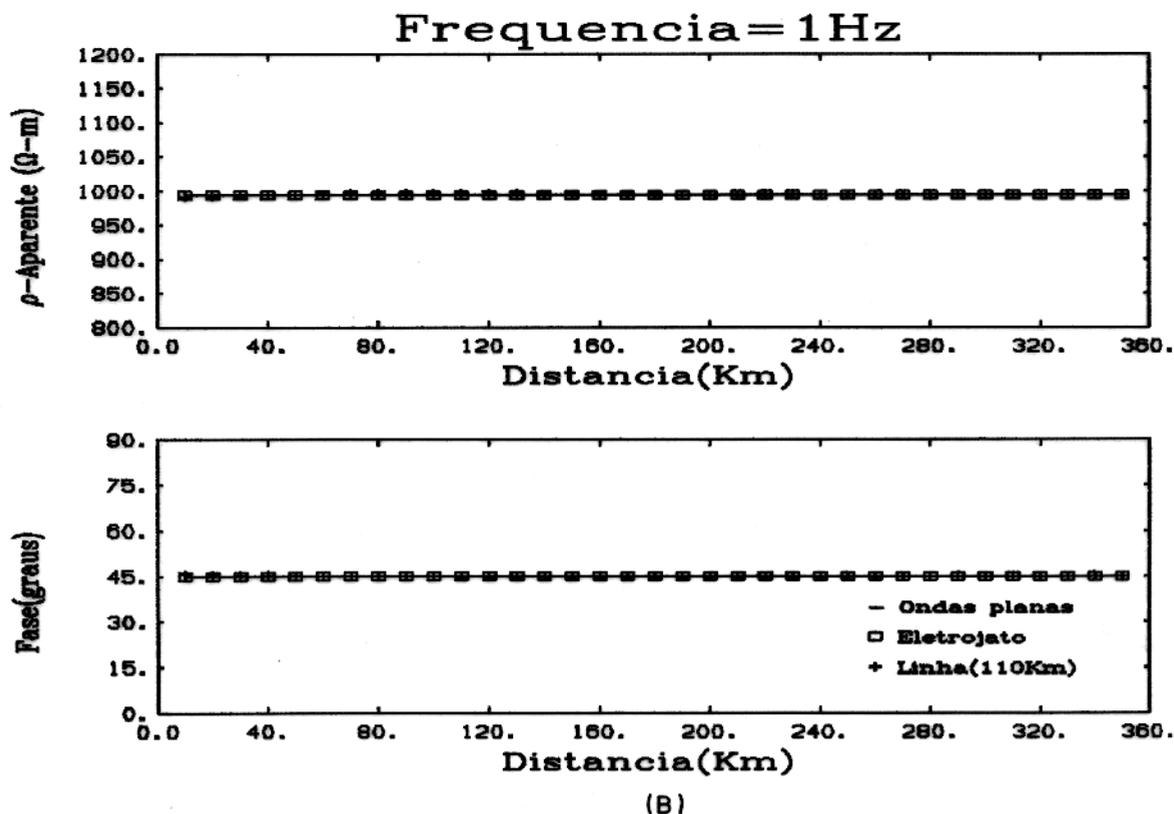
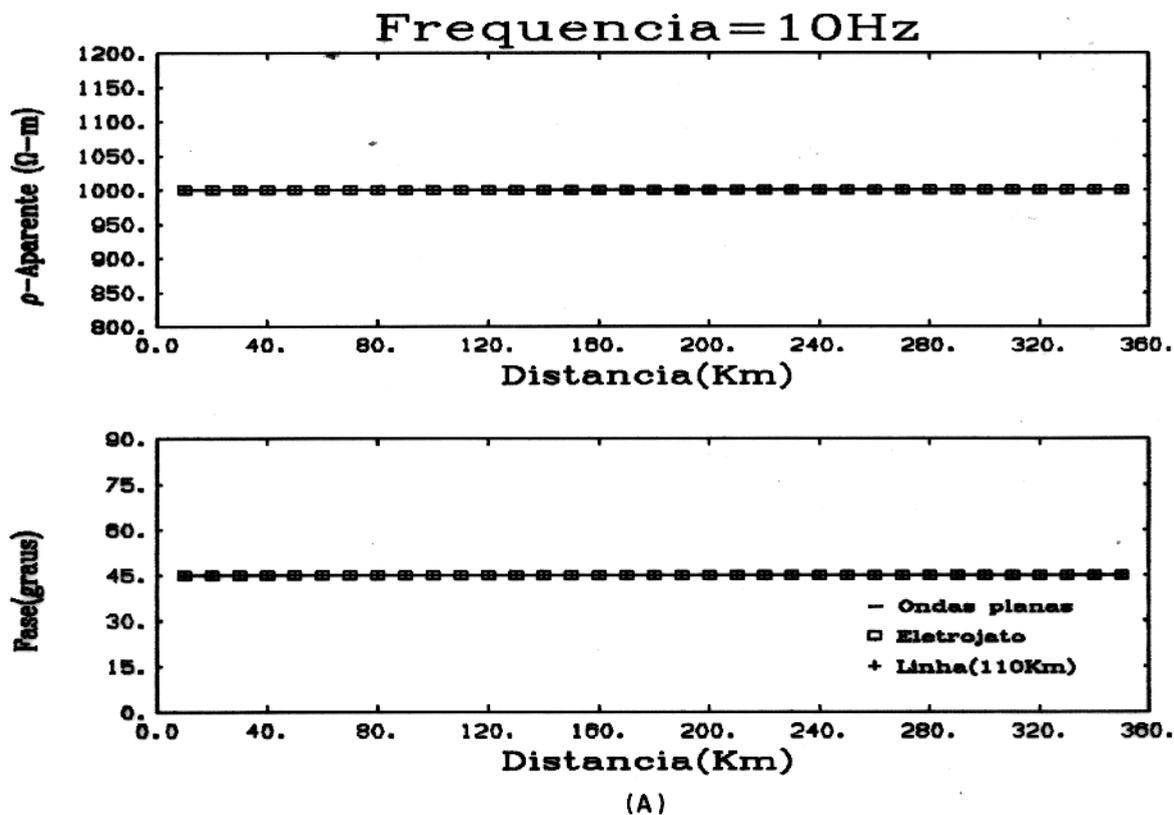


Fig. 22 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 50 Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 10 e B) 1 Hz.

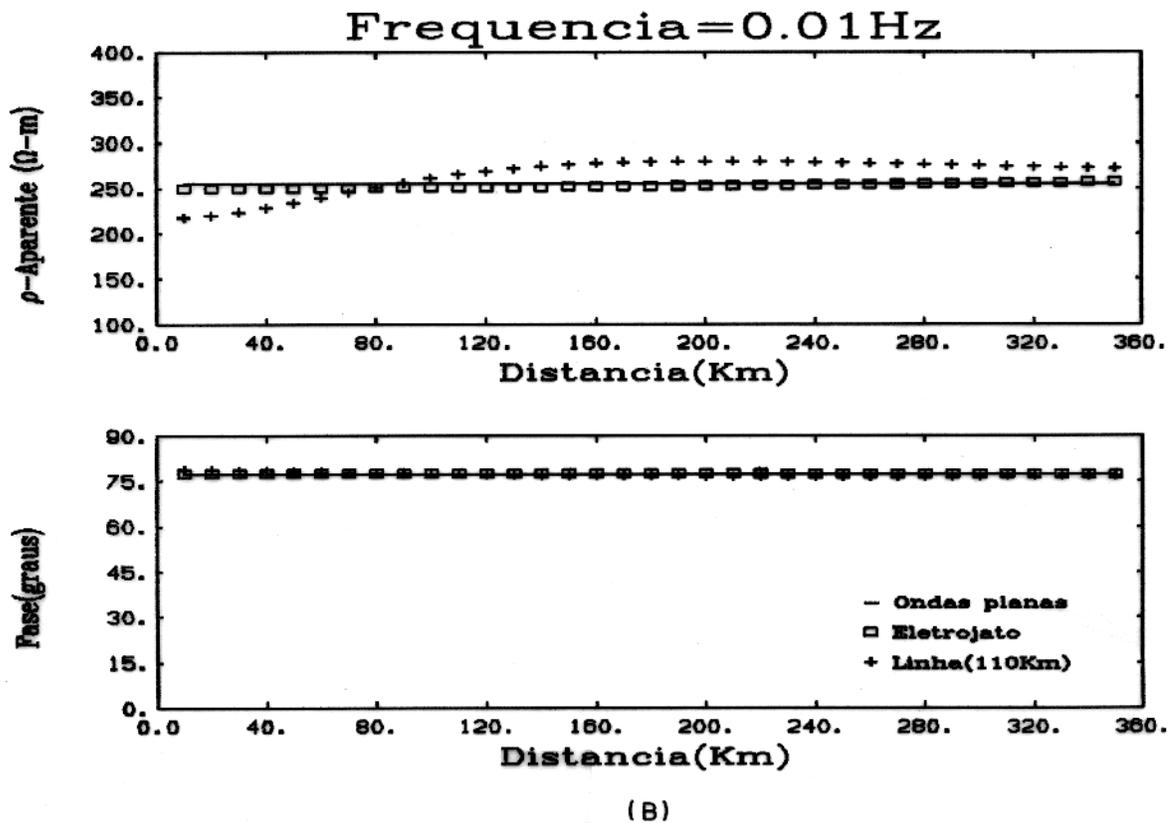
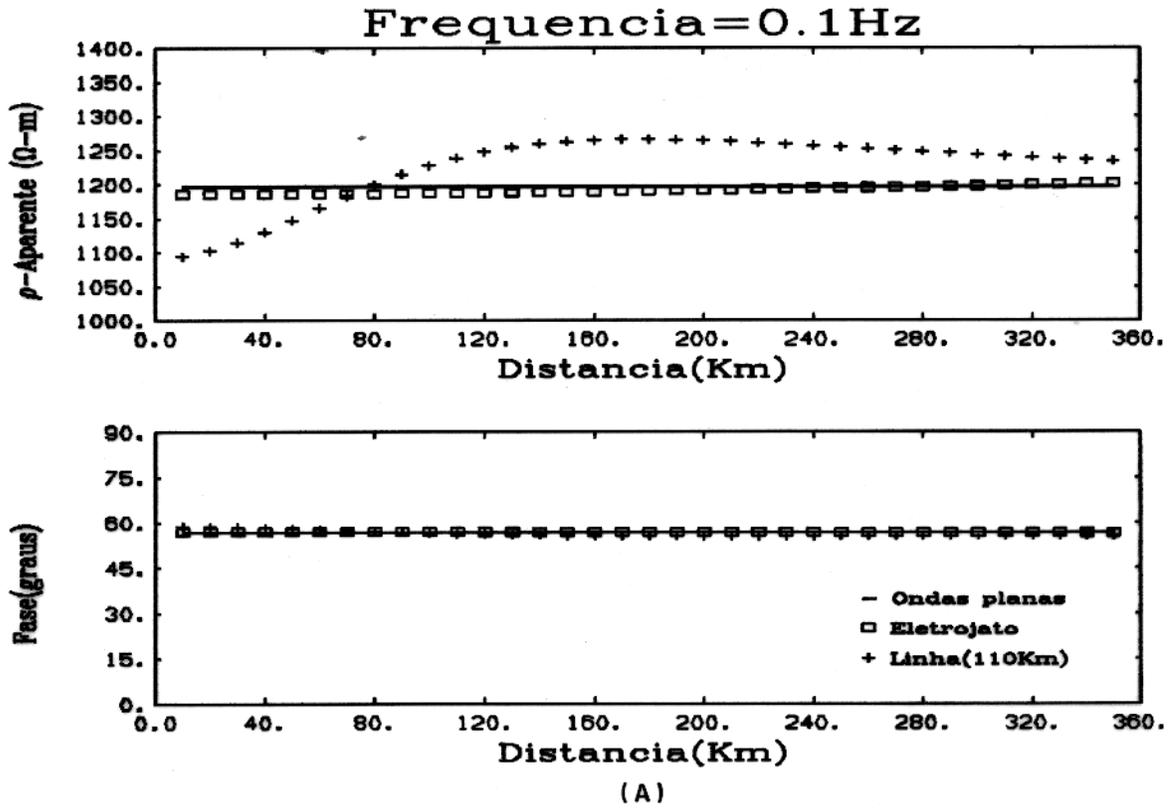


Fig. 23 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 50 Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 0.1 e B) 0.01 Hz.

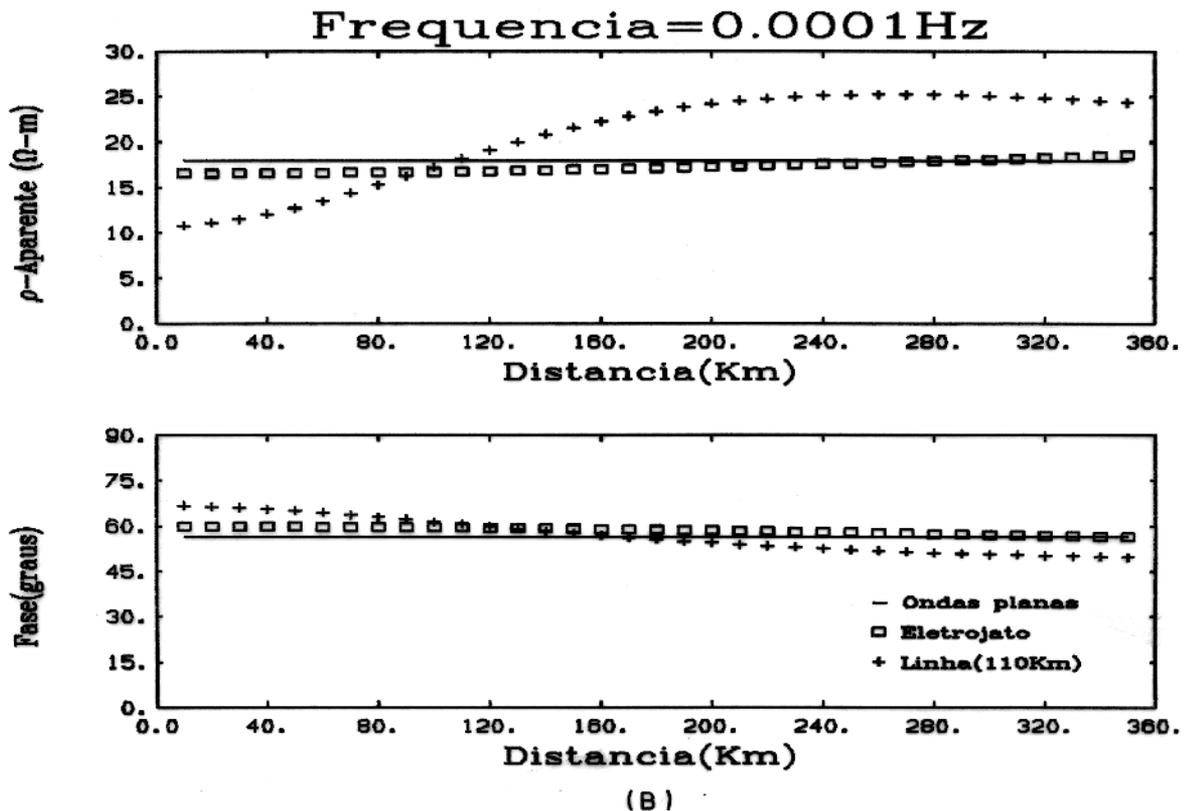
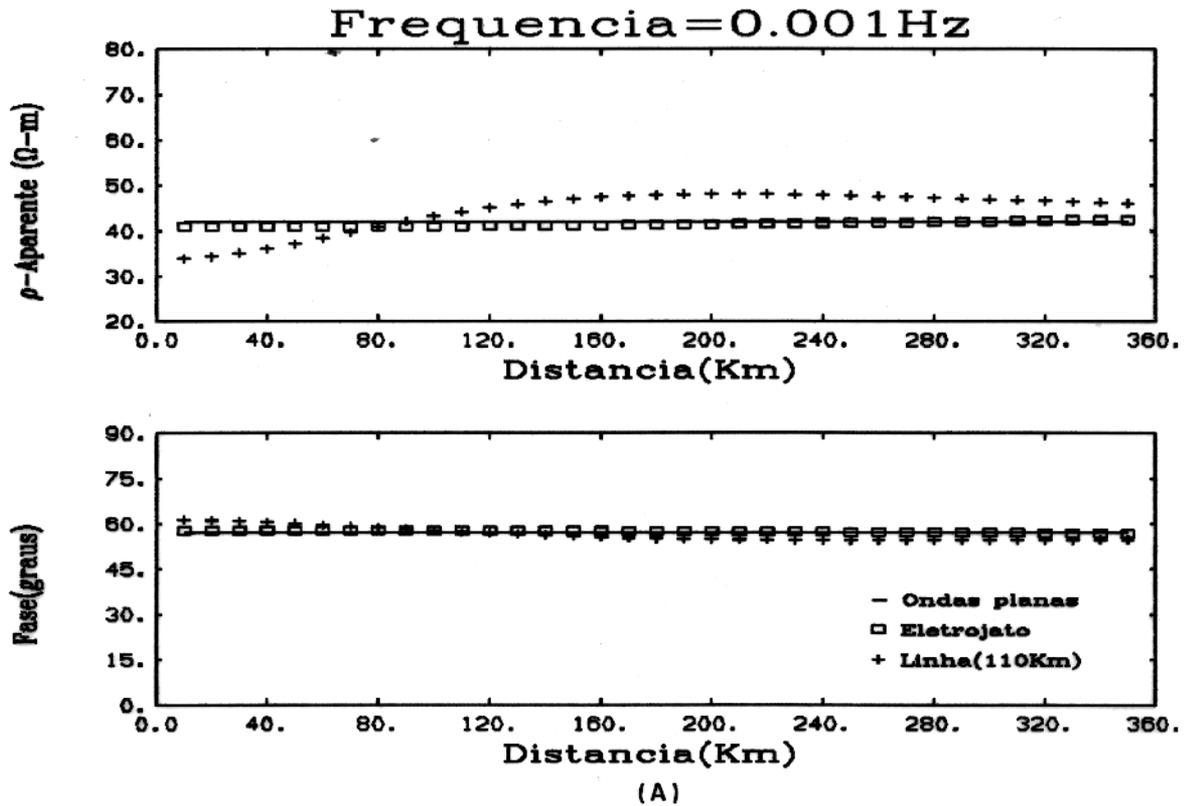


Fig. 24 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 50 Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$). A) Freq. 0.001 e B) 0.0001 Hz.

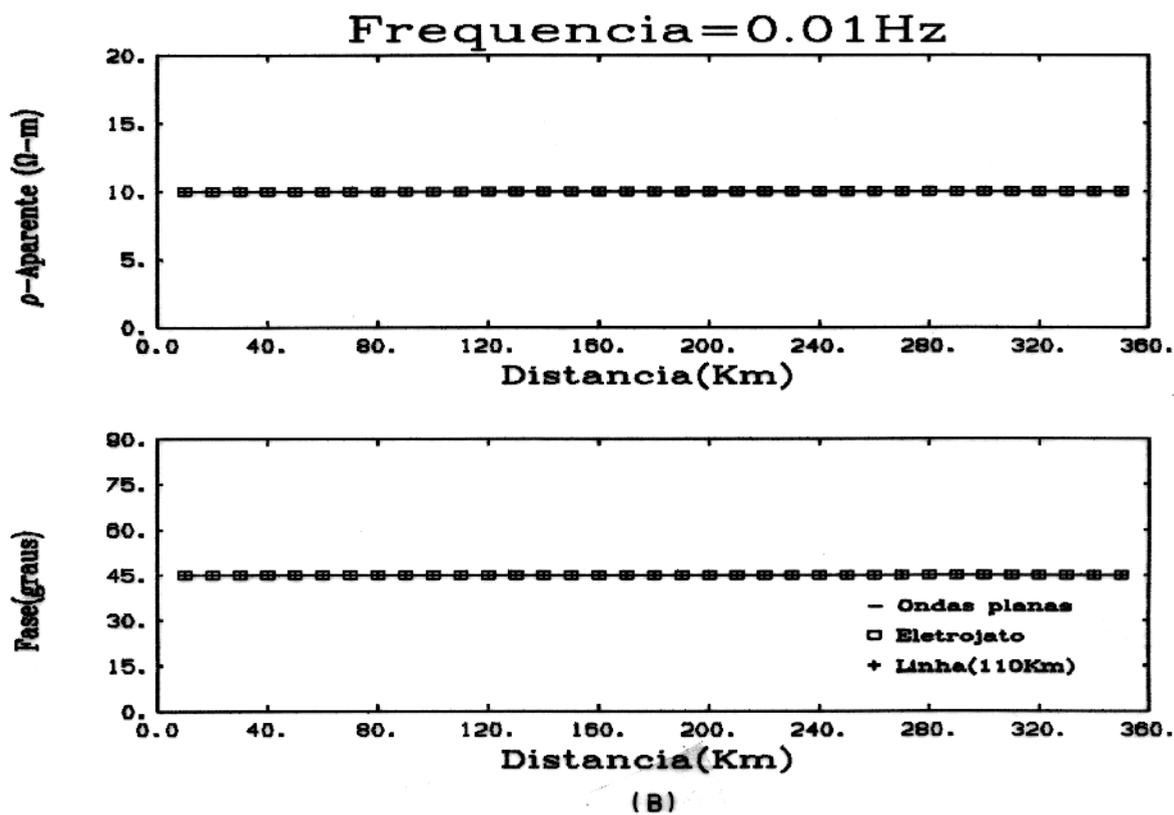
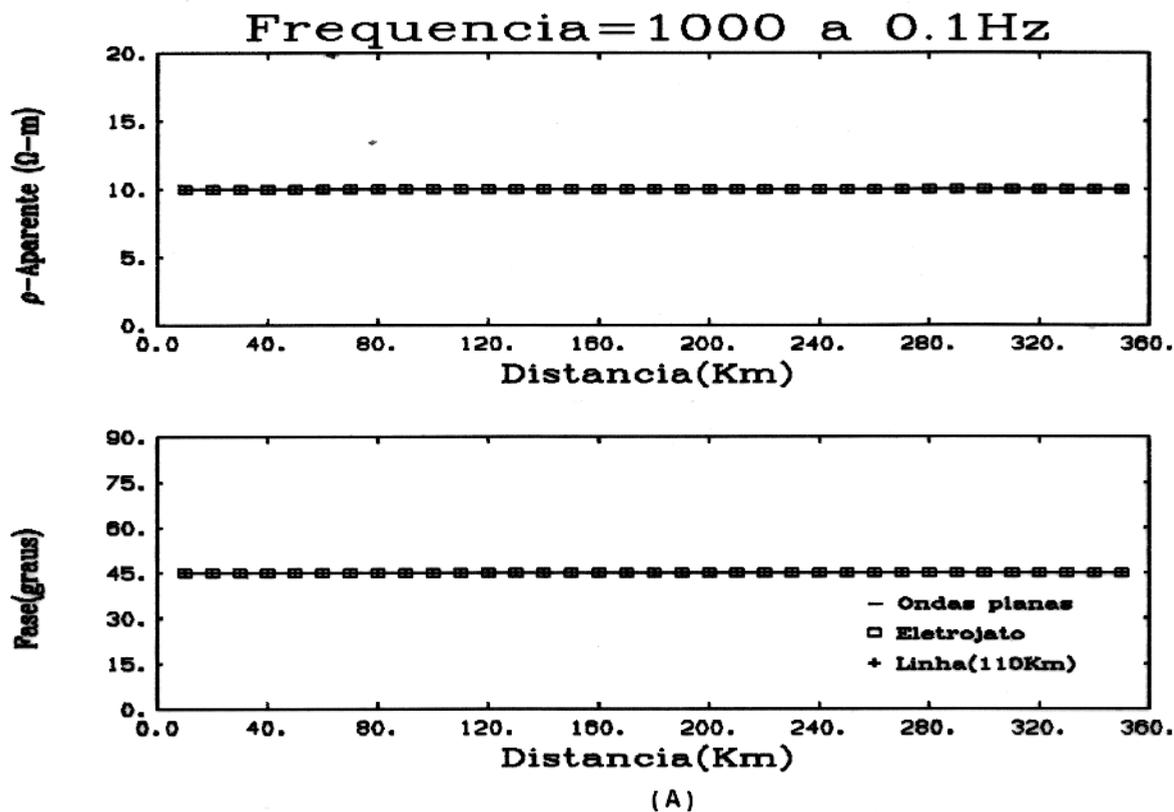


Fig. 25 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m$, $h_1 = 50 Km$, $\rho_2 = 1000 \Omega m$). A) Freq. 1000 a 0.1 e B) 0.01 Hz.

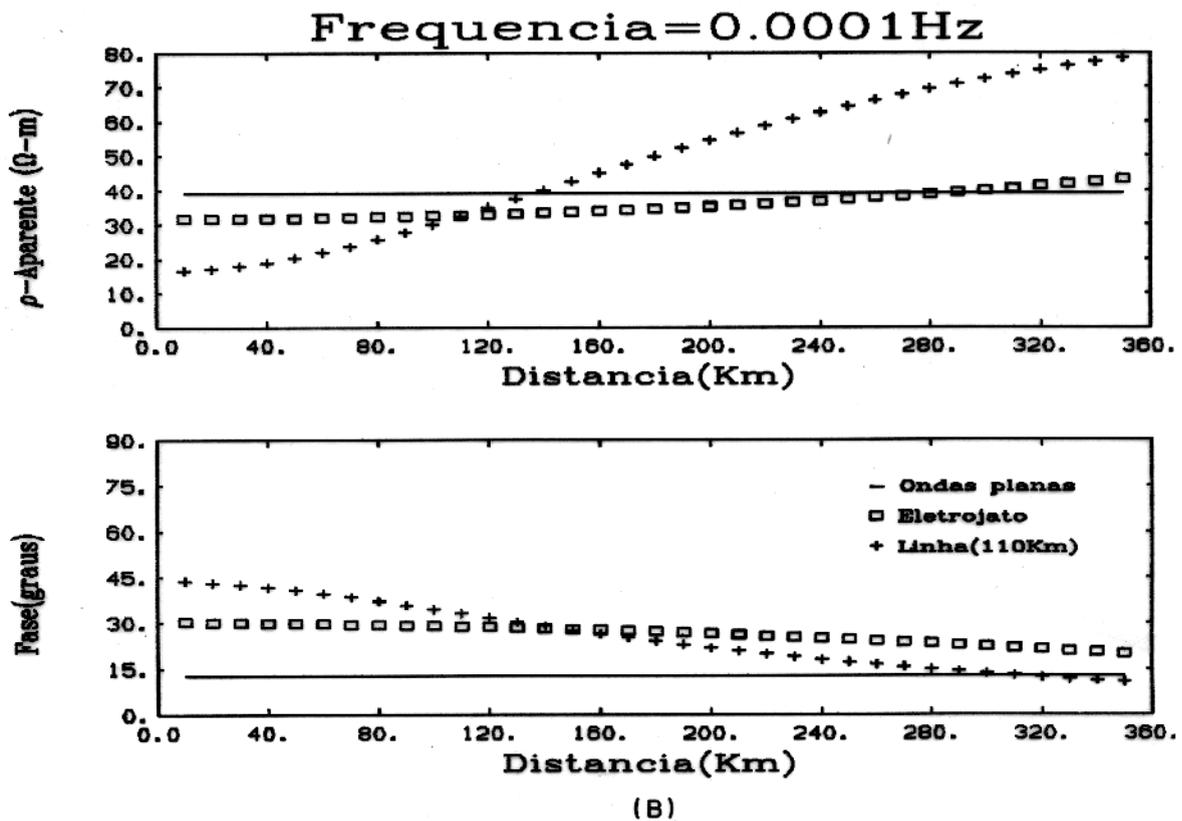
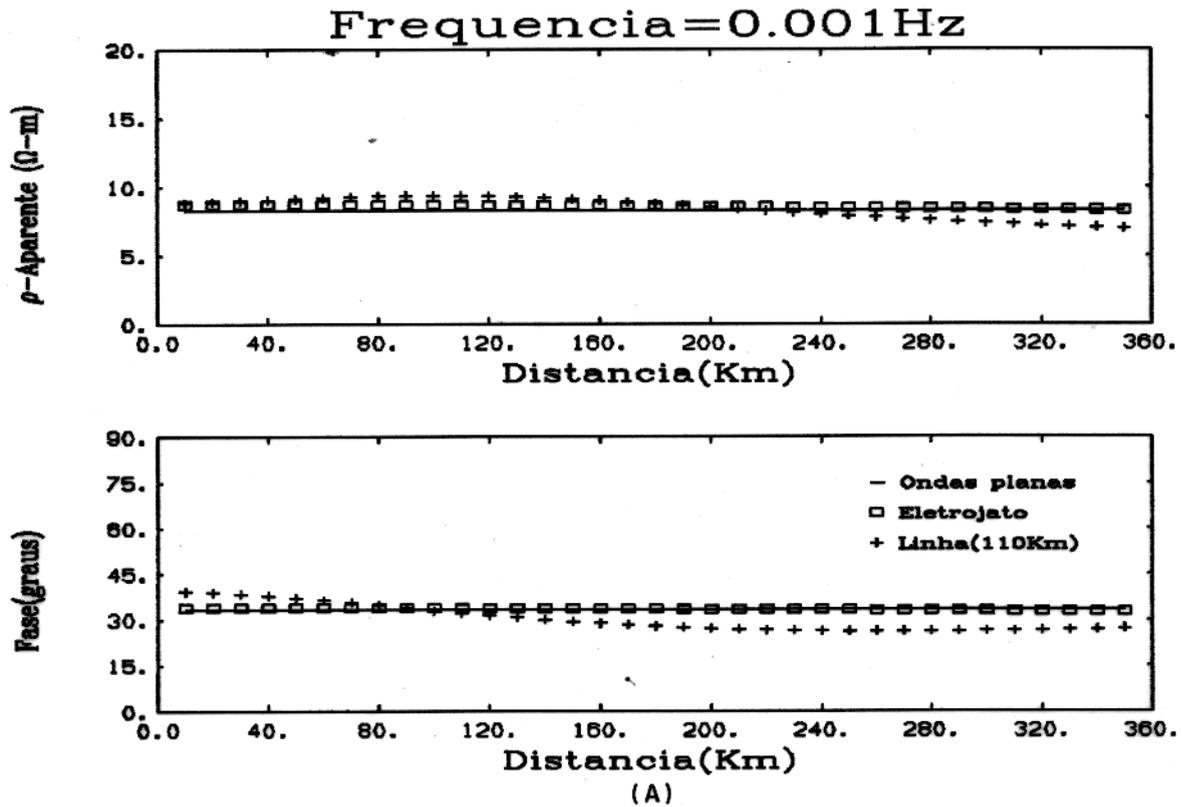


Fig. 26 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de duas camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m$, $h_1 = 50 Km$, $\rho_2 = 1000 \Omega m$). A) Freq. 0.001 e B) 0.0001 Hz.

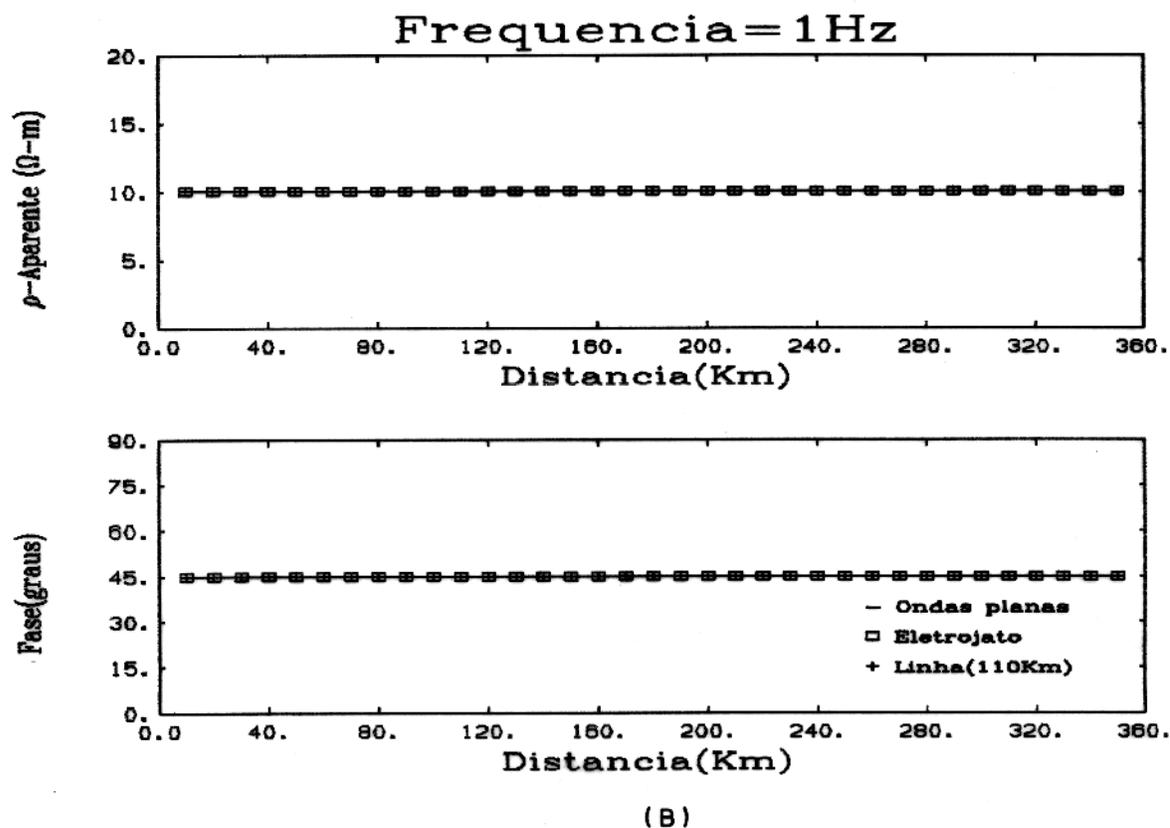
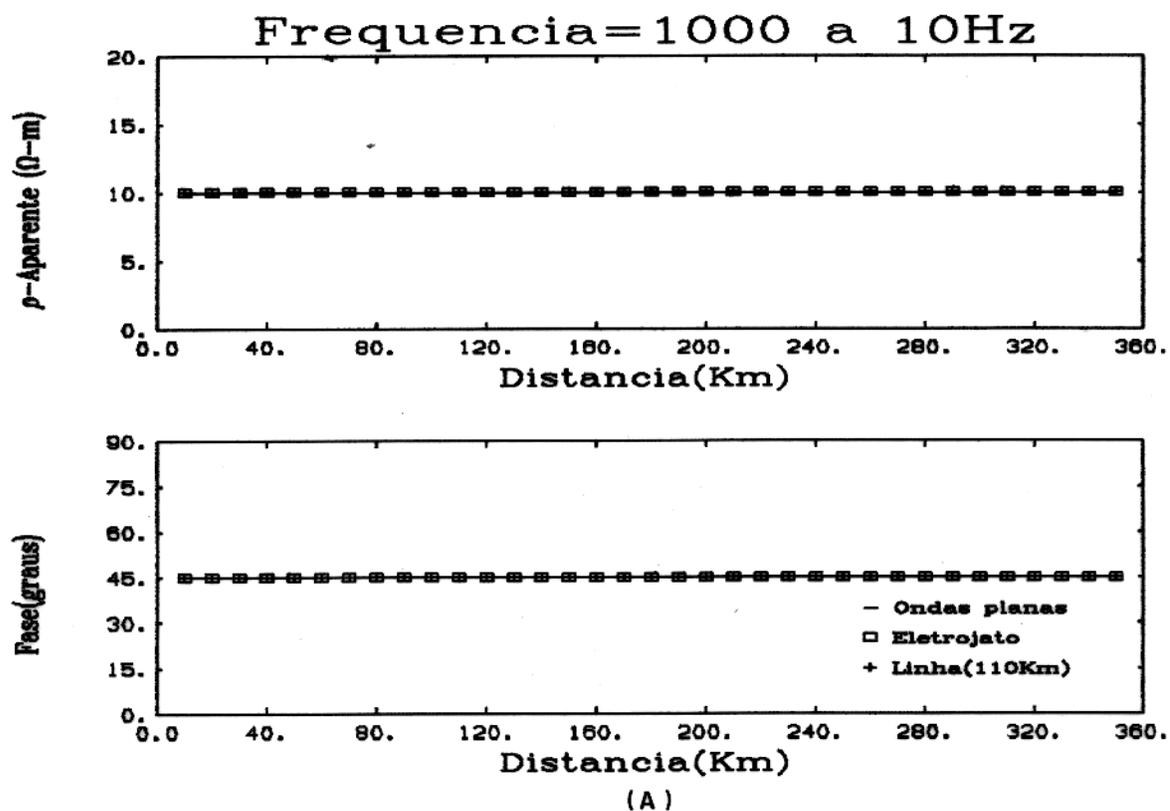


Fig. 27 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m$, $h_1 = 5 Km$, $\rho_2 = 1000 \Omega m$, $h_2 = 50 Km$, $\rho_3 = 10 \Omega m$). A) Freq. 1000 a 10 e B) 1 Hz.

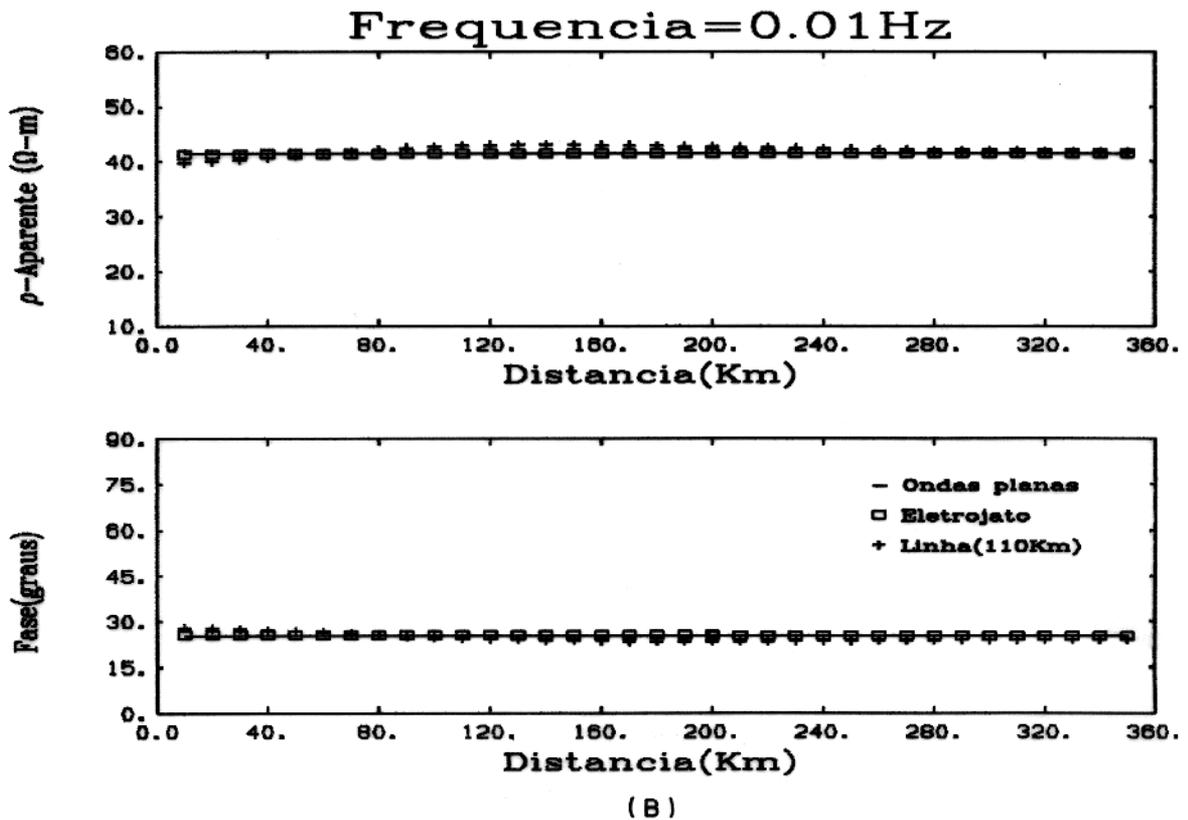
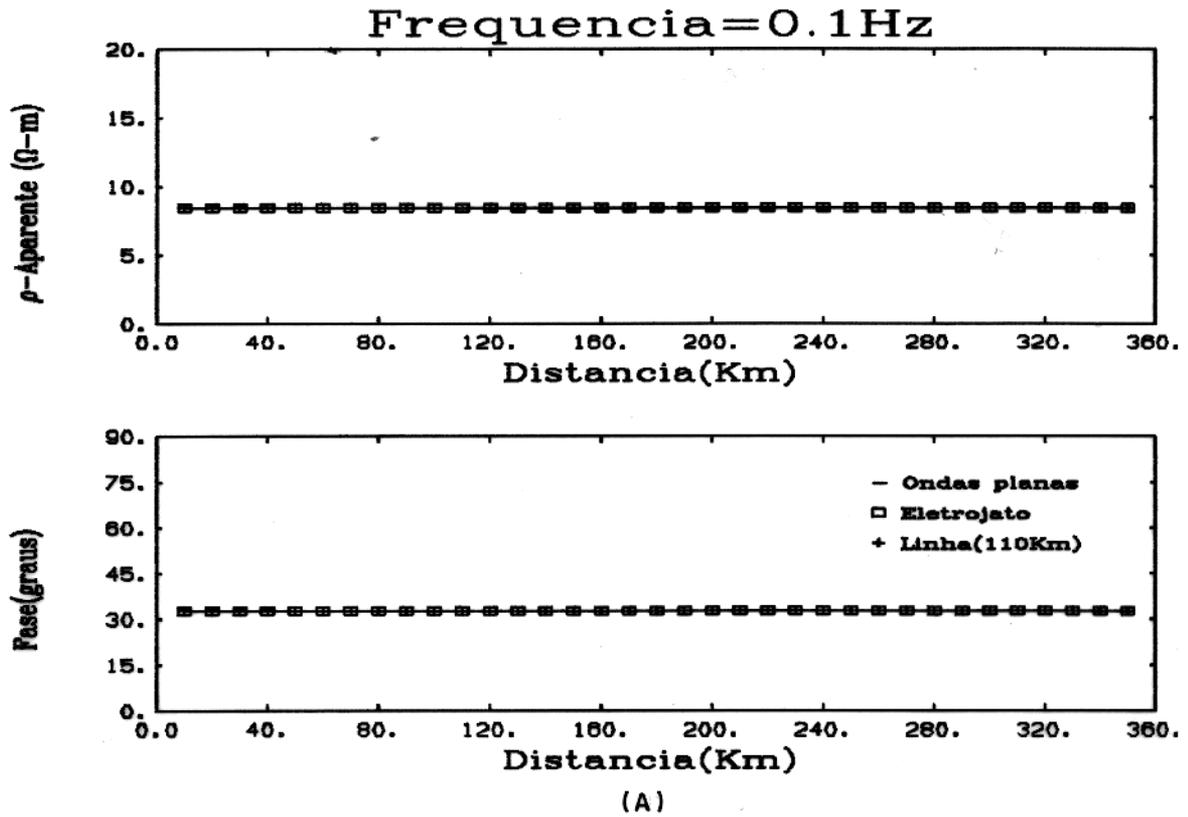


Fig. 28 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m, h_1 = 5 Km, \rho_2 = 1000 \Omega m, h_2 = 50 Km, \rho_3 = 10 \Omega m$). A) Freq. 0.1 e B) 0.01 Hz.

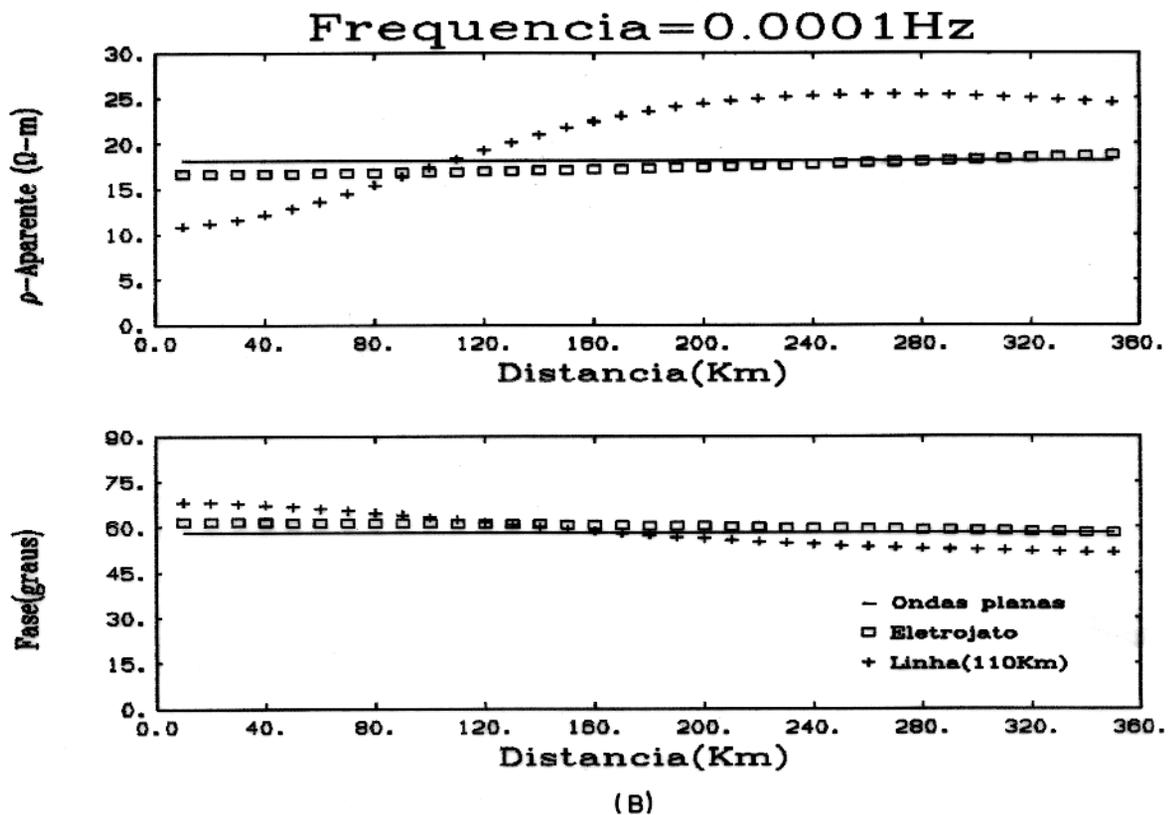
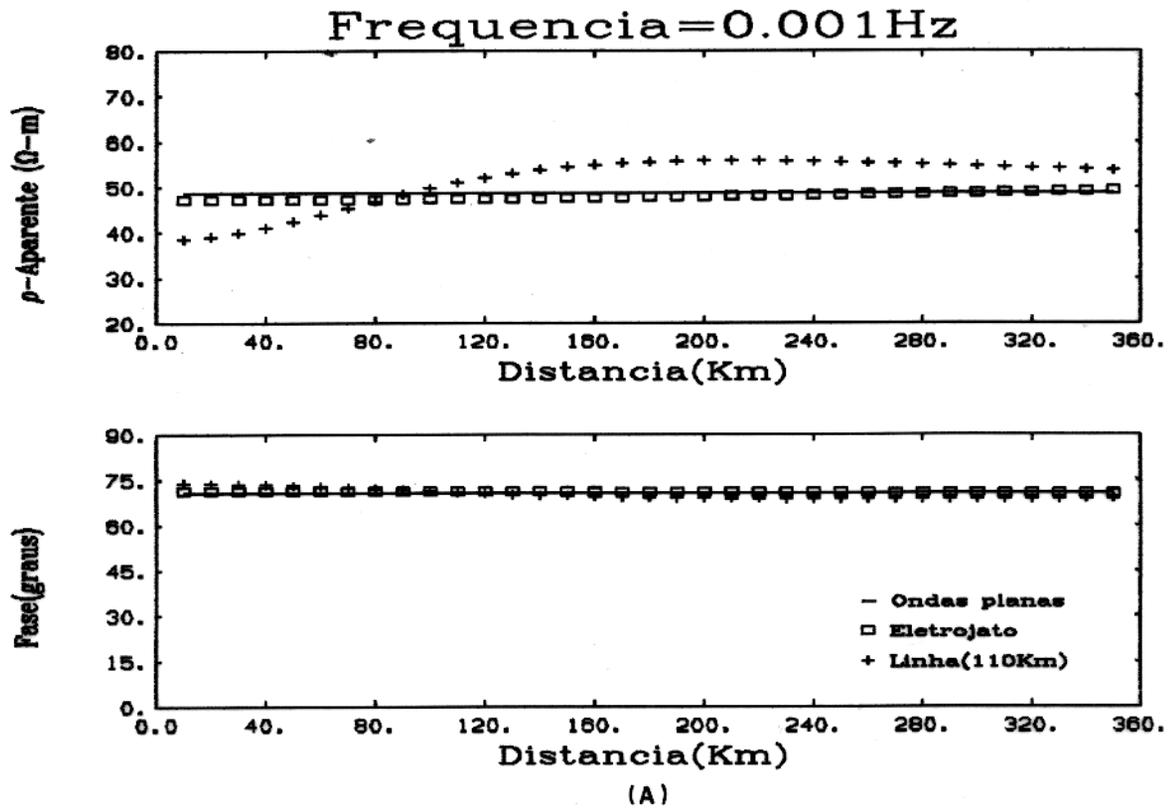


Fig. 29 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m, h_1 = 5 Km, \rho_2 = 1000 \Omega m, h_2 = 50 Km, \rho_3 = 10 \Omega m$). A) Freq. 0.001 e B) 0.0001 Hz.

0.1Hz, as curvas comportam-se da mesma forma que as do modelo 2B, ou seja, a resposta é mais influenciada pelas resistividades da primeira e segunda camada, não se observando divergência entre os resultados, em quaisquer pontos, para os três tipos de fontes. Com a redução da frequência, observa-se que o comportamento das curvas assemelha-se ao comportamento das curvas para o modelo 3A (Fig 29). Nesse caso, a resposta é mais influenciada pelos parâmetros das duas últimas camadas, sendo que a presença do substrato condutivo reduz a intensidade do efeito. Em todo caso, observa-se que a intensidade do efeito é bastante reduzida, quando a fonte utilizada é um eletrojato gaussiano.

Modelo 4B - $\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 5 Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$, $h_2 = 50 Km$, $\rho_3 = 1000 \Omega m$

As respostas para o modelo 4B, sendo um meio composto por uma camada com resistividade $1000 \Omega m$, e espessura de $5 Km$, uma camada com resistividade $10 \Omega m$ e espessura de $50 Km$ sobre um substrato com resistividade $1000 \Omega m$, estão ilustradas nas Figs. 30 a 33. Os perfis de resistividade aparente e fase para valores de frequência entre 1000 a $1 Hz$, comportam-se da mesma forma que os perfis para o modelo 2A, ou seja, prevalece a maior influência das duas primeiras camadas (Fig 30 a 32). Com a redução da frequência, observa-se que os perfis de resistividade aparente e fase são mais influenciados pelas resistividades das camadas inferiores (Fig 33) e comportam-se da mesma forma que a resposta para o modelo 3B. Contudo, a divergência entre os resultados para os três tipos de fontes só é observada a partir da frequência de $0.001Hz$ (Fig.33). Como nos modelos anteriores, a dimensão do efeito é maior para a linha de corrente que para o eletrojato gaussiano.

MEIOS BIDIMENSIONAIS

Nesta seção são analisados os resultados de modelos que apresentam heterogeneidades laterais. Para estes modelos, os campos elétricos e magnéticos foram separados em campos primários e secundários. Como campo primário foi considerado o de um meio estratificado, menos as heterogeneidades bidimensionais, e campo secundário, o campo devido as heterogeneidades, de acordo com a equação 2. Para este problema foram consideradas duas situações: (a) corpo paralelo à fonte e (b) corpo perpendicular à fonte, que correspondem, respectivamente, aos modos TE e TM.

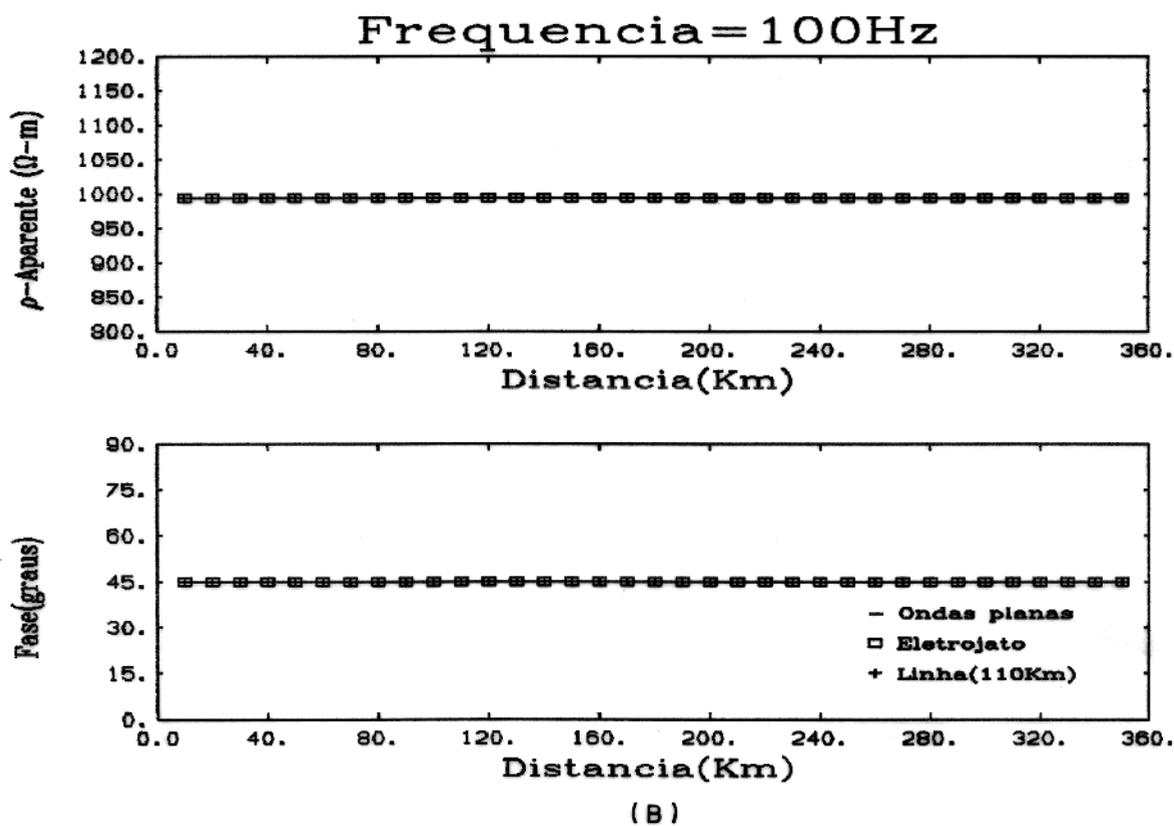
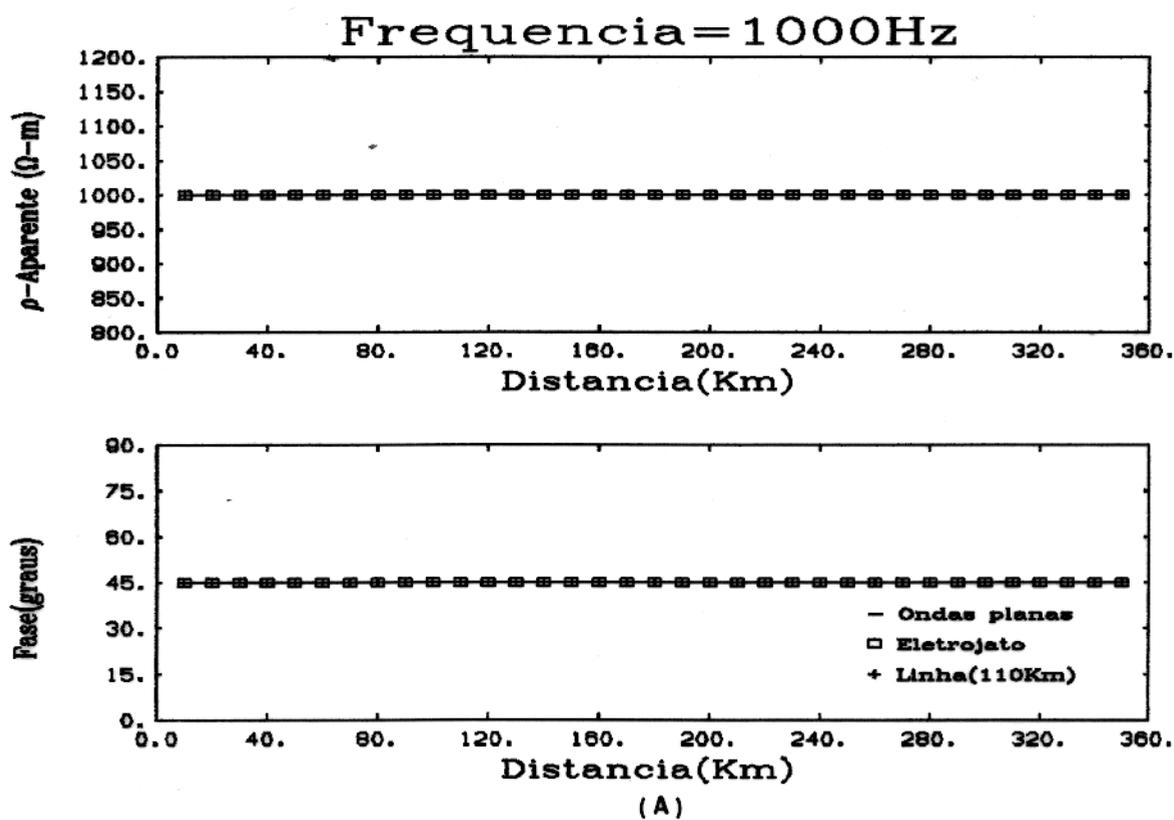


Fig. 30 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 5 Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$, $h_2 = 50 Km$, $\rho_3 = 1000 \Omega m$). A) Freq. 1000 e B) 100 Hz.

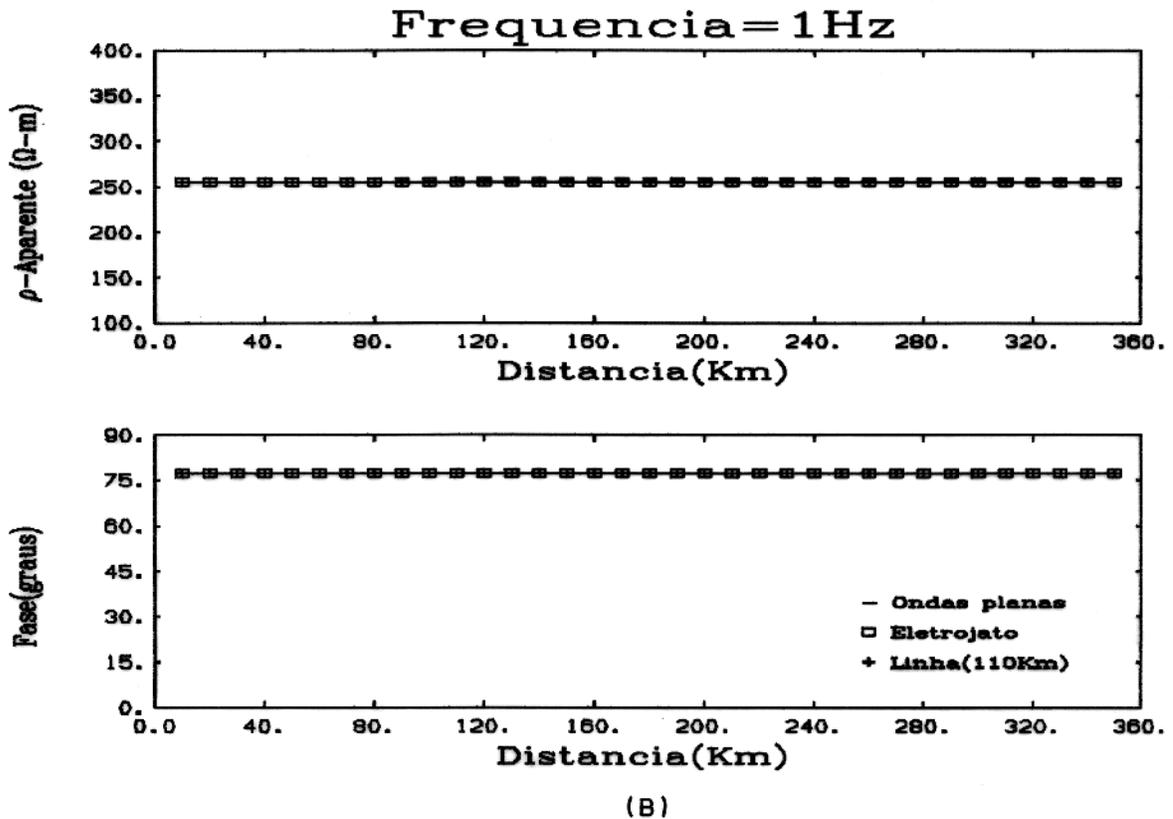
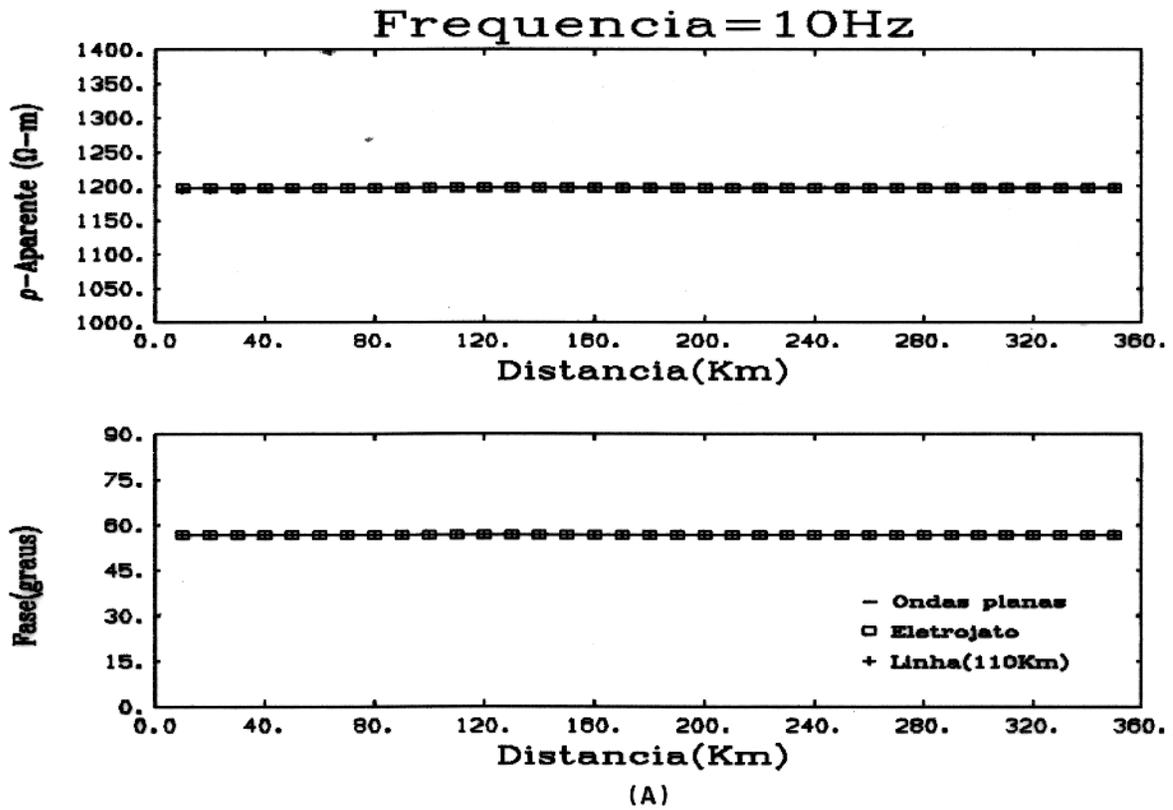


Fig. 31 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 5 Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$, $h_2 = 50 Km$, $\rho_3 = 1000 \Omega m$). A) Freq. 10 e B) 1 Hz.

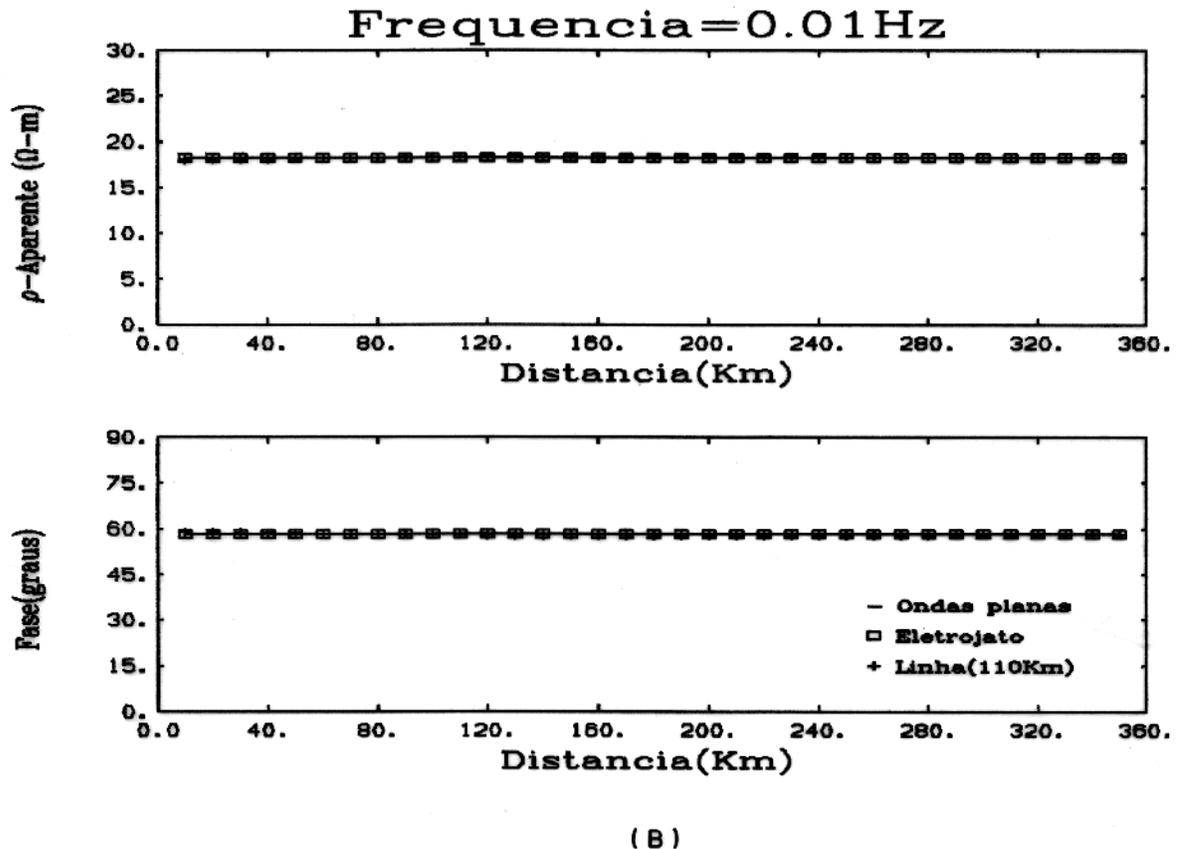
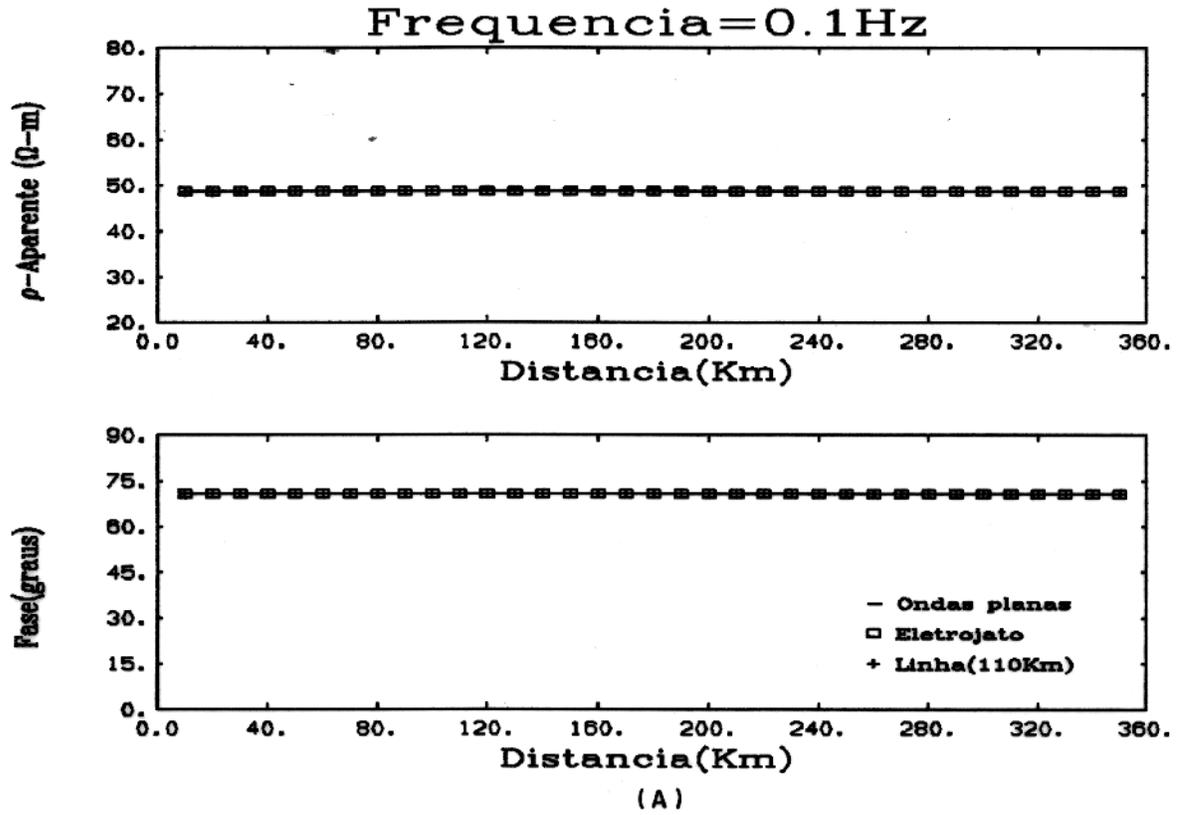


Fig. 32 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 5Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$, $h_2 = 50Km$, $\rho_3 = 1000 \Omega m$). A) Freq. 0.1 e B) 0.01 Hz.

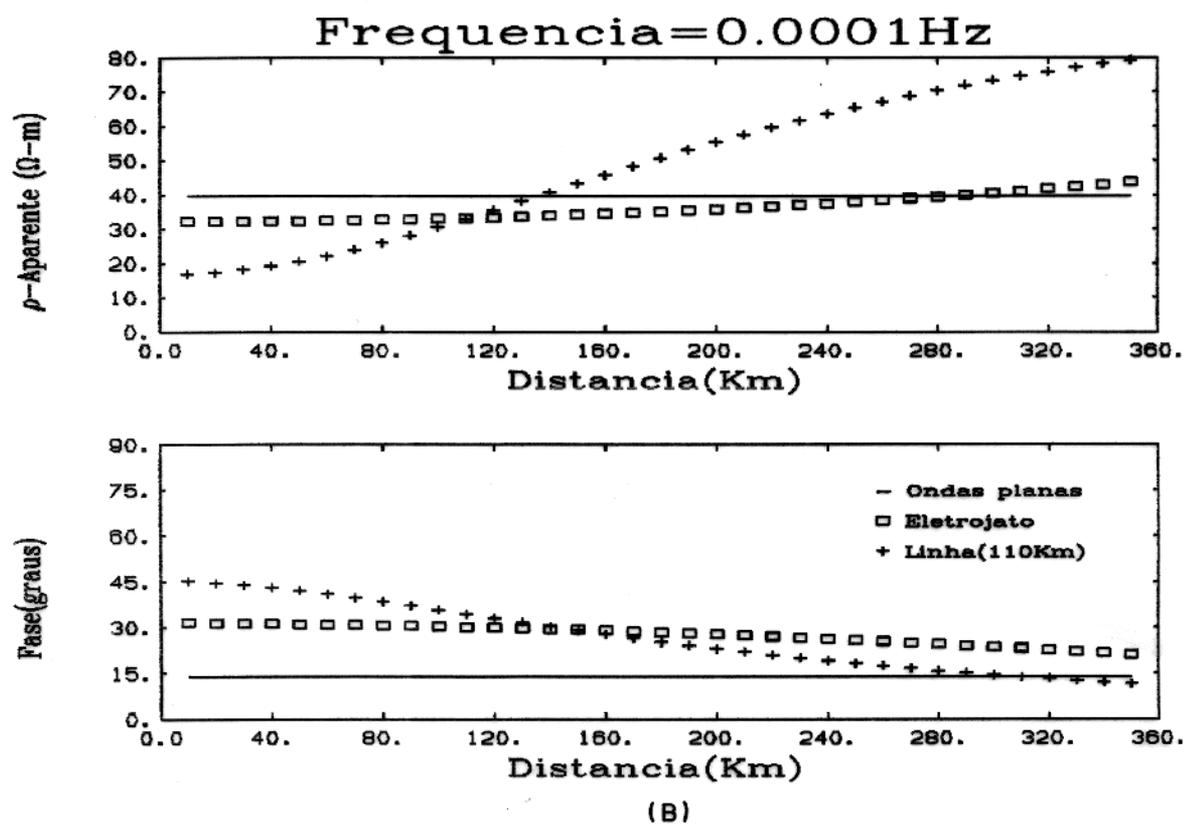
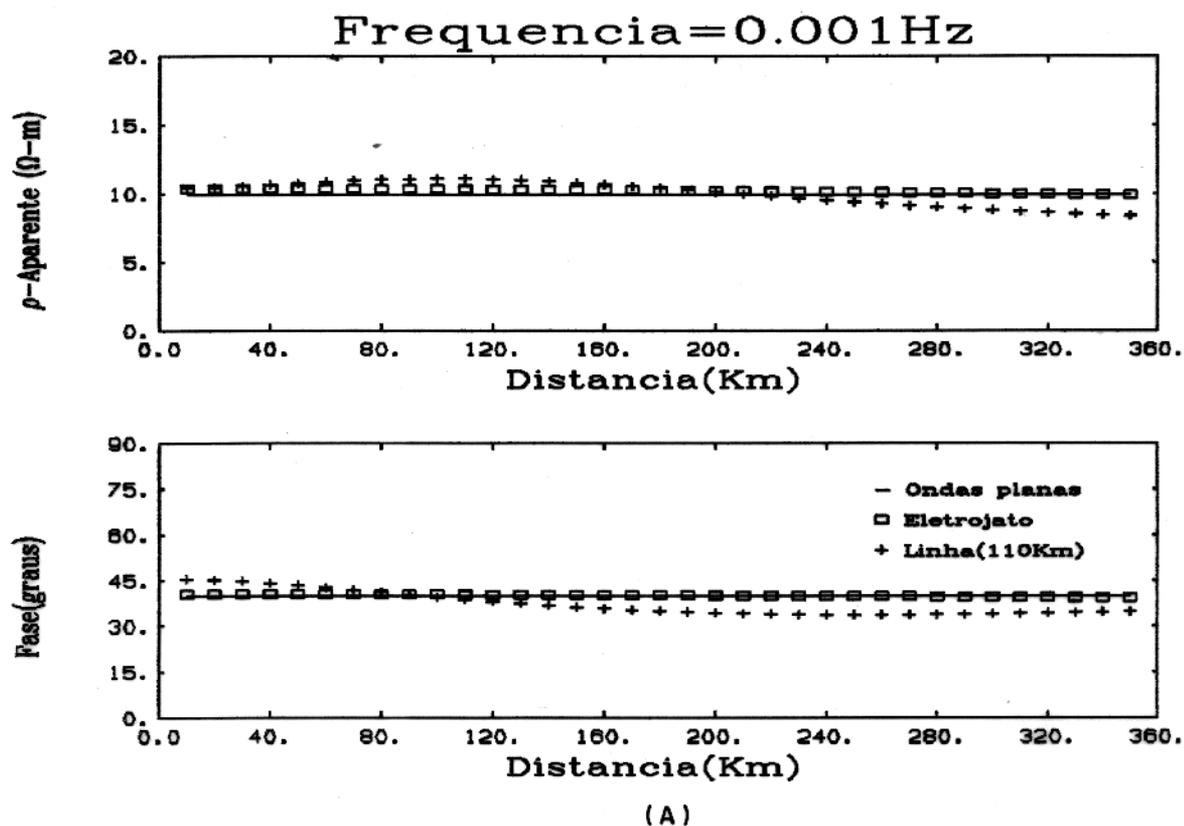


Fig. 33 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à linha de corrente, ao eletrojato e à onda plana para um meio de três camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h_1 = 5 Km$, $\rho_2 = 10 \Omega m$, $h_2 = 50 Km$, $\rho_3 = 1000 \Omega m$). A) Freq. 0.001 e B) 0.0001 Hz.

Modelo 5A

O efeito da fonte em meios bidimensionais depende principalmente dos contrastes de condutividade e proximidade da heterogeneidade. Para pontos distantes da heterogeneidade, a resposta comporta-se como a do meio primário, sendo alterados somente pelos valores de frequência e resistividade do meio primário. As respostas para um meio composto por um corpo de 1 Km de largura por 2 Km de espessura, imerso em um meio homogêneo, de resistividade $100 \Omega m$ (Fig. 34), são mostradas nas Figs. 35 a 38. O corpo tem resistividade de $2 \Omega m$, e está localizado a 0.5Km abaixo da superfície. O corpo está localizado a 240Km do ponto diretamente abaixo da linha ou centro do eletrojato, paralelamente a fonte. Para altas frequências, a resposta é influenciada apenas pelos parâmetros do meio primário (Fig. 35A). Com a redução da frequência, a resposta mostra a influência da presença do corpo (Fig. 35B-37). A divergência entre as respostas para os três tipos de fontes ocorre principalmente para baixa frequência, para valores em que a presença do corpo tem pouca influência na resposta (Fig. 38).

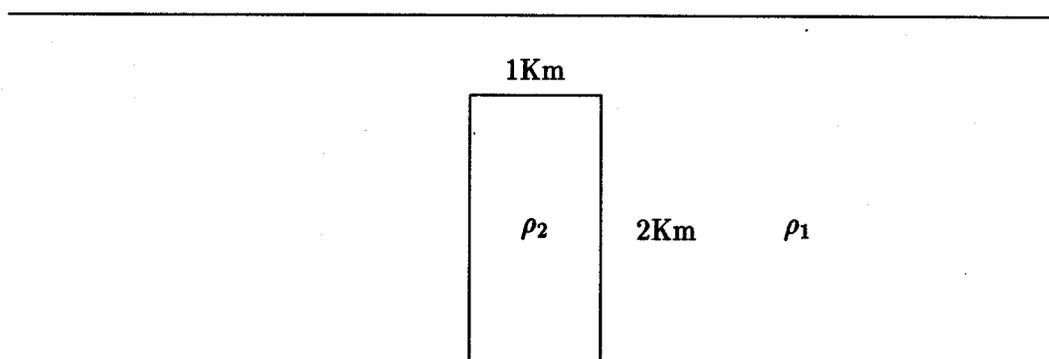


Fig. 34 Modelo de um dique de resistividade $2 \Omega m$ em um semi-espço de resistividade 100 ou 1000 Ωm .

A situação em que o corpo está perpendicular à fonte, corresponde ao modo-TM, a componente H_x é paralela ao "strike" do corpo. Neste caso, para baixos valores de frequências, é observado a redução da resistividade aparente, nas proximidades do corpo (Fig. 39 a 42). Nota-se também que, para baixas frequências, as respostas sofrem grande divergência em pontos distantes ao corpo,

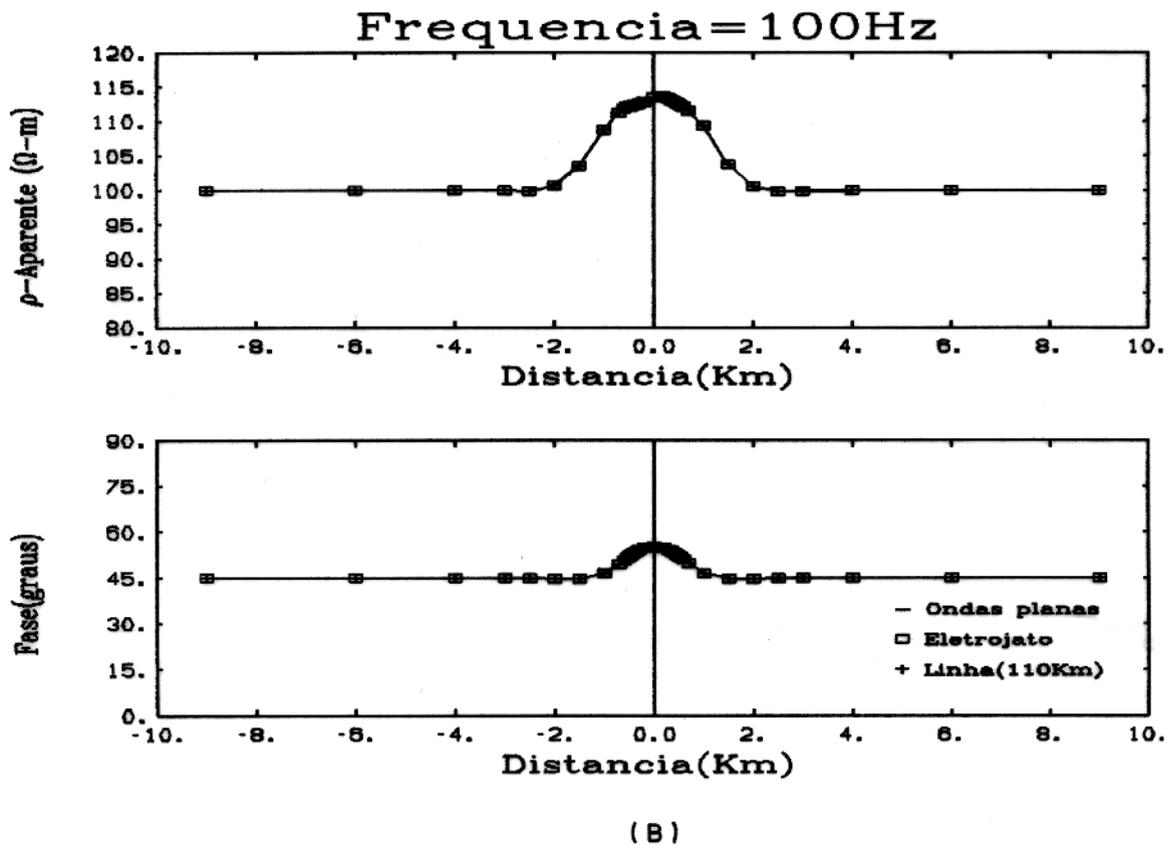
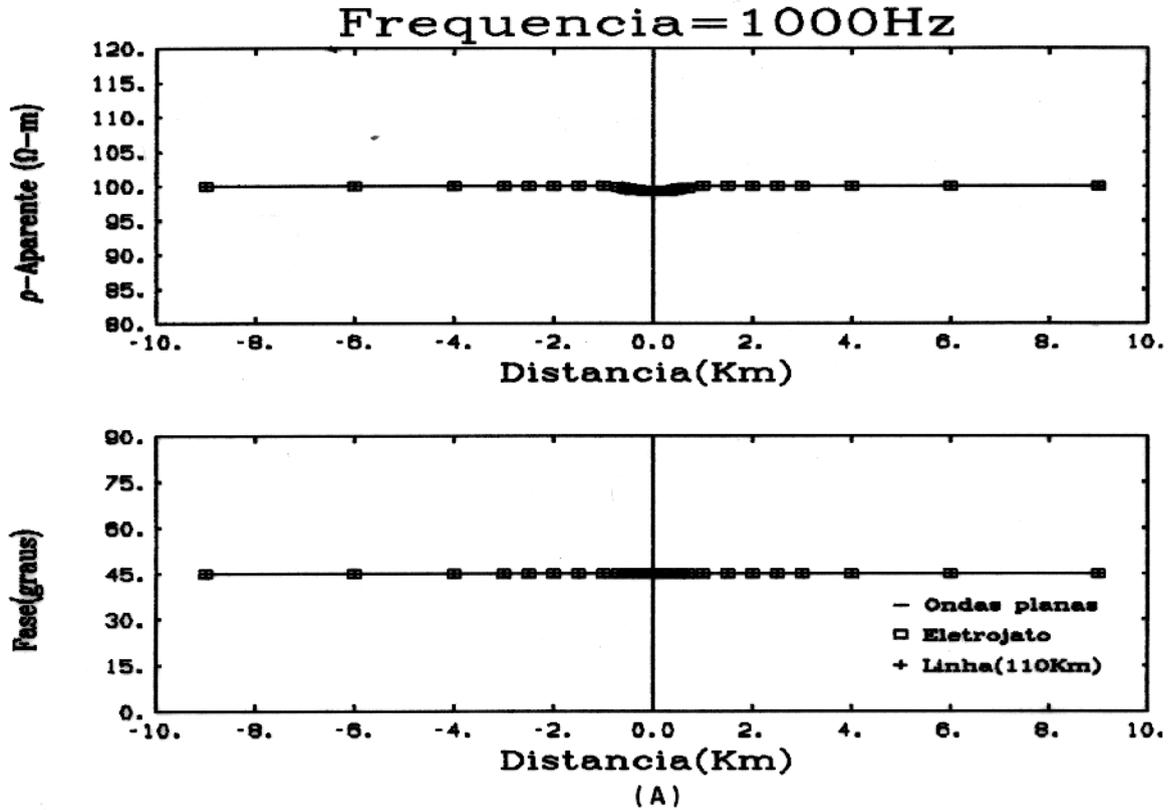


Fig. 35 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega\text{m}$ em um meio de $100 \Omega\text{m}$ (modo TE).
 A) 1000 Hz e B) 100Hz.

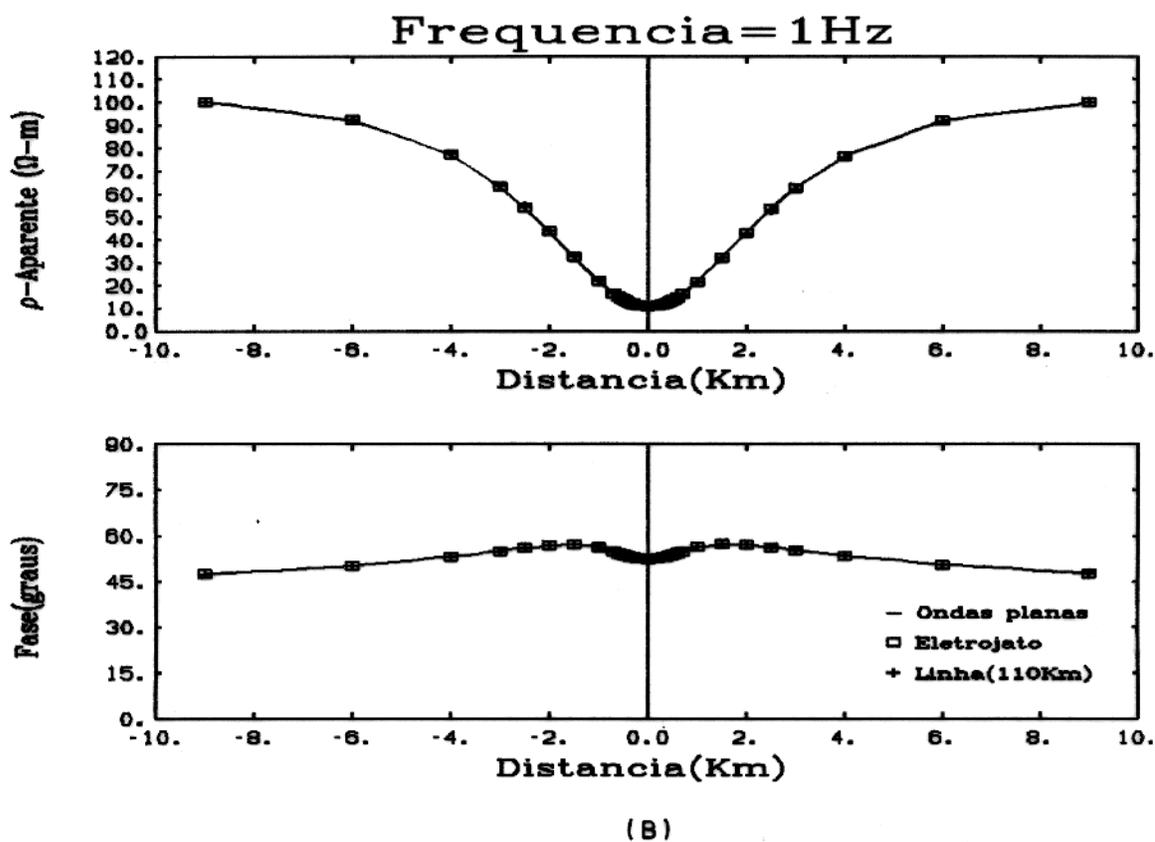
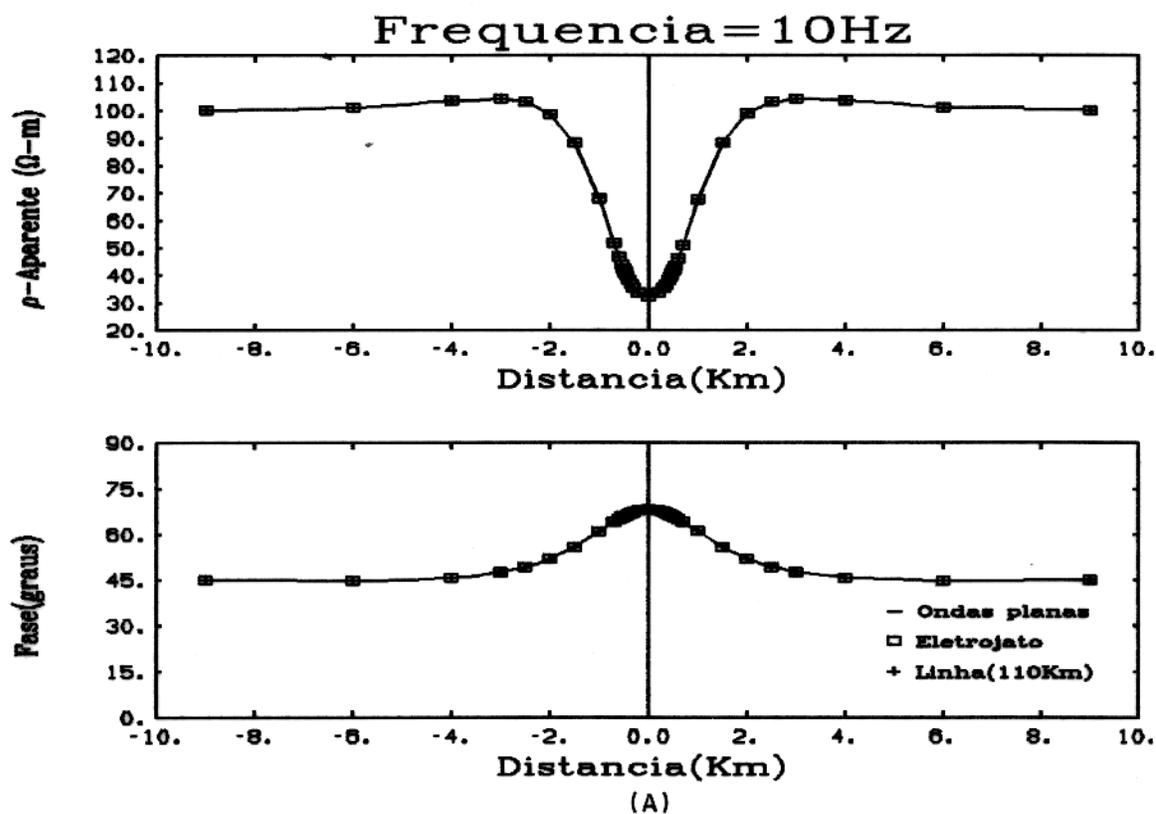


Fig. 36 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TE).
A) 10 Hz e B) 1Hz.

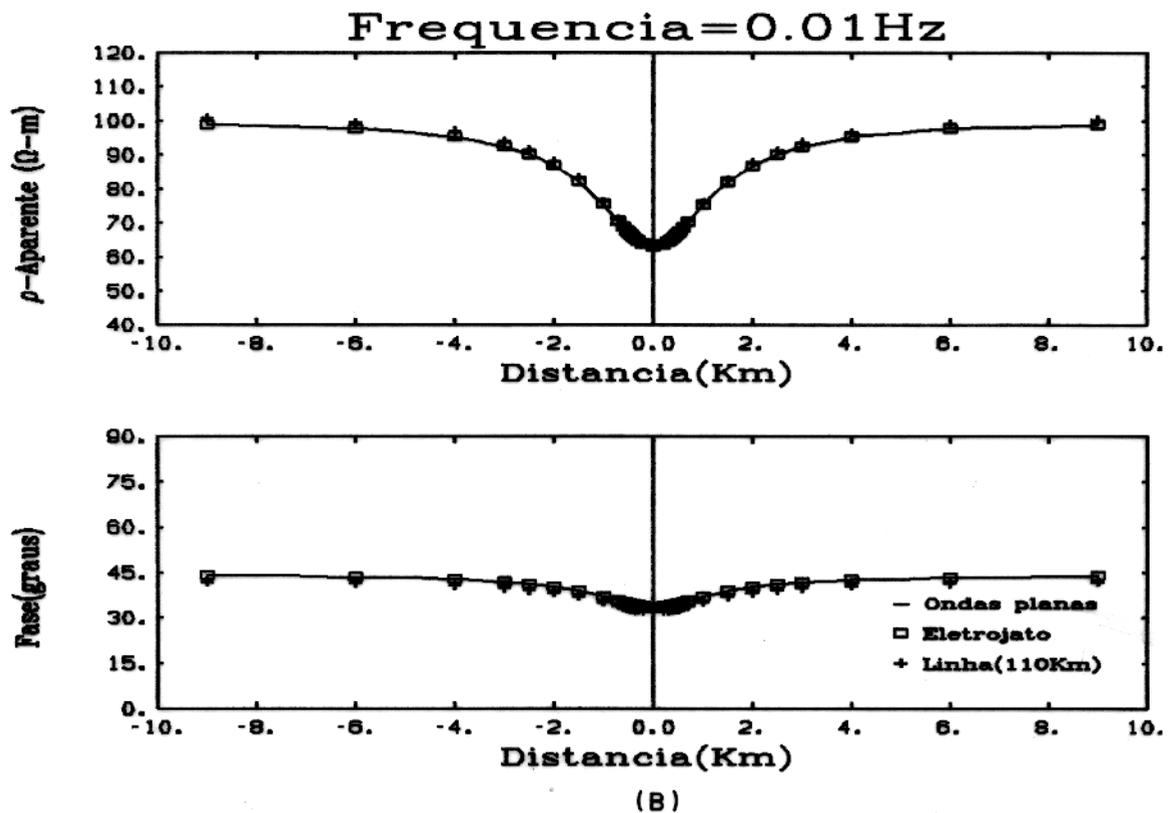
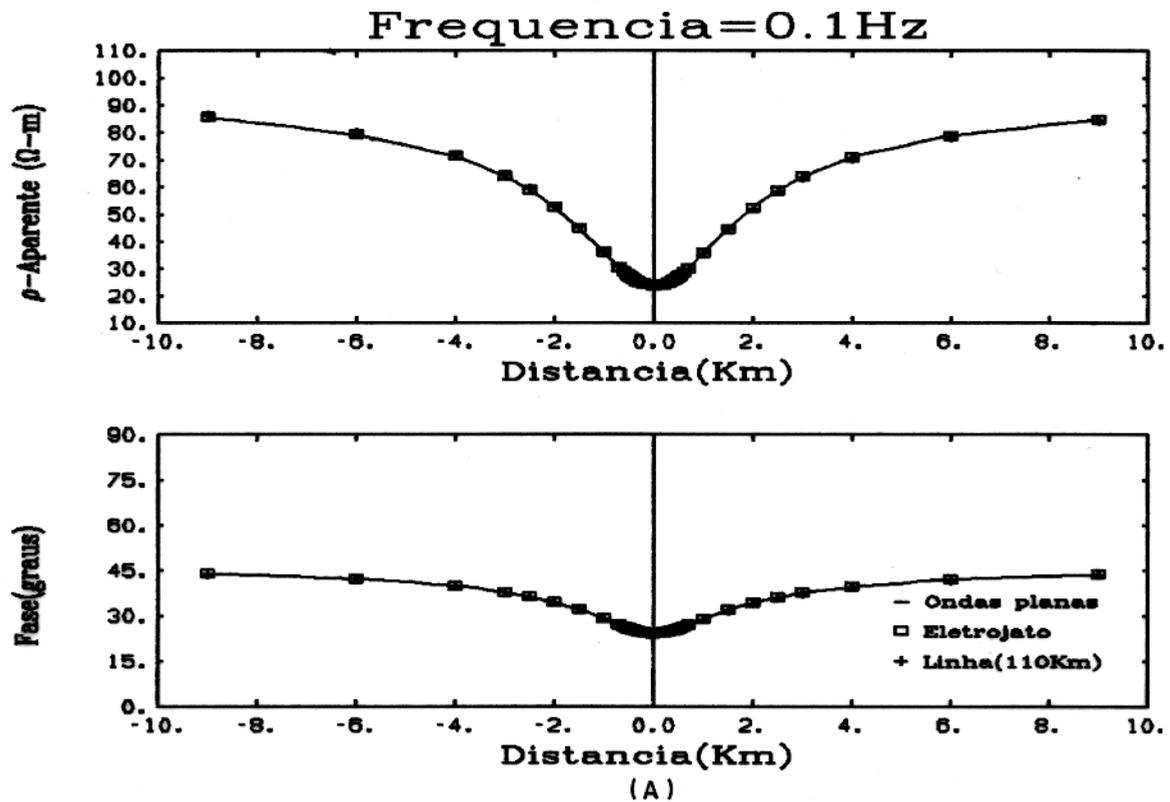


Fig. 37 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TE). A) 0.1 Hz e B) 0.01Hz.

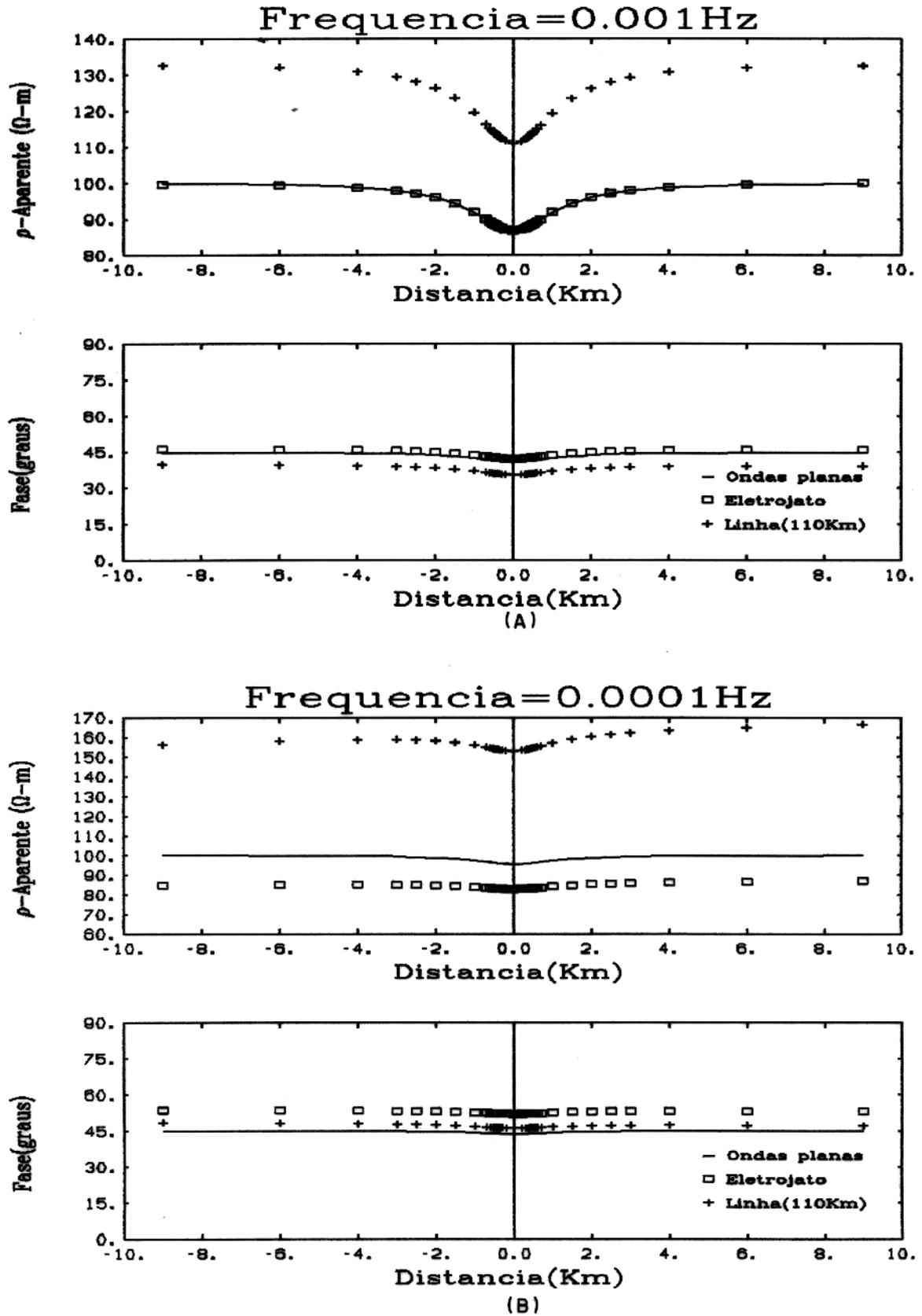


Fig. 38 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TE).
 A) 0.001 Hz e B) 0.0001Hz.

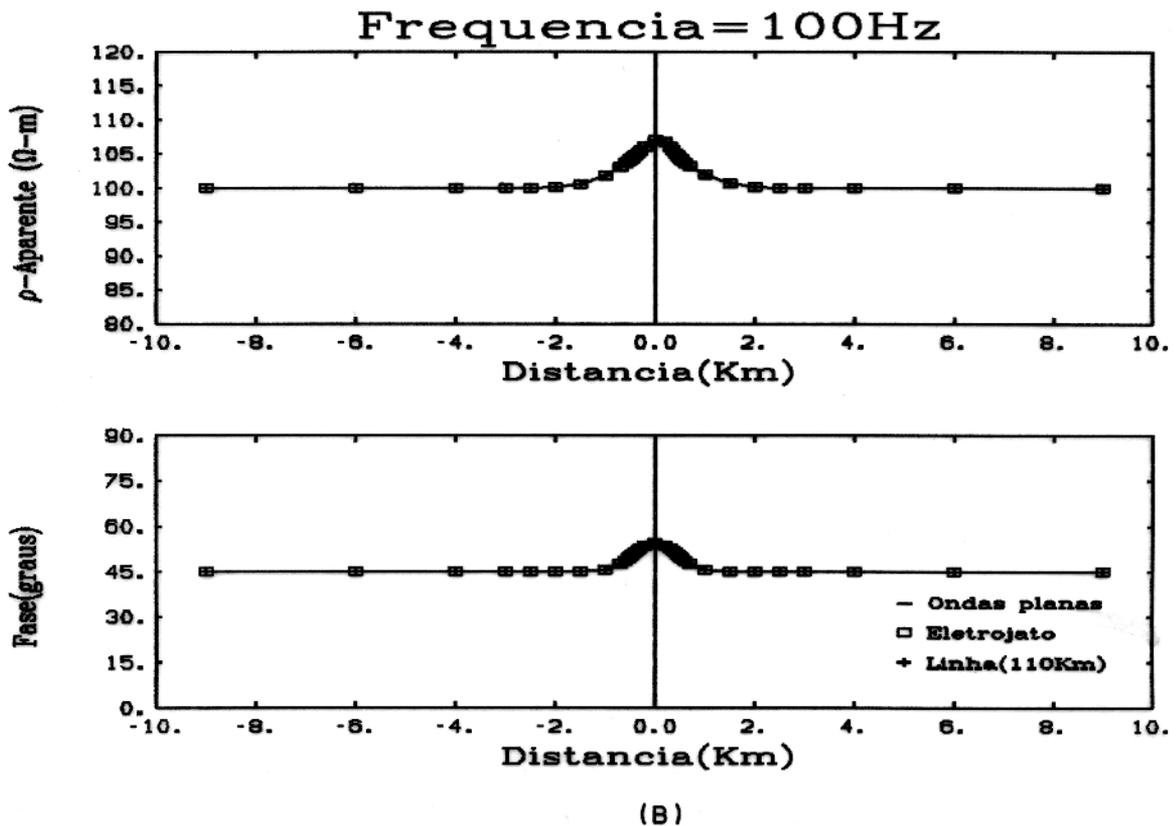
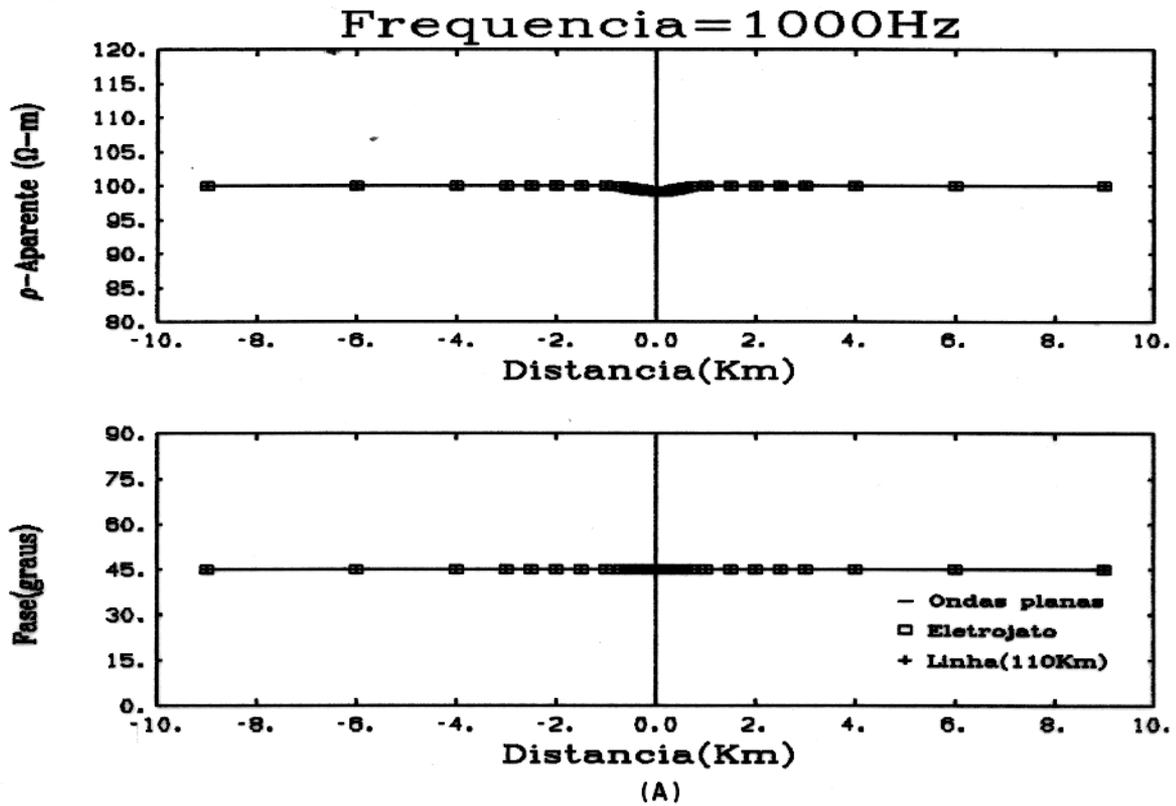


Fig. 39 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TM). A) 1000 Hz e B) 100Hz.

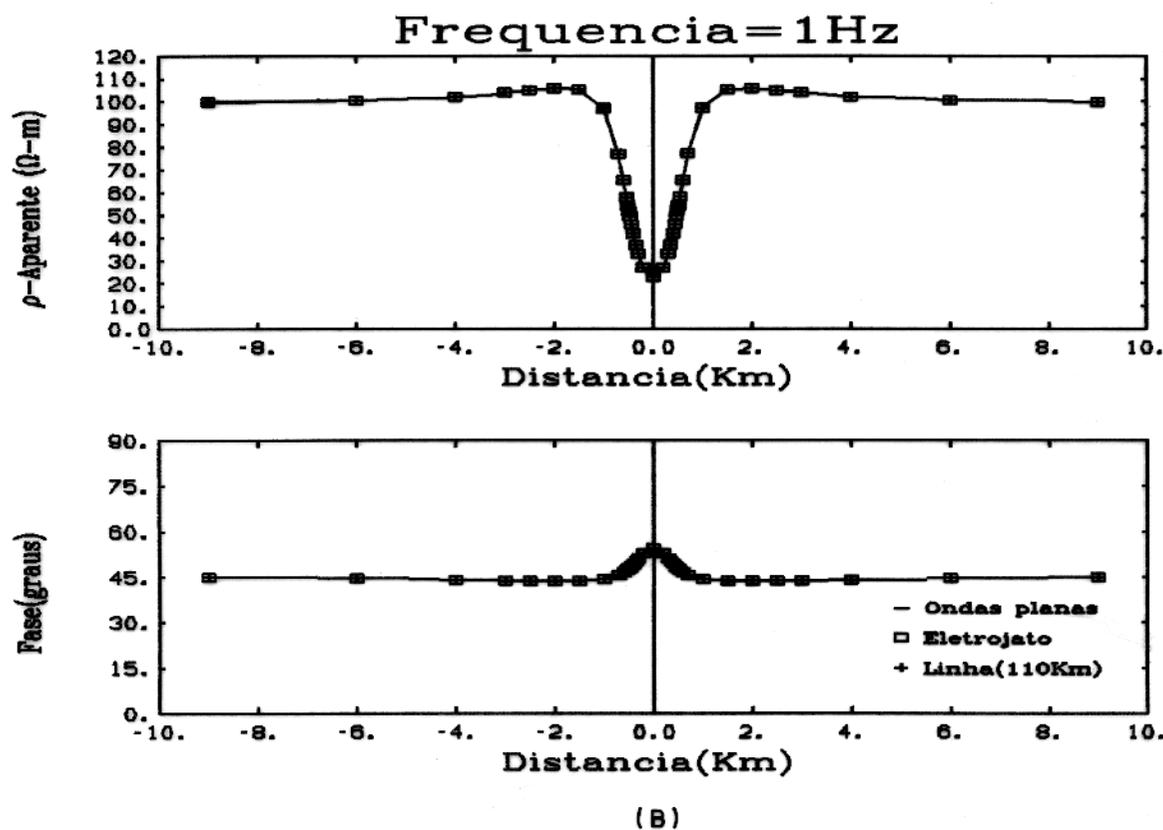
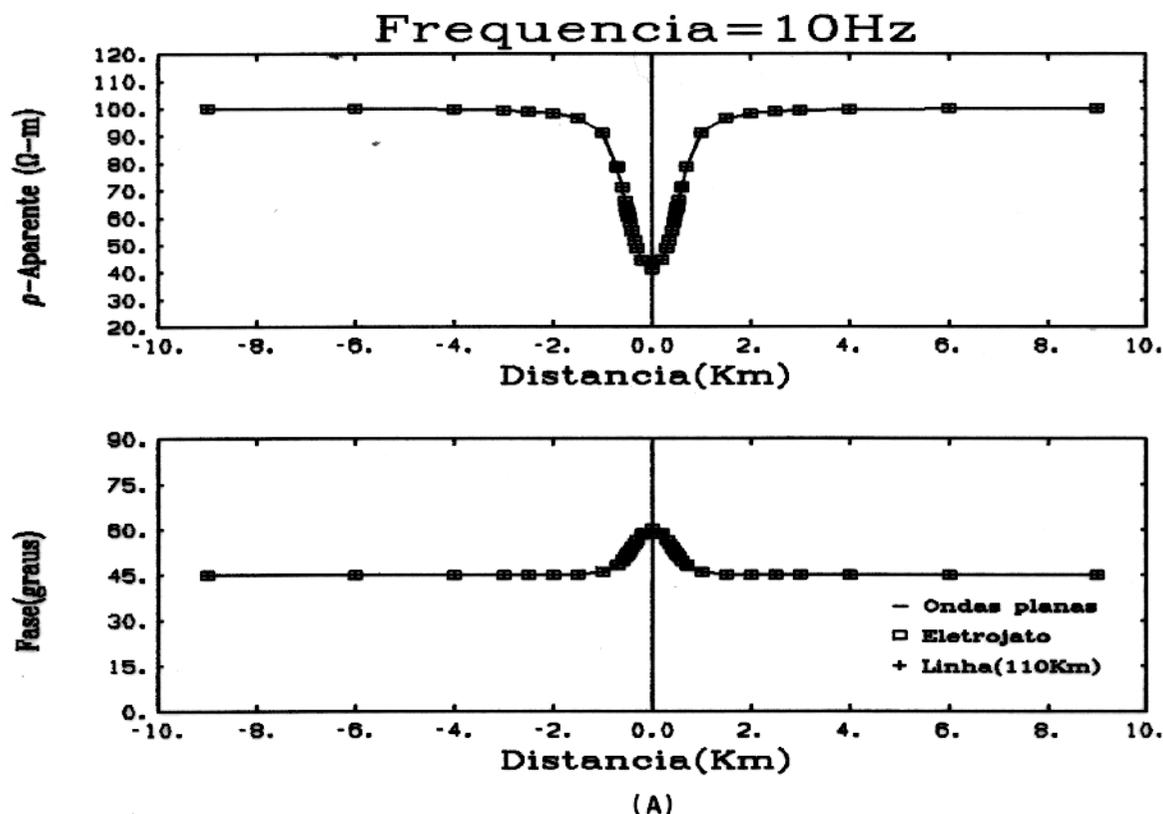


Fig. 40 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TM).
A) 10 Hz e B) 1 Hz.

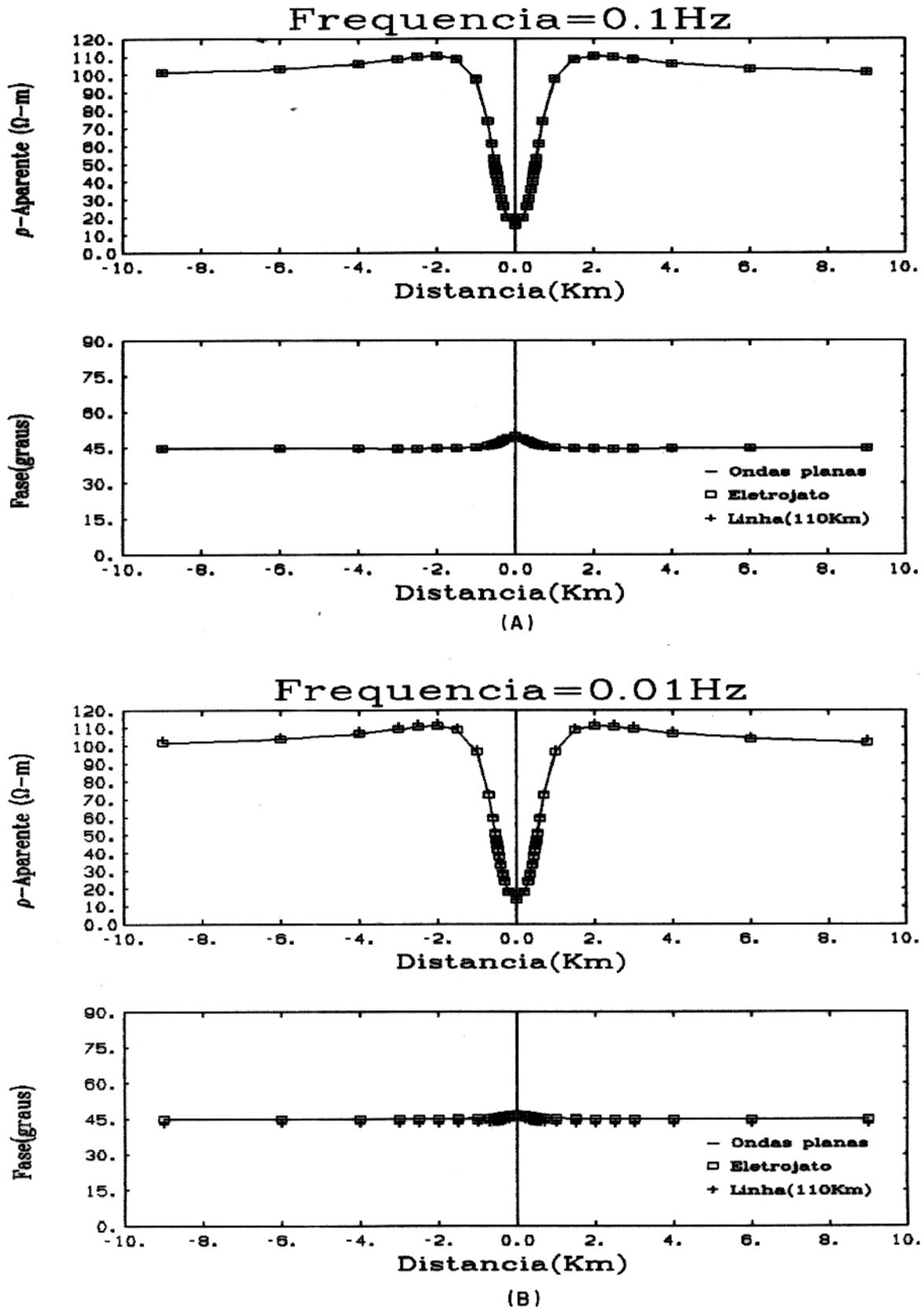


Fig. 41 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega\text{m}$ em um meio de $100 \Omega\text{m}$ (modo TM).
A) 0.1 Hz e B) 0.01Hz.

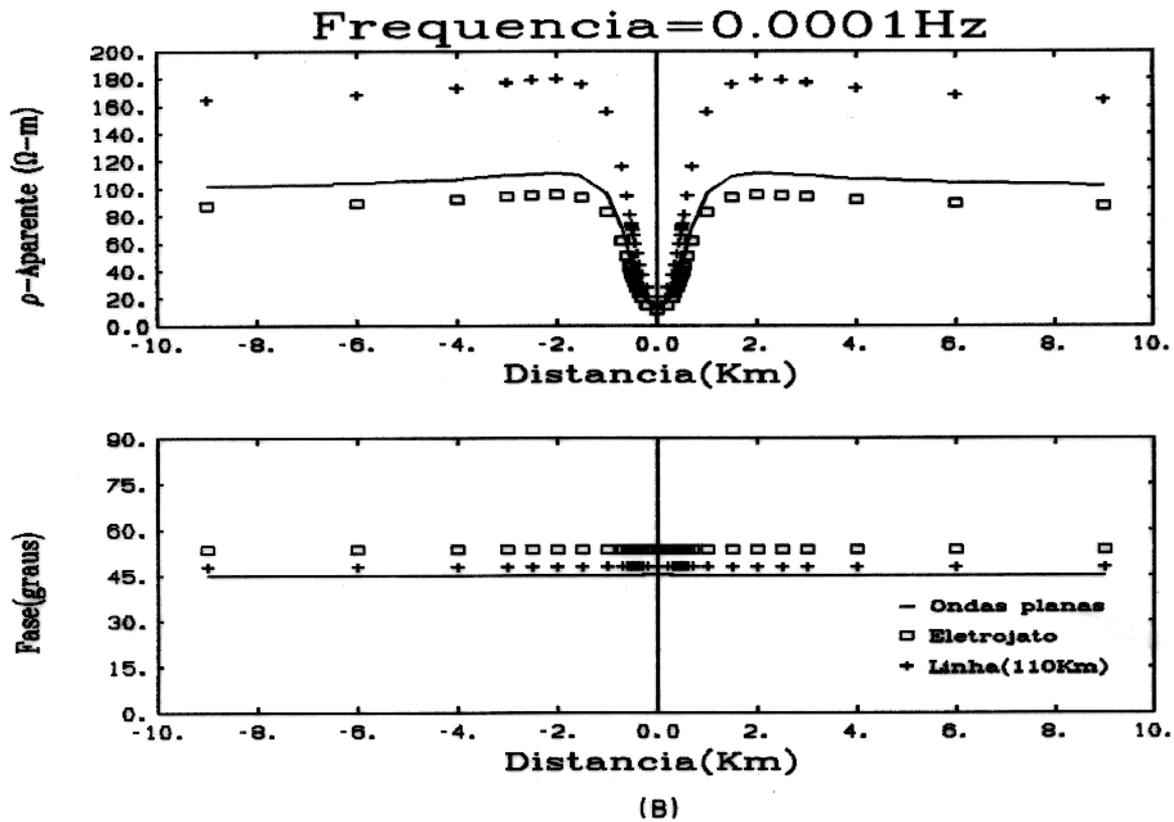
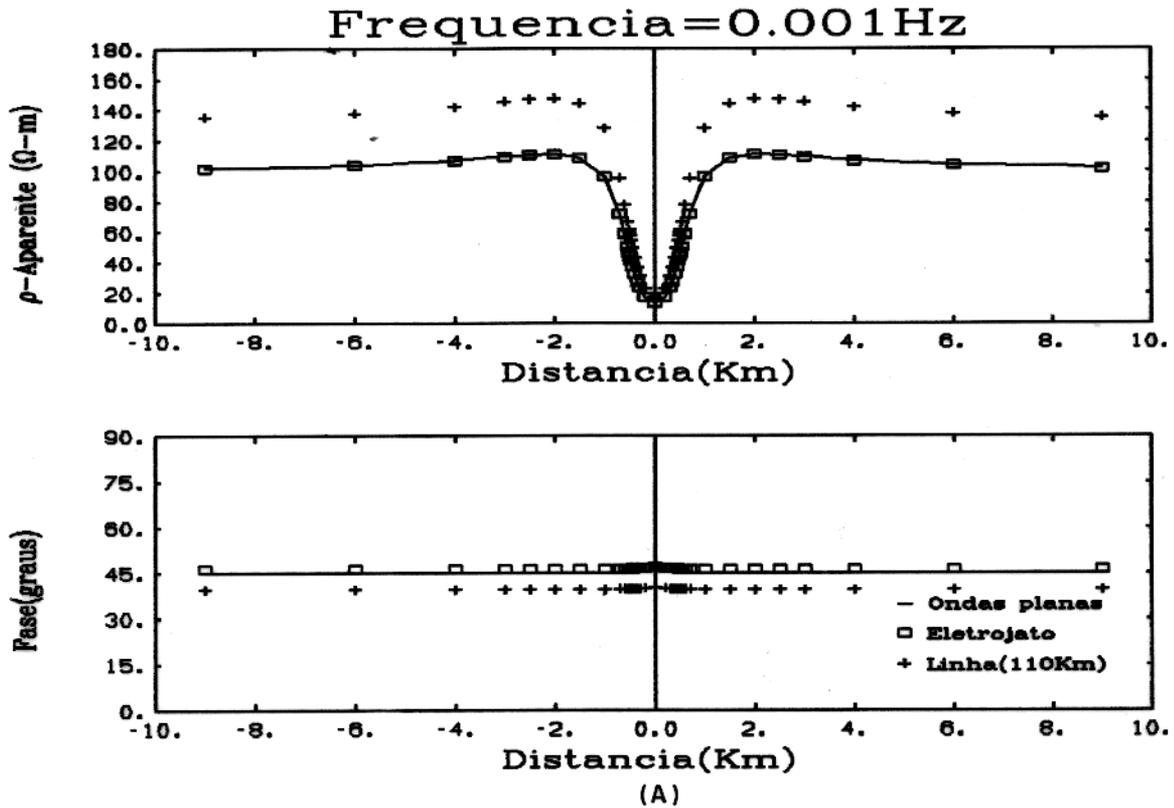


Fig. 42 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $100 \Omega m$ (modo TM). A) 0.001 Hz e B) 0.0001Hz.

aproximando-se da resposta da onda plana em pontos diretamente acima deste, ou seja, a presença de um corpo mais condutivo provoca uma redução da intensidade do efeito devido a fonte (Fig. 42).

Modelo 5B

A comparação dos resultados de resistividade aparente e fase, para um modelo com as mesmas dimensões do modelo anterior, e sendo a resistividade do corpo $2 \Omega m$ imerso em um meio com resistividade $1000 \Omega m$, paralelo a fonte (modo TE), é ilustrada nas Figs. 43 a 46. A divergência entre os resultados da onda plana e da linha de corrente é observada a partir das frequências de 0.01 Hz para pontos distantes do corpo, sendo reduzida nas proximidades deste (Fig. 45B). A divergência entre os resultados da onda plana e eletrojato gaussiano, é observada a partir das frequências de 0.001 Hz (Fig. 46). A situação em que a fonte está em posição perpendicular ao "strike" a fonte (modo TM) é mostrada nas Figs. 47 a 50. Para este caso, à frequência de 1000 a 0.1 Hz , não ocorre divergência entre as três respostas (Fig. 47 a 49A). Com a frequência de 0.01 Hz , observa-se um deslocamento da curva de resistividade correspondente à linha de corrente em pontos distantes do corpo (Fig. 49B). O deslocamento das curvas de resistividade aparente e fase para eletrojato, é observada a partir da frequência de 0.001 Hz (Fig. 50). Novamente se observa um deslocamento das curvas de resistividade aparente, em pontos distantes do corpo e se aproximando em pontos próximos a este. O efeito provoca deslocamento na curva da fase, porém, este deslocamento é pouco alterado nas proximidades do corpo.

Modelo 6A

A comparação entre as sondagens magnetotelúricas dos três tipos de fontes (onda plana, eletrojato gaussiano, linha de corrente), para um modelo de duas camadas e um corpo imerso na primeira camada, é mostrada na Fig. 51. O modelo é composto por uma camada de resistividade $10 \Omega m$ e espessura de 2250 m , sobre um substrato de resistividade $1 \Omega m$. O corpo tem espessura de 1000 m por 1000 m de largura com o topo situado a 250 m abaixo da superfície. A sondagem (SMT) foi feita em um ponto diretamente acima do corpo localizado a 240 Km do centro da fonte. Observa-se que, tanto para o Modo TE (Fig. 51A) quanto o Modo TM (Fig. 51B), ocorre um perfeito ajuste entre as curvas de resistividade aparente para os três tipos de fontes. A curva

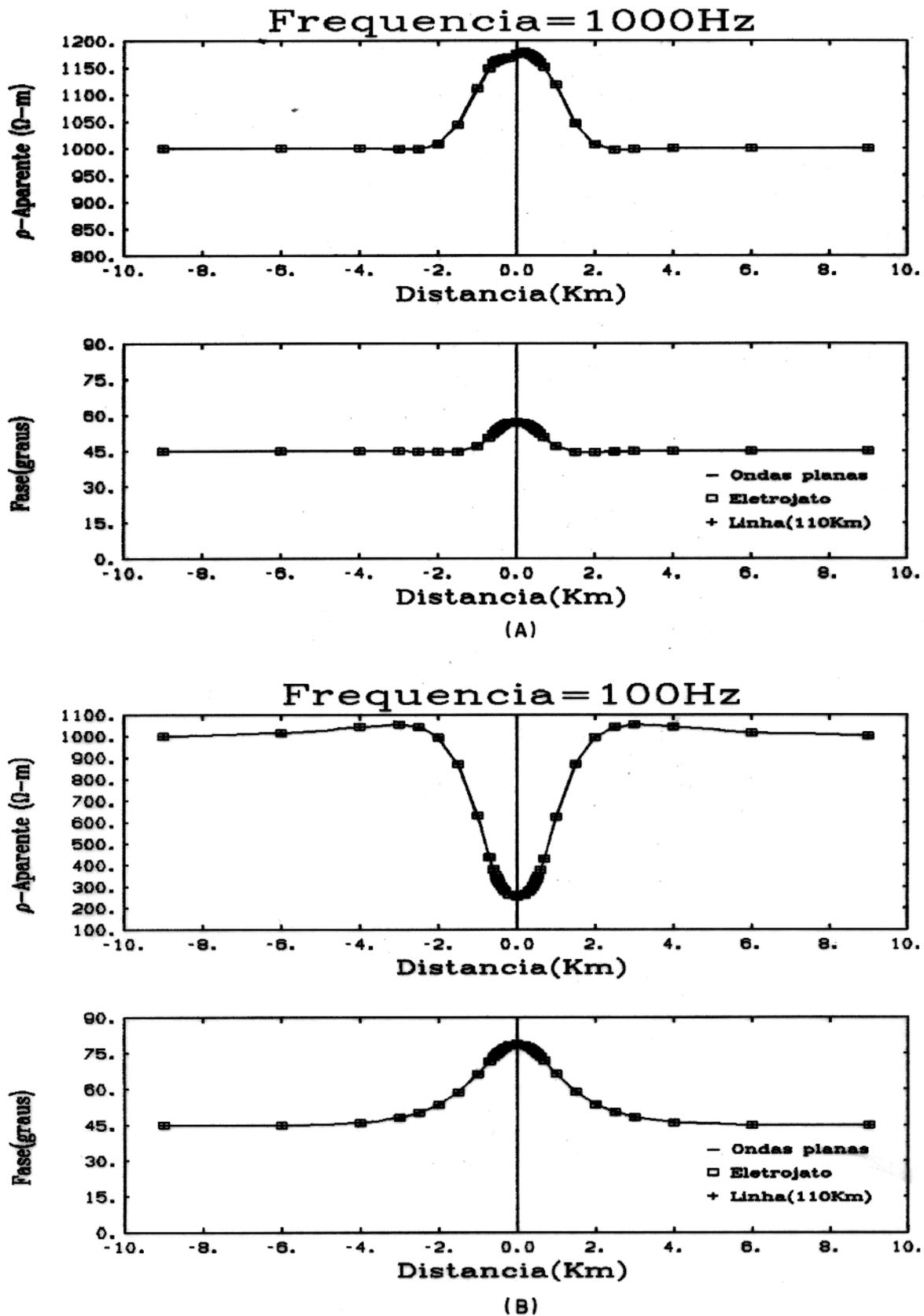


Fig. 43 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TE). A) 1000 Hz e B) 100Hz.

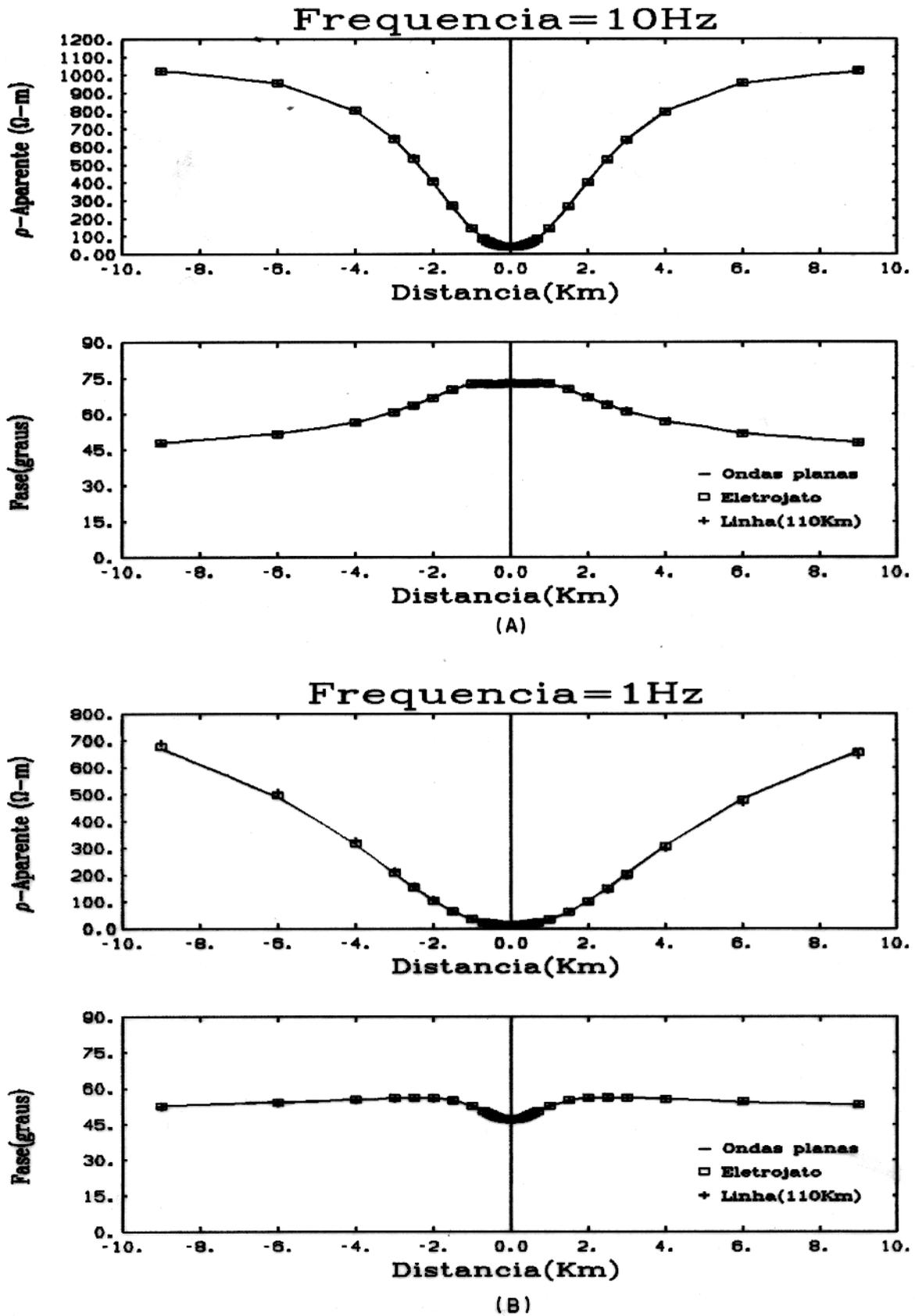


Fig. 44 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TE). A) 10 Hz e B) 1 Hz.

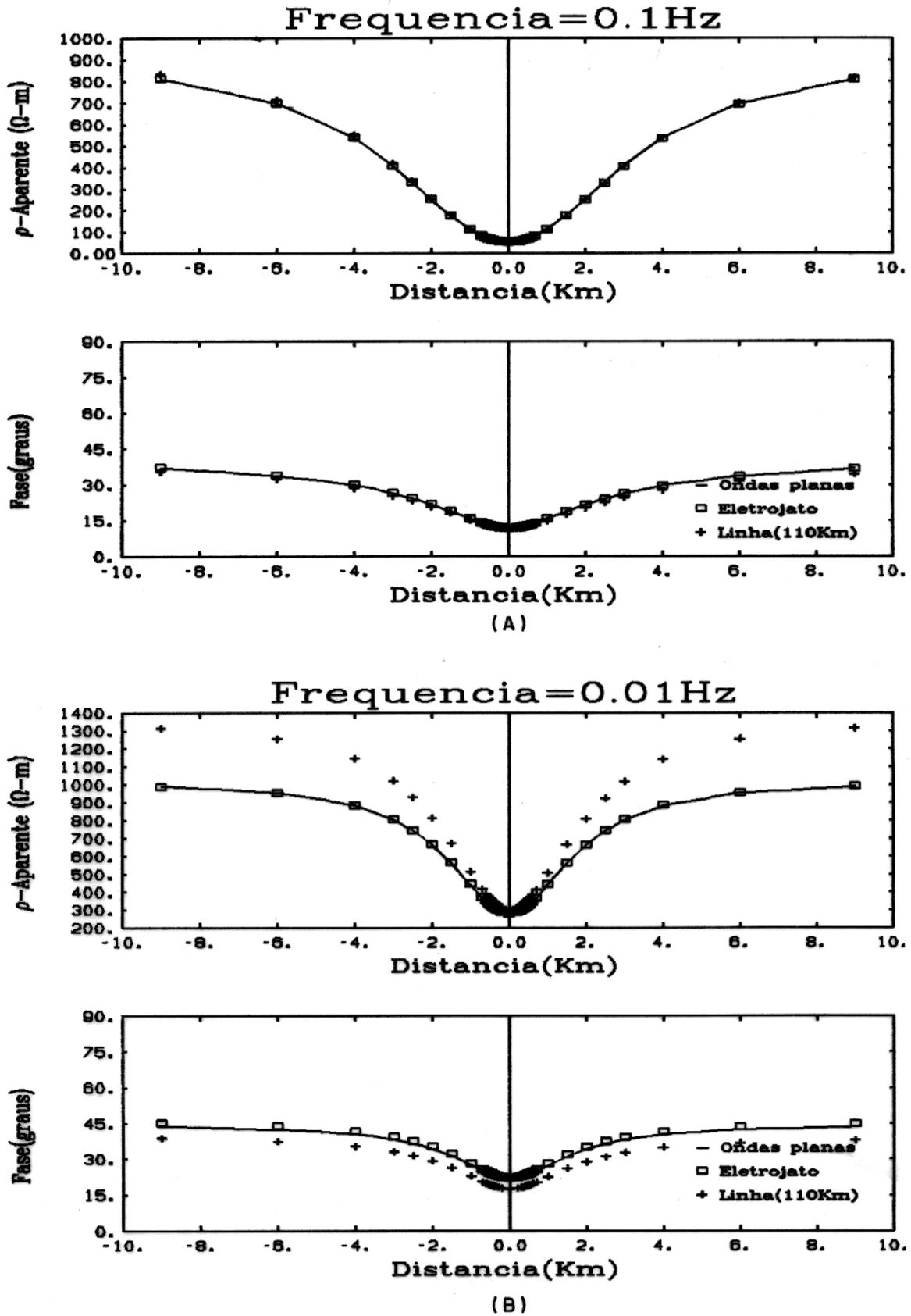


Fig. 45 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TE). A) 0.1 Hz e B) 0.01Hz.

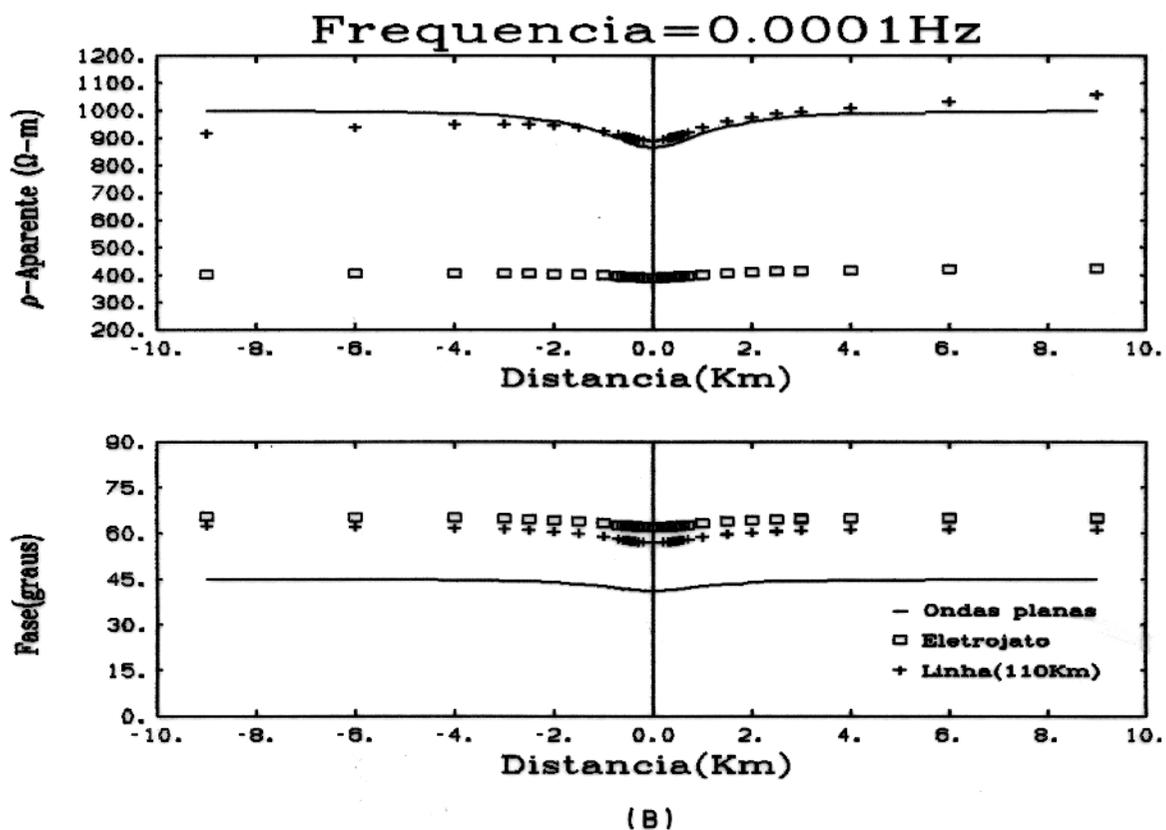
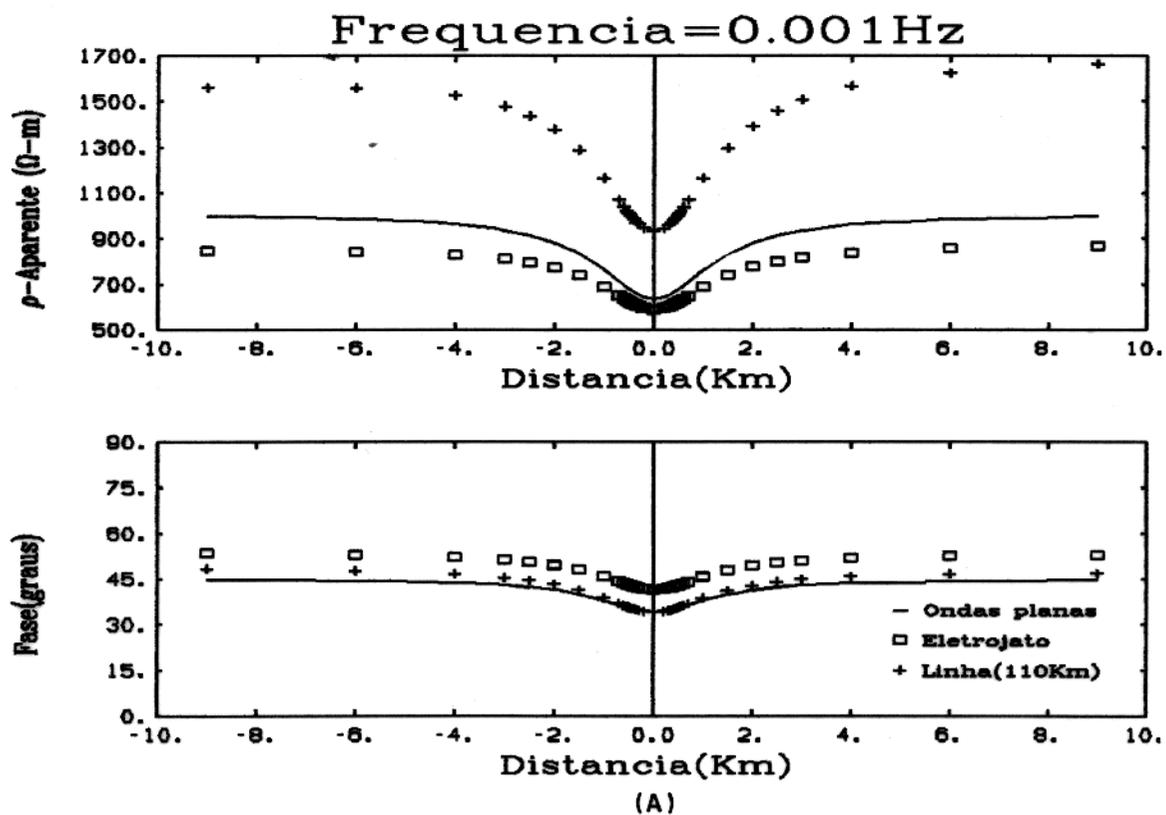


Fig. 46 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TE).
A) 0.001 Hz e B) 0.0001Hz.

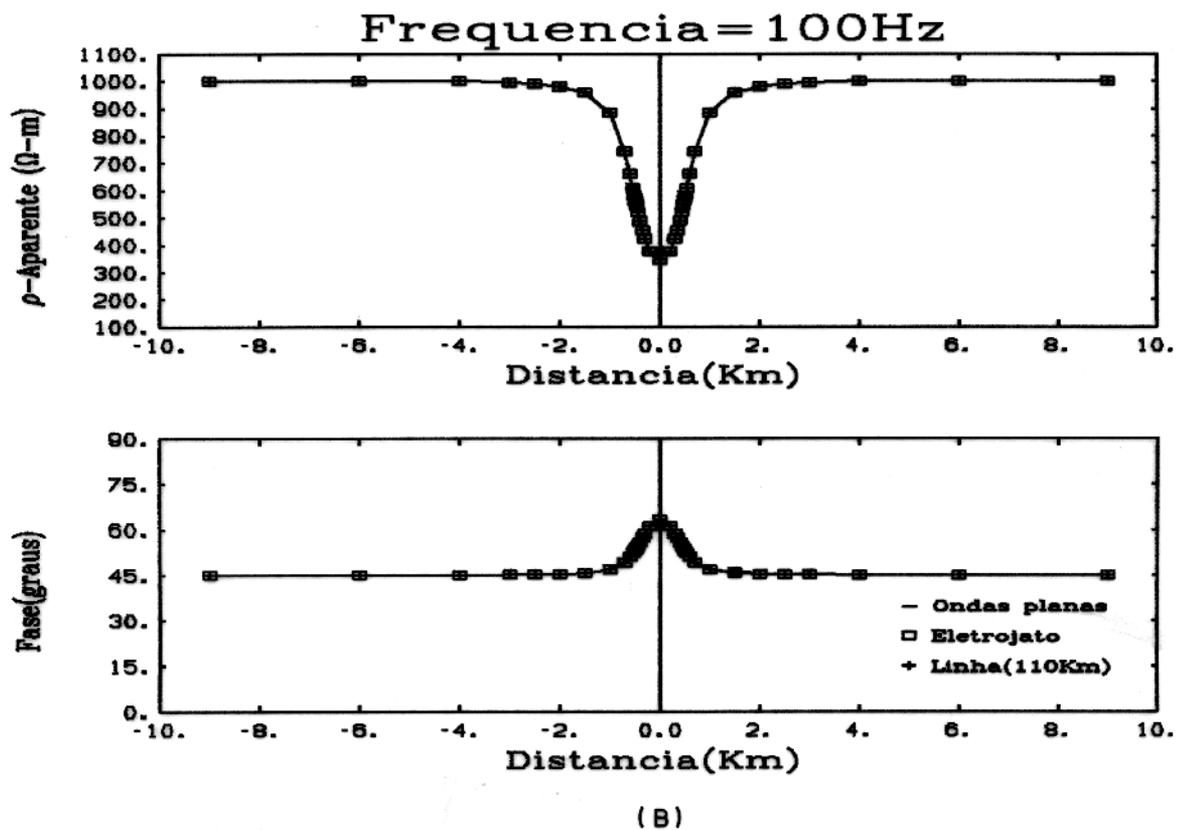
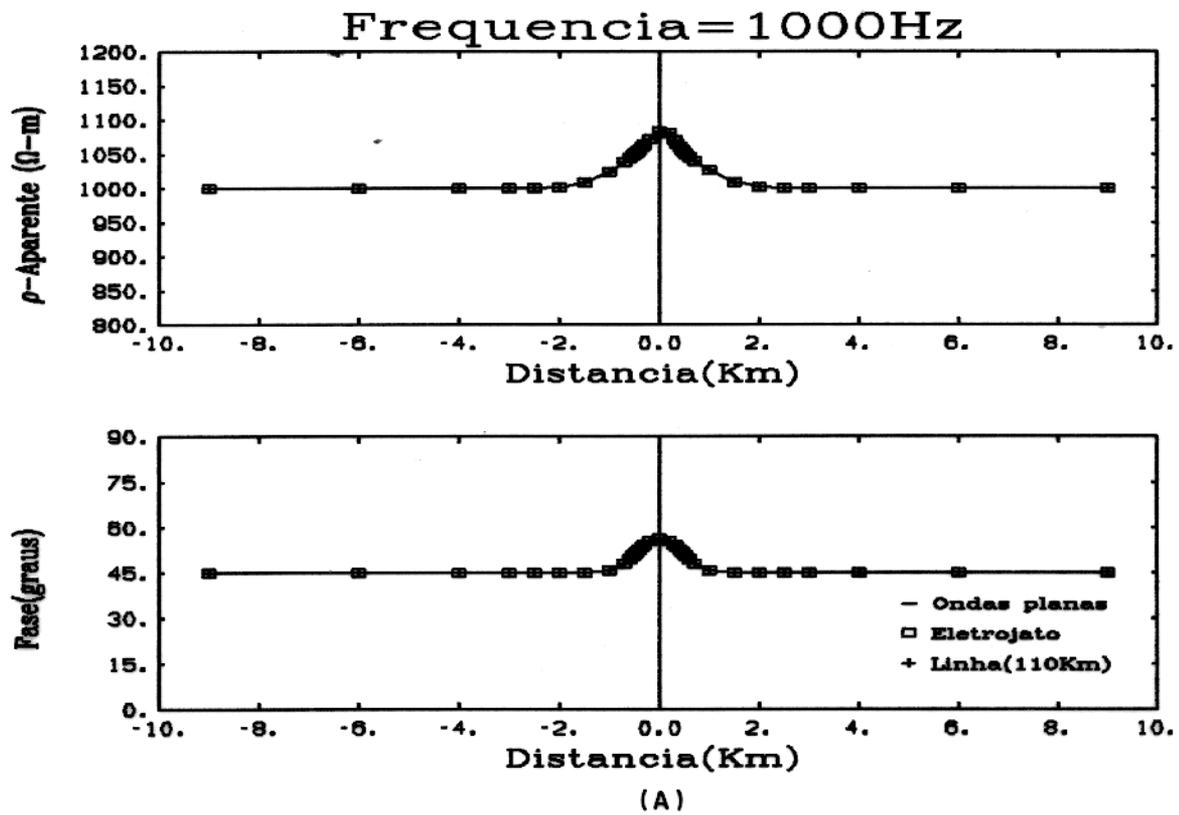


Fig. 47 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TM). A) 1000 Hz e B) 100Hz.

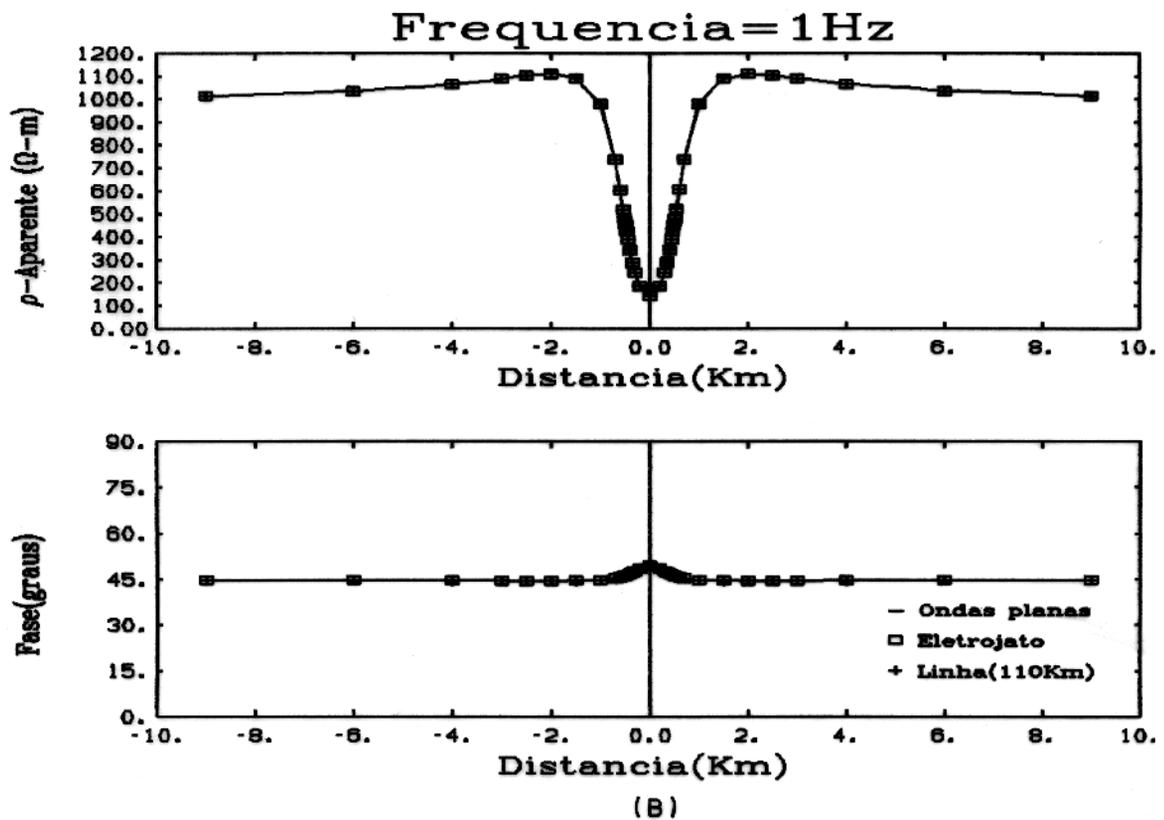
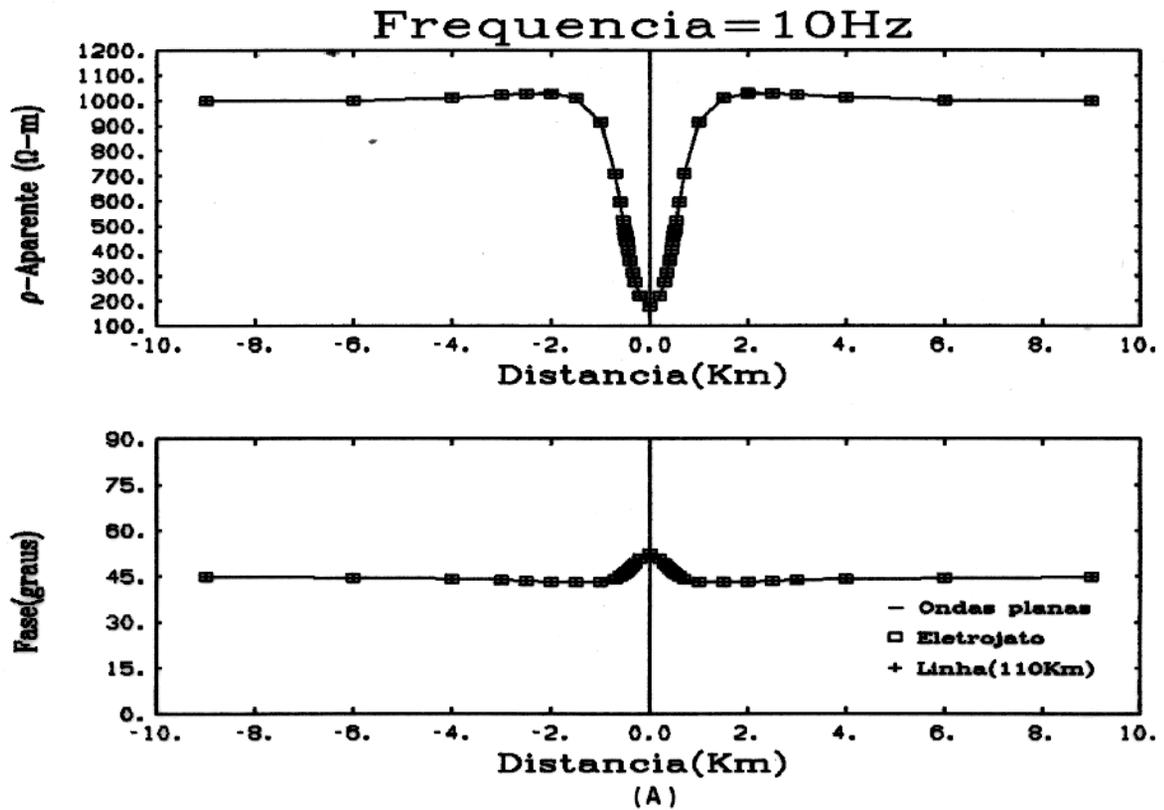


Fig. 48 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TM). A) 10 Hz e B) 1Hz.

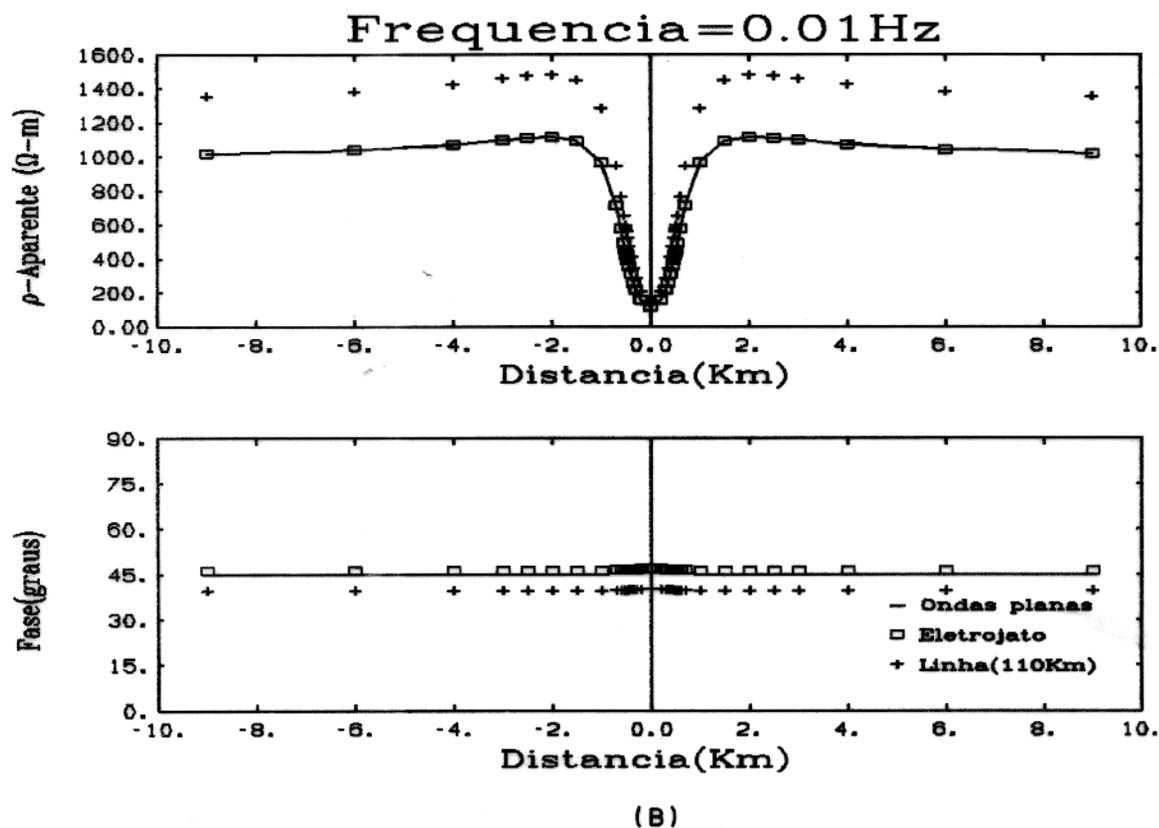
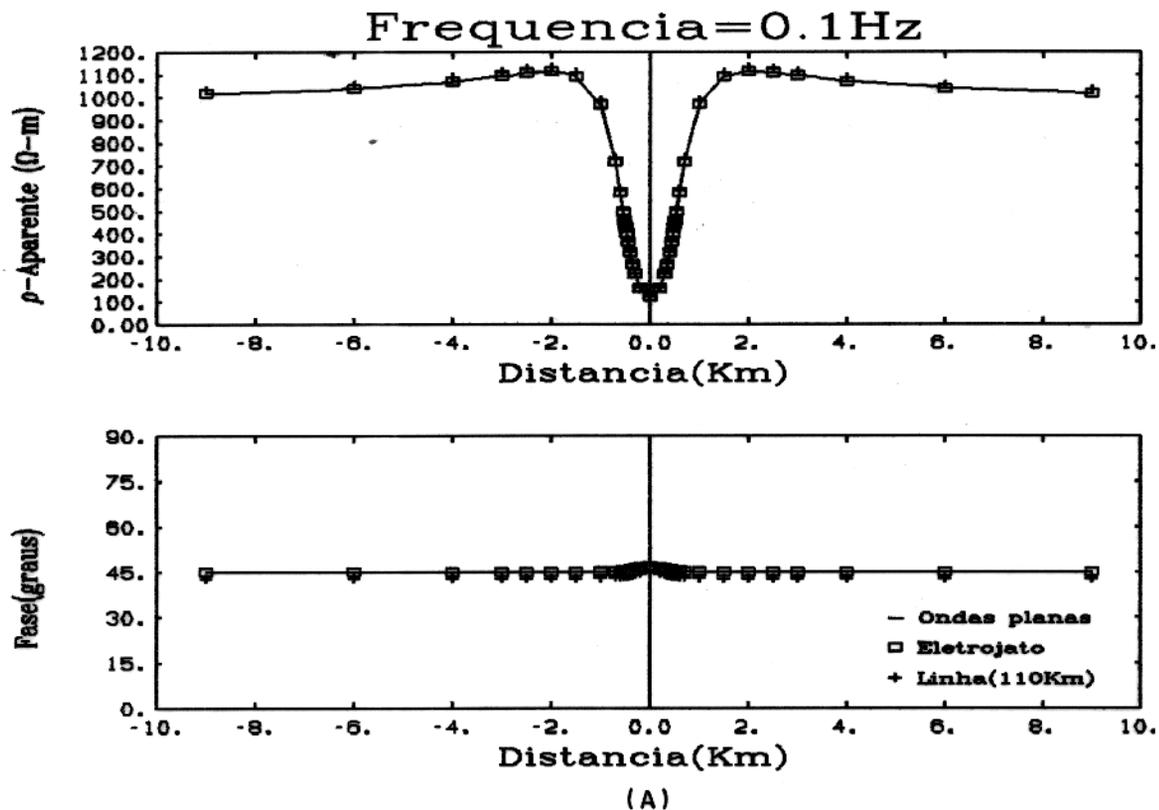


Fig. 49 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TM). A) 0.1 Hz e B) 0.01Hz.

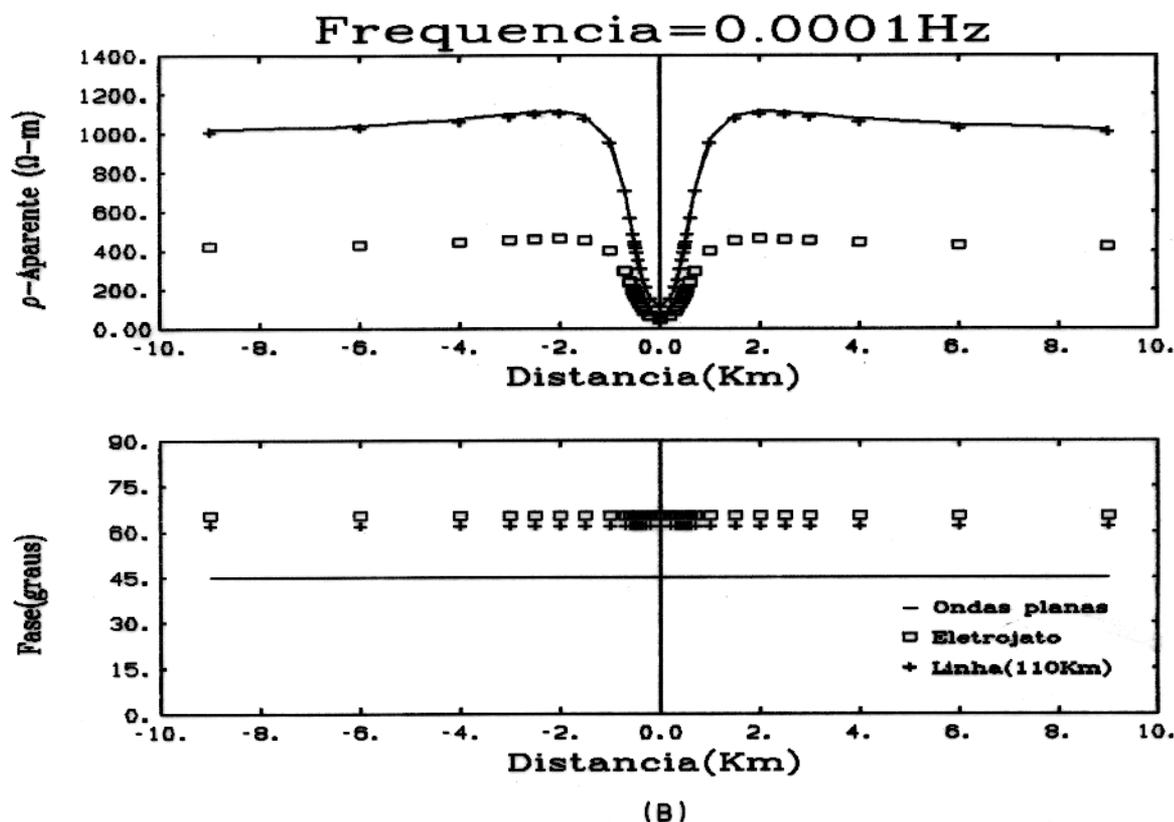
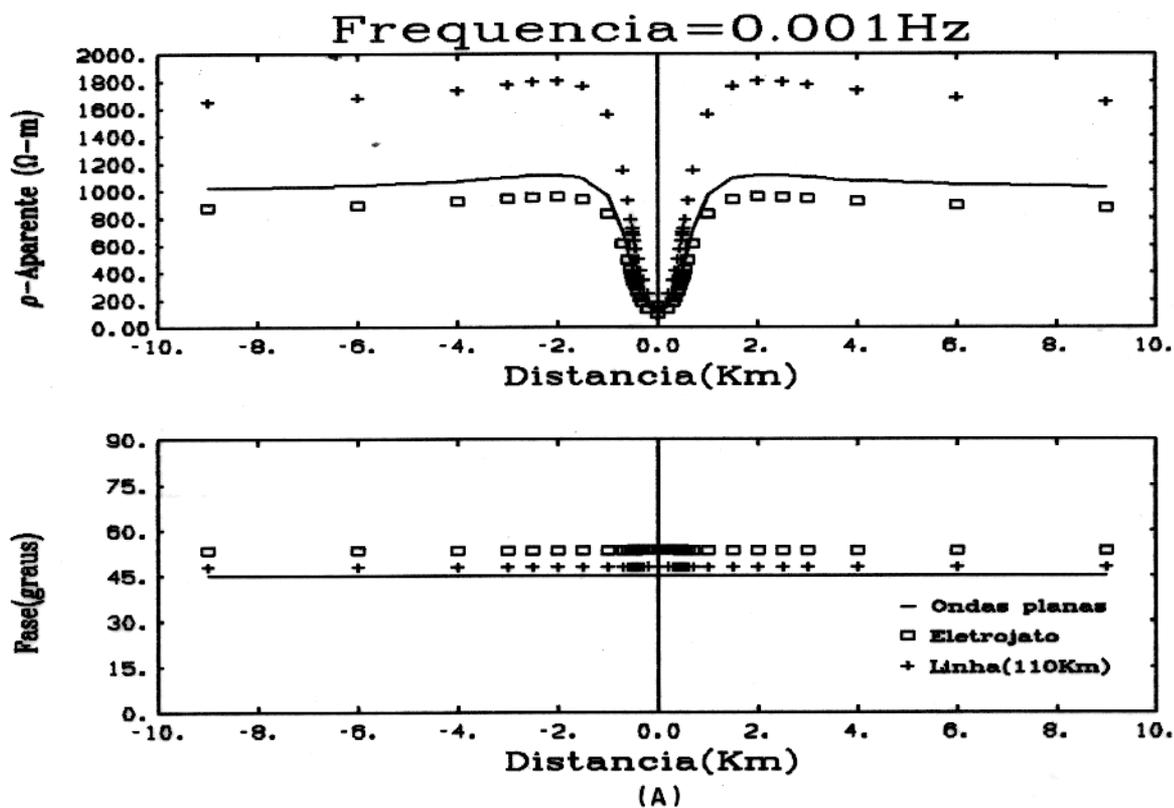
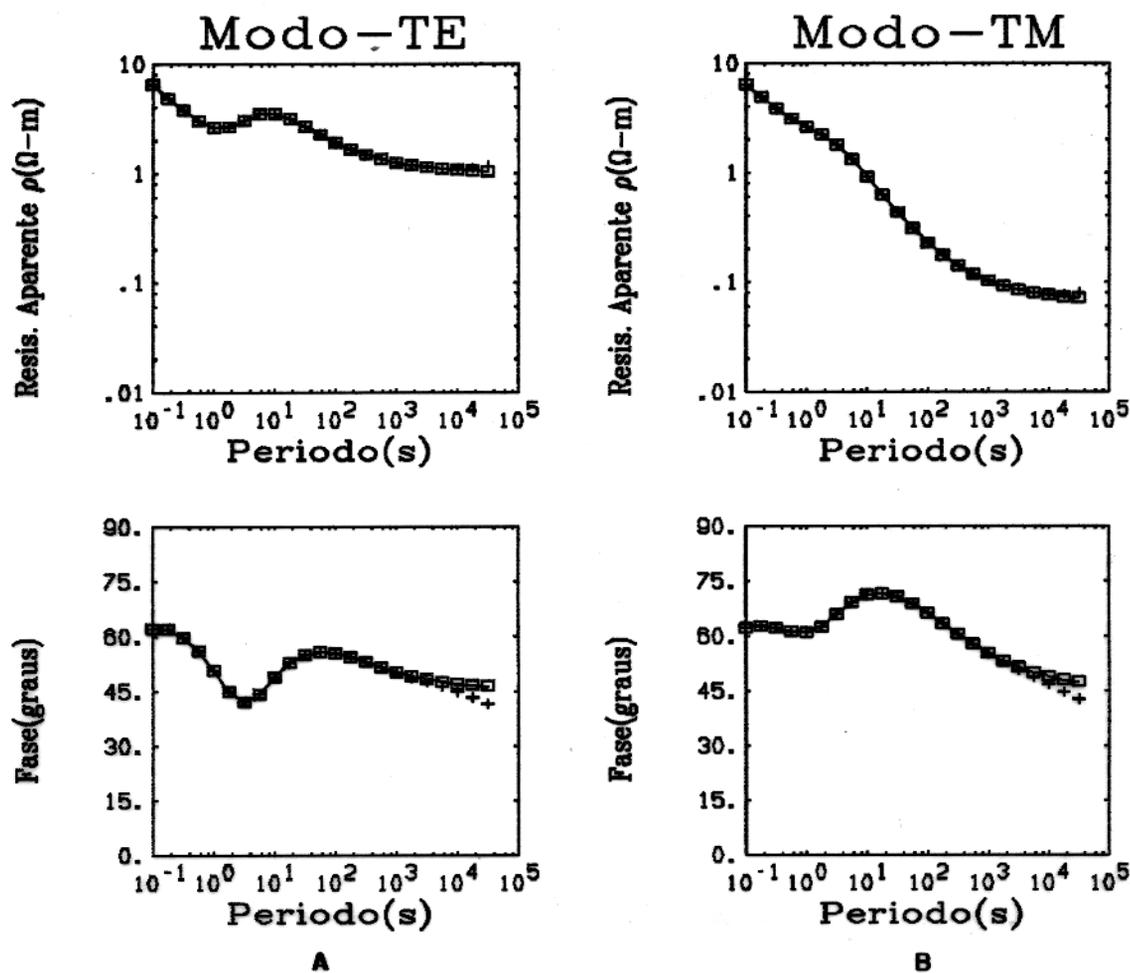


Fig. 50 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato de um dique de $2 \Omega m$ em um meio de $1000 \Omega m$ (modo TM). A) 0.001 Hz e B) 0.0001Hz.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

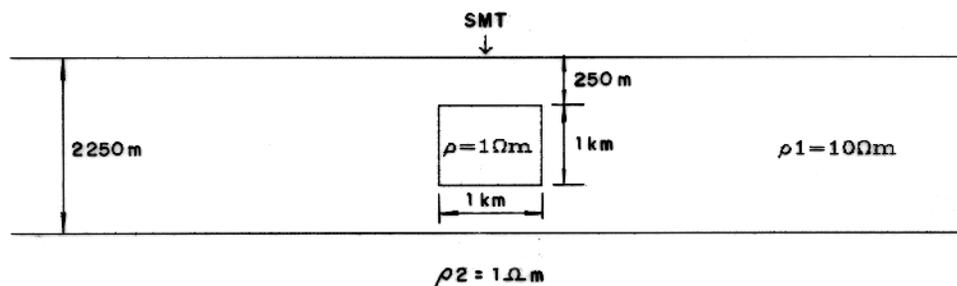


Fig. 51 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente de um dique ($\rho = 1 \Omega\text{m}$) em um meio de duas camadas ($\rho_1 = 10 \Omega\text{m}$, $h_1 = 2250\text{m}$, $\rho_2 = 1 \Omega\text{m}$). A) Modo TE e B) Modo TM.

da fase para a linha de corrente sofre um pequeno deslocamento para frequências muito baixas (períodos longos), em ambos os modos.

Modelo 6B

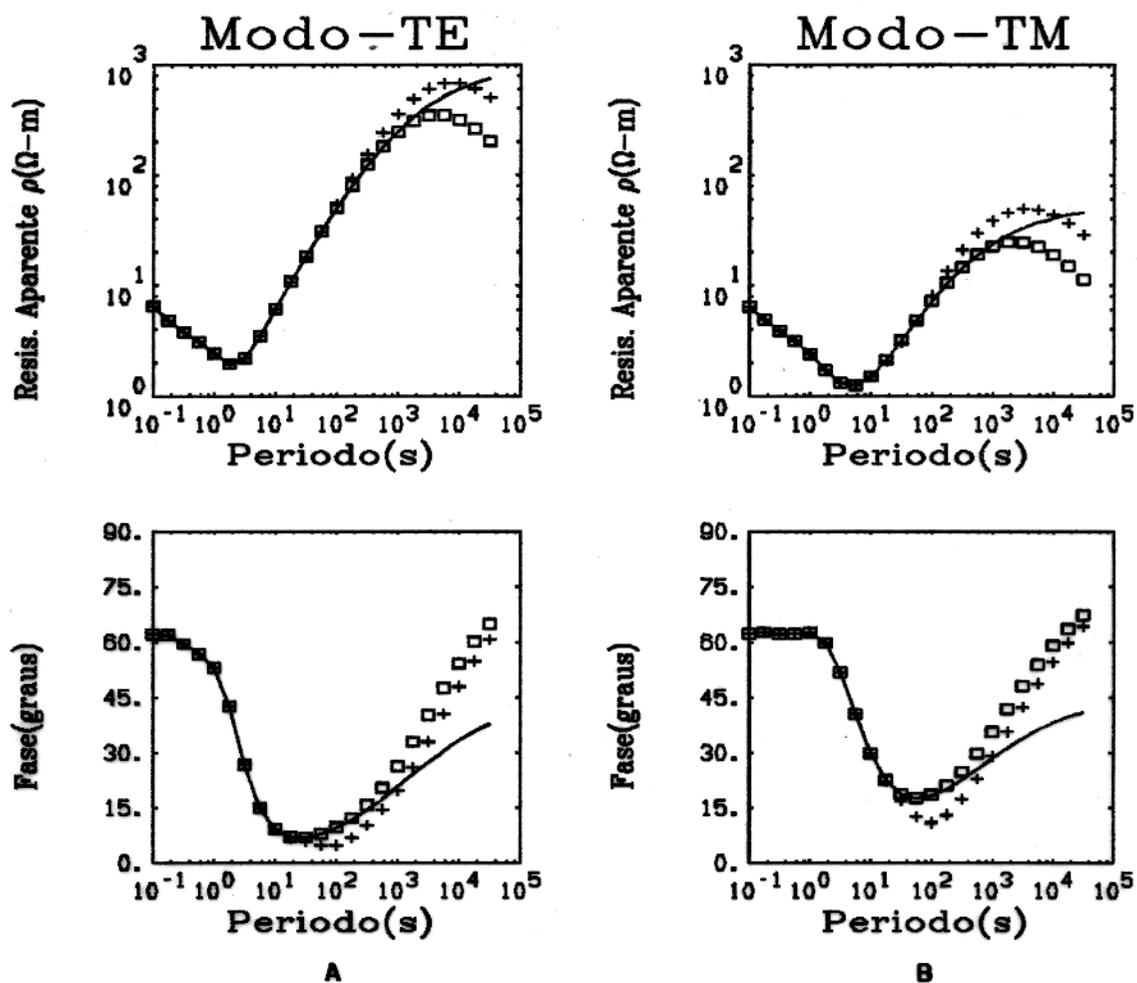
A presença de um substrato resistivo altera sensivelmente a resposta para a linha de corrente e eletrojato gaussiano. Isto pode ser visto através da Fig 52, para um modelo com as mesmas dimensões do modelo anterior, porém o substrato com resistividade $1000 \Omega m$. A partir das frequências de ordem de $0.1 Hz$, se observa um deslocamento das curvas de resistividade aparente e de fase e alterando totalmente estes valores com a redução da frequência. A divergência entre os resultados é observada para ambos os modos.

Modelo 7A

A resposta de sondagem para um modelo constituído por uma camada de resistividade $30 \Omega m$ e espessura de $2000 m$, sobre um substrato de $10 \Omega m$ e uma semi-camada aflorante com resistividade de $5 \Omega m$ e espessura de $200 m$, está ilustrada nas Figs. 53 e 54. O contato entre a primeira camada e a semi-camada está localizado a $240 Km$ do centro da fonte. Para este caso, a semi-camada é considerada como a fonte de campos secundários. A figura 53 mostra a resposta de uma sondagem feita a $100 m$ à esquerda do contato (SMT-1). A divergência entre os resultados dos três tipos, só é observada nas curvas da fase e para valores de frequência muito baixo (período longo). A resposta para a sondagem feita em um ponto diretamente acima da semi-camada é mostrada na Fig. 54, o ponto (SMT-2) está localizado a $100 m$ a direita do contato. É observado o deslocamento das curvas de resistividade aparente devido ao efeito de "static shift", em relação a sondagem SMT-1. Novamente é observada uma pequena divergência nas curvas da fase para a onda plana e linha, e eletrojato para frequências a partir de $10^{-3} Hz$ (período= 10^6), para ambos os modos.

Modelo 7B

A resposta de sondagem para o modelo 7B, que possui as mesmas dimensões do modelo 7A, mudando-se a resistividade do substrato para $1000 \Omega m$, é mostrada nas Figs. 55 e 56. A Fig. 55 mostra a resposta da sondagem feita a $100 m$ à esquerda do contato (SMT-1). Para este modelo é observado uma grande divergência entre os resultados da onda plana e da linha de corrente, e do



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

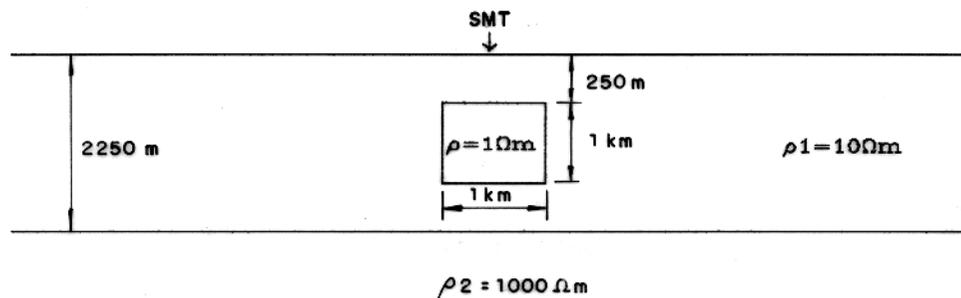
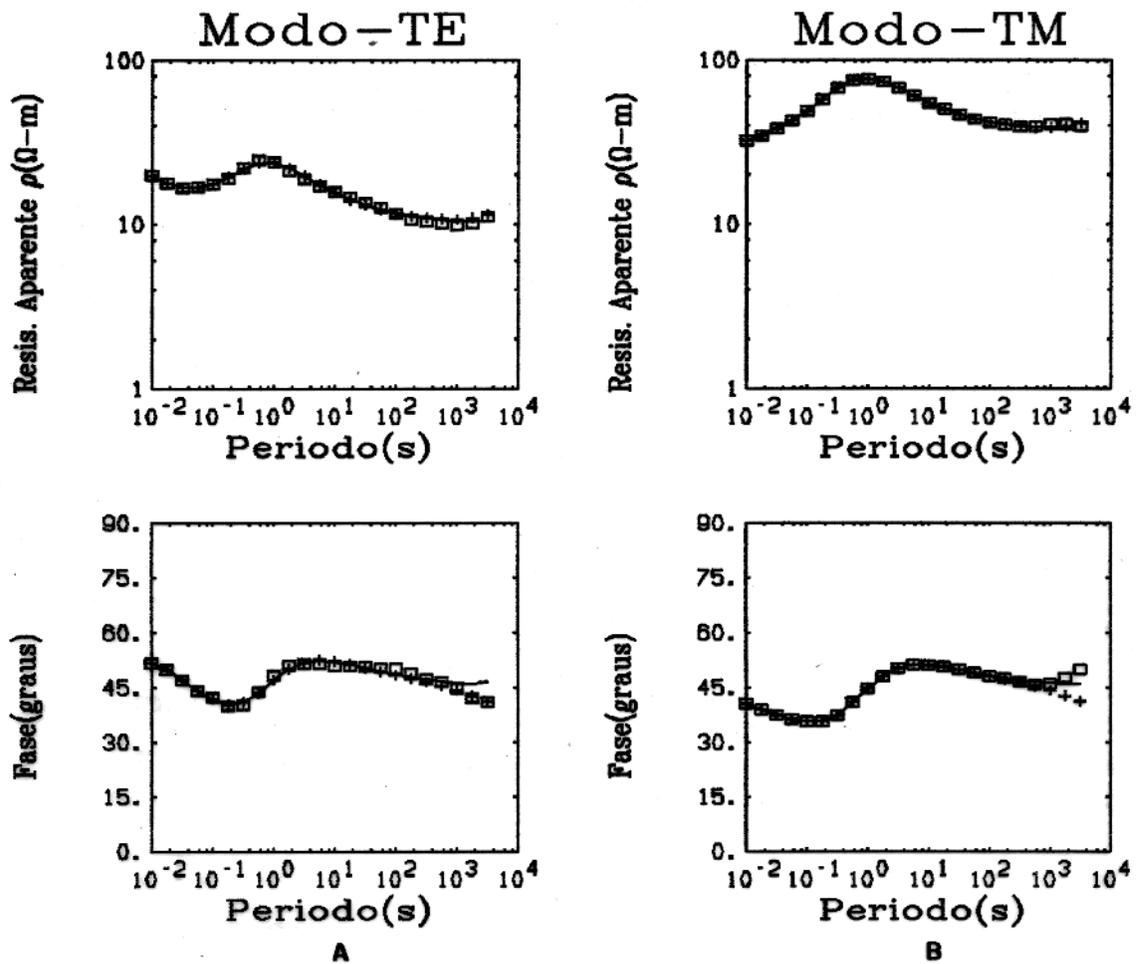


Fig. 52 Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente de um dique ($\rho = 1 \Omega\text{m}$) em um meio de duas camadas (SMT) ($\rho_1 = 10 \Omega\text{m}$, $h_1 = 2250\text{m}$, $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$). A) Modo TE e B) Modo TM.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

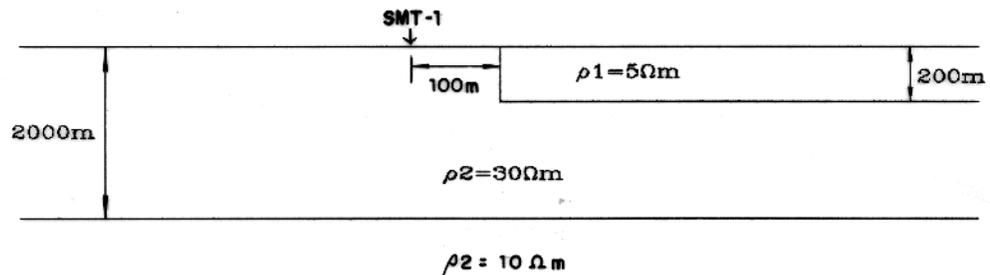
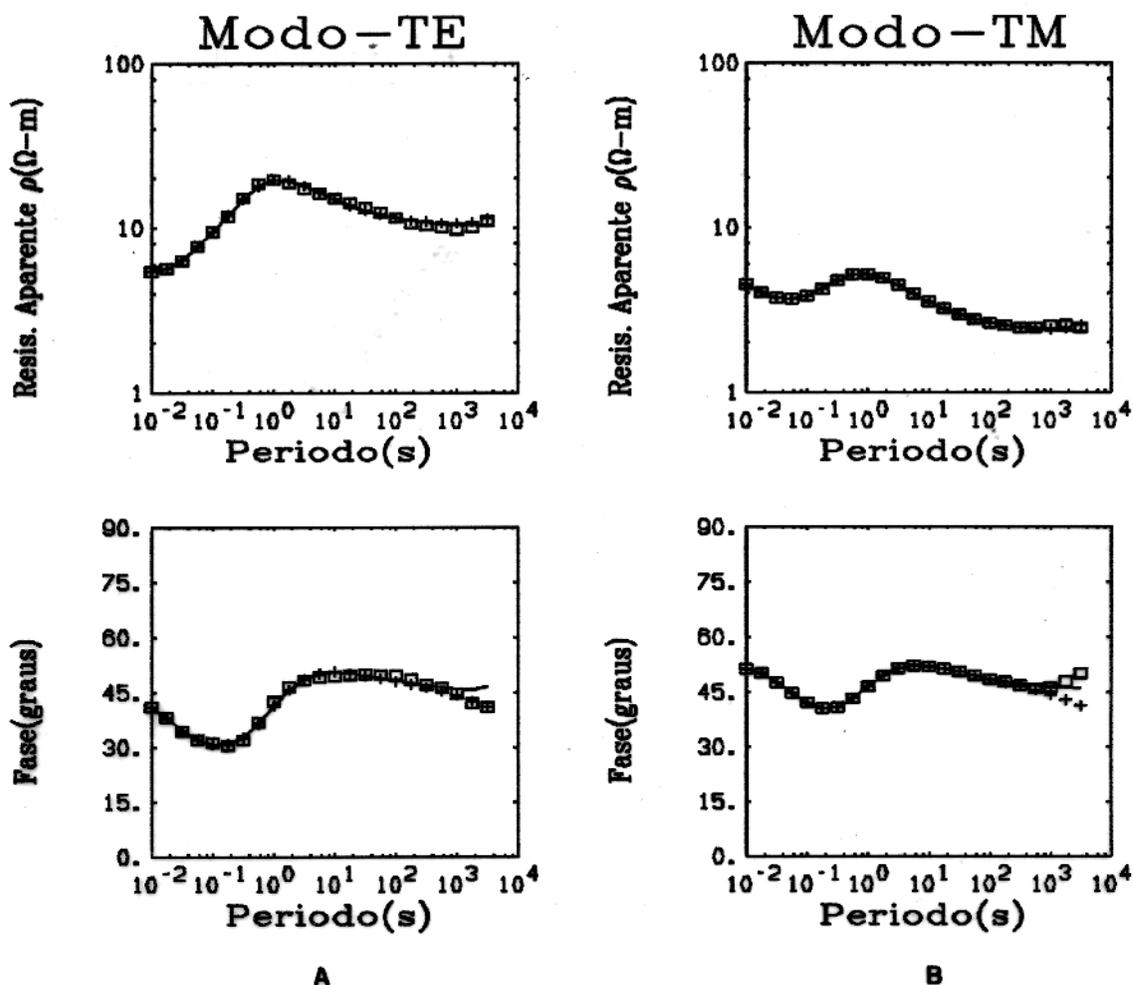


Fig. 53 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de uma semi-camada aflorante ($\rho_3 = 10\Omega\text{m}$). SMT-1 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

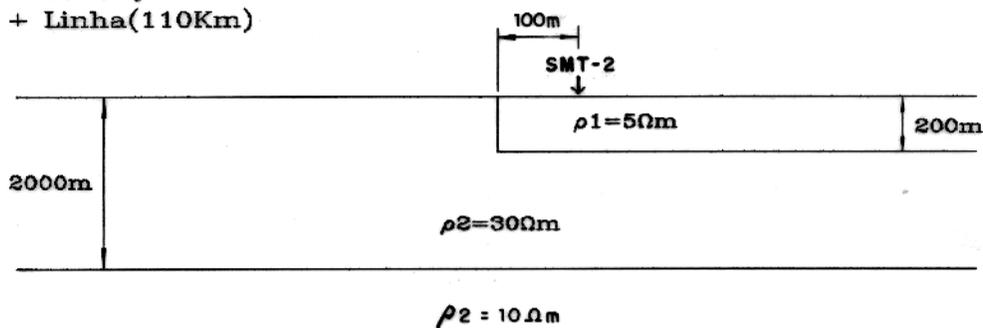
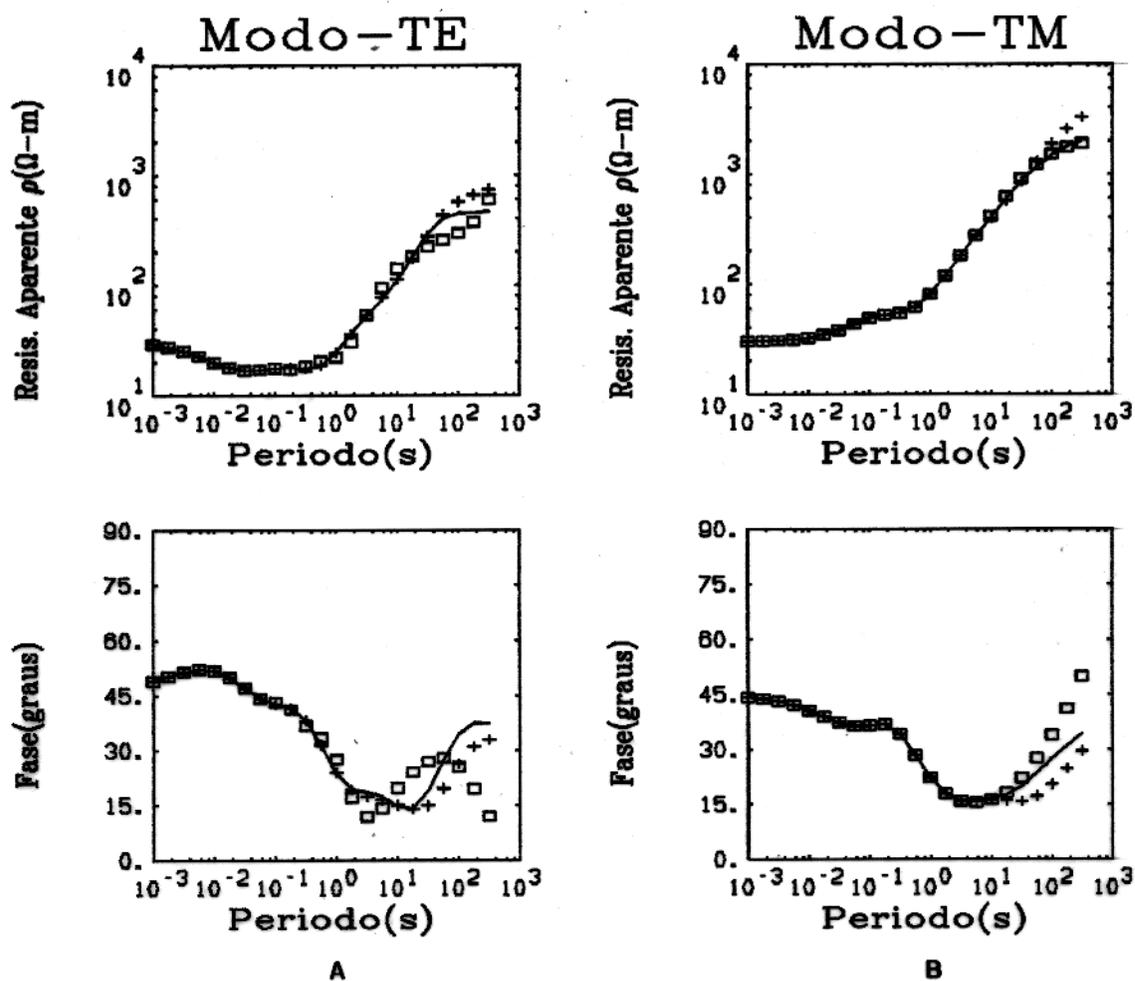


Fig. 54 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de uma semi-camada aflorante ($\rho_3 = 10 \Omega\text{m}$). SMT-2 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

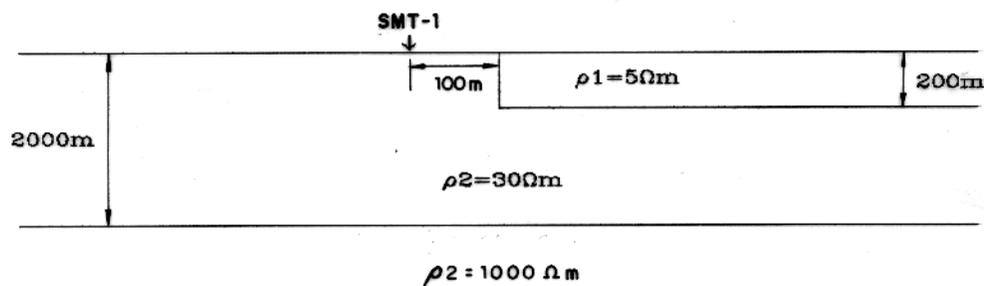
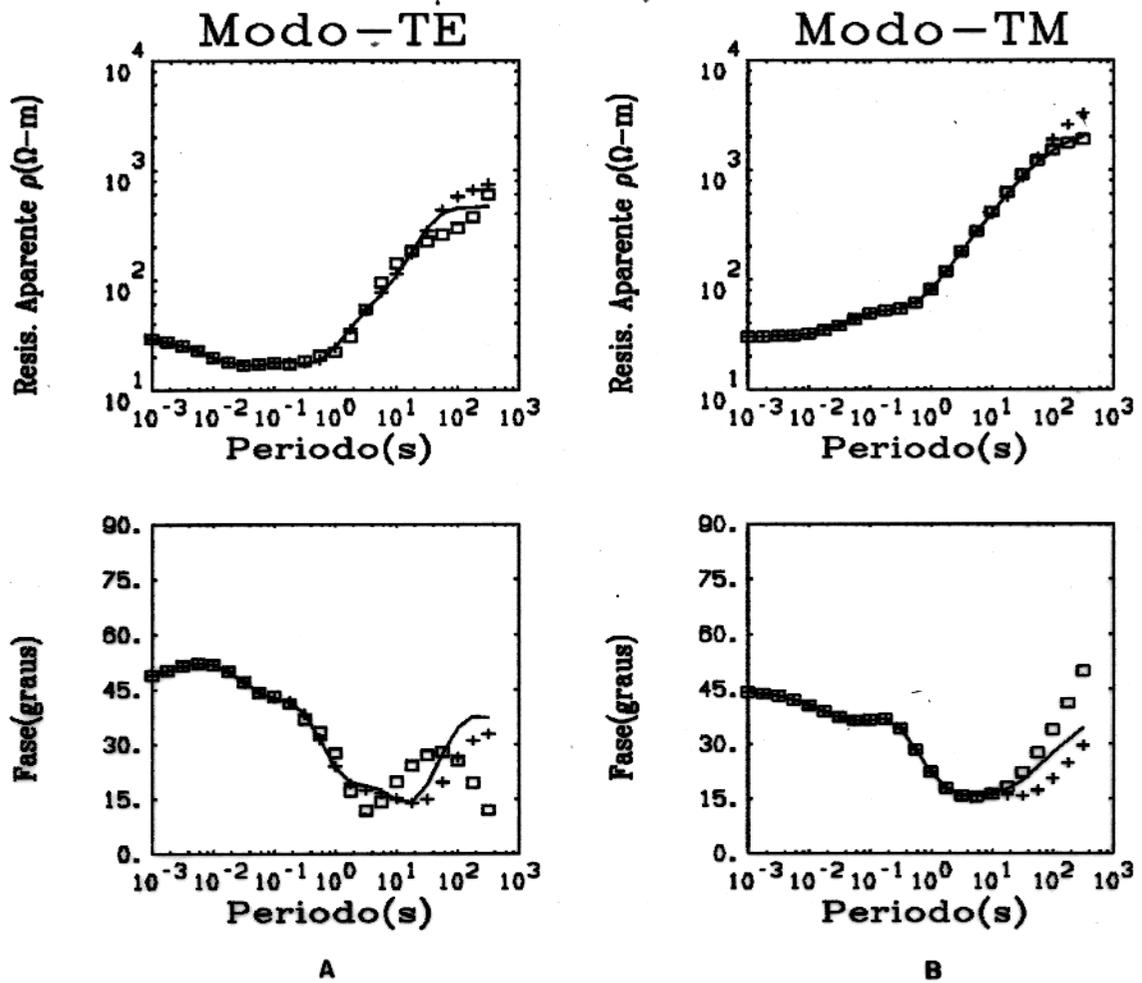


Fig. 55 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de uma semi-camada aflorante ($\rho_3 = 1000\Omega\text{m}$). SMT-1 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

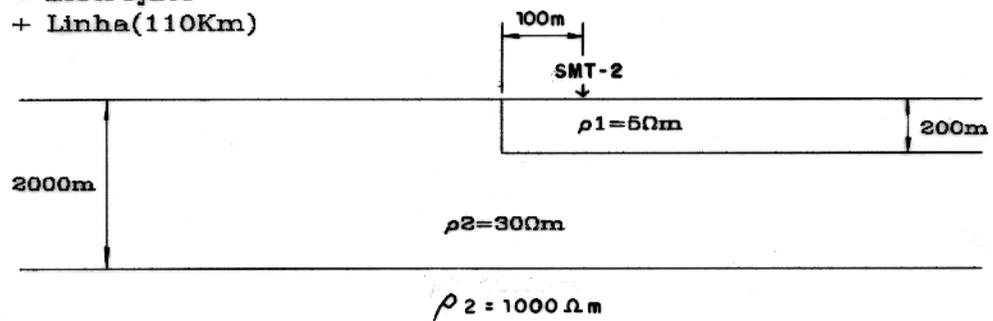


Fig. 56 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de uma semi-camada aflorante ($\rho_3 = 1000 \Omega\text{m}$). SMT-2 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.

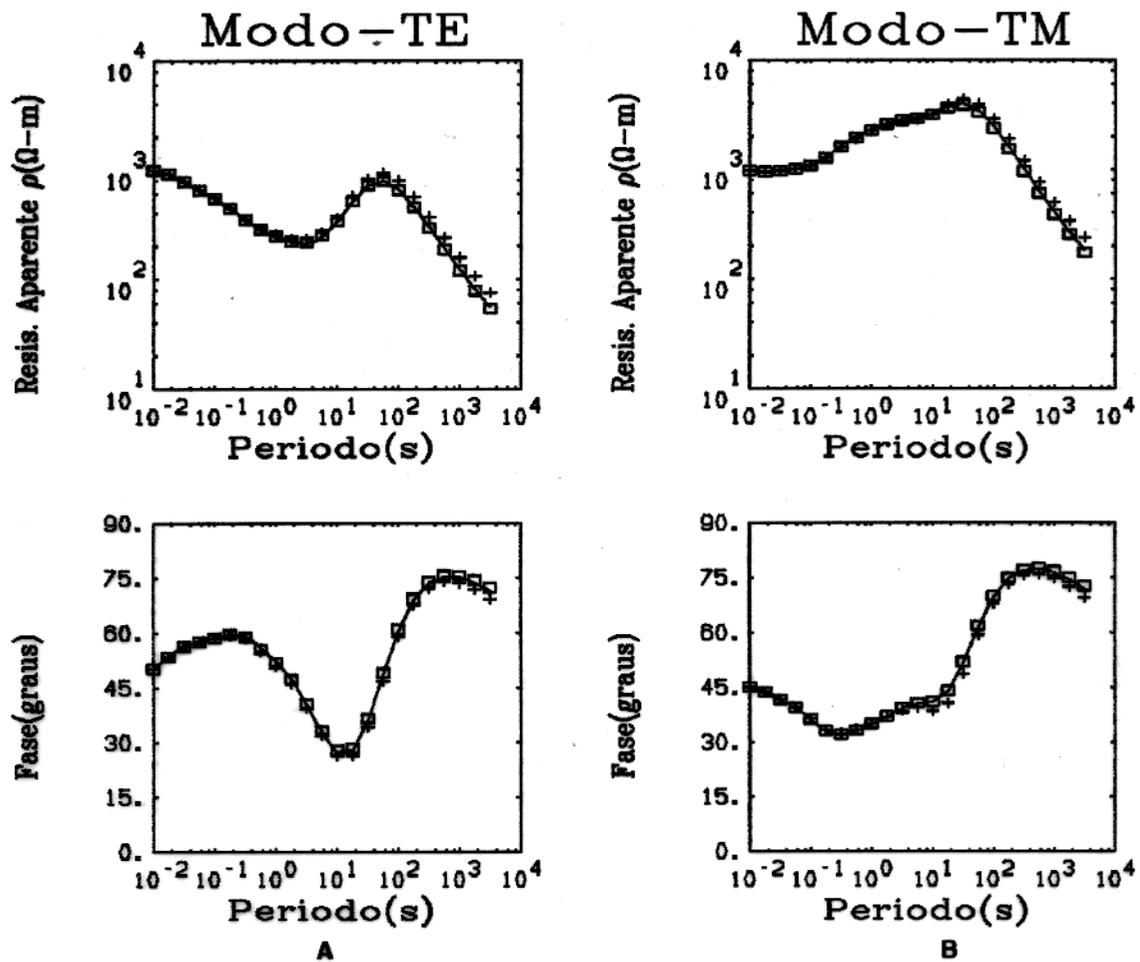
eletrojato, a medida que reduz a frequência (aumento do período). Para o modo TM, a divergência entre os resultados do eletrojato e da onda só é observada nas curvas da fase. A sondagem em um ponto a 100 m (SMT-2), à esquerda do contato é mostrada na Fig. 56. É observado novamente o efeito de "static shift" em relação a sondagem SMT-1. A divergência entre os resultados de resistividade aparente para os três tipos de fontes ocorre principalmente para o modo TE, e nas curvas da fase para ambos os modos.

Modelo 8A

As respostas de sondagem magnetotelúrica em dois pontos diferentes, para um modelo consistindo de um meio de duas camadas, com um corpo aflorante imerso na primeira camada são mostradas nas Figs.57 e 58. O modelo é composto por uma camada com resistividade de $1000 \Omega m$ e espessura de $100 Km$ e um substrato com resistividade de 10Ω , e corpo aflorante de $20 Km$ de largura, espessura de $2 Km$ e resistividade de $10 \Omega m$. O centro do corpo está localizado a $240 Km$ do ponto diretamente abaixo da linha ou centro do eletrojato. A resposta da sondagem feita em um ponto a $2 Km$ do corpo (SMT-1) mostra uma pequena divergência entre a resposta de ondas planas e o resultado de linha corrente (Fig.57). Não se observa divergência entre os resultados de ondas planas e eletrojato. A sondagem feita em um ponto sobre o corpo (SMT-2) localizado a $2 Km$ do contato esquerdo, é mostrado na Fig. 58. Para esse ponto (SMT-2), as curvas de resistividade aparente e fase para modo-TE, tem forma semelhante à resposta de um meio de três camadas, sendo a primeira camada com resistividade e espessura do corpo. Para ambos os modos, a divergência entre os resultados é praticamente imperceptível.

Modelo 8B

O modelo 8B, é composto por um meio de duas camadas e um corpo aflorante imerso na primeira camada com as mesmas dimensões do modelo 8A. A primeira camada tem resistividade igual $10 \Omega m$ e espessura de $100 Km$, o substrato de resistividade $1000 \Omega m$ e a resistividade do corpo igual a $1000 \Omega m$. A resposta de uma sondagem feita a $2 Km$ à direita do corpo (SMT-1) é mostrada na Fig. 59. Para esse ponto, a resposta é mais influenciada pela resistividade da primeira camada. Com redução da frequência (períodos longos), nota-se a influência da resistividade do substrato.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

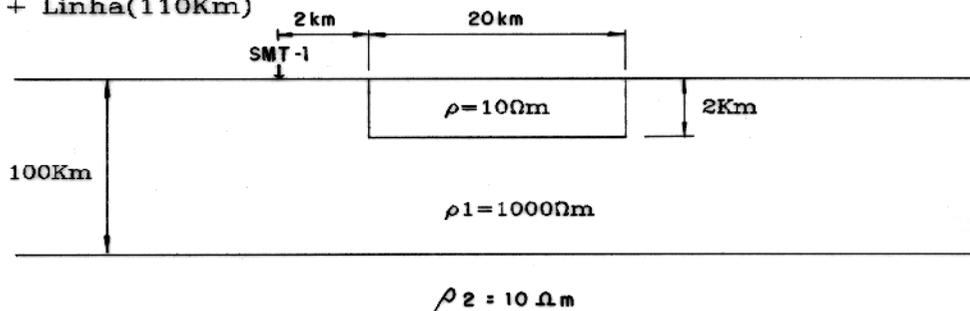
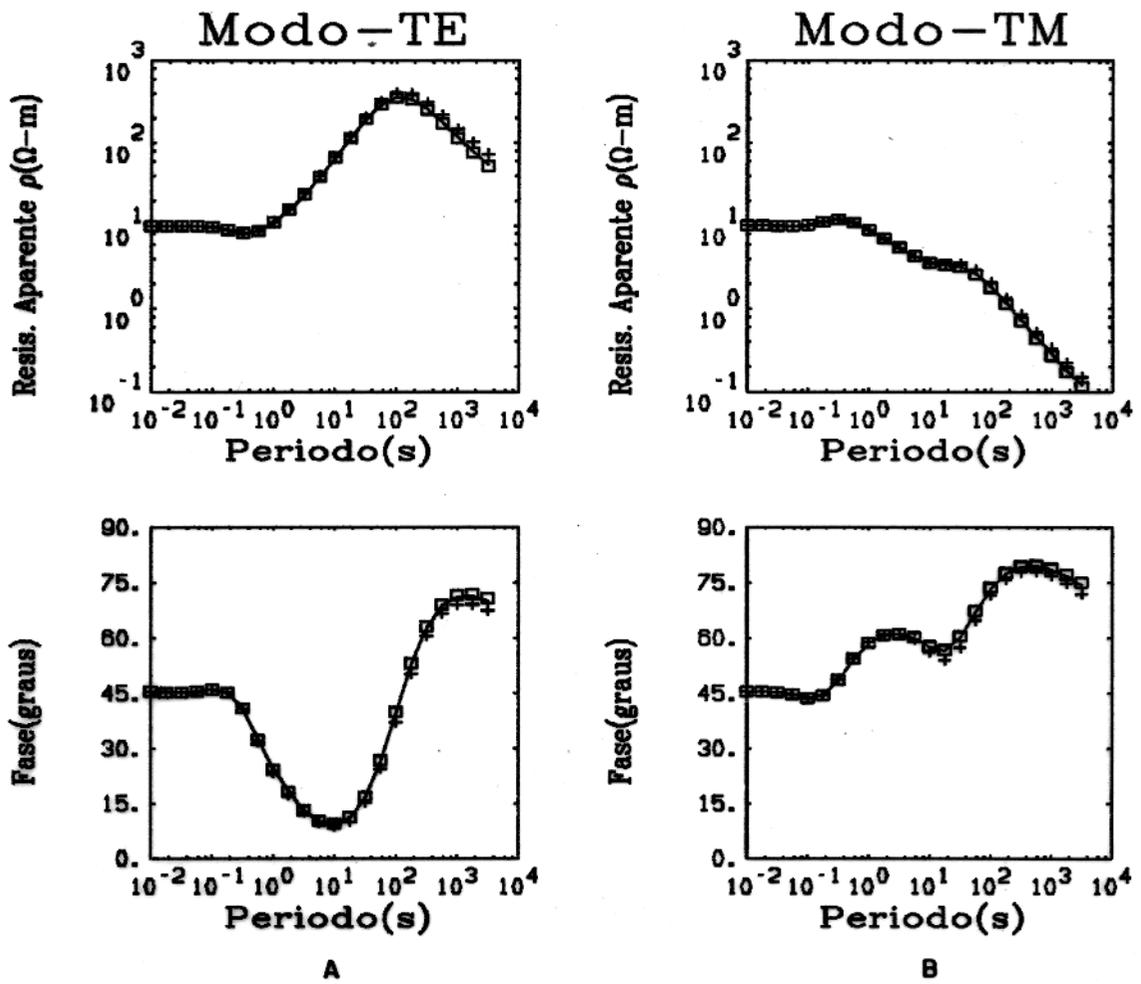


Fig. 57 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 8A. SMT-1 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

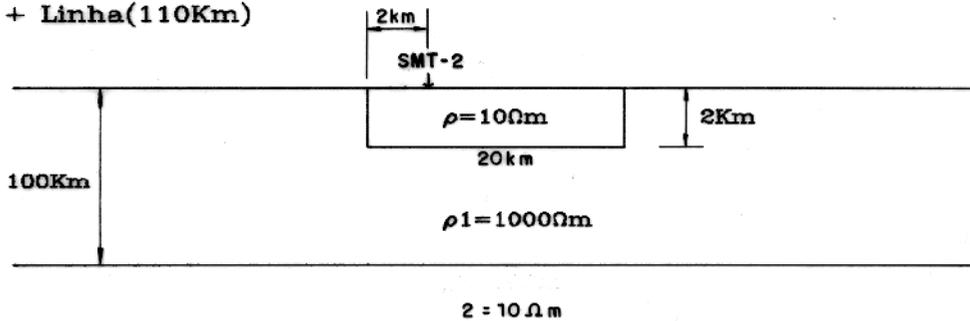
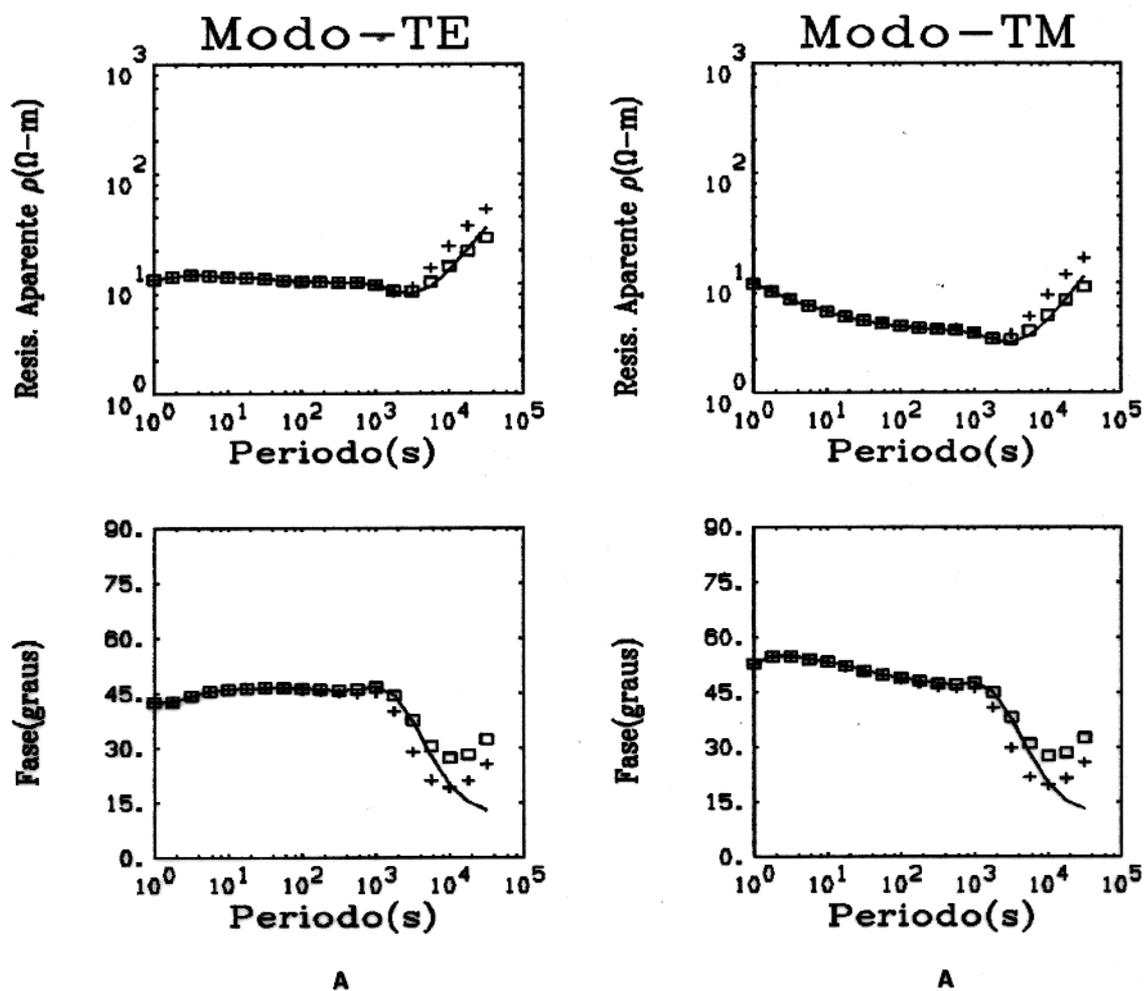


Fig. 58 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 8A. SMT-2 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

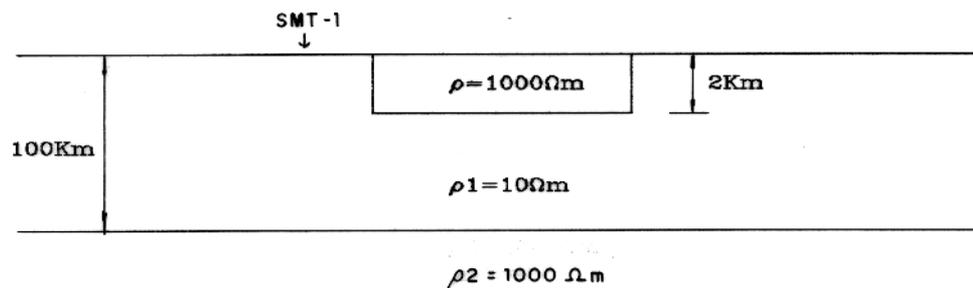


Fig. 59 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 8B. SMT-1 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.

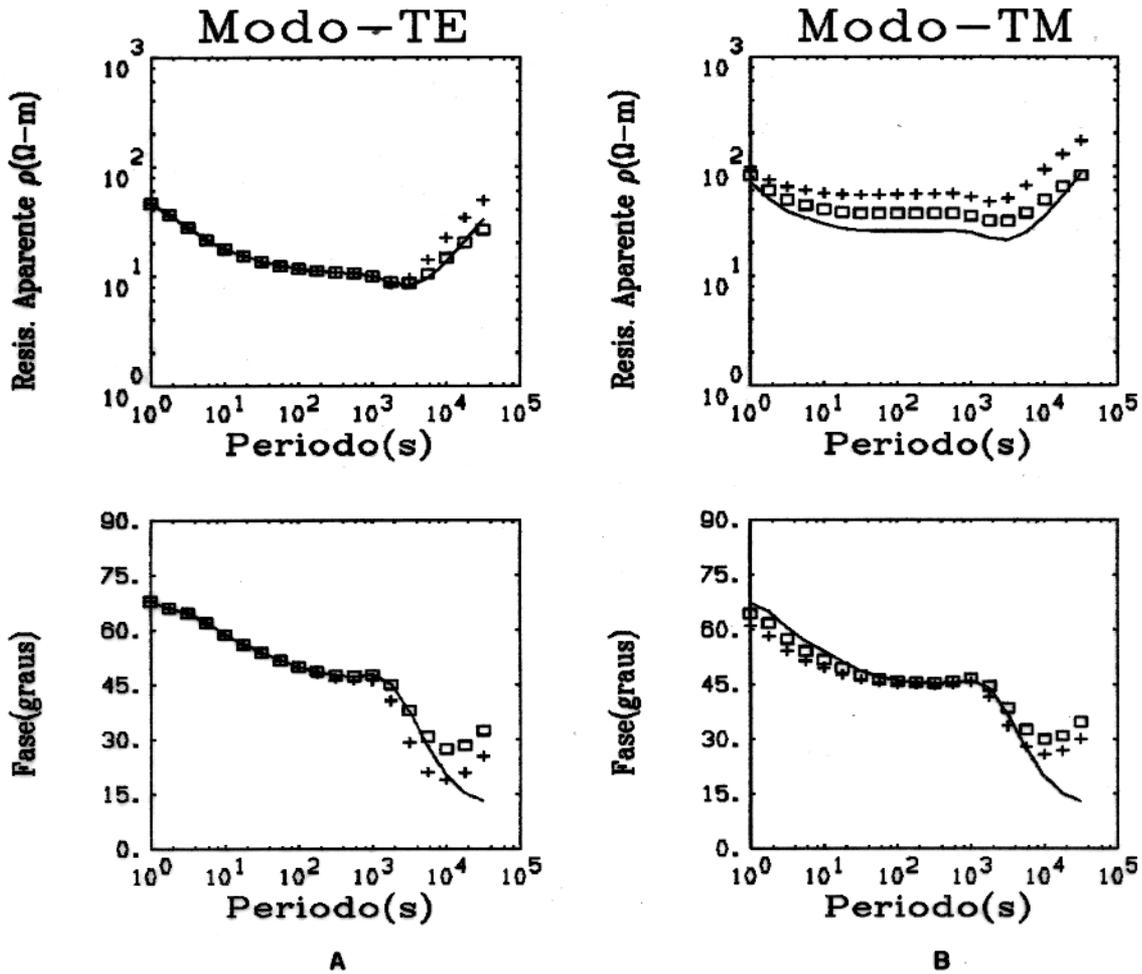
e, devido ao alto valor de resistividade, observa-se divergências entre as curvas correspondentes à onda plana, à linha e ao eletrojato. A resposta de uma sondagem feita diretamente acima do corpo a 2 Km da do contato esquerdo (SMT-2) é mostrada na Fig. 60. Para este ponto, a divergência entre os resultados para o modo TE só é observada para baixos valores de frequência (Fig. 60A). Para o modo TM, as curvas para a linha e para o eletrojato sofrem um deslocamento em relação a curva para a onda plana, sendo maior o deslocamento quando a fonte é a linha de corrente (Fig 60B).

Modelo 9A

É bem conhecido que a resposta de sondagens em meios bidimensionais dependem do ponto de observação em relação ao corpo. Um exemplo pode ser visto nas Figs. 61 e 62 para um modelo de um graben em um meio de três camadas, sendo o modelo constituído por uma camada superficial de resistividade $10 \Omega m$ e espessura de 250 m, uma segunda camada com resistividade de $1000 \Omega m$ sobre um substrato com resistividade de $10 \Omega m$. A interface entre a segunda camada e o substrato está localizada a 100 Km abaixo da superfície. O graben tem espessura de 1800 m por 20 Km de largura e seu centro está localizado a 240 Km do centro da fonte. A resposta da sondagem feita a 2 Km à esquerda do contato (SMT-1), tem maior influência do meio primário, não mostrando divergência entre o resultado para os três tipos de fontes. Para um ponto situado acima da heterogeneidade (Fig. 62), a resposta é bastante influenciada pela fonte secundária (gaben), se aproximando da resposta de um meio de três camadas, sendo a primeira camada com resistividade de $10 \Omega m$ e espessura de 2000 m (camada + corpo). Para este modelo a divergência entre os resultados para os três tipos de fontes é, praticamente, imperceptível.

Modelo 9B

As sondagens para um modelo de um graben com as mesmas dimensões do modelo 9A, sendo a resistividade da primeira camada igual a $10 \Omega m$, a segunda camada com resistividade de $100 \Omega m$ e o substrato com resistividade de $1000 \Omega m$, são mostradas nas Figs. 63 e 64. A Fig. 63 mostra a resposta de uma sondagem (SMT-1) feita a 2 Km à direita do contato. Para esse ponto ocorre um deslocamento da curva de resistividade aparente, referente à linha de corrente para valores de frequência da ordem de $10^{-3} Hz$ (período = $10^3 s$) para ambos os modos. O efeito na fase é observado tanto para linha de corrente quanto para o eletrojato. A sondagem (SMT-2)



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

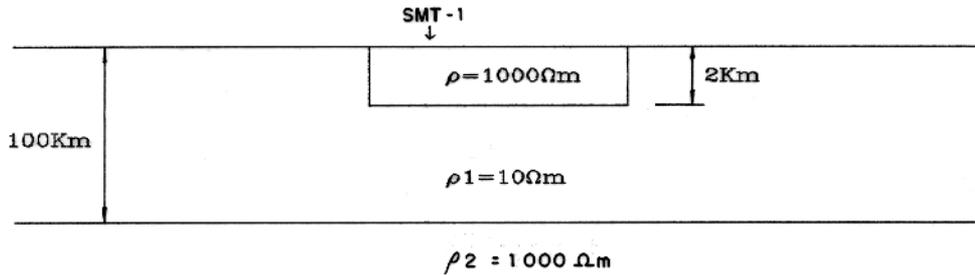
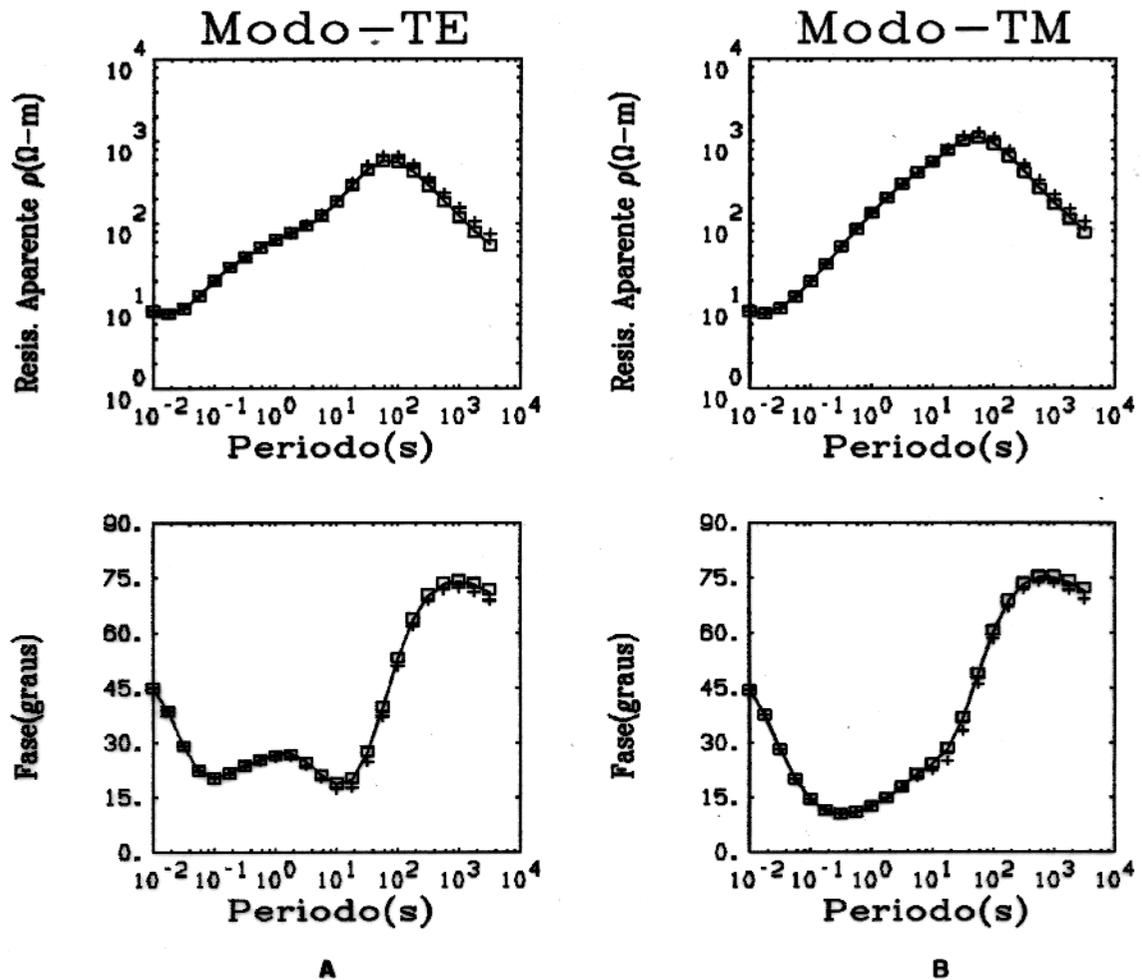


Fig. 60 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 8B. SMT-2 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

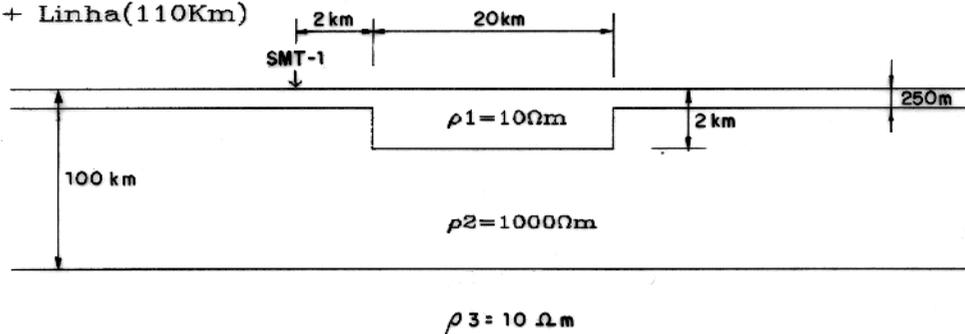
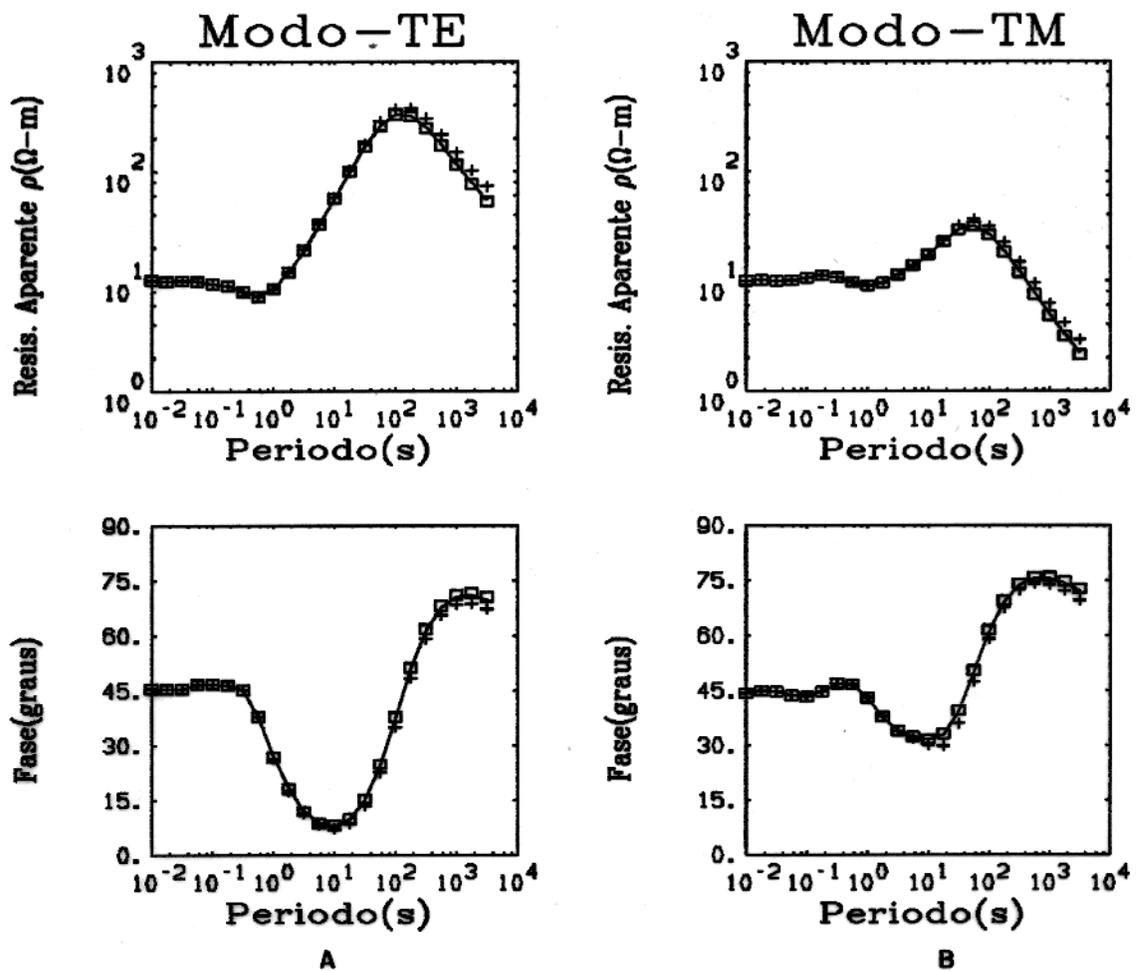


Fig. 61 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 9A. SMT-1 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

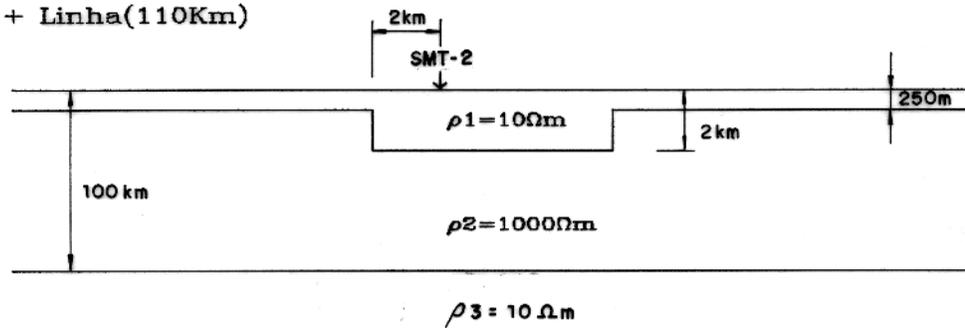
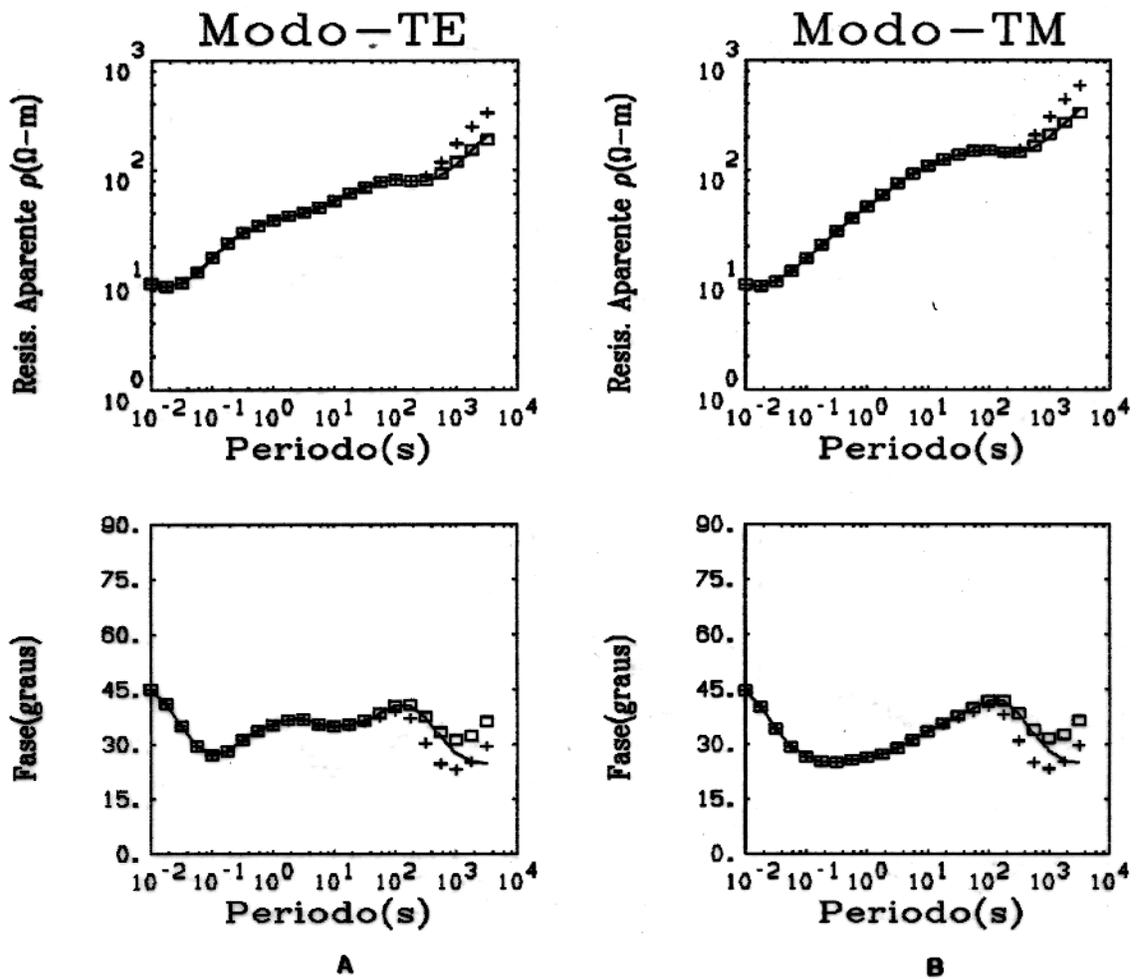


Fig. 62 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 9A. SMT-2 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

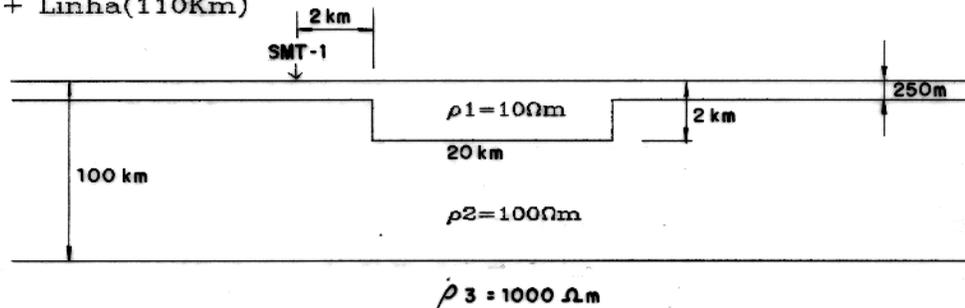
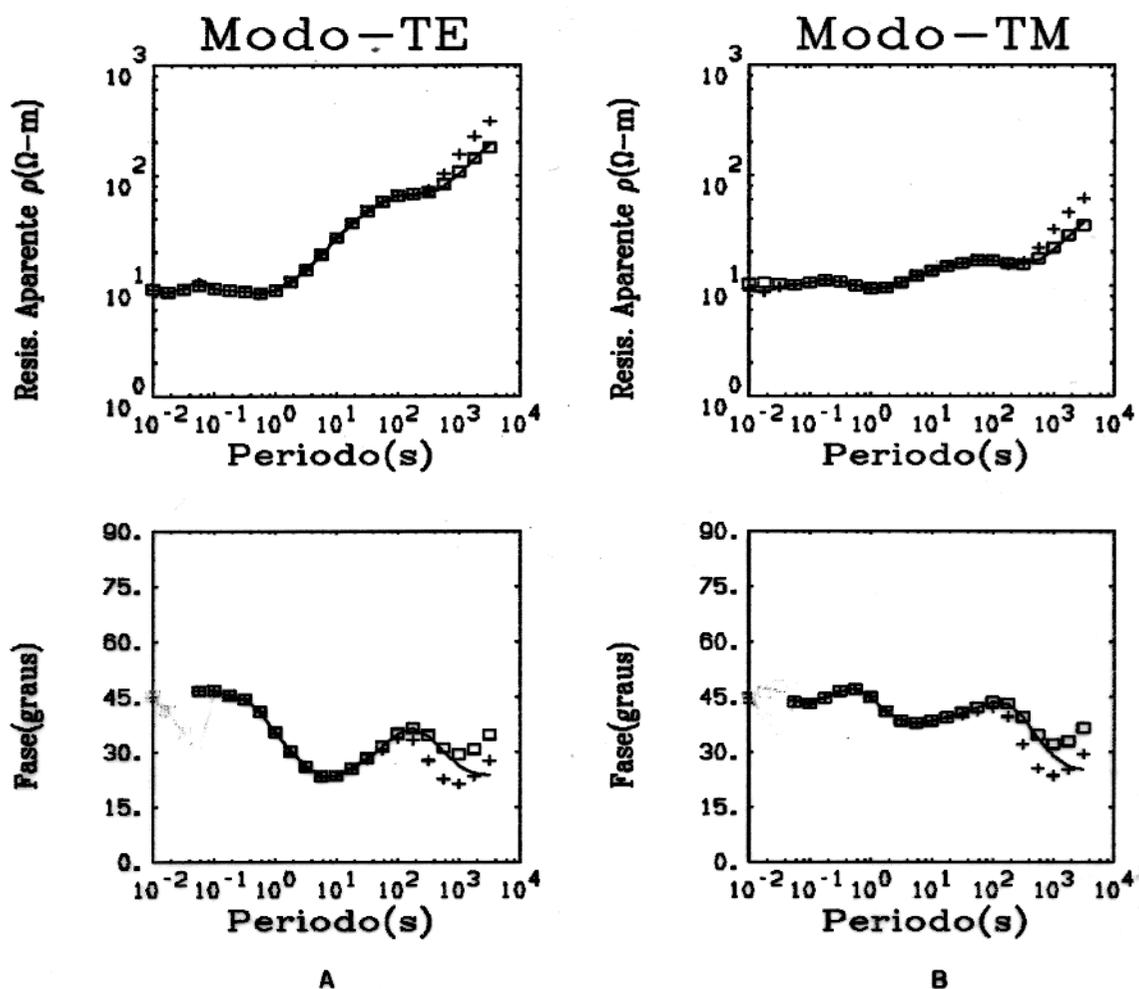


Fig. 63 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 9B. SMT-1 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

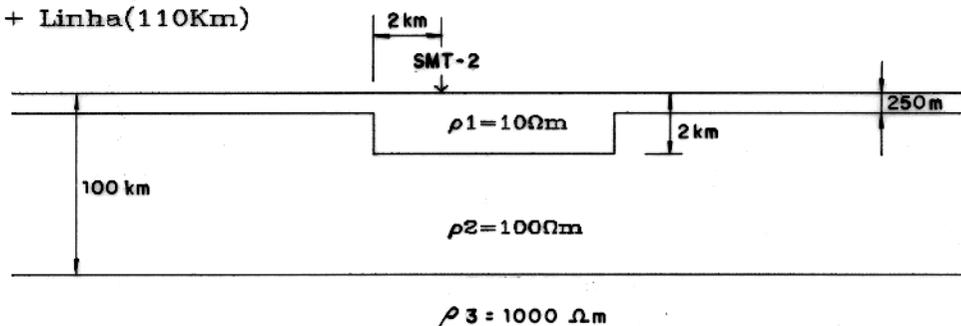


Fig. 64 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 9B. SMT-2 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.

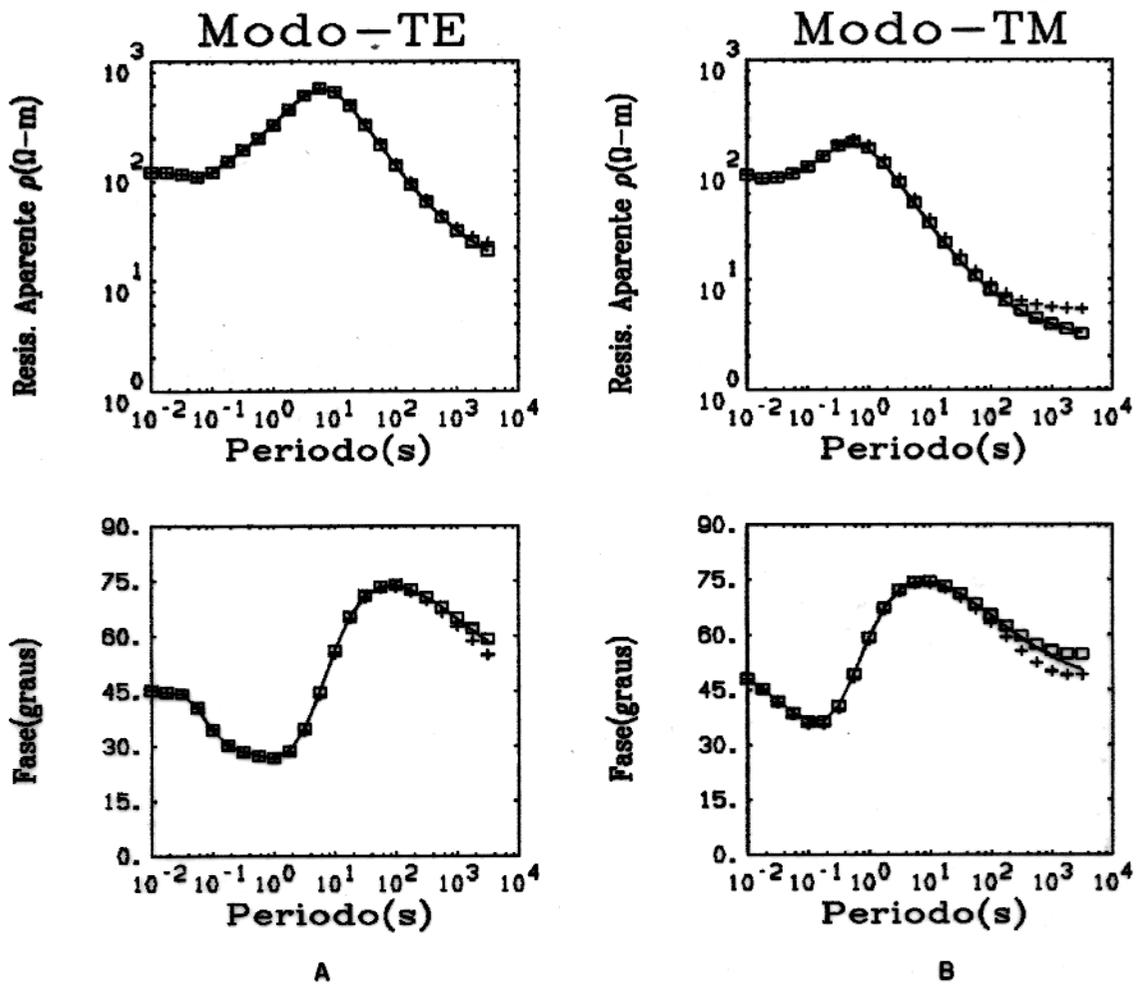
feita a 2 Km à direita do contato, ou seja, em um ponto diretamente acima do graben, é mostrada na Fig. 64. Para este ponto, o comportamento das curvas é semelhante ao do caso anterior, onde o efeito da fonte é observado apenas nas curvas de resistividade aparente para a linha de corrente. Nas curvas da fase, para baixos valores de frequências (períodos longos), nota-se claramente o efeito em ambos os tipos de fontes, para os dois modos considerados.

Modelo 10A

As sondagens para um modelo de um horst aflorante, em um meio de três camadas, são ilustradas nas Figs. 65 e 66. A camada 1 tem resistividade de $100 \Omega m$ e espessura de 2 Km, a camada 2 tem resistividade de $1000 \Omega m$ com espessura de 28 Km e substrato de $10 \Omega m$. O centro do horst está a 240 Km do centro da fonte. A sondagem SMT-1, feita a 2 Km à esquerda do contato, é mostrada na Fig. 65. Para este ponto, é observado um perfeito ajuste entre as curvas de resistividade aparente e fase, para o eletrojato gaussiano e onda plana, em ambos os modos. Um pequeno deslocamento é observado nas curvas de resistividade aparente e fase de linha corrente para o modo TM. A Fig. 66 mostra as curvas de resistividade aparente e fase para um ponto diretamente acima do horst, situado a 2 Km à direita do contato (SMT-2). Para este ponto, o resultado é semelhante ao anterior, ou seja, é observado uma divergência apenas nas curvas de linha de corrente para o modo TM, para valores de frequências da ordem de $10^{-2} Hz$.

Modelo 10B

As Figs. 67 e 68 mostram as sondagens SMT-1 e SMT-2, para um modelo com as mesmas dimensões do modelo anterior, trocando-se os valores de resistividade entre a segunda camada e o substrato, ou seja, $\rho_2 = 10 \Omega m$ e $\rho_3 = 1000 \Omega m$, ao invés de $\rho_2 = 1000 \Omega m$ e $\rho_3 = 10 \Omega m$, como no modelo anterior. A Fig. 67 mostra a resposta de uma sondagem feita em um ponto a 2Km, à esquerda do contato (SMT-1) e a Fig. 68 mostra a resposta da sondagem feita a 2 Km, à direita do contato (SMT-2). Para o modo TE (Fig. 67A e 68A) não são observadas divergências entre as curvas de resistividade aparente de onda plana e eletrojato gaussiano. Entretanto, uma pequena divergência é observada na resistividade aparente da linha de corrente, em relação a da onda plana. Ainda para o modo TE, ocorre divergência entre as curvas da fase para os três tipos de fontes. A intensidade do efeito é maior quando a fonte está em posição perpendicular ao horst, que corresponde ao modo TM. Isto pode ser visto nas Figs. 66B e 67B. Para ambas as sondagens,



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

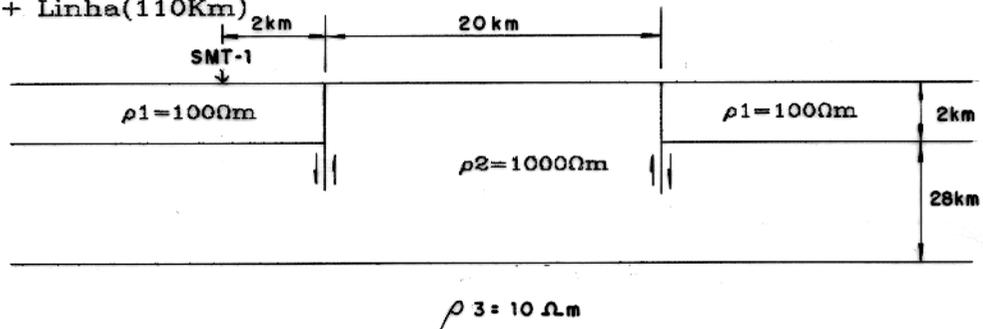
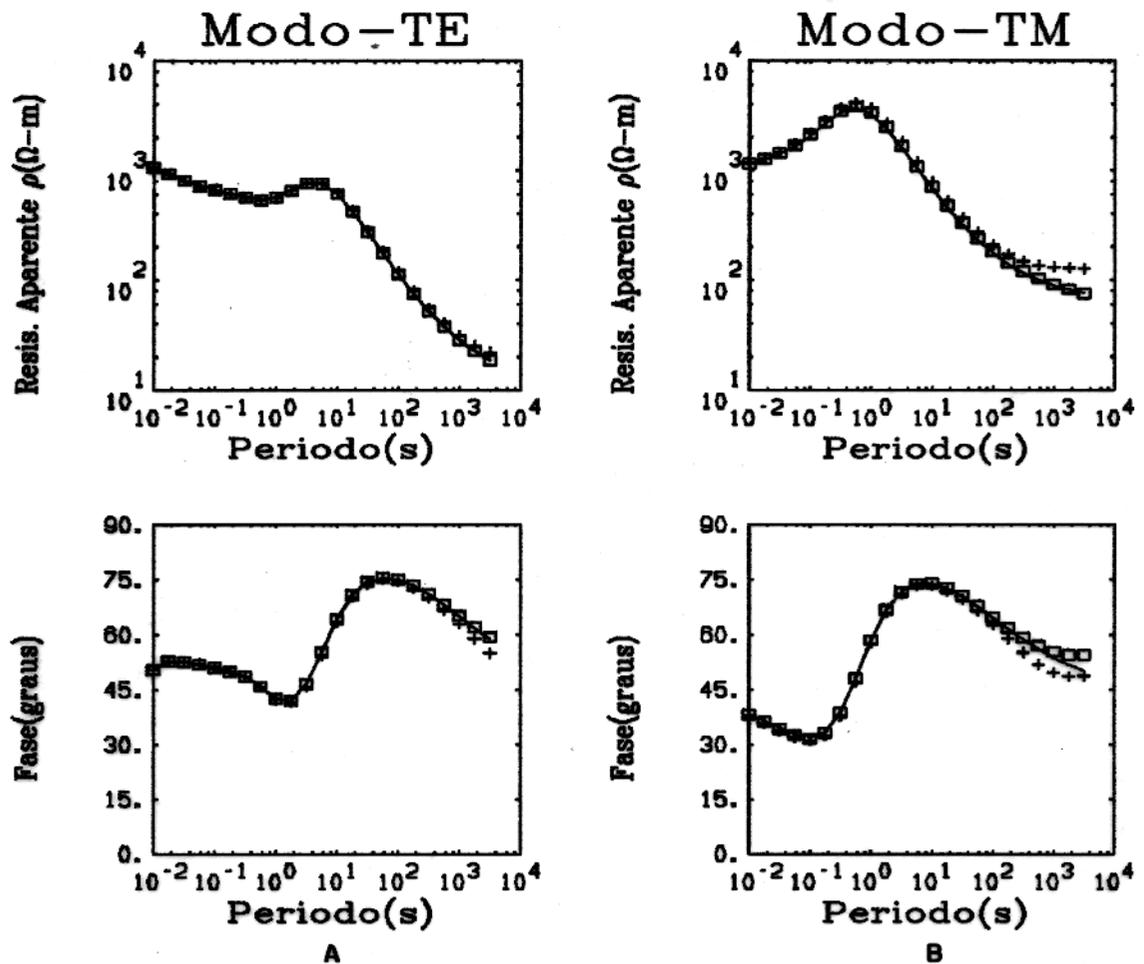


Fig. 65 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 10A. SMT-1 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

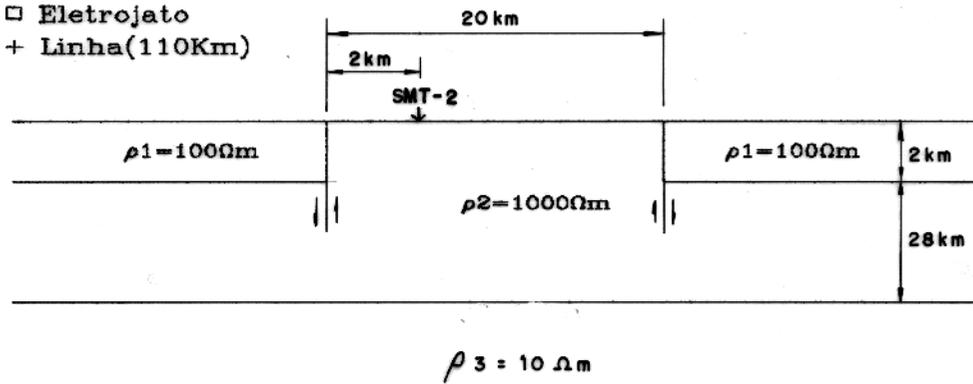
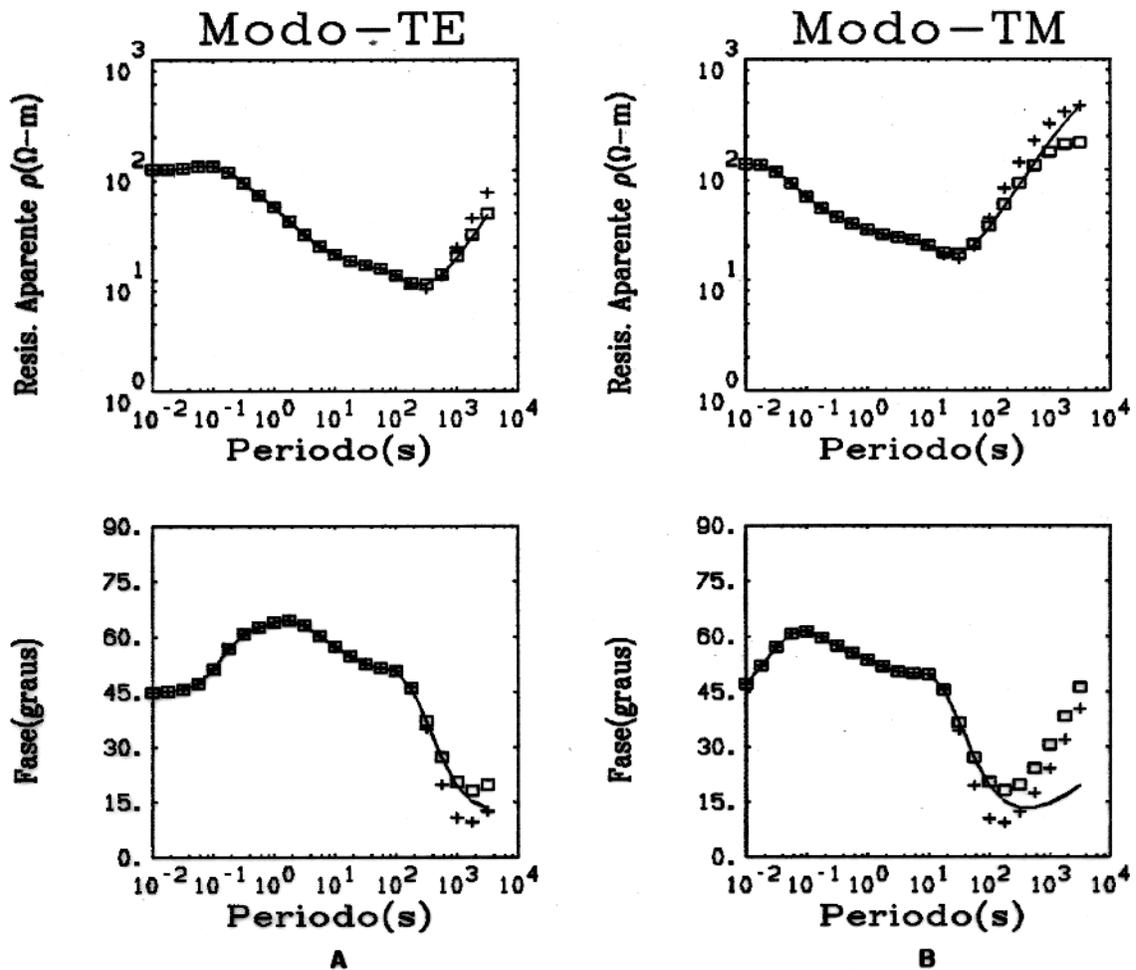


Fig. 66 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 10A. SMT-2 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

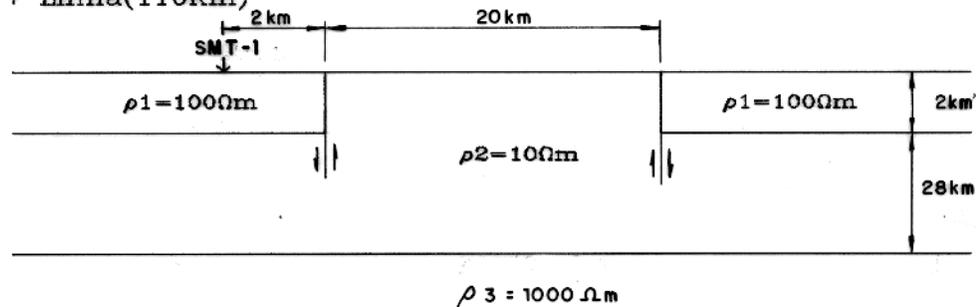
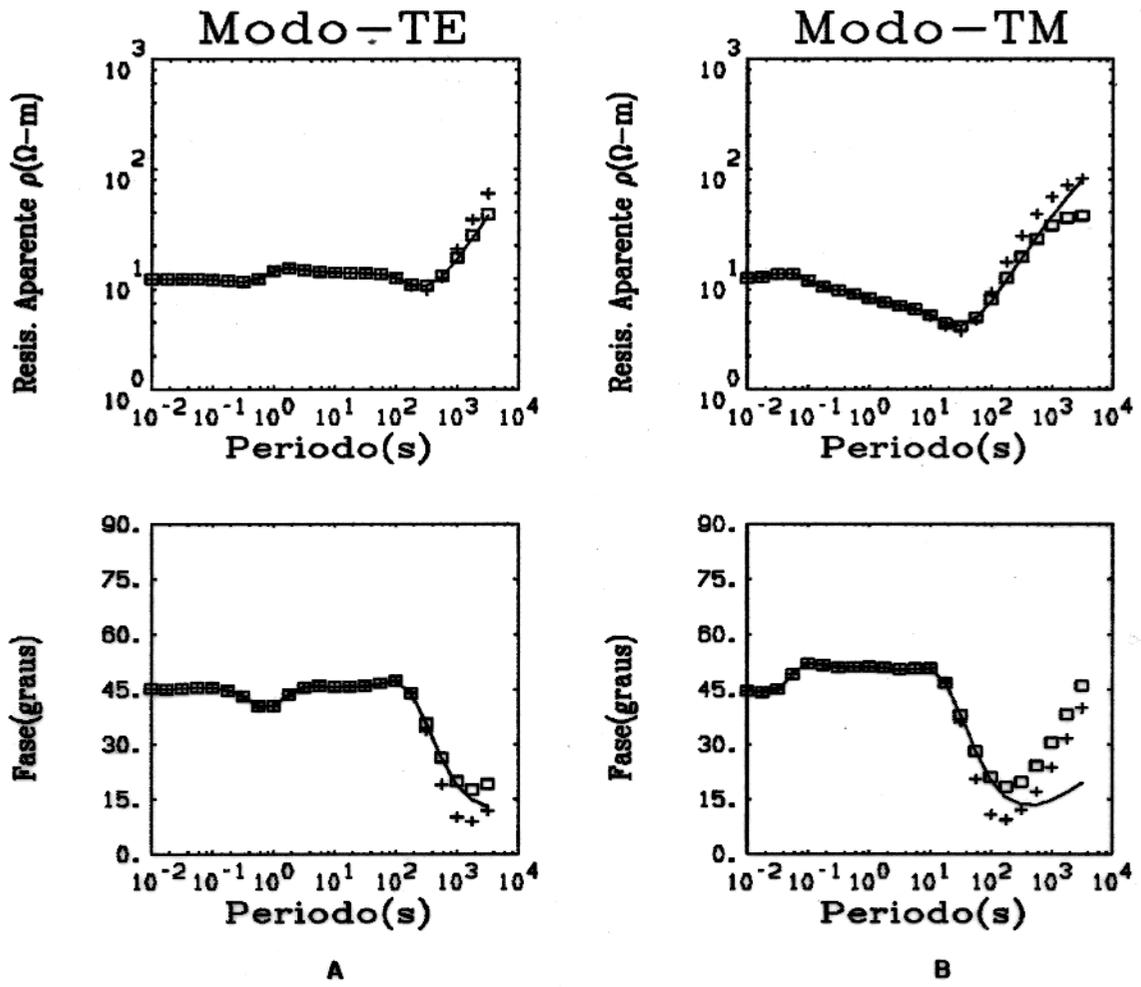


Fig. 67 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 10B. SMT-1 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.



FONTES

- Ondas planas
- Eletrojato
- + Linha(110Km)

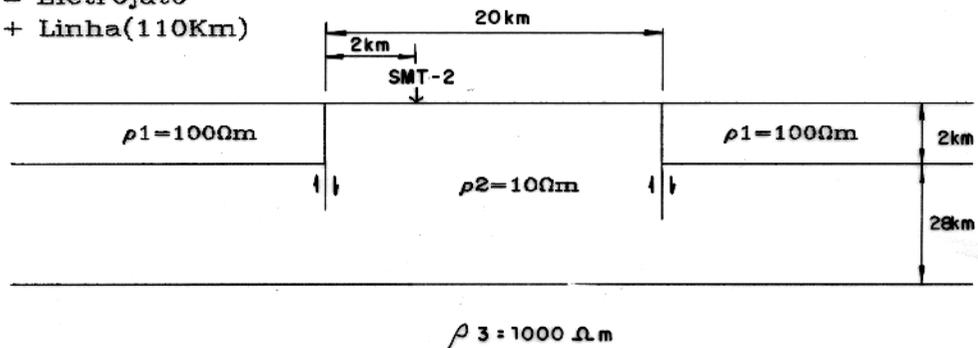


Fig. 68 Curvas de resistividade aparente e fase correspondentes à onda plana, ao eletrojato e à linha de corrente para o modelo 10B. SMT-2 ponto da sondagem. A) Modo TE e B) modo TM.

observa-se claramente, uma divergência entre os resultados da linha de corrente e do eletrodo gaussiano em relação a onda plana. O efeito na fase é observado em frequências mais altas que na resistividade aparente. Em todo caso, podemos observar que a intensidade do efeito cresce sempre com o aumento da resistividade do substrato.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Simulação da fonte

Neste trabalho, os efeitos do eletrojato equatorial foram simulados por dois tipos de fontes: a) uma linha infinita de corrente, e b) uma distribuição plana em que intensidade de corrente tenha uma dependência gaussiana com uma coordenada horizontal. Foi obtida uma resposta aproximada para a resistividade aparente e fase, para modelos unidimensionais e bidimensionais e comparados aos resultados da onda plana.

As respostas indicam uma melhor aproximação dos resultados de ondas planas, quando a fonte empregada é um eletrojato gaussiano. Quando empregada a linha para simular o efeito do eletrojato equatorial, é sempre observado uma maior divergência com os resultados da onda plana que os resultados para a distribuição gaussiana, isto devido ao fato da linha ser uma fonte bastante concentrada. Em termos gerais, pode-se dizer que o eletrojato equatorial é melhor representada pela distribuição gaussiana de corrente.

Efeito da frequência

Para valores de frequências altas, são praticamente indistinguíveis as respostas para resistividade aparente e fase dos três tipos de fontes, onda plana, distribuição gaussiana e linha de corrente. A redução da frequência provoca divergência entre os resultados da linha e do eletrojato gaussiano em relação ao da onda plana. Isto pode acarretar sérios erros de interpretação quando o método magnetotelúrico é empregado na investigação de camadas profundas, em regiões sob a influência de eletrojato.

Efeito com resistividade do meio

A intensidade do efeito da fonte é crescente com a resistividade do meio, ou seja, para meios mais resistivos ocorre uma maior intensidade do efeito, provocando maior divergência entre os resultados de resistividade aparente e fase para o eletrojato e onda plana. Para meios estratifica-

dos, a intensidade do efeito depende principalmente das resistividades das camadas mais profundas.

Efeito em relação a distância à fonte

Para meios unidimensionais (homogêneos e estratificados), o cálculo da resistividade aparente e fase, depende da posição em relação à fonte, na qual é feita a medida. Em pontos próximos ao ponto diretamente abaixo da linha ou do centro do eletrojato, o efeito provoca um deslocamento para baixo nos perfis de resistividade aparente e para cima nos perfis da fase, sendo invertidos com o aumento da distância.

Efeito de heterogeneidades laterais

A resposta de resistividade aparente e fase para meios com heterogeneidades laterais, dependem da posição, em relação à heterogeneidade, e do contraste de resistividade (meio primário-heterogeneidade). Para pontos distantes da heterogeneidade, as respostas são influenciadas pelos parâmetros do meio primário. Nas proximidades de um corpo 2D, com menor resistividade que o meio primário, ocorre uma redução da intensidade do efeito.

Sondagens em meios bidimensionais

As respostas em meios bidimensionais dependem do ponto onde é feita a medida. O comportamento das curvas de sondagens é praticamente indistinguível para altos valores de frequências, tanto para o modo TE, quanto para o modo TM. A divergência entre os resultados ocorre principalmente quando o substrato é muito resistivo, sendo maior a intensidade nas curvas da fase. O efeito de "static shift", observado na resistividade aparente de onda plana, ocorre também quando a fonte é eletrojato ou a linha de corrente.

De maneira geral podemos concluir que o efeito do eletrojato equatorial, em dados magnetotélúricos, depende de três parâmetros principais: a) posição da medida em relação a fonte, b) faixa de frequência empregada e c) resistividade do meio.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luiz Rijo pela dedicação e paciência, e sobretudo pela orientação nesta tese de mestrado.

Aos Profs. Dr. Om Prakash Verma e Nalin Babulal Trivedi, pelas sugestões e críticas que permitiram melhorar muito este trabalho.

Ao Prof. MsC. Jorge Leão, pelo apoio computacional.

Ao convênio UFFa/PETROBRÁS/FADESP/CAPES/FINEP/CNPq, pelo apoio financeiro e concessão de bolsa de estudo.

Aos colegas Abel Carrasquilla, Sérgio Brochado, André Luiz Vieira e Licurgo Peixoto Brito, pelas sempre válidas discussões técnicas.

À minha família e *Alda Lígia* pelo constante apoio e incentivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAGNIARD, L., 1953, Basic of the magnetotelluric method of geophysics prospecting, 18, 605–635.
- DEMITRIEV, V. I. & BERDICHEVSKY M N, 1979, The fundamental Model of Magnetotelluric Sounding: Proceeding of the IEEE 67, 1034–1044.
- HERMANCE, J. F., 1984, Eletromagnetic Inducion by finite wave–number Source, Gheophysics J. Roy. Astr. Soc., 32, 269–277.
- HERMANCE, J. F. & PELTIER, W. R., 1970, Magnetotelluric Field of a line de Current, J. Gheophys. Res., 73,3351–3355.
- HIBBS, R. D. & JONES F. W., 1973, Eletromagnetic Inducion in the Earth by a symetric non–uniform source, Geophys J. roy. Astr. Sco., 32, 269–277.
- HIBBS, R. D. & JONES F. W., 1973, Eletromagnetic Inducion in the Earth by a non–symetric non–uniform source, J. Geomag. Geoeletric., 25, 75–86.
- HOHMANN, G. W., 1971, Eletromagnetic scattering by conductors in the near a line source of current: Geophysics, v. 36, p. 101–131.
- MADDEN T. & NELSON P., 1985, A defense of Cagniard’s magnetotelluric method, (edited by Vozoff K.), Geophysics reprint series, 89–102.
- NISSEN & ENMARK., 1986, An optimized digital filter for the Fourier transform. Geophysical Prospecting 30,501-514.
- PRICE, A. T., 1962, The theory of Magneto–telluric method when the source is considerad: Journal of Geophysics Research, 67, 1907–1918.
- PELTIER, W. R. & HERMANCE, J.f, 1971, Magnetotelluric Field of a Gaussian Eletroject, Canad. J. Earth Sci, 8, 338–346.
- RIJO, L., 1977, Modelling of eletric and eletromagnetic data. Ph.D. Thesis, Salt Lake City, University of Utah. 242. p.
- RIJO, L., 1989, Notas de aulas do curso ” Teoria dos métodos elétricos e eletromagnéticos I e II”.

- RIJO, L. 1989, Um filtro digital ótimo para transformada cosseno. Anais do 1^o Cong. Bras. Geof.
- THIKHONOV, A. N., 1950, On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust in Magnetotellurics Methods, Edited by Vozoff K., Geophysics Reprint Series n 5, SEG, 2-3.
- WAIT, J. R., 1962, Theory of Magneto-telluric fields, Journal of Research of the National Bureau of Standards, 66
- TRIVEDI, N. B., 1989, The equatorial electrojet and its implications in geophysical prospecting; Resumos do 1^o Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica; Magnetometria, p. 51