

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

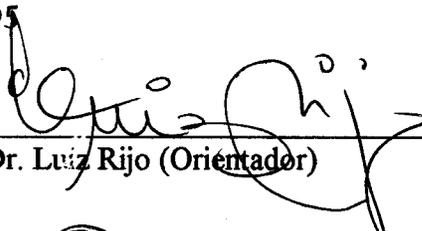
COMPARAÇÃO DOS EFEITOS DO ELETROJATO EQUATORIAL
NOS DADOS MAGNETOTELÚRICOS BI E TRIDIMENSIONAIS

TESE APRESENTADA POR
ALTEM NASCIMENTO PONTES

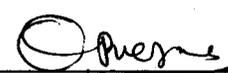
COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

Data de Aprovação : 01/11/1995

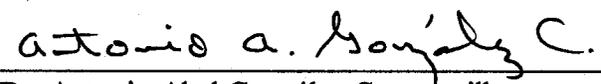
COMITÊ DE TESE:



Dr. Luiz Rijo (Orientador)



Dr. Om Prakash Verma



Dr. Antonio Abel González Carrasquilla

BELÉM

1995

PONTES, Altem Nascimento. **Comparação dos efeitos do eletrojato equatorial nos dados magnetotéluricos Bi e Tridimensionais.** Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1995. 129 p.

Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1995.

1. MÉTODO MAGNETOTELÚRICO. 2. ELETROJATO EQUATORIAL. I. Título.

Aos meus pais, Luiz e Francisca e a
meus irmãos, Alba, Aldo, Alda e
Luiza.

AGRADECIMENTOS

Em especial, ao Dr. Luiz Rijo, pela orientação, pela paciência e pelas sugestões valiosas à realização deste trabalho.

Aos demais membros da banca examinadora, Drs. Om Prakash Verma e Antonio Abel González Carrasquilla, pela disponibilidade e revisão crítica do trabalho de tese.

Aos professores que compõem o quadro docente do Curso de Pós-Graduação em Geofísica.

Ao Prof. Lourenildo W. B. Leite, pelo trabalho desenvolvido na administração do Curso de Pós-Graduação em Geofísica.

Ao Sr. Ronald Vieira, pelo desenho e adaptação de muitas figuras encontradas neste texto.

A todos os demais funcionários do Curso de Pós-Graduação em Geofísica.

Ao Departamento de Geofísica, pela excelente infra-estrutura oferecida e ao convênio UFPA-PETROBRÁS-FADESP, pelo suporte financeiro necessário à realização deste trabalho.

Ao colega Antônio Maia pela amizade e companheirismo.

À minha família que não mediu esforços em me proporcionar uma educação austera, mostrando sempre que a perseverança é um fator fundamental na conquista dos objetivos.

A Deus que me proporcionou saúde e sabedoria durante esses vinte e oito anos de existência.

SUMÁRIO

	P.
DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 - INTRODUÇÃO	3
2 - O MÉTODO MAGNETOTELÚRICO E O ELETROJATO EQUATORIAL	6
2.1 O MÉTODO MAGNETOTELÚRICO	6
2.2 O CAMPO MAGNETOTELÚRICO	8
2.2.1 Onda Plana	9
2.2.2 Linha de Corrente	10
2.2.3 Eletrojato Gaussiano	10
2.2.4 Eletrojato Ondulante	10
2.3 O ELETROJATO EQUATORIAL	12
2.4 A IONOSFERA	12
2.5 CAUSA DO ELETROJATO EQUATORIAL	14
2.6 ESTRUTURA DO ELETROJATO EQUATORIAL	17
2.7 CARACTERÍSTICAS DO ELETROJATO EQUATORIAL	19
2.7.1 A altura do eletrojato	19
2.7.2 A largura do eletrojato	21
2.7.3 A intensidade do eletrojato equatorial	21
3 - COMPARAÇÃO DOS EFEITOS DOS MODELOS BI E TRIDIMENSIONAIS (LINHA DE CORRENTE E ELETROJATO GAUSSIANO)	23
3.1 INTRODUÇÃO	23
3.2 OBJETIVOS	23
3.3 MODELOS ESTUDADOS	23

3.4	RESULTADOS OBTIDOS	27
4 -	DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS DO ELETROJATO EQUATORIAL ONWUMECHILLIANO	74
4.1	INTRODUÇÃO	74
4.2	OBJETIVOS	74
4.3	MODELOS ESTUDADOS	74
4.4	RESULTADOS OBTIDOS	75
5 -	CONCLUSÕES	108
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

RESUMO

Este trabalho trata da comparação dos efeitos do eletrojato equatorial nos dados magnetotéluricos bi e tridimensionais. Ele compõe-se fundamentalmente de duas partes: Na primeira, que consiste na comparação dos efeitos dos modelos bi e tridimensionais (linha de corrente e eletrojato gaussiano), determinamos as dimensões que deve apresentar uma estrutura tridimensional para que a resposta magnetotélúrica proveniente dessa estrutura, nas polarizações YX e XY, possa ser substituída pela resposta magnetotélúrica proveniente de uma estrutura bidimensional nos modos TE e TM respectivamente, para a resistividade aparente e fase. Os resultados mostram, para um embasamento condutivo ou resistivo, que é necessário aumentar a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal acima de dezesseis vezes, em relação à dimensão inicial, para que a resposta magnetotélúrica proveniente dessa estrutura na polarização YX, possa ser substituída pela resposta magnetotélúrica proveniente de uma estrutura bidimensional no modo TE; no caso da polarização ser XY, essa substituição ocorrerá, no modo TM bidimensional, se aumentarmos a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal acima de vinte e seis vezes em relação à dimensão inicial.

Na segunda parte, que consiste na determinação dos efeitos do eletrojato equatorial Onwumechilliano, posicionamos a estrutura tridimensional a 10 km, 100 km, 300 km, 500 km, 1000 km e 1500 km, respectivamente, de distância do eletrojato. Dessa forma, determinamos a distância na qual os efeitos do eletrojato equatorial Onwumechilliano sobre as sondagens magnetotélúricas são praticamente desprezíveis. Verificamos que, posicionando a estrutura tridimensional a 1500 km de distância da fonte, para embasamento condutivo, o eletrojato não afeta as sondagens magnetotélúricas. Quando o embasamento é resistivo, o eletrojato afeta as sondagens magnetotélúricas, mesmo posicionando-se a estrutura tridimensional a 1500 km de distância da fonte.

De um modo geral, constatamos que o eletrojato equatorial afeta as sondagens magnetotélúricas para frequências inferiores a 10^{-2} Hz, tanto na resistividade aparente quanto na fase e em ambas as polarizações, principalmente, quando o embasamento é resistivo. Observamos também que o efeito galvânico é mais pronunciado na polarização YX que na XY.

ABSTRACT

This work deals with the comparison between the effects of the equatorial electrojet in two and three-dimensional magnetotelluric data. It is composed of two parts: in the first part, which consists in comparing the effects of two-dimensional with three-dimensional models (current line and gaussian electrojet), we determine the dimensions that a three-dimensional structure should have so that the MT response of that structure, in YX and XY polarizations, can be replaced by the MT response of a 2D structure in TE and TM modes, for apparent resistivity and phase. The results show that the dimension of the 3D structure in the main direction must be over 16 times its length in the initial dimension, so that the MT response of that structure in YX polarization can be replaced by the MT response at a 2D structure in TE mode. If the polarization is XY the main dimension must be 26 times the initial dimension.

In the second part, which consists in determining the effects of the Onwumechillian equatorial electrojet, we placed the 3D structure at 10 km, 100 km, 300 km, 500 km, 1000 km and 1500 km, from the electrojet. In this way we determine the distance at which the effects of the Onwumechillian equatorial electrojet on the MT soundings are practically negligible. We observe that, for a conductive basement, the equatorial electrojet does not affect the MT soundings if the 3D structure is placed at 1500 km from the source. When the basement is resistive, the electrojet affects the MT soundings even if the structure is at 1500 km away from the source.

We verified that the equatorial electrojet affects the MT soundings in frequencies under 10^{-2} Hz, in both resistivity and phase and in both polarizations. We also observed that the galvanic effect is stronger on the YX than on the XY polarization.

1 - INTRODUÇÃO

No método magnetotelúrico, proposto por TIKHONOV (1950) e CAGNIARD (1953), a onda incidente é considerada plana. Essa hipótese tem funcionado muito bem, sobretudo em latitudes médias, onde o método foi proposto, testado e amplamente utilizado para estimar a condutividade elétrica em subsuperfície. Contudo, em latitudes equatoriais e aurorais existem jatos de corrente ionosférica cuja concentração produz variações nos campos magnéticos na superfície terrestre, invalidando, segundo alguns autores, a idéia de onda plana, pelo menos nas baixas frequências. No caso equatorial, tal concentração de corrente na direção leste-oeste entre 90 a 130 km de altura é conhecida como eletrojato equatorial (CHAPMAN, 1948; ONWUMECHILLI, 1967; HUTTON, 1972; REDDY, 1989).

PRICE (1962) e WAIT (1962) sugeriram que as estimativas das resistividades em subsuperfície, obtidas com base nas hipóteses de Tikhonov-Cagniard, podem ser enganosas em circunstâncias onde não se tem ondas planas, embora tenham concluído que bons resultados podem ser obtidos se a variação do campo incidente for suave.

Autores como HOFFMAN & HORTON (1966), WARD & MORRISON (1966), insistiram na aplicabilidade do método MT, mesmo em regiões com a presença de eletrojatos.

Pesquisadores que trabalham com dados reais nessas latitudes, têm relutado em abandonar as hipóteses de Tikhonov-Cagniard devido, principalmente, a sua facilidade de aplicação (HERMANCE & GARLAND, 1968).

Para testar a validade da relação de Cagniard para os dados de resistividade aparente na presença do eletrojato, HERMANCE & PELTIER (1970) propuseram um modelo de eletrojato tipo linha infinita de corrente na direção leste-oeste, localizado a 110 km verticalmente sobre um meio de duas camadas e concluíram que o efeito só se verifica nas baixas frequências e no caso do embasamento ser resistivo.

Numa extensão deste trabalho, PELTIER & HERMANCE (1971) simularam o eletrojato através de uma densidade superficial de corrente segundo uma distribuição planar gaussiana, localizada a uma altura de 110 km e fluindo na direção leste-oeste. Eles verificaram que o efeito do eletrojato gaussiano é menor do que o do modelo da linha de corrente.

O método utilizado por HERMANCE & PELTIER (1970) foi generalizado no trabalho realizado por HIBBS & JONES (1973a), de maneira a incluir o efeito de fontes simétricas

não-uniformes.

Em um trabalho subsequente, HIBBS & JONES (1973b) calcularam a indução eletromagnética sobre um meio bidimensional, gerada por uma fonte de corrente não-uniforme e assimétrica. Os resultados desse trabalho são praticamente semelhantes aos anteriores.

Analisando o modelo de Tikhonov - Cagniard para os trabalhos de exploração geofísica, DMITRIEV & BERDICHEVSKIY (1979) confirmaram a sua validade principalmente quando a área prospectada é relativamente pequena e o campo incidente apresenta variação linear, mesmo que esta variação seja grande.

MOTA & RIJO (1991) descreveram uma solução numérica da resposta magnetotélúrica para meios bidimensionais, com fontes que simulavam o eletrojato equatorial do tipo linha de corrente e distribuição gaussiana. A exemplo dos trabalhos anteriores, eles verificaram que o efeito desses modelos de eletrojato são muito pequenos e só se verifica apenas, nas baixas frequências ($< 10^{-2}$ Hz).

Em todos os trabalhos acima referidos, o modelo do eletrojato equatorial não contempla a possibilidade de reversão das correntes. Motivado pelos trabalhos de ONWUMECHILLI (1967) e HESSE (1982), RIJO (1981) modelou a resposta magnetotélúrica em regiões de baixas latitudes usando fontes de forma mais complexas, permitindo assim, a modelagem de eletrojatos mais reais. Com esse trabalho ele concluiu que o efeito de reversão das correntes do eletrojato influencia bastante os dados magnetotélúricos.

Com base no trabalho de RIJO (1991), CARRASQUILLA (1993) estudou a influência do eletrojato equatorial sobre dados magnetotélúricos tridimensionais. Contudo, devido à limitação do sistema de computação da Universidade Federal do Pará na época, não lhe foi possível fazer uma análise mais completa do problema, restringindo-se apenas ao estudo de um número reduzido de estruturas simples tridimensionais.

Num trabalho apresentado no 3º Congresso Brasileiro de Geofísica da SBGf, RIJO (1993) apresentou, em continuação do trabalho de 1991, um estudo sobre a influência do eletrojato Onwumechilliano nos dados magnetotélúricos uni e bidimensionais concluindo que o seu efeito pode ser substancial, dependendo do comportamento da inversão das correntes do eletrojato.

O objetivo primordial desse trabalho de tese é estender os estudos de CARRASQUILLA (1993) e RIJO (1993) na comparação dos efeitos do eletrojato equatorial nos dados magnetotélúricos bi e tridimensionais.

No primeiro capítulo, faz-se um breve comentário sobre os principais resultados apresentados na literatura à respeito do método magnetotélúrico e do eletrojato equatorial. Este

capítulo mostra o que foi feito e o que está sendo feito para o aperfeiçoamento do método.

O método magnetotelúrico e o eletrojato equatorial, são abordados no segundo capítulo. Neste capítulo vamos estudar, inicialmente, as principais fontes de campo magnetotelúrico; quais sejam: a onda plana, a linha de corrente, o eletrojato gaussiano e o eletrojato ondulante. É baseado nestas fontes que se desenvolve a maioria dos assuntos tratados neste trabalho, visto que são elas que vão induzir campos na superfície terrestre. Em seguida, o estudo é direcionado à ionosfera que é uma camada condutora que envolve a Terra e onde se processam muitos fenômenos relacionados à formação de correntes que induzirão, posteriormente, campos eletromagnéticos na superfície terrestre. Posteriormente, é discutida a causa, a estrutura e as principais características do eletrojato equatorial.

A comparação dos efeitos dos modelos bi e tridimensionais é o título do terceiro capítulo desta tese. Neste capítulo aumenta-se gradualmente a dimensão de uma estrutura tridimensional na direção principal até que a resposta magnetotelúrica, no que concerne à resistividade aparente e fase e nas polarizações YX e XY proveniente dessa estrutura, possa ser substituída pela resposta magnetotelúrica de uma estrutura bidimensional nos modos TE e TM, respectivamente. A relevância deste estudo reside, principalmente, num ganho maior de tempo no processamento dos dados, uma vez que, modelos bidimensionais levam alguns segundos para serem processados, enquanto os tridimensionais necessitam de vários minutos e até horas, dependendo do tipo de computador e da configuração do modelo.

O quarto capítulo visa a determinação dos efeitos do eletrojato equatorial Onwumechilliano. A ênfase aqui é estudar o eletrojato ondulante proposto por Onwumechilli. Este tipo de eletrojato contempla as correntes reversas, com isso, espera-se que os efeitos nas sondagens sejam muito mais perceptíveis que aqueles provocados pela linha de corrente ou eletrojato gaussiano.

O quinto capítulo trata das conclusões obtidas ao longo deste trabalho de tese.

2 - O MÉTODO MAGNETOTELÚRICO E O ELE- TROIJATO EQUATORIAL

2.1 O MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

O método magnetotelúrico se baseia na condição de correntes naturais induzidas em subsuperfície. Essas correntes foram observadas, primeiramente, por Barlow em 1847, durante os estudos para a implantação do primeiro sistema de telégrafo inglês. Observações feitas experimentalmente e estudos teóricos, mostram que a fonte destas correntes está localizada fora da superfície terrestre, sendo que as variações do vento solar e da aurora estão relacionados à variação diurna do campo magnético natural da Terra. Essas flutuações induzem, provavelmente, as correntes na ionosfera que, por sua vez, vão induzir na Terra as correntes telúricas. O mecanismo indutor é um campo eletromagnético que se propaga com pequena atenuação, desde a ionosfera até a superfície terrestre. Como a separação entre os meios é grande, a onda eletromagnética chega a terra praticamente na forma de onda plana com frequência variável superior a 10^{-5} Hz, que corresponde a um comprimento de onda inferior a 10^{13} m. Esse campo eletromagnético, que passaremos a denominá-lo de *campo magnetotelúrico*, penetra na superfície terrestre e induz nesta as correntes telúricas (TELFORD et al., 1975).

A Figura 2.1 mostra, ainda segundo este autor, o sistema de correntes telúricas de extensão mundial. Ele cobre milhões de quilômetros quadrados, é fixo em relação ao sol e rotaciona de forma alternada no sentido horário e anti-horário. Nas latitudes médias, ocorre dois máximos e dois mínimos por dia e a direção média é a do meridiano magnético. Por outro lado, próximo ao Equador (Peru, Madagascar), parece haver apenas um máximo e um mínimo por dia. As amplitudes são menores e a direção média é leste-oeste. Sobrepostas ao campo telúrico médio estão as flutuações aleatórias cuja intensidade varia com os distúrbios elétricos que ocorrem na ionosfera. Como exemplo destas fontes de flutuações, temos as tempestades elétricas. Apesar da localização destas fontes ser, de certa maneira, aleatória, há três principais centros de tempestade, todos localizados em regiões equatoriais (*Brasil, África Central e Malásia*). Parte da energia da trovoada é convertida em campo eletromagnético que se propaga na interface ionosfera-Terra. As fracas correntes induzidas por esses campos na subsuperfície terrestre podem ser utilizadas na prospecção magnetotelúrica, particularmente, devido aos picos de amplitude apresentarem várias frequências diferentes (TELFORD et al., 1975).

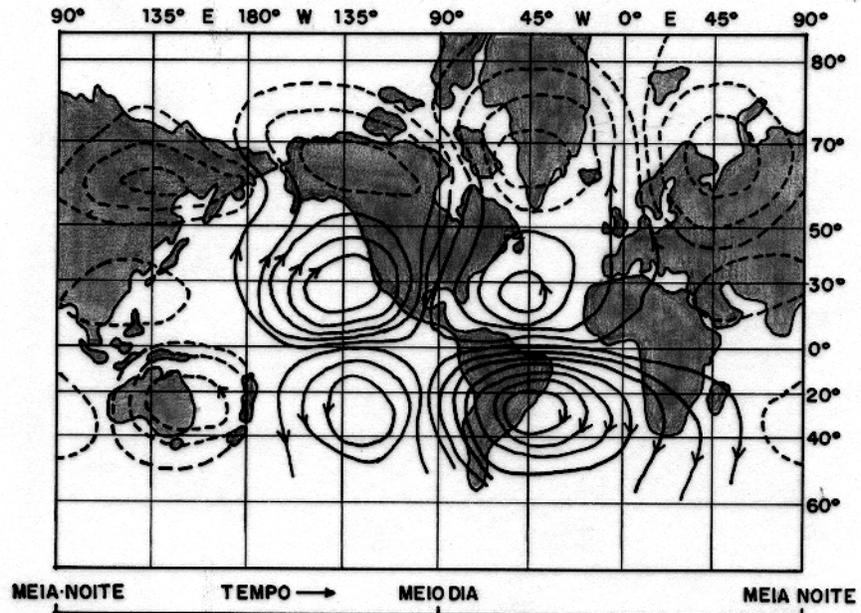


Figura 2.1 - Sistema de correntes telúricas de extensão mundial. Adaptado de TELFORD et al. (1975).

Depois desta breve introdução sobre o método magnetotelúrico, passaremos ao estudo do campo magnetotelúrico, mas precisamente das fontes que constituem este campo. Nesse sentido, estudaremos a onda plana, a linha de corrente, o eletrojato gaussiano e o eletrojato ondulante.

2.2 O CAMPO MAGNETOTELÚRICO

TIKHONOV (1950) e CAGNIARD (1953) propuseram, originalmente, um método para a determinação da condutividade elétrica da crosta terrestre e manto superior, através das componentes horizontais do campo magnetotelúrico, quando esses campos são medidos simultaneamente em um ponto da superfície terrestre. Esse método tornou-se conhecido como sondagem magnetotelúrica (DMITRIEV & BERDICHEVSKIY, 1979). Em uma dimensão, apenas uma componente do vetor campo magnético horizontal e do vetor campo elétrico na direção perpendicular são medidas. Elas estão relacionadas por,

$$E_x = ZH_y,$$

e

$$E_y = ZH_x,$$

onde Z é a impedância de Tikhonov-Cagniard.

CANTWELL (1960) estendeu o método para estruturas que apresentam heterogeneidades laterais, assim

$$E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y,$$

e

$$E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y,$$

em notação matricial temos

$$E = \tilde{Z}H,$$

onde \tilde{Z} é o tensor de impedância expresso por

$$\tilde{Z} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}.$$

Valores diferentes de zero dos elementos, Z_{xx} e Z_{yy} , indicam que a estrutura geoeétrica corresponde a uma estrutura bi ou tridimensional. Nos meios estratificados unidimensionais, $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$.

A resistividade aparente e fase são expressas por

$$\rho_{ij} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{ij}|^2,$$

e

$$\phi_{xy} = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(Z_{ij})}{\text{Re}(Z_{ij})},$$

para

$$i, j = x, y,$$

em que $Im(Z_{ij})$ e $Re(Z_{ij})$ são a parte imaginária e real, respectivamente, de Z_{ij} .

Nesse trabalho, convencionou-se que quando a polarização for YX, o campo elétrico estará na direção Y e o campo magnético na direção X. Este tipo de polarização corresponde ao modo TE bidimensional. Quando a polarização for XY, o campo elétrico estará na direção X e o magnético na direção Y, sendo correspondente ao modo TM bidimensional.

2.2.1 Onda Plana

O modelo da onda plana aplica-se quando a fonte encontra-se muito afastada do observador. Nesse caso, para um meio estratificado, no modo TE as componentes do campo elétrico e magnético são expressas de acordo com RIJO (1992) por,

$$\begin{aligned} E_y^j &= E_j(e^{-u_j(z-z_j)} + R_{TE}^j e^{u_j(z-z_j)})e^{i\lambda x}, \\ H_x^j &= -Y_j E_j(e^{-u_j(z-z_j)} - R_{TE}^j e^{u_j(z-z_j)})e^{i\lambda x}, \end{aligned}$$

para $z < z_{N-1}$ e $0 < j < N - 1$.

A constante de propagação u_j é expressa por

$$u_j = (\lambda^2 - k_j^2)^{1/2}.$$

O coeficiente de reflexão é

$$R_{TE} = \frac{Y_j - \hat{Y}_{j+1}}{Y_j + \hat{Y}_{j+1}}, \quad (2.1)$$

onde as admitâncias aparentes são dadas, por

$$\hat{Y}_j = Y_j \frac{\hat{Y}_{j+1} + \tanh(u_j h_j)}{Y_j + \hat{Y}_{j+1} \tanh(u_j h_j)}.$$

As constantes E_j , por outro lado, são expressas na forma

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

em que $j = 1, 2, \dots, N - 1$ e $Y_j = \frac{u_j}{\sigma_j}$, sendo σ_j a condutividade elétrica da camada j -ésima e h_j a sua espessura.

2.2.2 Linha de Corrente.

Nesse estudo, usamos o campo elétrico e o campo magnético de uma linha de corrente fluindo em uma certa altura da superfície terrestre. Esse fluxo é paralelo ao eixo y e em uma altura $z = -h$ e tem uma dependência temporal na forma $e^{i\omega t}$. Desprezando a corrente de deslocamento, a componente do campo elétrico E_y em $z \leq 0$ será

$$E_y = \frac{i\omega\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{u_o} [e^{-u_o|z-h_o|} + R_{TE}^0 e^{u_o(z+h_o)}] \cos(k_x(x-x_o)) dk_x,$$

onde $u_o = (k_x^2 - k_o^2)^{\frac{1}{2}}$ é a constante de propagação e R_{TE}^0 é o coeficiente de reflexão dado pela Eq.(2.1), com $\lambda = k_x$ (RIJO, 1992).

2.2.3 Eletrojato Gaussiano

A solução para o eletrojato gaussiano pode ser obtida pela superposição da solução da linha de corrente (PELTIER & HERMANCE, 1971). A corrente do eletrojato flui na direção y e em uma altura $z_o = -|h|$, e ambos, campo elétrico e magnético, apresentam dependência na forma $e^{i\omega t}$. Desse modo, a intensidade de corrente é uma função da coordenada x e pode ser escrita na forma

$$I_y(x) = I_o e^{-\frac{x^2}{2k^2}},$$

onde k é o desvio padrão da distribuição e I_o é a intensidade da corrente no centro.

2.2.4 Eletrojato Ondulante

O eletrojato ondulante proposto originalmente por Onwumechilli é expresso através da seguinte função

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_o \frac{a^2(a^2 + \alpha x^2)}{(a^2 + x^2)^2},$$

onde \mathbf{J} e \mathbf{J}_o são os vetores densidade de corrente (\mathbf{J}_o no centro da distribuição), α é um parâmetro associado à reversibilidade da corrente e a é uma constante relacionada à abertura do eletrojato (ONWUMECHILLI, 1967). Quando $\alpha \geq 0$ este modelo não contempla a reversibilidade da corrente. Contudo, se $\alpha < 0$ teremos correntes reversas, ou seja, ocorre mudança de polaridade da corrente, (ver Figura 2.2).

Os detalhes sobre o cálculo das respostas magnetotelúricas devido aos eletrojatos gaussiano e ondulante são encontrados em RIJO (1992) e CARRASQUILLA (1993).

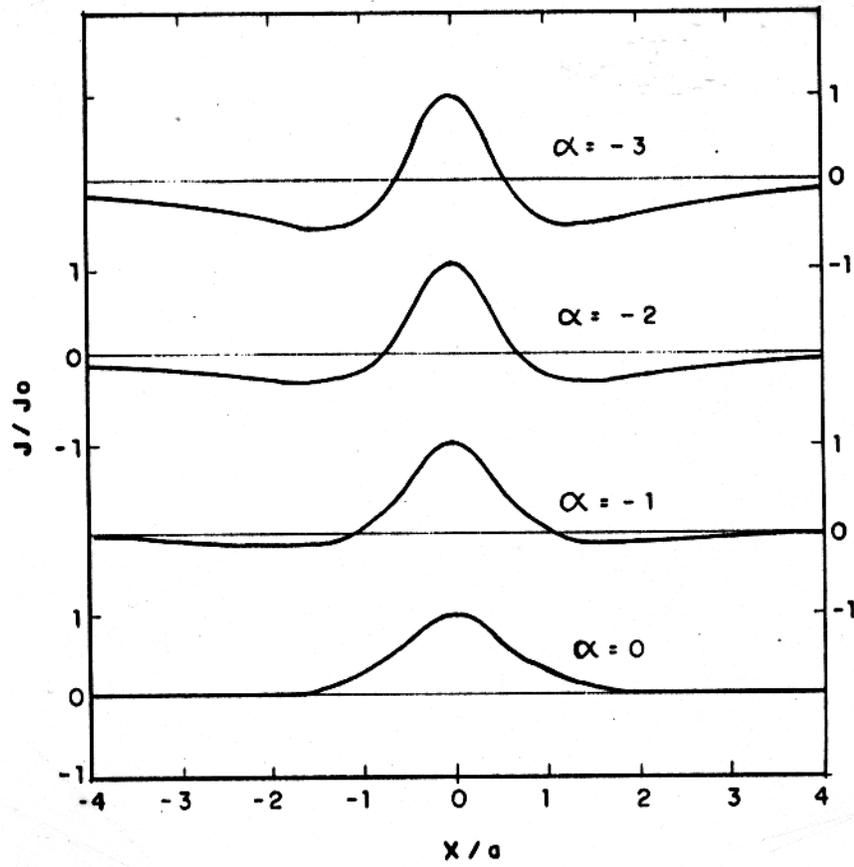


Figura 2.2 - Ondulações no modelo de Onwumechilli. Adaptado de RIJO (1991).

2.3 O ELETROJATO EQUATORIAL

Em 1922, o Departamento de Magnetismo Terrestre do Instituto Carnegie de Washington implantou um observatório geomagnético em Huancayo no Peru, próximo ao equador magnético. Medidas feitas neste observatório, mostraram que a variação diurna do campo magnético H é, freqüentemente, mais que o dobro do valor esperado. A natureza do aumento em Huancayo foi extensivamente investigada depois de EGEDAL (1947,1948) ter registrado que a variação diurna de H em seis estações próximas ao equador magnético também apresentavam anomalia semelhante (Figura 2.3). Ele sugeriu que o aumento era causado por uma corrente elétrica variável de 300 km de largura fluindo em uma zona muito estreita próximo ao equador magnético. Posteriormente, medidas feitas por Walter em Uganda, GIESECKE (1951) no Peru e PRAMANICK & YEGNANARAYANAN (1952) na Índia provaram que o aumento de $S_q(H)$ pode ser encontrado em qualquer lugar da Terra próximo ao equador magnético. Esta alta concentração de corrente elétrica fluindo de oeste para leste em uma zona muito estreita em ambos os lados do equador magnético foi denominada, por CHAPMAN (1951), de *eletrojato equatorial*.

Para entendermos o fenômeno das fontes de campo magnetotelúrico é necessário que tenhamos informações sobre a *ionosfera*, pois é nessa camada que se processa a formação da maior parte das correntes que induzirão campos eletromagnéticos na superfície terrestre.

2.4 A IONOSFERA

A ionosfera é uma região altamente ionizada da atmosfera terrestre, que tem aproximadamente de 70 a 1000 km. Contudo, esses limites não são na realidade muito rígidos, podendo variar de autor para autor. O que se percebe, na prática, é que tanto abaixo de 70 km quanto acima de 1000 km, a concentração eletrônica torna-se muito pequena. Acima desta altura há a predominância dos íons do elemento hélio H_e , numa região denominada *heliosfera*. Ao redor de um raio terrestre R_e , temos a região chamada *protonosfera*, devido a elevada concentração dos íons do elemento hidrogênio (KIRCHHOFF, 1991).

De acordo com este autor, dividiu-se a atmosfera em várias regiões, cada qual com suas características específicas. A Figura 2.4, mostra a disposição destas regiões com suas respectivas altitudes médias.

A *região D* vai até, aproximadamente, 80 km de altura. Esta é uma região localizada muito próximo a superfície terrestre, sofrendo assim grande influência tanto da emissão solar quanto da própria Terra. Por isso, esta região é a mais irregular da ionosfera, apresentando

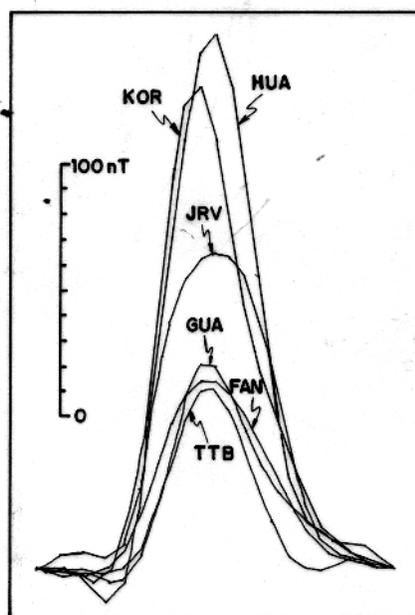


Figura 2.3 - Curvas de variação diurna para **H** em seis observatórios de baixa latitude. HUA, KOR e JRV estão dentro de 5° do equador magnético. Enquanto, GUA, FAN e TTB estão mais que 5° do equador magnético. Adaptado de PARKINSON (1983).

grande concentração de gases O_2 e N_2 (Figura 2.5).

A *região E*, localizada a uma altura média que varia de 80 a 130 km é a região mais importante para o estudo do método magnetotélúrico, pois, é nesta região, que ocorre a máxima condutividade elétrica. Nessa região desenvolvem-se as correntes elétricas ionosféricas. A Figura 2.4 também mostra a *região F*, a qual aparece dividida nas sub-regiões *F1* e *F2*. A região *F1*, está compreendida a uma altura aproximada de 200 km logo onde ocorre uma pequena distorção na curva. A importância desta região reside no fato de ser nela que ocorre a transição das leis que variam de forma linear para quadrática, concernente às perdas eletrônicas. A região *F2*, que faz parte da ionosfera superior, é caracterizada, principalmente, por processos dinâmicos que lá ocorrem e pela interação com os ventos termosféricos. Nesta região ocorre o pico de densidade a uma altura aproximada de 300 km (KIRCHHOFF, 1991).

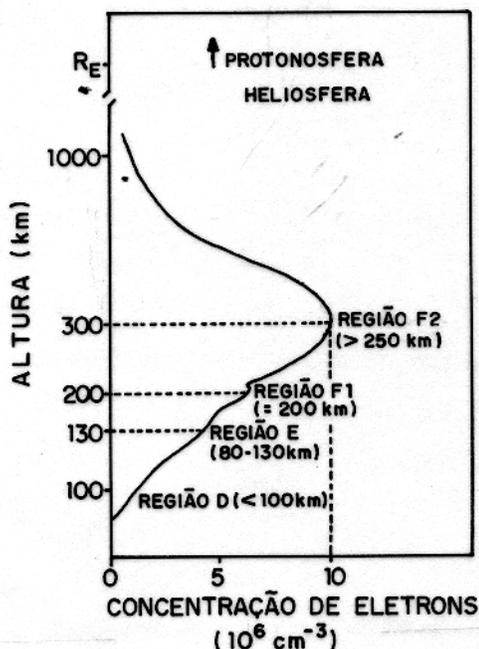


Figura 2.4 - Nomenclatura e localização das camadas ionosféricas. Adaptado de KIRCHHOFF (1991).

2.5 CAUSA DO ELETROJATO EQUATORIAL

A causa do eletrojato equatorial, de acordo com MATSUSHITA (1967), consiste em um comportamento diferente da condutividade elétrica na atmosfera superior. A ionosfera pode ser considerada como um gás ligeiramente ionizado, no qual há n_r partículas carregadas. Seja uma partícula de carga e_r , massa m_r , frequência colisional com partículas neutras ν_r e frequência de giro dada por,

$$\omega_r = \frac{e_r B}{m_r},$$

onde B é a intensidade do campo magnético no meio.

De acordo com MATSUSHITA (1967), onde um campo elétrico é paralelo ao campo magnético, a condutividade é chamada de condutividade longitudinal, que é independente do campo magnético (MASSEY & BOYD, 1958) e é expressa por

$$\sigma_0 = \sum \frac{n_r e_r^2}{m_r \nu_r}.$$

Se o campo elétrico é perpendicular ao campo magnético, a condutividade é chamada de condutividade de Pedersen (PEDERSEN, 1927) e é dada como

$$\sigma_1 = \sum \frac{n_r \nu_r e_r^2}{m_r (\nu_r^2 + \omega_r^2)},$$

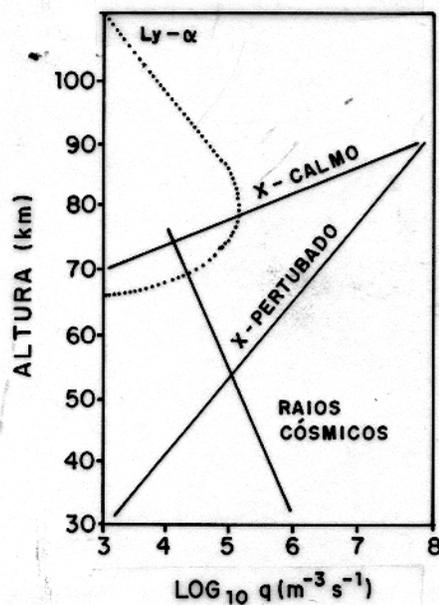


Figura 2.5 - Produção iônica na baixa ionosfera. Adaptado de KIRCHHOFF (1991).

mas no caso, afirma MATSUSHITA (1967), de existirem campo eletromagnético transversal, a corrente de Hall flui perpendicularmente a ambos, elétrico e magnético. A condutividade relacionada a esta corrente é chamada de condutividade de Hall e é expressa da seguinte forma,

$$\sigma_2 = - \sum \frac{n_r \omega_r e_r^2}{m_r (\nu_r^2 + \omega_r^2)}.$$

Quando o meio é inclinado na direção da corrente de Hall, o fluxo desta corrente resulta em polarização e a polarização do campo opõe-se ao fluxo de corrente. COWLING (1932) encontrou que, se a polarização de Hall inibe o fluxo de corrente de Hall, a condutividade efetiva do meio é maior que a condutividade de Pedersen. Para obtermos a condutividade efetiva na ionosfera, nós seguimos o tratamento feito por BAKER & MARTYN (1953). Considere a ionosfera como uma folha plana. Faça os eixos x e y coincidirem com o sul e o leste magnético, respectivamente, ao passo que o eixo z aponta para cima. Seja o campo magnético **B** inclinado de um ângulo I em relação ao plano. Em geral, temos

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k}, \quad (2.2)$$

onde **i**, **j** e **k** são os vetores unitários nas direções x, y e z respectivamente. Nós podemos resolver **E** com **E**₀ paralelos ao campo magnético e **E**₁ perpendicular a ele. Se os vetores unitários nessas direções são **b**₀ (paralelo ao campo magnético) e **b**₁ (perpendicular a ele),

então

$$\mathbf{B} = B\mathbf{b}_0 = -B \cos I \cdot \mathbf{i} - B \sin I \cdot \mathbf{k}, \quad (2.3)$$

que nos conduz a,

$$\mathbf{b}_0 = -\cos I \cdot \mathbf{i} - \sin I \cdot \mathbf{k}, \quad (2.4)$$

e

$$\mathbf{b}_1 = \sin I \cdot \mathbf{i} - \cos I \cdot \mathbf{k}. \quad (2.5)$$

Assim, a corrente de Hall é proporcional ao vetor $\mathbf{b}_0 \times \mathbf{E}$ e nós podemos escrever a densidade de corrente resultante como

$$\mathbf{J} = \sigma_0 E_0 + \sigma_1 E_1 + \sigma_2 (\mathbf{b}_0 \times \mathbf{E}), \quad (2.6)$$

em que os vetores de acordo com a Eq.(2.6) serão dados por,

$$\mathbf{E}_0 = (E_x \cos^2 I + E_z \cos I \sin I)\mathbf{i} + (E_x \cos I \sin I + E_z \sin^2 I)\mathbf{k}. \quad (2.7)$$

Da mesma forma,

$$\mathbf{E}_1 = (E_x \sin^2 I - E_z \cos I \sin I)\mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + (-E_x \cos I \sin I + E_z \cos^2 I)\mathbf{k} \quad (2.8)$$

e,

$$(\mathbf{b}_0 \times \mathbf{E}) = E_y \sin I \cdot \mathbf{i} + (-E_x \sin I + E_z \cos I)\mathbf{j} - E_y \cos I \cdot \mathbf{k}. \quad (2.9)$$

Substituindo as Eqs. (2.7), (2.8) e (2.9) em (2.6), obtemos

$$\begin{aligned} \mathbf{J} = & [(\sigma_0 \cos^2 I + \sigma_1 \sin^2 I)E_x + \sigma_2 E_y \sin I + (\sigma_0 - \sigma_1)E_z \cos I \sin I]\mathbf{i} \\ & + [\sigma_1 E_y - \sigma_2 (E_x \sin I - E_z \cos I)]\mathbf{j} + [(\sigma_0 - \sigma_1)E_x \cos I \sin I \\ & - \sigma_2 E_y \cos I + (\sigma_0 \sin^2 I + \sigma_1 \cos^2 I)E_z]\mathbf{k}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Nesta expressão, pode-se observar que a componente vertical da corrente não pode fluir porque ela é perpendicular ao plano. Igualando a zero, fica

$$E_z = \frac{[\sigma_2 E_y \cos I - (\sigma_0 - \sigma_1)E_x \cos I \sin I]}{(\sigma_0 \sin^2 I + \sigma_1 \cos^2 I)}. \quad (2.11)$$

Substituindo a Eq. (2.11) em (2.10), teremos

$$J_x = \sigma_{xx} E_x + \sigma_{xy} E_y, \quad (2.12)$$

e

$$J_y = -\sigma_{xy} E_x + \sigma_{yy} E_y, \quad (2.13)$$

em que

$$\sigma_{xx} = \frac{\sigma_0 \sigma_1}{(\sigma_0 \sin^2 I + \sigma_1 \cos^2 I)}, \quad (2.14)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\sigma_0 \sigma_2 \sin I}{(\sigma_0 \sin^2 I + \sigma_1 \cos^2 I)}, \quad (2.15)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{[\sigma_0 \sigma_1 \sin^2 I + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \cos^2 I]}{\sigma_0 \sin^2 I + \sigma_1 \cos^2 I}. \quad (2.16)$$

Com estas expressões, é de interesse imediato a utilização da condutividade efetiva na teoria do dínamo, podendo ser mostrado que

$$\sigma_3 = \sigma_1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1}. \quad (2.17)$$

Esta é a chamada condutividade de Cowling, a qual depende da altitude, visto que a densidade eletrônica n e a frequência de colisão ν são dependentes. Devido σ_2 ser maior que σ_1 na região de interesse (Figura 2.6), a condutividade de Cowling representa um aumento em relação à condutividade de Pedersen. Visto que σ_{xx} , σ_{xy} e σ_{yy} dependem apenas do ângulo de inclinação, suas magnitudes dependem, com isso, somente da posição. No equador magnético,

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_0, \\ \sigma_{xy} &= 0, \\ \sigma_{yy} &= \sigma_1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1}. \end{aligned}$$

A condutividade de Cowling aumenta de um fator de 2 a 5 vezes devido a inibição da corrente de Hall. A razão é que as linhas de campo magnético são horizontais no equador magnético, prevenindo assim a polarização das cargas de sinais opostos que estão concentradas acima e abaixo das correntes de recombinação. Esse aumento de condutividade na direção leste-oeste ocorre em uma estreita faixa de ambos os lados do equador magnético, mas diminui com a distância ao equador.

2.6 ESTRUTURA DO ELETROJATO EQUATORIAL

A determinação da estrutura implica em se conhecer a altura e a latitude da disposição dos campos elétricos do eletrojato. Vários modelos teóricos foram desenvolvidos no sentido de se explicar em detalhes a altura do eletrojato, a disposição da latitude e a variação do eletrojato dependente da longitude (UNTIEDT, 1967; SUGIURA & POROS, 1969; RICHMOND, 1973a,b). A disposição da altura das correntes próximas ao equador magnético foi medida com magnetômetros colocados em foguetes (MAYNARD & CAHILL, 1965; MAYNARD,

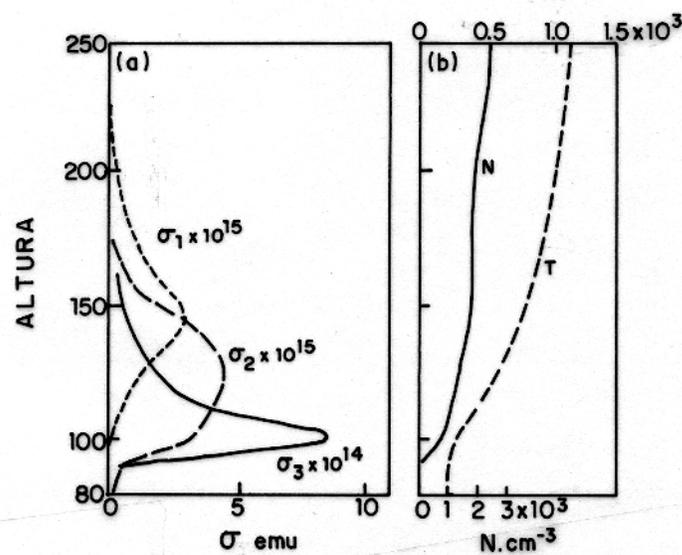


Figura 2.6 - (a). Variação da condutividade de Pedersen (σ_1), Hall (σ_2) e Cowling (σ_3), com a altura para uma ionosfera em que a densidade (N), e a temperatura (T), variam como mostrado em (b). Observe que a escala para σ_3 é maior que para σ_1 e σ_2 por um fator de 10. Adaptado de MATSUSHITA & CAMPBELL (1967).

1967; DAVIS et al. 1967; SAMPATH & SASTRY, 1979). Os resultados para o setor Americano e setor Indiano estão mostrados nas Figuras 2.7a e 2.7b, respectivamente. A estrutura vertical é a mesma em ambos os casos, com pequenas diferenças. O que é mais significativo é a diferença de 6 - 7 km na Figura 2.7a entre as alturas dos máximos computados e observados da densidade de corrente (RICHMOND, 1973b). As medidas VHF de radar feitas em Thumda sobre os perfis de mudança de velocidade, também mostram uma similaridade, mas com uma diferença média menor entre o modelo teoricamente esperado e as alturas observadas da máxima mudança de velocidade (REDDY et al., 1987).

Estes resultados obtidos através de radar confirmam que as mudanças nos perfis de densidade eletrônica (N_e) são a principal causa da discrepância observada, como proposto por STENING (1985), visto que mudanças em N_e não podem causar mudanças na mobilidade dos íons ou elétrons na região E onde N_e é uma pequena fração da densidade neutra (n). Por outro lado, as mudanças na densidade neutra podem produzir mudanças em ambos, densidade de elétrons ou íon e mobilidade eletrônica (STENING, 1986; REDDY et al., 1987). Assim, REDDY et al. (1987) apontaram que um possível aumento de n sobre os valores do modelo de 50 a 100% poderiam justificar a discrepância observada entre as alturas computadas e observadas da velocidade máxima de mudança e densidade de corrente no eletrojato. A Figura 2.7c mostra os perfis dos modelos calculados da densidade de corrente (j_E) em gammas, latitudes de 0° , 2° , 3° , 5° e 9° , enquanto os perfis da polarização vertical do campo elétrico (E_p) nas mesmas latitudes são mostradas na Figura 2.7d. A extensão da altura onde o fluxo de corrente é menor e o pico da densidade de corrente é maior é no equador. O alargamento do fluxo de corrente que varia com a altura e a redução do pico da densidade de corrente com o aumento da latitude são muito rápidos e largos além de 2° (Figura 2.7c). Medidas no local de E_Y leste-oeste ou da polarização do campo elétrico vertical E_p no eletrojato equatorial estão disponíveis. Mas foi demonstrado que há mudança de velocidade leste-oeste quando medidas com radares VHF estão relacionadas a aquelas dos campos elétricos leste-oeste no eletrojato (BALSLEY, 1973; REDDY, 1981). Recentemente, os valores absolutos do campo elétrico do eletrojato equatorial foram obtidos com grande resolução, o que é muito útil em diversos estudos científicos (REDDY, 1989).

2.7 CARACTERÍSTICAS DO ELETROJATO EQUATORIAL

2.7.1 A altura do eletrojato

É esperado que haja fluxo do eletrojato onde a condutividade de Cowling, σ_3 seja grande. Na altitude de σ_3 máxima, 102 km, a condutividade é fortemente assimétrica com a altura,

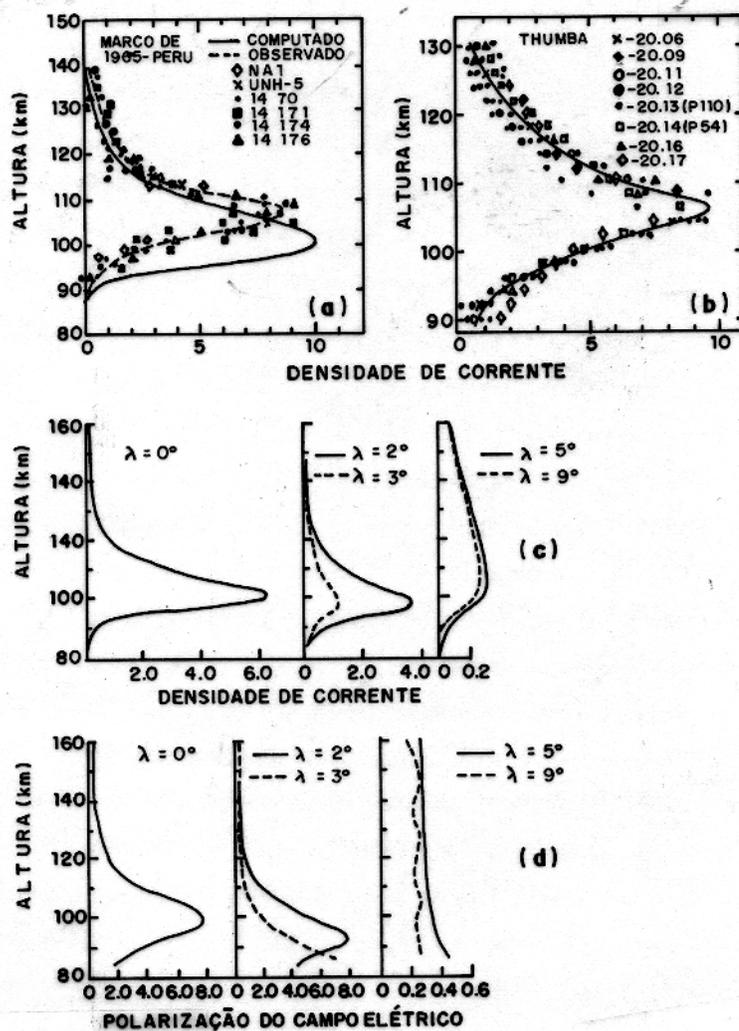


Figura 2.7 - (a) Altura observada da disposição da densidade de corrente no EEJ próximo ao Peru (a curva pontilhada corresponde aos valores observados, enquanto a linha contínua aos valores teóricos); (b) Altura observada da disposição da densidade de corrente do eletrojato equatorial (EEJ) sobre Thumba (os pontos representam valores experimentais enquanto a linha contínua os valores médios); (c) disposição da altura na direção leste da densidade de corrente e (d) Polarização do campo elétrico em diferentes latitudes para $E_y = 0,30$ mV/m, $B = 0,39$ gauss. Adaptado de REDDY (1989).

como mostrado na Figura 2.6 (MATSUSHITA & CAMPBELL, 1967). Contudo, o que mais afeta a densidade de corrente é a condutividade da altura integrada. CHAPMAN (1956) indicou que, aproximadamente, 95% da condutividade da altura integrada vem do intervalo de 90 a 150 km. A altitude da condutividade média, 115 km, é um valor mais preciso para altura da corrente. Por outro lado, medidas feitas a bordo de foguete por CAHILL (1959) localizaram a primeira camada de corrente em 100 km e a segunda de 20 a 25 km acima da primeira. Uma altitude de 110 km para o eletrojato equatorial é uma altura razoável a ser assumida. Os perfis verticais de densidade de corrente para o eletrojato dados por MAYNARD et al. (1965) conduzem a valores médios de $\beta = 2$ e $b = 3$ km. O fato do valor de β ser positivo, significa que não há retorno apreciável de corrente em um plano vertical na direção leste-oeste.

2.7.2 A largura do eletrojato

O eletrojato equatorial constitui-se numa lâmina de corrente de 15 km de espessura que flui na direção leste para oeste (MARESCHAL, 1986). A sua largura pode variar de $\pm 3^\circ$ que corresponde a um intervalo de 350 km a 600 km, centrado no equador magnético (McNISH, 1938). De acordo com MATSUSHITA (1967), se nós compararmos a largura equivalente resultante do modelo de banda, com a largura obtida através do modelo tridimensional, pode-se observar que o eletrojato era mais extenso no Peru que na Nigéria na primeira metade de 1957. A diferença regional na largura pode ser entendida da seguinte forma: o eletrojato é causado pela inibição da corrente de Hall no campo Hall polarizado. A condição ideal para esta situação acontecer ao longo de uma linha de inclinação zero. Ao se afastar do equador magnético, as linhas de força do campo terrestre começam a destruir a polarização, e o ângulo de inclinação determina a distância do equador magnético até o término do eletrojato. A menor taxa de mudança do ângulo de inclinação com a latitude, ocorre na Costa dos Estados Unidos e um levantamento geodésico de 1955 dá a taxa de mudança do ângulo de mergulho como aproximadamente $2,4^\circ$ mer/grau.lat. Na Nigéria e no Peru $1,9^\circ$ mer/grau.lat. Com isso, pode-se esperar que o eletrojato seja mais extenso no Peru que na Nigéria.

2.7.3 A intensidade do eletrojato equatorial

A densidade de corrente típica para o eletrojato é da ordem de 300 A/km no equador magnético, mas é reduzida a 40 A/km em latitudes de 3° (MARESCHAL, 1986). O eletrojato aumenta de intensidade do amanhecer até, aproximadamente, ao meio dia e então diminui até o por do sol. Não é possível afirmar através de medidas realizadas com magnetômetros

colocados no solo se a corrente ainda flui a noite. Se a corrente flui a noite, ela não muda muito de intensidade com o tempo. É conveniente considerar o horário da meia noite como nível zero pelo qual a intensidade e a variação são medidas. CHAPMAN & RAJA RAO (1965) explicaram a diferença entre as intensidades do eletrojato de dia e a noite. Na região de pequeno ângulo de inclinação magnética a condutividade efetiva da camada, (σ_{yy}), na direção leste-oeste é, aproximadamente, a condutividade de Cowling, (σ_3). A condutividade de Cowling predomina sobre as condutividades longitudinal e de Pedersen em uma pequena variação de 90 a 110 km. De dia, na região de pequeno ângulo de inclinação, a densidade eletrônica é suficientemente grande para a altura integrada da condutividade leste-oeste estar concentrada nesta variação de altura. À noite, a máxima ionização move-se para grandes alturas de 200 a 350 km. Como a condutividade de Cowling não predomina em grandes altitudes, a condutividade efetiva leste-oeste na região de pequeno ângulo de inclinação é reduzida.

3 - COMPARAÇÃO DOS EFEITOS DOS MODELOS BI E TRIDIMENSIONAIS (LINHA DE CORRENTE E ELETROJATO GAUSSIANO)

3.1 INTRODUÇÃO

A modelagem da resposta eletromagnética de estruturas tridimensionais teve, na última década, um grande desenvolvimento, motivado por uma apresentação mais realista da geologia localizada em subsuperfície. Contudo, a maioria dos modelos interpretativos no método MT são unidimensionais ou bidimensionais. Com isso a questão é, por que não se faz apenas modelagem de estruturas tridimensionais? A resposta desta pergunta está nos tempos computacionais utilizados nas modelagens com as técnicas numéricas usuais. Para que se tenha uma idéia deste problema basta saber que os modelos bidimensionais gastam alguns segundos para serem processados, enquanto os tridimensionais gastam vários minutos e até horas, dependendo do tipo do computador, da configuração do modelo e do tipo de técnica numérica utilizada. Assim, uma das questões mais interessantes relacionadas com este tema é a substituição da resposta MT de uma estrutura bidimensional pela de uma tridimensional. Esse é, precisamente, o tema deste capítulo.

3.2 OBJETIVOS

Pretendemos neste capítulo comparar os efeitos dos modelos bi e tridimensionais. Ou seja, verificar quando é possível substituir a resposta magnetotelúrica de uma estrutura tridimensional por a de uma bidimensional.

3.3 MODELOS ESTUDADOS

Nesse capítulo, parte-se de uma estrutura tridimensional e aumenta-se gradualmente a dimensão principal da mesma, até que a resposta magnetotelúrica dessa estrutura (resistividade aparente e fase nas polarizações YX e XY) possa ser substituída pela resposta de uma estrutura bidimensional (resistividade aparente e fase nos modos TE e TM).

MODELO - 01

O primeiro modelo utilizado neste trabalho é o modelo bidimensional apresentado na Tese de Mestrado de MOTA (1991), que é mostrado na Figura 3.1. Esse modelo consiste de um meio encaixante de duas camadas, com a primeira camada apresentando 2250 m de espessura e resistividade de $10 \Omega\text{m}$. Dentro desta camada há uma estrutura bidimensional localizada a 250 m da superfície, de 1 km de lado e cuja resistividade é igual a $1 \Omega\text{m}$. A segunda camada apresenta resistividade igual a $1 \Omega\text{m}$.

Identificada a estrutura bidimensional, passaremos a um estágio posterior, qual seja, o de escolher uma estrutura tridimensional compatível com o modelo bidimensional, para se fazer os testes numéricos.

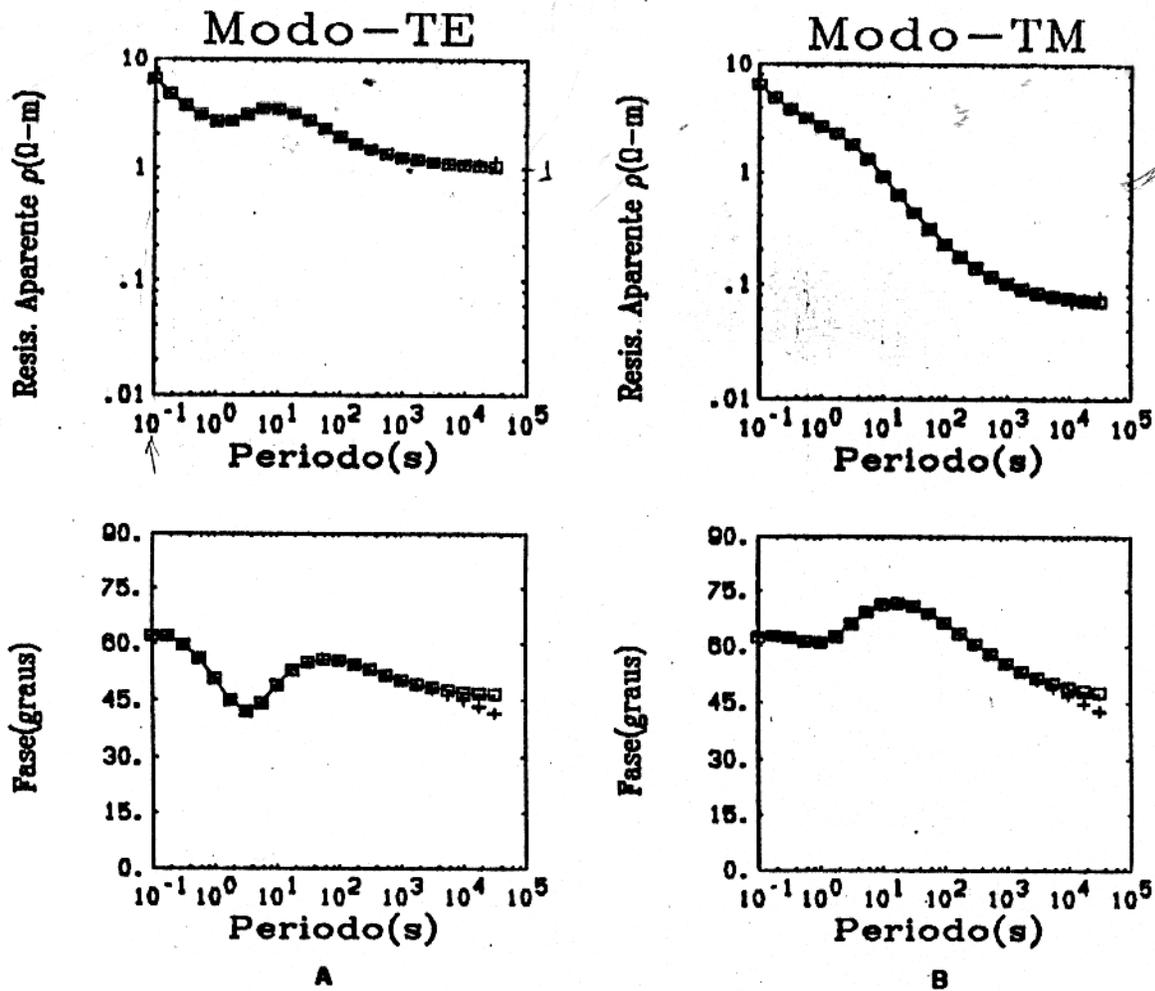
No *primeiro modelo tridimensional*, a estrutura escolhida consiste de um cubo de $1 \Omega\text{m}$ de resistividade e cujas arestas medem 1 km. Ele está imerso num meio encaixante com as mesmas características daquele da estrutura bidimensional (Figura 3.2).

MODELO - 02

O segundo modelo utilizado nesse trabalho é o modelo bidimensional apresentado na Tese de Mestrado de MOTA (1991), que é mostrado na Figura 3.18. Esse modelo possui as mesmas características do meio encaixante da estrutura bidimensional, com a diferença que o embasamento é resistivo, com resistividade de $1000 \Omega\text{m}$.

O *segundo modelo tridimensional* escolhido, consiste numa estrutura cúbica de $1 \Omega\text{m}$ de resistividade e cujas arestas medem 1 km. Ele está imerso no mesmo meio encaixante da estrutura bidimensional (Figura 3.19).

Neste estudo, é importante esclarecer que os gráficos da resistividade aparente e fase, nas polarizações XY e YX, constituem-se de três curvas: o modelo unidimensional, com onda plana; o modelo bidimensional, com onda plana, linha de corrente e eletrojato gaussiano e o modelo tridimensional, com onda plana, linha de corrente e eletrojato gaussiano. É também importante salientar, que tanto a linha de corrente quanto o eletrojato gaussiano estão a uma altura de 110 km e a sondagem é feita a 240 km da fonte. O eletrojato gaussiano apresenta desvio padrão da ordem de 240 km.



FONTES

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

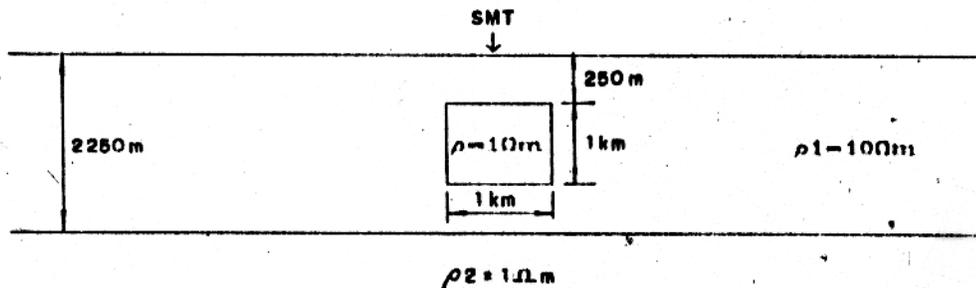


Figura 3.1 - Modelo bidimensional utilizado. Adaptado de MOTA (1991).

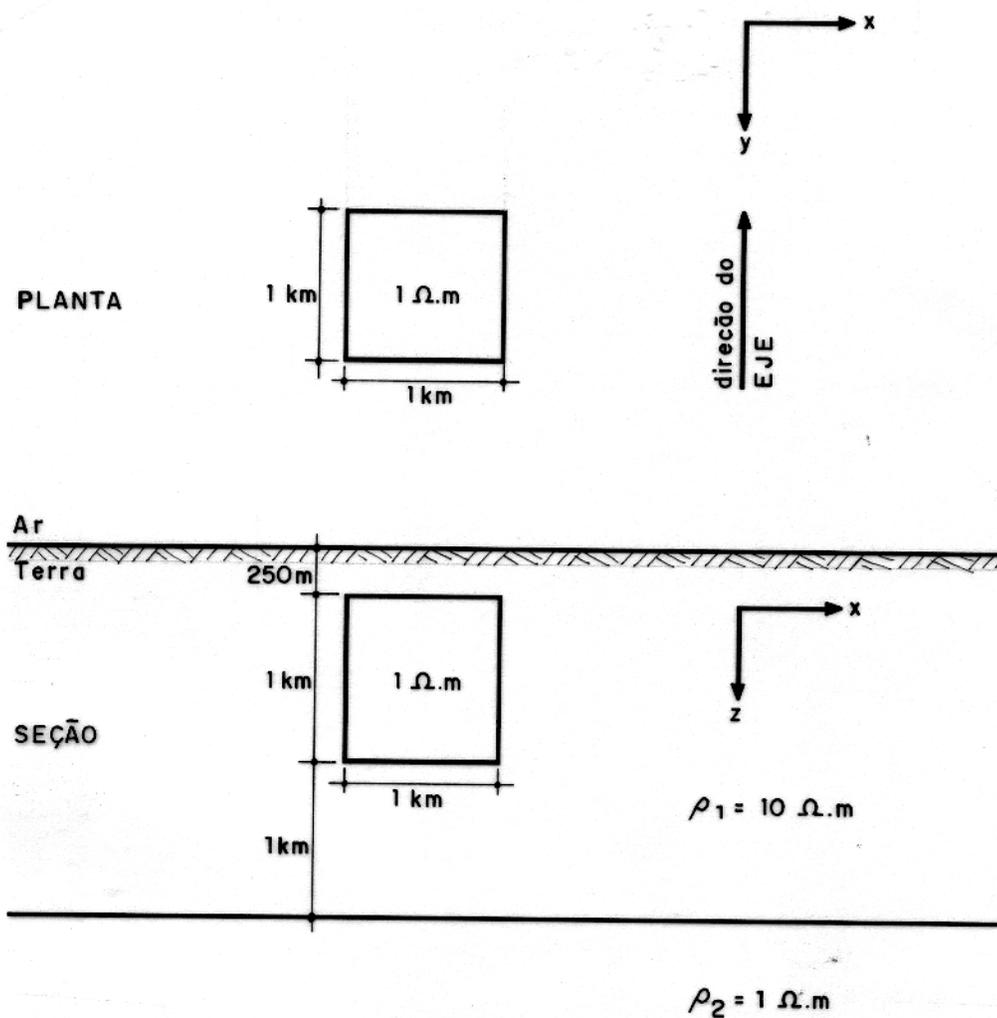


Figura 3.2 - Modelo tridimensional utilizado

3.4 RESULTADOS OBTIDOS

A seguir, apresentamos os resultados para cada um dos modelos analisados. Inicialmente, teremos o *modelo 01* cujo embasamento é condutivo e, em seguida, o *modelo 02* cujo embasamento é resistivo.

MODELO - 01

A Figura 3.3 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.2. Nesses gráficos, se compararmos as curvas dos modelos unidimensional e tridimensional, verifica-se que para frequências inferiores a 10^1 Hz essas curvas são praticamente paralelas em ambas as polarizações. Verifica-se também, que a curva bidimensional para a resistividade aparente no modo TE, está mais próxima da curva tridimensional na polarização YX. Por outro lado, a curva bidimensional no modo TM está um pouco mais afastada, em relação a curva tridimensional na polarização XY. Isso nos induz a inferir que a bidimensionalidade será possivelmente atingida primeiro na polarização YX que corresponde ao modo TE e posteriormente na polarização XY que corresponde ao modo TM. De acordo ainda com essa figura, os gráficos de resistividade aparente nos mostram que o efeito galvânico é razoável, quando se compara a curva do modelo unidimensional com a curva do modelo tridimensional independentemente da polarização ser YX ou XY, não se percebendo diferença na intensidade desse efeito quando a polarização é XY ou YX. Quando se compara as curvas de resistividade aparente dos modelos unidimensional e bidimensional verifica-se claramente que o efeito galvânico no modo TM é muito mais pronunciado que o efeito galvânico no modo TE. Como exemplo, na frequência de 10^{-4} Hz, a resposta unidimensional nos mostra que a resistividade aparente é igual a $10^0 \Omega\text{m}$, quanto que no modo TM o valor dessa resistividade aparente é igual a $10^{-1} \Omega\text{m}$ e no modo TE desse modelo bidimensional a resistividade aparente equivale a $10^0 \Omega\text{m}$.

Os gráficos correspondentes à fase mostram que as curvas unidimensional, bidimensional e tridimensional, apresentam-se invertidas em relação às curvas da resistividade aparente, tanto na polarização XY quanto na YX. Esse fenômeno é devido a que a fase está relacionada à resistividade aparente através de uma transformada de Hilbert. Pode-se observar neste gráfico na polarização XY, que nas altas frequências (pequena profundidade) a curva unidimensional, para frequência igual a 10^1 Hz, apresenta fase igual 45° ; enquanto que, as sondagens bidimensional e tridimensional, na mesma frequência, apresenta fase aproximadamente igual a 60° . Ou seja, nas altas frequências a fase relativa ao modelo unidimensional encontra-se defasada de cerca de 15° em relação à fase dos modelos bidimensional e tridimensional. Nas baixas frequências (grandes profundidades) podemos observar que as curvas unidimensional,

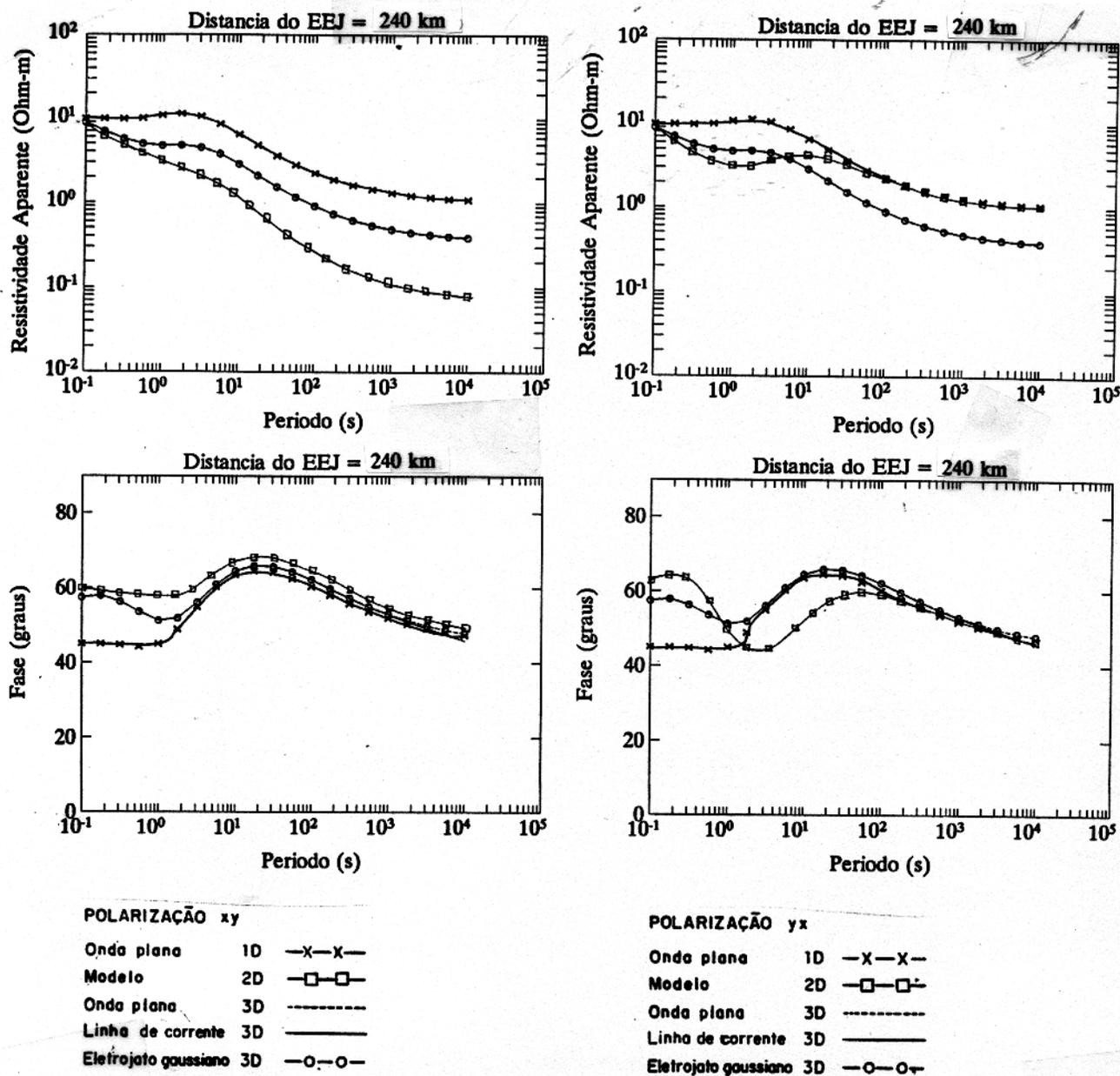


Figura 3.3 - Sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.2.

bidimensional e tridimensional na polarização XY, estão praticamente em fase. Na polarização YX o gráfico da fase nos mostra que para frequências inferiores a 10^{-2} Hz as curvas que representam os três tipos de resposta estão praticamente em fase. Na frequência de 10^{-1} Hz a curva bidimensional está defasada em cerca de 20° em relação às curvas unidimensional e tridimensional, as quais estão em fase. De acordo com os gráficos apresentados nesta figura, verifica-se que o eletrojato equatorial não apresenta nenhuma influência nas sondagens magnetotélúricas, mesmo nas baixas frequências. Uma possível explicação para esse fenômeno seria porque nos modelos utilizados para a obtenção das curvas o embasamento é condutivo ($\rho = 1 \Omega\text{m}$). Deve-se ressaltar, novamente, que os gráficos da resistividade aparente e fase, nas duas polarizações constituem-se de três curvas: o modelo unidimensional, representado pela onda plana 1D; o modelo bidimensional, representado pela onda plana 2D, linha de corrente 2D e eletrojato gaussiano 2D; o modelo tridimensional, representado pela onda plana 3D, linha de corrente 3D e eletrojato gaussiano 3D.

A Figura 3.5 mostra os gráficos das sondagens magnetotélúricas nas polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.4, no que concerne à resistividade aparente e fase. Deve-se observar que neste caso a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal, aumentou 100% em relação a aquela da Figura 3.2. Ou seja, passou de 1 km para 2 km. O gráfico da resistividade aparente na polarização XY, nos mostra que o valor dessa resistividade decresceu em relação ao gráfico da Figura 3.3 em aproximadamente $0,1 \Omega\text{m}$, ou seja, passou de $0,4 \Omega\text{m}$ para $0,3 \Omega\text{m}$ na frequência de 10^{-4} Hz. Na polarização YX, entretanto, o valor dessa resistividade praticamente não se alterou em relação ao gráfico da Figura 3.3, nessa mesma frequência. Esses resultados parciais são importantes pois demonstram que é necessária uma estrutura tridimensional com dimensão muito maior, na direção principal, para que se possa substituir a resposta magnetotélúrica desta estrutura pela de uma bidimensional. Comparando as curvas na polarização XY dos modelos unidimensional e tridimensional das Figuras 3.3 e 3.5, verifica-se que o efeito galvânico é mais acentuado na Figura 3.5. Uma possível explicação seria porque nessa figura a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal é muito maior e conseqüentemente haverá uma polarização mais intensa de cargas nessa direção. Contudo, se fizermos a comparação das curvas de resistividade aparente na polarização YX dos mesmos modelos nas mesmas figuras, verifica-se que há, alguma diferença no efeito galvânico das duas figuras, sobretudo para o intervalo de frequências de 10^1 até 10^{-1} Hz. Observando o gráfico de resistividade aparente na polarização YX, verifica-se que para frequências inferiores a 10^{-2} Hz não se pode afirmar se resposta magnetotélúrica é proveniente do modelo unidimensional ou do bidimensional no modo TE, pois a partir deste valor de frequência as duas curvas estão completamente sobrepostas. Os efeitos produzidos pela estrutura tridimensional nas sondagens magnetotélúricas

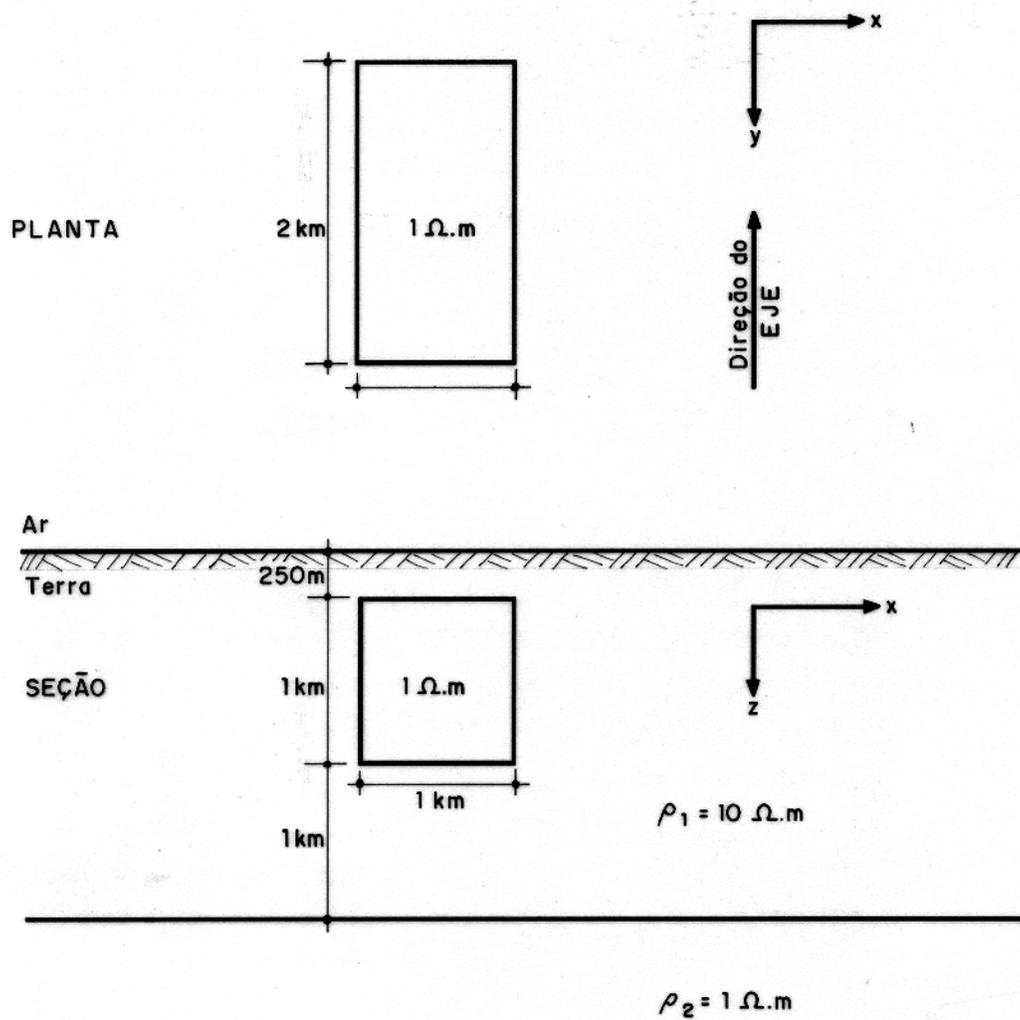


Figura 3.4 - Modelo tridimensional utilizado

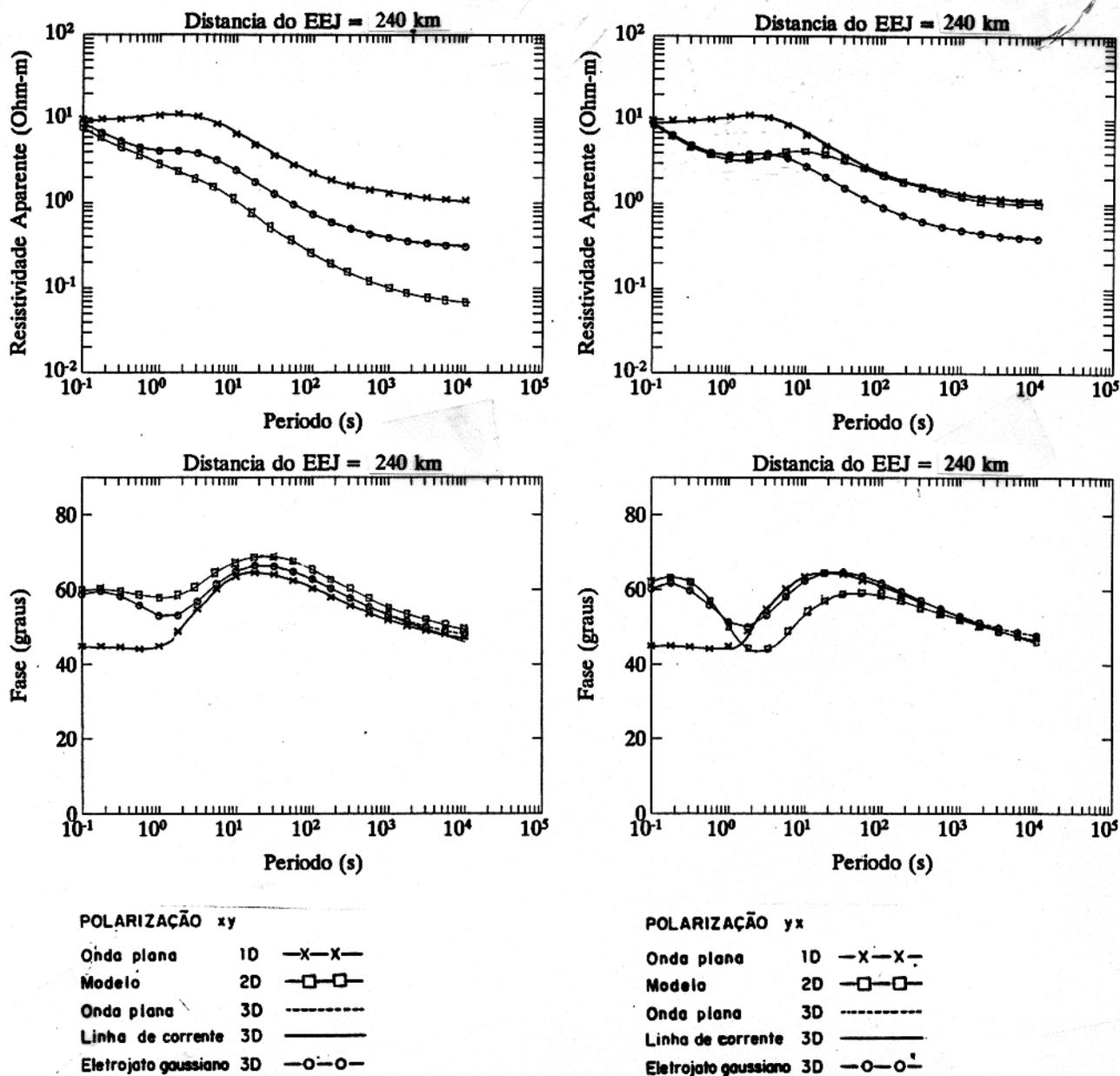


Figura 3.5 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.4.

podem ser evidenciados nos gráficos de resistividade aparente para ambas as polarizações; fazendo a comparação da curva unidimensional e da tridimensional, verifica-se que elas apresentam um certo paralelismo para frequências inferiores a 10^1 Hz, nas polarizações XY e YX, porém não há sobreposição dessas curvas nesse intervalo de frequência.

Comparando os gráficos da fase na polarização XY mostrados nas 3.3 e 3.5, verifica-se que apesar da estrutura tridimensional ter a dimensão aumentada na direção principal de 100%, os efeitos produzidos nas sondagens magnetotélúricas foram realmente muito pequenos. De acordo com eles, a mudança mais perceptível é que na Figura 3.5 a curva unidimensional está menos paralela à curva tridimensional, que na Figura 3.3. Se compararmos a fase nas duas polarizações mostradas nas duas figuras, verifica-se que os efeitos produzidos nas sondagens magnetotélúricas foram mais pronunciados na polarização XY que na polarização YX. Este pode ser visualizado da seguinte forma: quando a frequência é de 10^1 Hz, observa-se que na Figura 3.3 as curvas unidimensional, bidimensional e tridimensional estão totalmente fora de fase, mas na Figura 3.5 as curvas dos modelos bidimensional e tridimensional estão em fase. Percebe-se também que para frequências entre 10^0 Hz e 10^{-2} Hz, as curvas unidimensional e tridimensional que estão justapostas apresentam-se mais próximas da curva do modelo bidimensional no modo TE da Figura 3.5 que na Figura 3.3. De acordo com a Figura 3.5, verificamos que a fase na polarização XY nos mostra que as curvas bidimensional e tridimensional estão em fase na frequência de 10^1 Hz e voltam a ficar praticamente em fase para frequências inferiores a 10^{-1} Hz. Observando o gráfico, verifica-se que a resposta magnetotélúrica devido a estrutura tridimensional pode ser percebida somente nas altas frequências, ou seja, entre 10^1 Hz e 10^{-1} Hz, pois para frequências inferiores, as curvas dos modelos unidimensional e tridimensional estão completamente em fase. A fase na polarização YX, nos mostra que nas altas frequências, de 10^1 Hz a 10^0 Hz, as curvas bidimensional e tridimensional estão em fase, enquanto nas frequências entre 10^0 Hz e 10^{-2} Hz essas curvas estão fora de fase. Nas frequências inferiores a 10^{-2} Hz essas curvas voltam a entrar em fase. Por outro lado, se compararmos as curvas unidimensional e tridimensional verificamos que na frequência de 10^1 Hz a diferença de fase entre elas é de aproximadamente 15° , porém para frequências inferiores a 10^0 Hz essas curvas estão em fase. De acordo com esses resultados obtidos em ambas polarizações, observa-se que para frequências inferiores a 10^0 Hz não é possível diferenciar entre as respostas referentes ao modelo unidimensional estratificado ou da estrutura tridimensional. É importante ressaltar, no que diz respeito à fase, que independentemente da polarização, as curvas dos modelos unidimensional, bidimensional e tridimensional, na frequência 10^{-4} Hz tendem para um ângulo de fase igual a 45° . Estes gráficos também nos mostram que não há influência do eletrojato equatorial nas sondagens magnetotélúricas, mesmo nas baixas frequências.

A Figura 3.7 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.6. É importante ressaltar que nesta situação a estrutura tridimensional teve a dimensão aumentada na direção principal em 400% em relação a aquela da Figura 3.2 (1 km para 4 km). Comparando os gráficos de resistividade aparente na polarização XY, apresentados nas Figuras 3.5 e 3.7, verifica-se que a sondagem da estrutura tridimensional está um pouco mais afastada da curva unidimensional na Figura 3.7, que na Figura 3.5. Esse efeito pode ser verificado facilmente na frequência de 10^{-4} Hz, na Figura 3.5 o valor da resistividade aparente, para essa frequência, no que se refere a curva tridimensional é de $0,3 \Omega\text{m}$ e na Figura 3.7 este valor cai para cerca de $0,25 \Omega\text{m}$, ambos valores em relação à curva unidimensional. Esses resultados comprovam que a medida em que a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal aumenta o efeito galvânico também aumenta, nesta polarização. Entretanto, é na polarização YX que são observados os maiores efeitos nas sondagens magnetotelúricas, que podem ser verificados na frequência de 10^{-4} Hz. Assim, na Figura 3.5, o valor da resistividade aparente para essa frequência no que se refere a curva do modelo tridimensional é de $0,4 \Omega\text{m}$ e na Figura 3.7 este valor aumenta para cerca de $0,6 \Omega\text{m}$, em relação à curva do modelo unidimensional. Estes resultados verificam que a medida em que a dimensão na direção principal aumenta, o efeito galvânico tende a diminuir de forma bastante rápida nessa polarização. Deve-se sempre lembrar que a mudança ocorrida nessas curvas é sempre em relação à curva do modelo tridimensional, pois as curvas provenientes dos modelos unidimensional e bidimensional não sofrem modificações. Uma das possíveis razões para se ter mais influência na polarização YX do que na XY, seria a posição do eletrojato em relação a direção principal da estrutura tridimensional. Sabe-se que nesta situação a dimensão do corpo na direção Y é 400% maior que na direção X e que o eletrojato está posicionado na direção Y. Desse modo, a componente do campo elétrico na direção Y é maior que a componente transversal, ou seja, na direção X. Como consequência, teremos que as correntes de acanalamento na direção Y também serão maiores que na direção X. Na realidade, estas correntes elétricas induzidas no corpo também produzirão campos elétricos secundários que serão posteriormente medidos na superfície terrestre.

Comparando a fase na polarização XY, mostradas nas Figuras 3.5 e 3.7, verifica-se que a curva bidimensional está praticamente em fase com a curva tridimensional na Figura 3.7, enquanto na Figura 3.5 isso não acontece. Nesta figura há um intervalo de frequência que vai de 10^0 Hz a 10^{-1} Hz onde as curvas dos modelos bidimensional e tridimensional estão defasadas. O que é interessante nesses resultados é que a fase mesmo sendo uma grandeza física bastante sensível, não apresenta efeitos apreciáveis por parte do eletrojato nas sondagens magnetotelúricas tanto nas baixas frequências quanto nas altas. Como se sabe, as

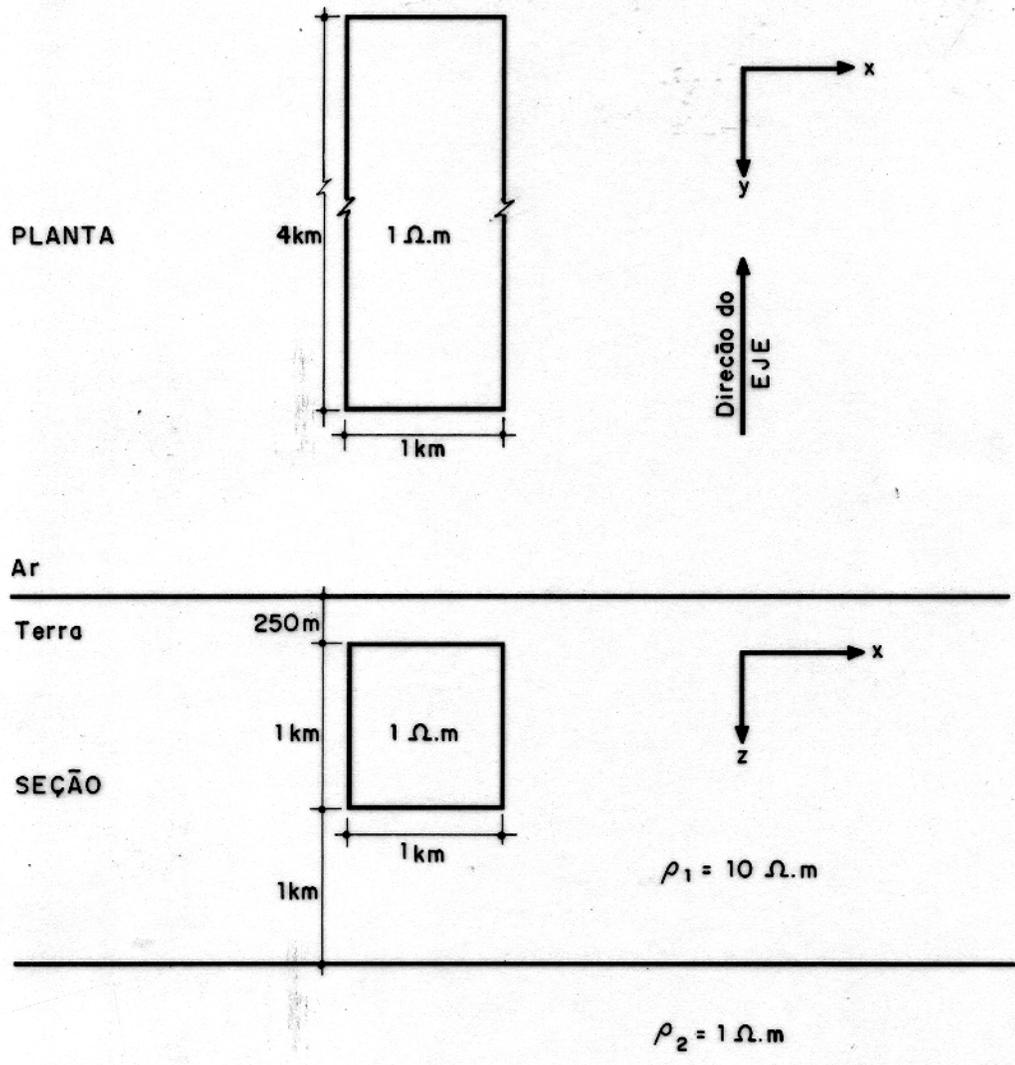


Figura 3.6 - Modelo tridimensional utilizado

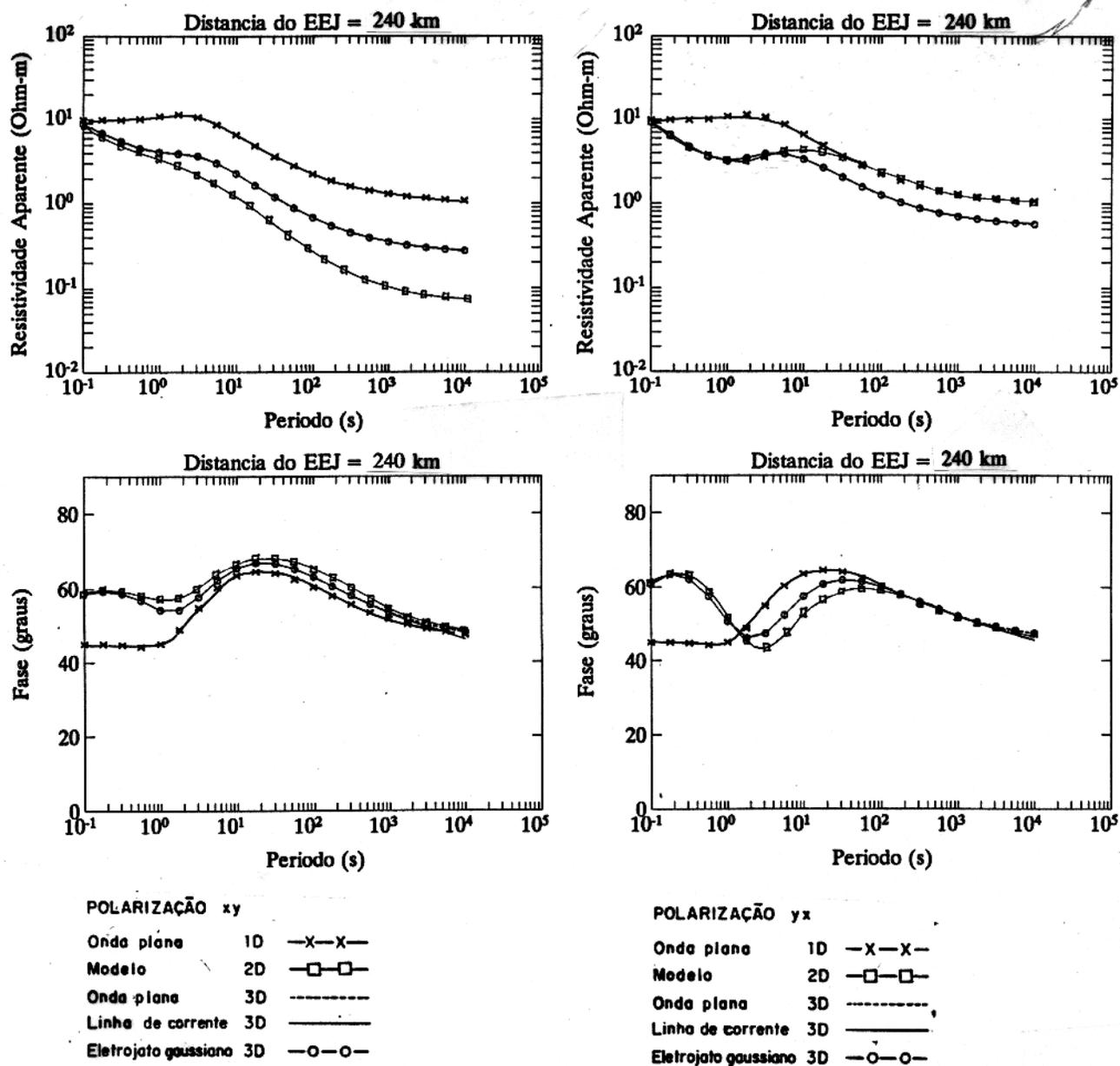


Figura 3.7 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.6.

altas frequências nos dão a resposta magnetotelúrica da subsuperfície em pequena profundidade, enquanto nas baixas frequências a resposta magnetotelúrica obtida está relacionada à grandes profundidades. Analisando a fase na polarização XY mostrados nas Figuras 3.5 e 3.7 no que concerne às curvas unidimensional e tridimensional, verifica-se que essas curvas estão praticamente em fase na Figura 3.7 para frequências inferiores a 10^{-1} Hz; enquanto na Figura 3.5 essas curvas só estão completamente em fase para frequências inferiores a 10^{-3} Hz. Com relação a polarização YX, podemos verificar nessas mesmas figuras que para frequências entre 10^0 Hz e 10^{-2} Hz, as curvas bidimensional e tridimensional apresentam-se praticamente paralelas em ambas as figuras, porém na Figura 3.5 a diferença de fase entre as curvas dos dois modelos é mais acentuada que na Figura 3.7. Observando com mais detalhes, essas duas figuras, constatamos que a fase no intervalo de frequências entre 10^0 Hz e 10^{-2} Hz, teve uma decréscimo muito grande da Figura 3.5 para a Figura 3.7, isso quando a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal passou de 2 km para 4 km. O que se pode notar também nessas figuras é que no caso da Figura 3.5 as curvas unidimensional, bidimensional e tridimensional estão em fase para frequências inferiores a 10^{-2} Hz, enquanto na Figura 3.7 essas mesmas curvas estão em fase para frequências inferiores a 10^{-3} Hz. Os gráficos de resistividade aparente e fase que constituem a Figura 3.5 mostram, independentemente da polarização, que não há efeitos do eletrojato equatorial sobre as sondagens magnetotelúricas, mesmo nas baixas frequências.

A Figura 3.9 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.8. Neste caso, a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal é 800% maior que a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal, mostrada na Figura 3.2 (1 km para 8 km). Se fizermos a comparação das sondagens apresentadas nas Figuras 3.7 e 3.9, verifica-se que as curvas bidimensional e tridimensional na polarização YX para a resistividade aparente, estão quase superpostas em todo o espectro de frequência, enquanto as curvas apresentadas na Figura 3.7, estão superpostas até a frequência de 10^{-1} Hz. Para a polarização YX, entretanto, houve uma maior aproximação entre as curvas dos modelos bidimensional e tridimensional na Figura 3.9, que na Figura 3.7. Comparando as curvas de resistividade aparente bidimensional e tridimensional na polarização XY, verifica-se que na Figura 3.9 estas curvas estão mais próximas, que na Figura 3.7. para constatar essa afirmação podemos observar que na frequência de 10^{-4} Hz a separação entre as curvas dos modelos bidimensional e tridimensional na Figura 3.7 é de aproximadamente $0,22 \Omega m$, enquanto na Figura 3.9 essa diferença é aproximadamente igual a $0,12 \Omega m$. Estes resultados obtidos para a resistividade aparente nas duas polarizações são importantes porque mostram que a medida em que se aumenta a dimensão na direção principal a sondagem tridimensional na polarização YX, se aproxima de forma bastante rápida

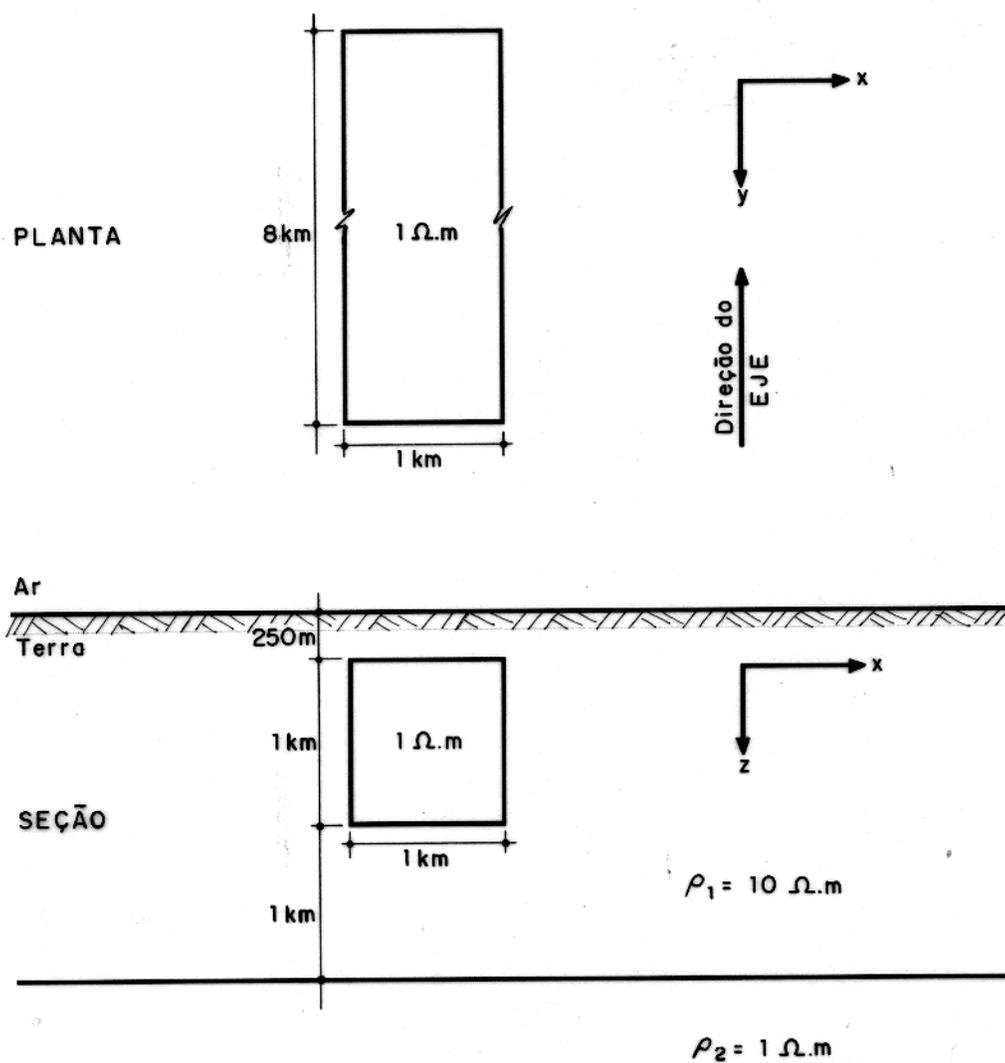


Figura 3.8 - Modelo tridimensional utilizado

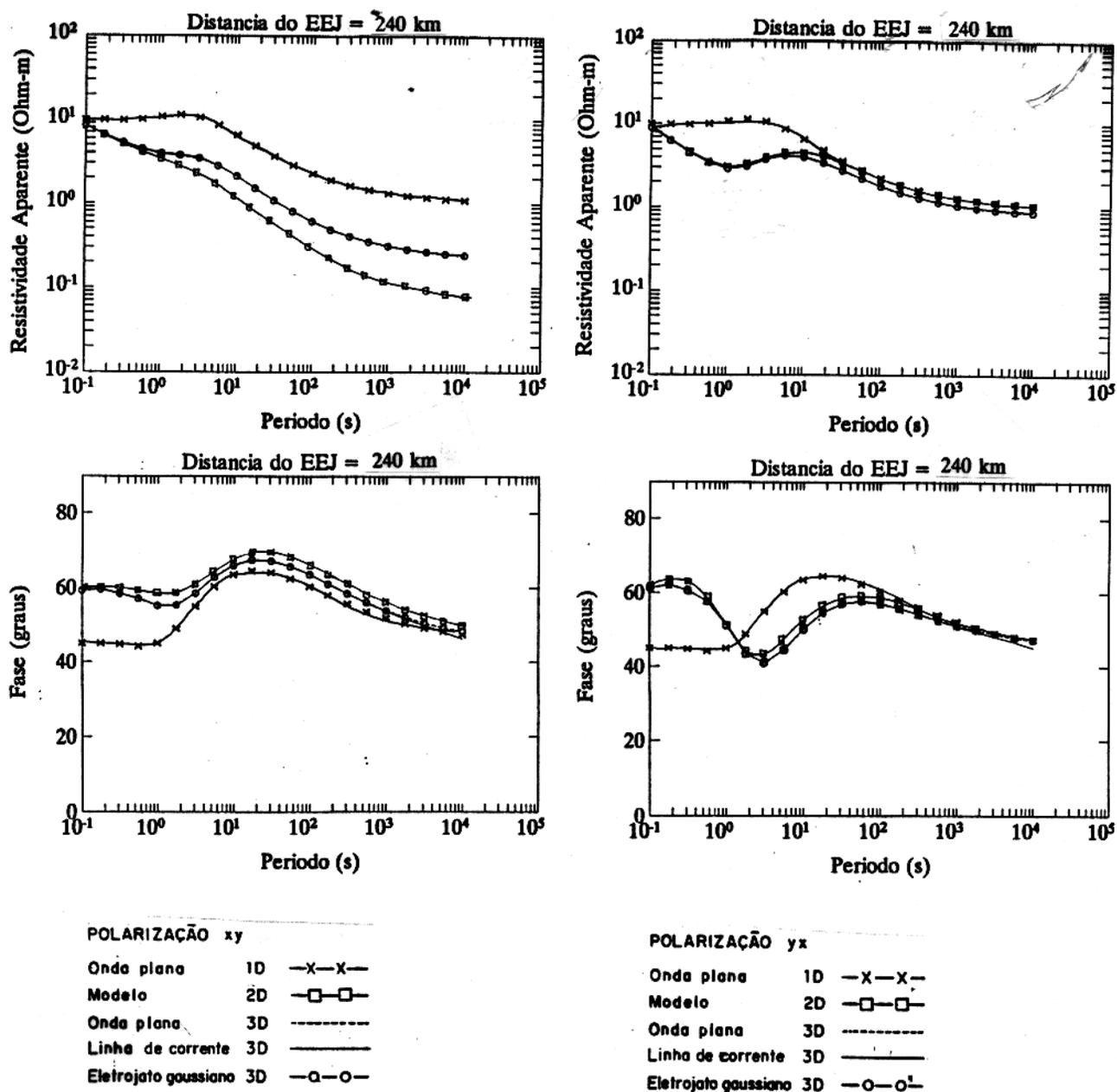


Figura 3.9 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.8.

da curva bidimensional no modo TE. Porém, a curva tridimensional na polarização XY, se aproxima de forma bastante lenta da sondagem bidimensional no modo TM.

Observando a fase na polarização XY mostrada nas Figuras 3.7 e 3.9, verifica-se que para frequências inferiores a 10^{-1} Hz as sondagens dos modelos unidimensional, bidimensional e tridimensional de ambas as figuras estão aproximadamente em fase. Na polarização XY a fase tridimensional está um pouco mais sobreposta à curva bidimensional no gráfico da Figura 3.9, que no gráfico da Figura 3.7. Esses gráficos da fase na polarização XY também mostram que na frequência de 10^1 Hz as curvas bidimensional e tridimensional estão defasadas de 15° em relação à curva unidimensional, tanto na Figura 3.7 quanto na Figura 3.9. Nas baixas frequências, o que se observa é que as curvas dos três modelos tendem a se sobrepor. Essa sobreposição ocorre para uma frequência de 10^{-4} Hz, com uma fase igual a 45° . Para frequências entre 10^0 Hz e 10^{-2} Hz o gráfico da Figura 3.9 mostra que a curva unidimensional, está praticamente paralela às curvas bidimensional e tridimensional. É importante observar-se na Figura 3.9, assim como, nas outras figuras deste modelo, que as curvas tridimensionais (onda plana 3D, linha de corrente 3D e eletrojato gaussiano 3D) estão totalmente superpostas. Desse modo, é possível escolher qualquer uma das fontes com sua influência nos modelos tridimensionais e comparar seu resultado com os efeitos do modelo bidimensional. Este fenômeno da superposição das curvas ocorreu, possivelmente, devido a resistividade do embasamento do modelo em estudo ser baixa ($1 \Omega m$).

A Figura 3.11 mostra as sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.10. Neste modelo, a dimensão na direção principal da estrutura 3D aumentou 1600% em relação à da Figura 3.2 (1 km para 16 km). No gráfico de resistividade aparente a sondagem na polarização YX do modelo tridimensional está completamente sobreposta à curva bidimensional no modo TE, em todo o espectro de frequência apresentado. Este resultado é importante pois demonstra que ao se aumentar a dimensão da estrutura na direção principal em cerca de dezesseis vezes em relação à dimensão inicial, a sondagem tridimensional, pode ser substituída pela bidimensional no modo TE. Observe no gráfico de resistividade aparente na polarização YX da Figura 3.11, que a presença da estrutura tridimensional só é verificada para frequências que variam entre 10^1 Hz e 10^{-2} Hz, ou seja nas altas frequências; para frequências inferiores a 10^{-2} Hz a curva de sondagem unidimensional está completamente sobreposta as curvas bidimensional e tridimensional. Salienta-se também na Figura 3.11, que na frequência de 10^1 Hz a resistividade aparente na polarização YX é igual a $10 \Omega m$ que é o mesmo valor da resistividade da primeira camada do modelo em estudo (Figura 3.2). Já na frequência de 10^{-4} Hz a resistividade aparente na polarização YX é igual a $10^0 \Omega m$, que é o mesmo valor da resistividade do embasamento do modelo em estudo. Comparando os gráficos de resistividade aparente na

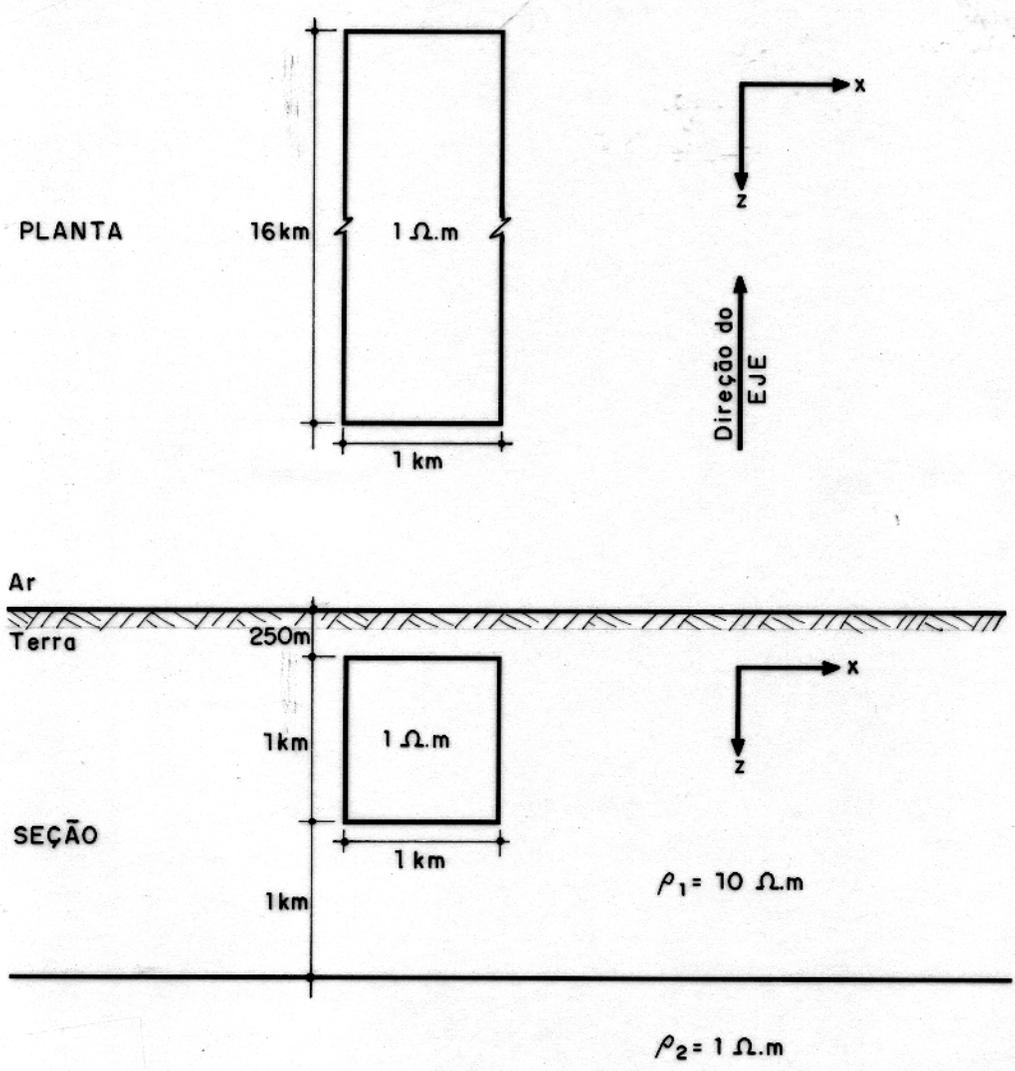


Figura 3.10 - Modelo tridimensional utilizado

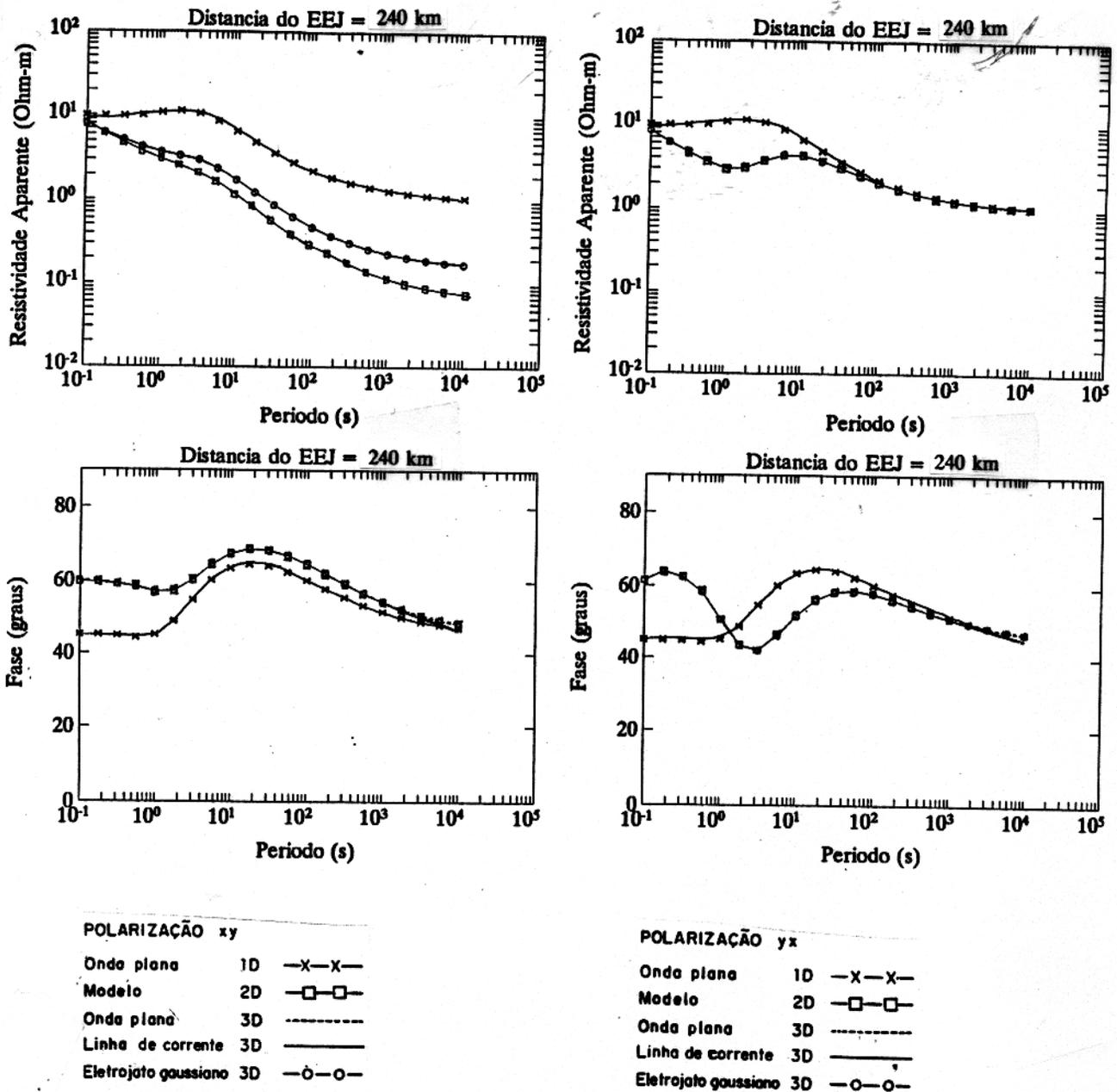


Figura 3.11 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.10.

polarização XY mostrados nas Figuras 3.9 e 3.11, verifica-se que o efeito galvânico na Figura 3.11 é maior que na Figura 3.9. Este efeito galvânico tende a se acentuar nessa polarização a medida em que cresce a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal. Nessa Figura 3.11 o gráfico de resistividade aparente na polarização XY nos mostra que a medida em que cresce a dimensão na direção principal, ocorre um afastamento da curva tridimensional em relação à curva unidimensional. Em outras palavras, ocorre uma aproximação da curva tridimensional em relação à curva bidimensional no caso do modo TM.

A fase na polarização XY da Figura 3.11 nos mostra que é possível substituir a resposta magnetotelúrica proveniente de um modelo tridimensional, pela resposta referente a um modelo bidimensional no modo TM, para a estrutura com as dimensões apresentadas na Figura 3.10. Essa afirmação é verídica pois a curva tridimensional está completamente sobreposta à curva bidimensional no modo TM, em todo o espectro de frequências mostrado no gráfico. Na frequência de 10^1 Hz, a Figura 3.11 nos mostra que a sondagem unidimensional apresenta uma fase aproximadamente igual a 45° ; enquanto as curvas bidimensional e tridimensional, que estão superpostas, apresentam uma fase igual a 60° . Da mesma forma, as curvas bidimensional e tridimensional apresentam um certo paralelismo com a sondagem unidimensional. A partir da frequência de 10^{-3} Hz, essas curvas unidimensional, bidimensional e tridimensional se superpõem. Na frequência de 10^{-4} Hz a fase na polarização XY mostra que essas curvas apresentam uma fase aproximadamente igual a 45° . De acordo com esse gráfico da fase na polarização XY, se observa que a sondagem tridimensional na polarização YX está completamente sobreposta à curva bidimensional no modo TE, em todo o espectro de frequência apresentado. Novamente, esse resultado é importante pois demonstra que ao se aumentar a dimensão na direção principal cerca de dezesseis vezes em relação à dimensão inicial, a sondagem tridimensional, pode ser substituída pela bidimensional no modo TE. Observando os quatro gráficos mostrados na Figura 3.11, verificamos que não há efeitos do eletrojato equatorial nas sondagens magnetotelúricas.

A Figura 3.13 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.12. Nesta figura a estrutura tridimensional teve a sua dimensão aumentada na direção principal de 2000% em relação à da Figura 3.2 (1 km para 20 km). O objetivo agora é verificar quando é possível substituir a resposta magnetotelúrica produzida por uma estrutura tridimensional, pela resposta de uma bidimensional, na polarização XY, que corresponde ao modo TM no caso bidimensional. Para a resistividade aparente na polarização YX e fase nas polarizações XY e YX, essa substituição já foi obtida nos gráficos da Figura 3.11. Comparando os gráficos de resistividade aparente na polarização XY mostrados nas Figuras 3.11 e 3.13, verifica-se que o efeito galvânico é maior na Figura 3.13 que na Figura 3.11. Esse resultado pode ser confirmado ao observar-se

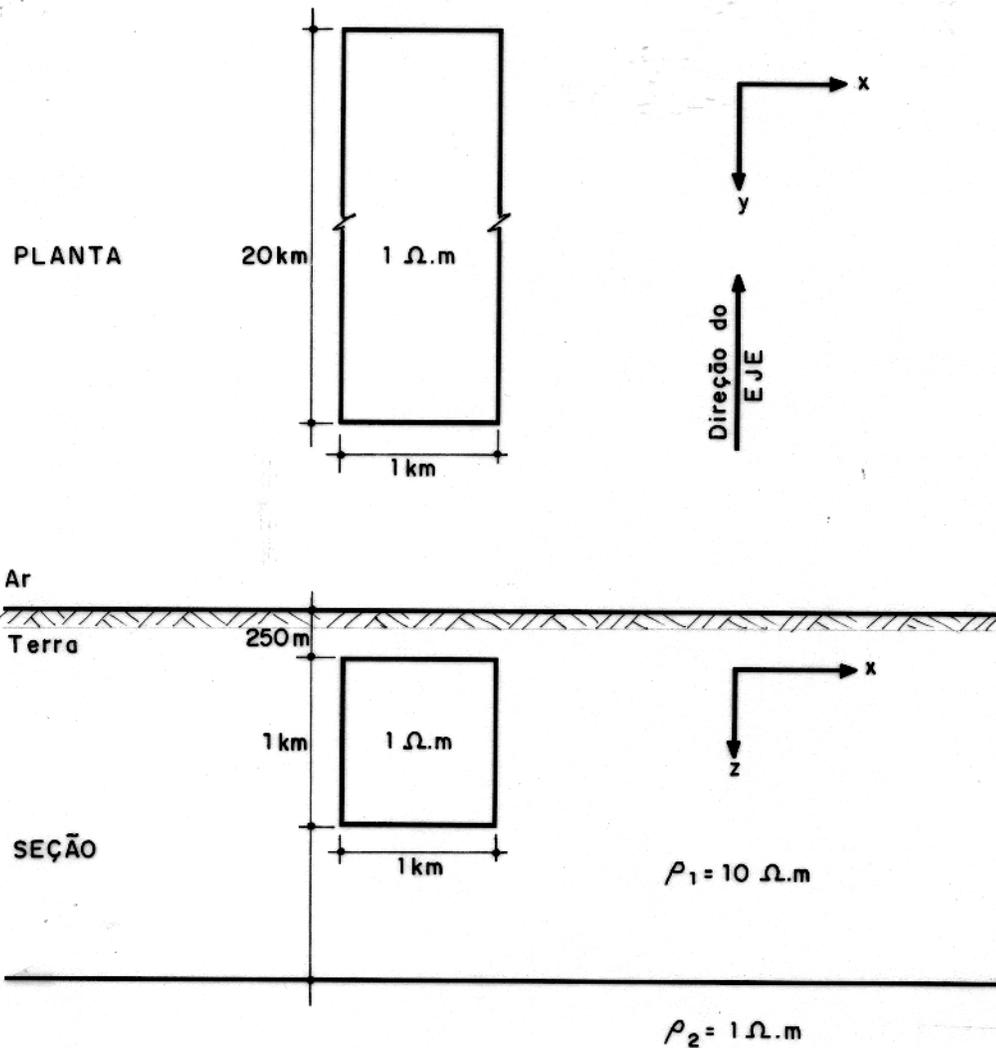


Figura 3.12 - Modelo tridimensional utilizado

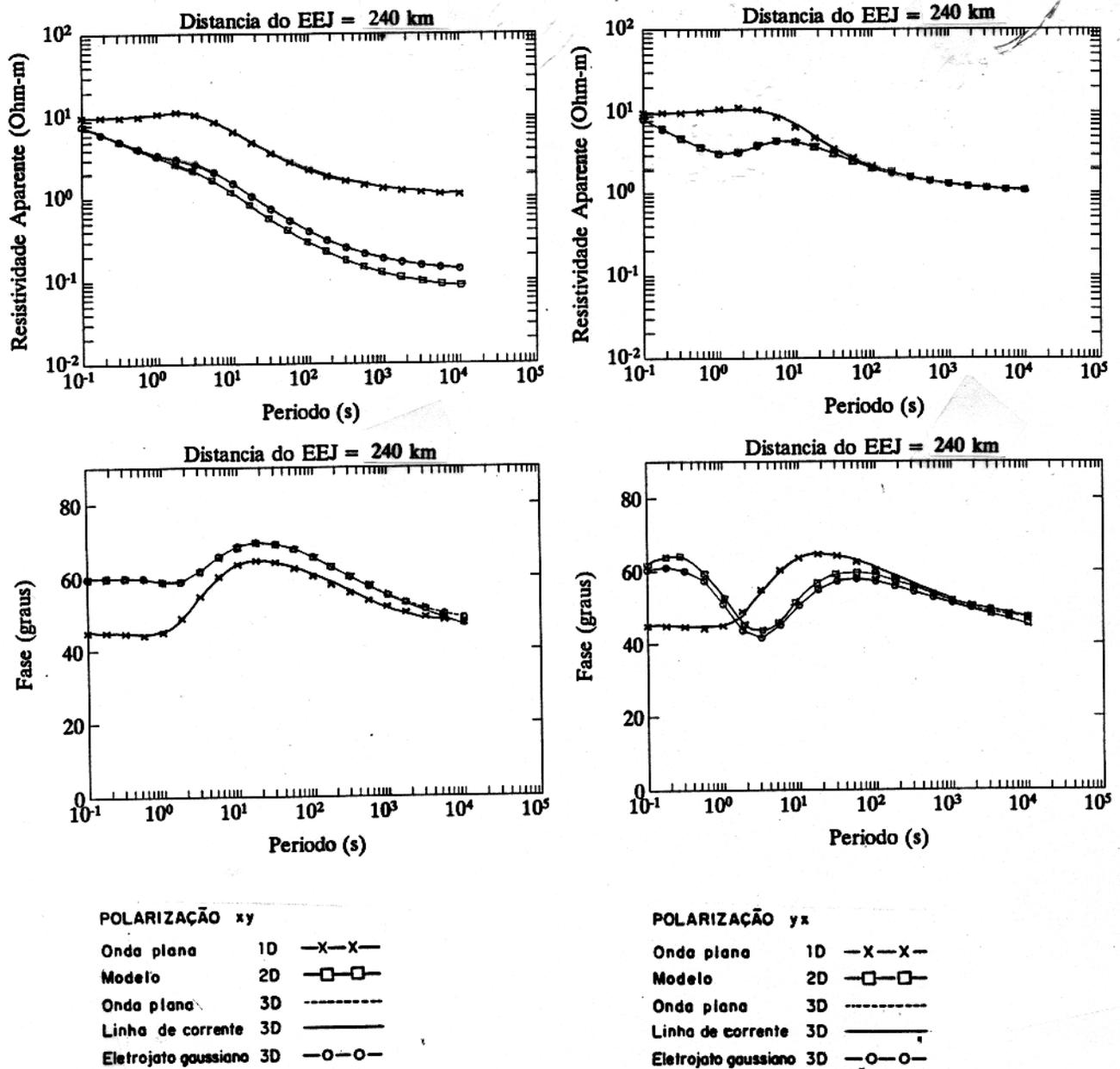


Figura 3.13 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.12.

na Figura 3.13 que a curva tridimensional encontra-se bastante afastada da unidimensional. Já na Figura 3.11, a curva tridimensional encontra-se mais próxima da curva unidimensional. No gráfico da Figura 3.13, é possível verificar que para frequências que variam entre 10^1 Hz e 10^0 Hz as curvas bidimensionais, no caso do modo TM, e tridimensionais na polarização XY estão completamente sobrepostas. Para frequências inferiores a 10^0 Hz essas curvas apresentam um certo paralelismo.

A Figura 3.15 mostra as sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.14. Deve-se observar que nesse caso a estrutura tridimensional teve a dimensão na direção principal aumentada de 2400% em relação à da Figura 3.2 (1 km para 24 km). Comparando as sondagens apresentadas nas Figuras 3.13 e 3.15, verifica-se que a curva tridimensional para a resistividade aparente na polarização XY, está praticamente sobreposta à curva bidimensional no modo TM. O que é interessante, nesse caso, é que essa estrutura tridimensional com dimensão de 24 km em relação à direção principal, apresenta efeitos nas sondagens magnetotélúricas que são semelhantes aos efeitos produzidos por uma estrutura bidimensional. Nesse e nos demais gráficos relacionados ao primeiro modelo cujo embasamento é condutivo, observa-se que nas curvas de resistividade aparente na polarização XY, o efeito da tridimensionalidade ou bidimensionalidade do corpo localizado na subsuperfície pode ser observado facilmente para frequências inferiores a 10^1 Hz. Essa afirmação é verdadeira pois as sondagens magnetotélúricas bidimensionais e tridimensionais em nenhum momento, para frequências inferiores a 10^1 Hz, se superpõem à curva do modelo da onda plana 1D para um meio estratificado.

A Figura 3.17 mostra as sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.16. Neste caso a estrutura teve a dimensão na direção principal aumentada de 2600% em relação à aquela da Figura 3.2 (1 km para 26 km). De acordo com a Figura 3.17, o gráfico de resistividade aparente na polarização XY nos mostra que a resposta magnetotélúrica tridimensional, poderá ser substituída pela bidimensional no modo TM. Esse resultado pode ser constatado verificando-se que as curvas bidimensional e tridimensional estão completamente sobrepostas em todo o espectro de frequência apresentado no gráfico. De acordo com essa mesma figura, o gráfico de resistividade aparente na polarização XY nos mostra que o efeito galvânico é bastante pronunciado entre as curvas unidimensional e tridimensional. Por exemplo, na frequência de 10^{-4} Hz a resistividade aparente unidimensional é cerca de $1 \Omega m$, já com relação ao modelo tridimensional, para o mesmo valor de frequência, o valor dessa resistividade aparente é de aproximadamente $0,1 \Omega m$. Este gráfico da resistividade aparente na polarização XY, visto na Figura 3.17, também nos mostra que na frequência de 10^1 Hz, o valor da resistividade aparente para os três modelos utilizados, quais sejam, unidimensional, bidimensional e tridimensional, é igual

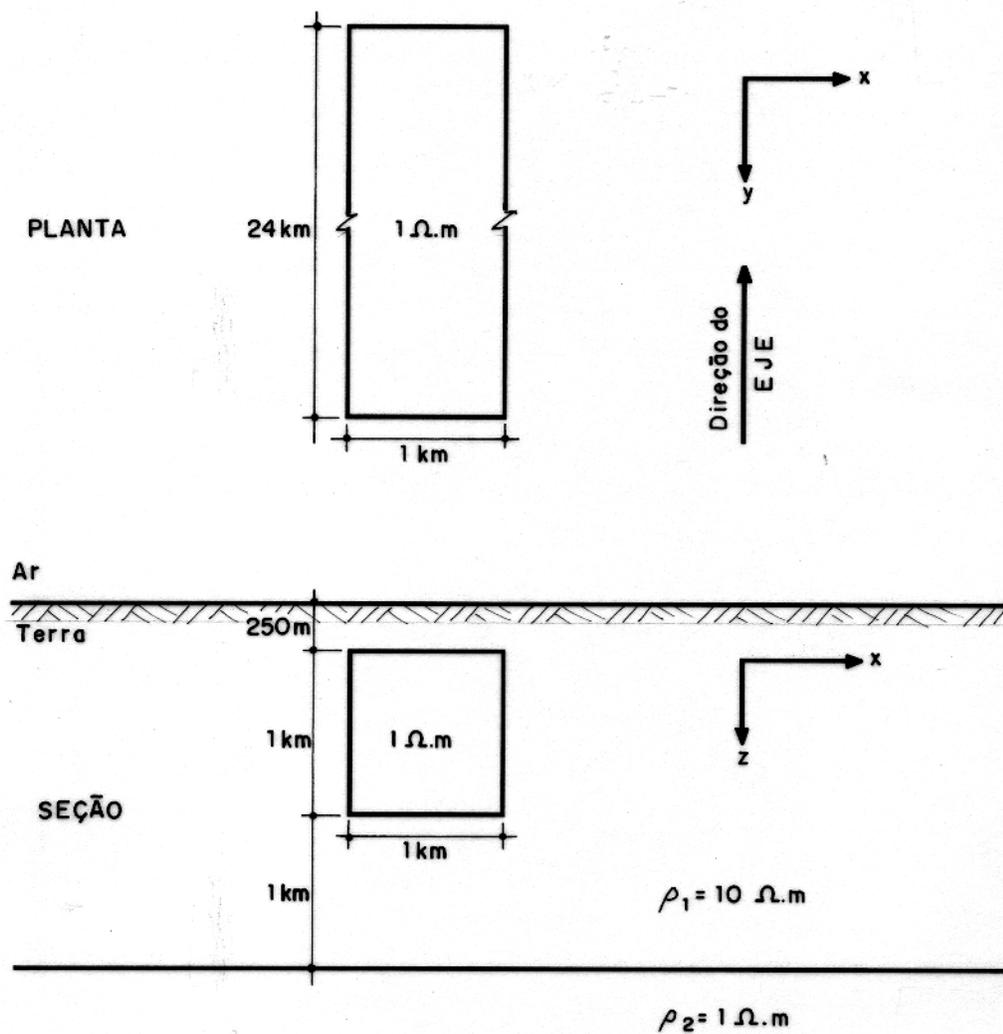


Figura 3.14 - Modelo tridimensional utilizado

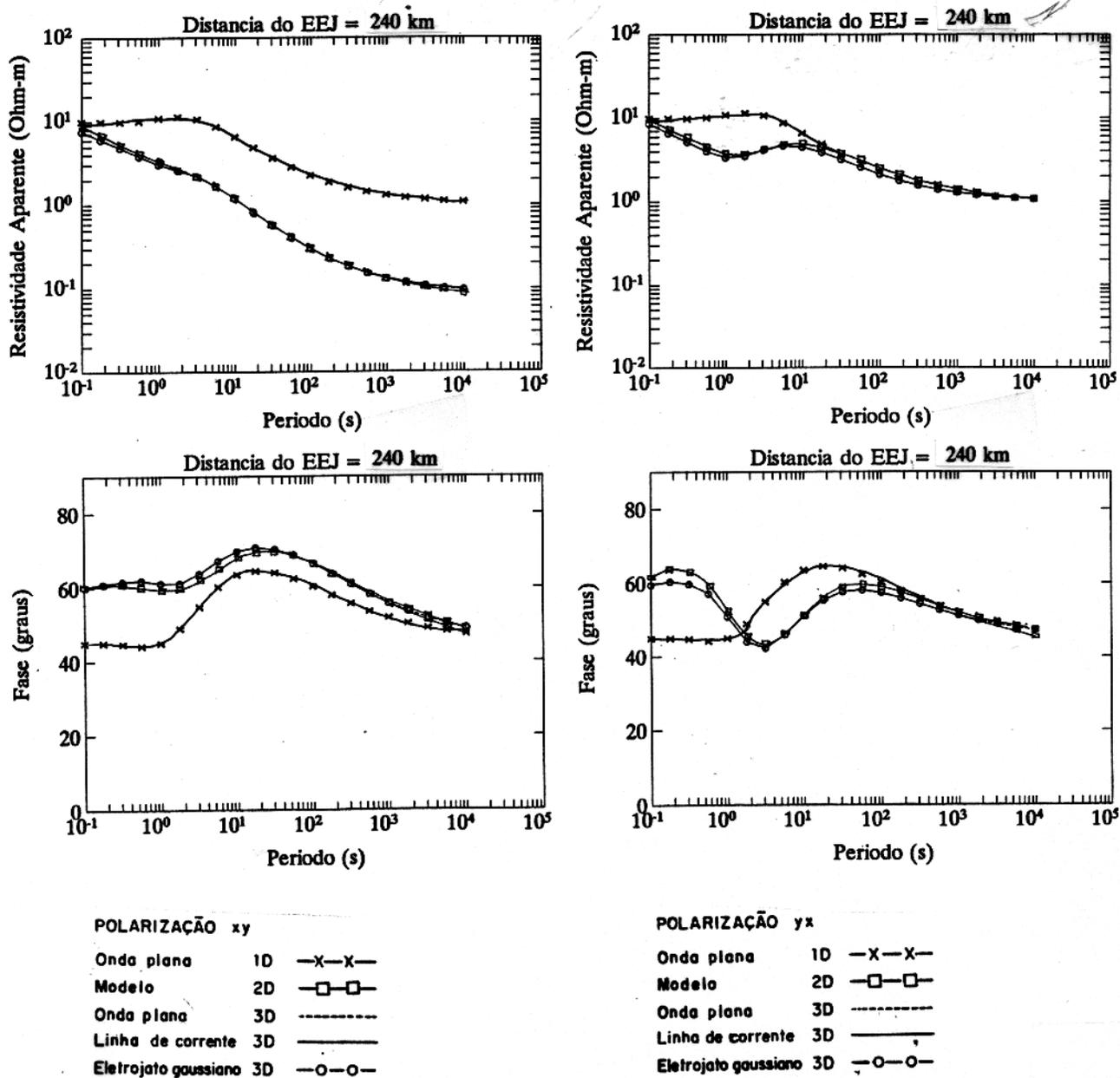


Figura 3.15 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.14.

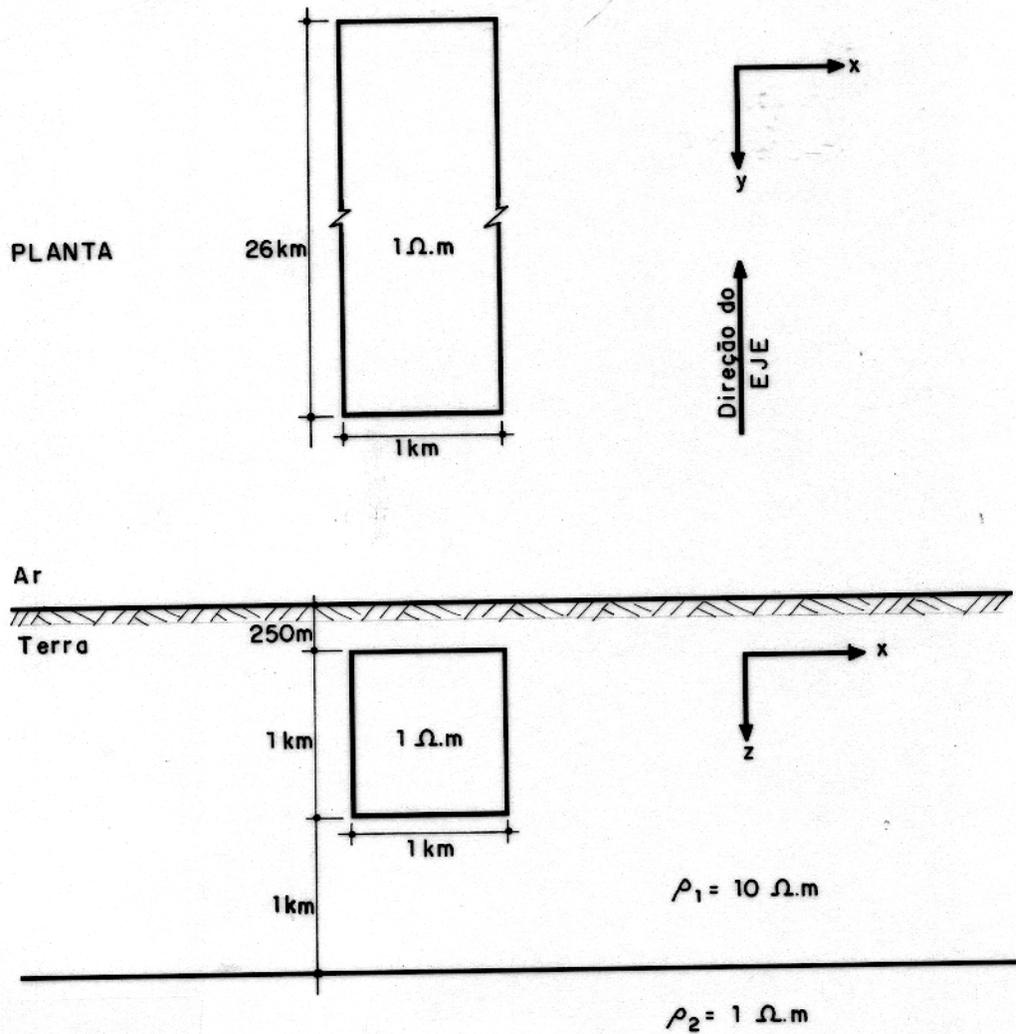


Figura 3.16 - Modelo tridimensional utilizado

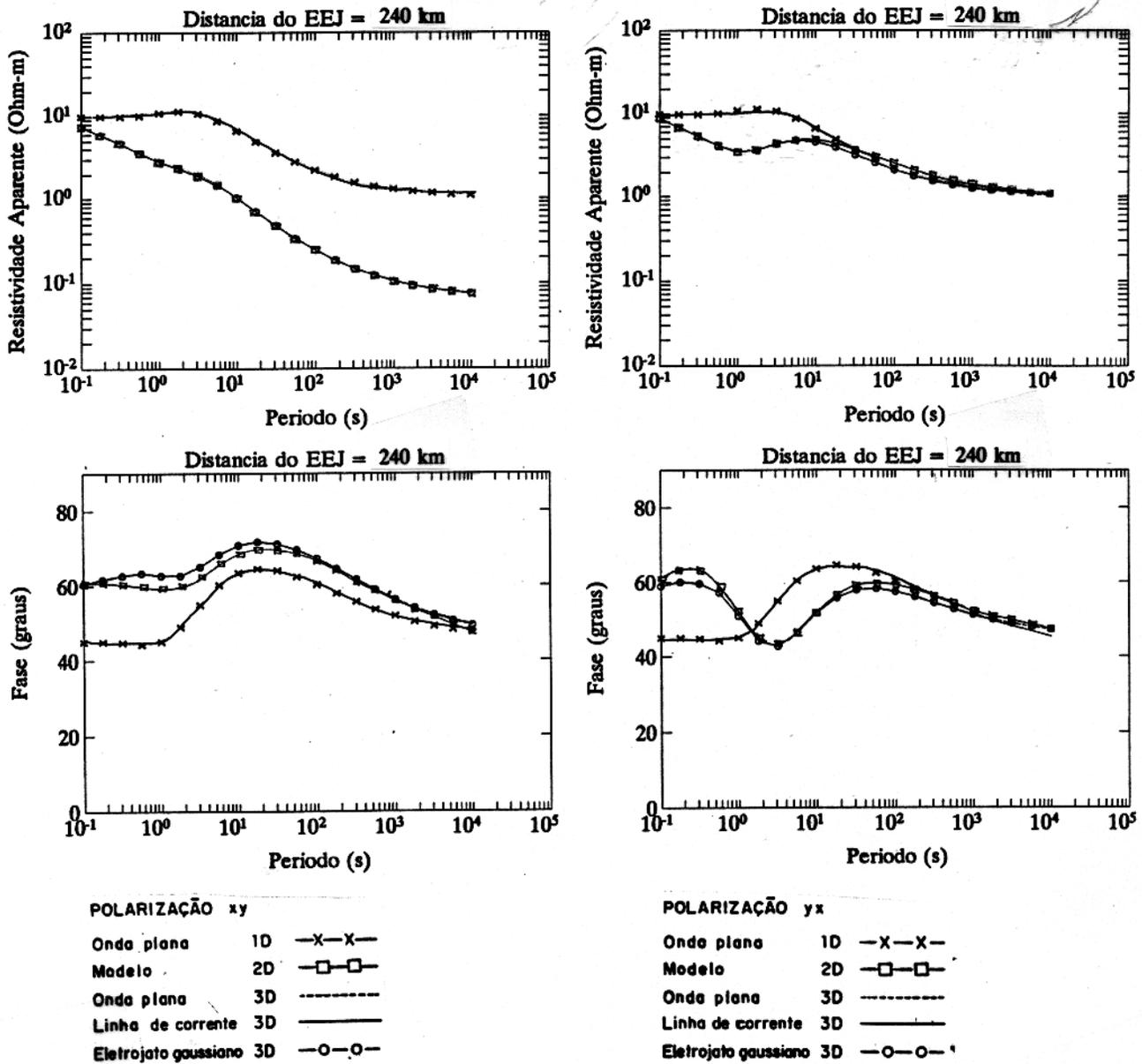


Figura 3.17 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.16

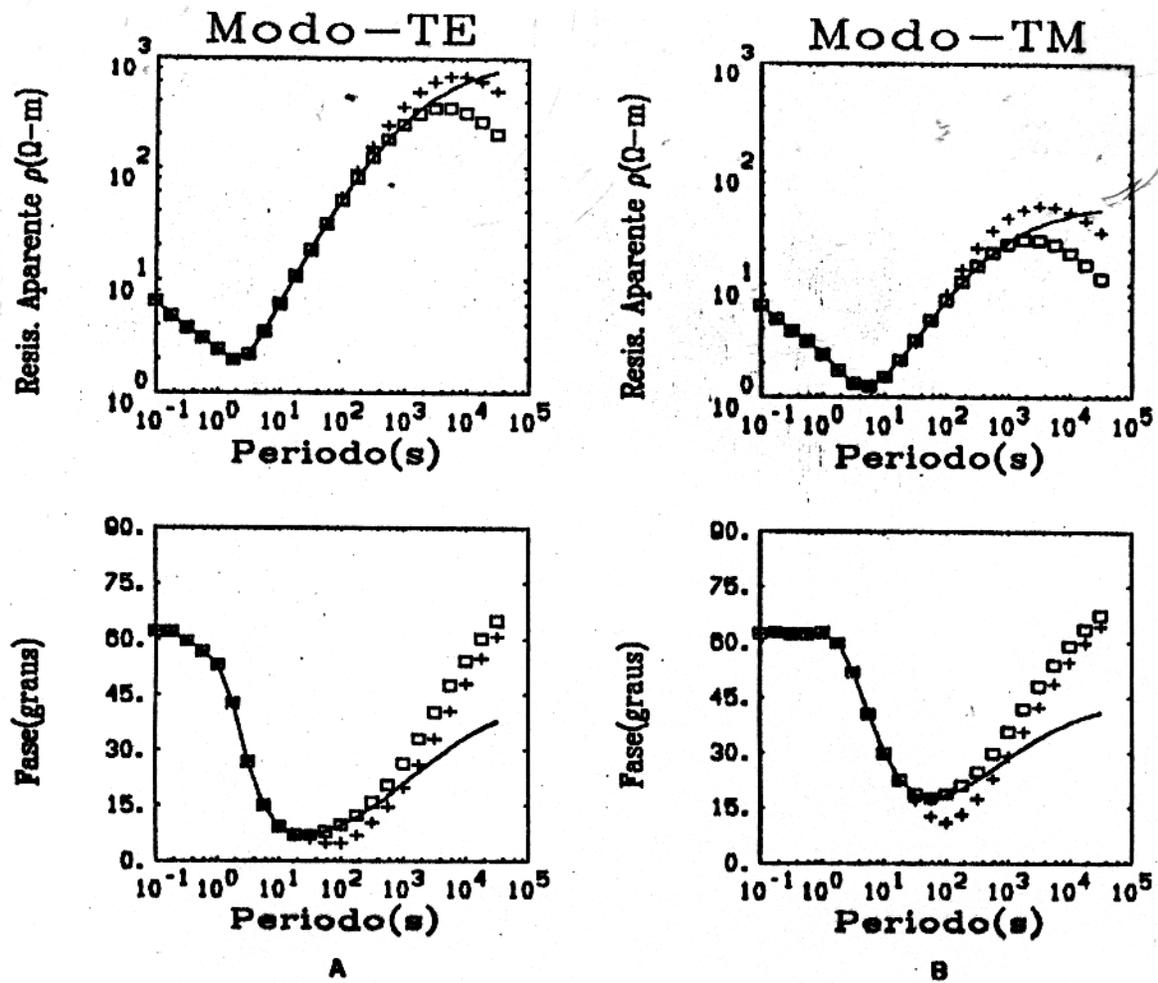
a $10 \Omega m$. Um fato que chama bastante atenção nessas curvas unidimensional, bidimensional e tridimensional, é que é possível se identificar com bastante precisão, o efeito da tridimensionalidade da estrutura. Assim, para qualquer valor de frequência inferior a 10^1 Hz, as curvas bidimensional e tridimensional que estão sobrepostas, apresentam-se praticamente paralelas à curva unidimensional. Todos os gráficos obtidos para esses modelos cujo embasamento é condutivo, mostram que o eletrojato equatorial não afeta as sondagens magnetotélúricas.

MODELO - 02

O segundo modelo em estudo, consiste, inicialmente, numa estrutura tridimensional de 1 km de aresta localizada num meio encaixante semelhante ao estudado no primeiro modelo, com a diferença em que neste o embasamento é resistivo ($\rho = 1000 \Omega m$). A seguir, apresentamos os resultados referentes a este modelo.

A Figura 3.20 mostra as sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.19. O gráfico de resistividade aparente na polarização XY nos mostra que para frequências inferiores a 10^{-2} Hz o eletrojato equatorial afeta as sondagens bidimensionais e tridimensionais. É importante ressaltar que a sondagem foi realizada num meio cujo embasamento é resistivo, $\rho = 1000 \Omega m$. De acordo com esse gráfico, o efeito galvânico entre as curvas dos modelos unidimensional e tridimensional pode ser verificado, em ambas as polarizações, desde a frequência de 10^1 Hz a 10^{-4} Hz. Observa-se que para frequências inferiores a 10^{-2} Hz a resposta tridimensional devido ao eletrojato gaussiano é a que apresenta efeito mais pronunciado em relação às demais fontes, se comparada à resposta unidimensional. De acordo com o gráfico de resistividade aparente na polarização YX, verificamos que as curvas bidimensional e tridimensional apresentam-se quase sobrepostas. Assim, na frequência de 10^1 Hz as curvas unidimensional, bidimensional e tridimensional apresentam resistividade aparente igual a $10^1 \Omega m$ e na frequência de 10^{-4} Hz o menor valor para o modelo 3D de resistividade aparente é observado para a curva do eletrojato gaussiano ($10^2 \Omega m$).

De acordo com o gráfico da fase na polarização XY mostrado na Figura 3.20, constatamos que na frequência 10^1 Hz a curva unidimensional apresenta fase de aproximadamente 45° , enquanto que as curvas bidimensional e tridimensional apresentam ângulo de fase igual a 60° . Desse modo, se verifica que para esse valor de frequência a curva unidimensional está fora de fase em relação às curvas bidimensional e tridimensional. Observa-se também, nesse gráfico, que as curvas dos três modelos apresentam-se invertidas em relação às curvas de resistividade aparente na mesma polarização. Para frequências inferiores a 10^{-3} Hz, a curva bidimensional com onda plana está sobreposta à curva proveniente do modelo tridimensional com onda plana. Por outro lado, a curva proveniente do modelo bidimensional com linha de corrente está sobreposta à curva unidimensional com onda plana e tridimensional com linha de corrente. Também a curva bidimensional com eletrojato gaussiano está sobreposta à curva tridimensional com eletrojato gaussiano. O gráfico da fase na polarização YX, nos mostra que para frequências inferiores a 10^{-1} Hz o eletrojato equatorial influencia nas sondagens magnetotélúricas bidimensionais e tridimensionais. De acordo com esse gráfico, a maior influência aparece quando se usa uma fonte do tipo eletrojato gaussiano. O que é interessante



FONTES

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

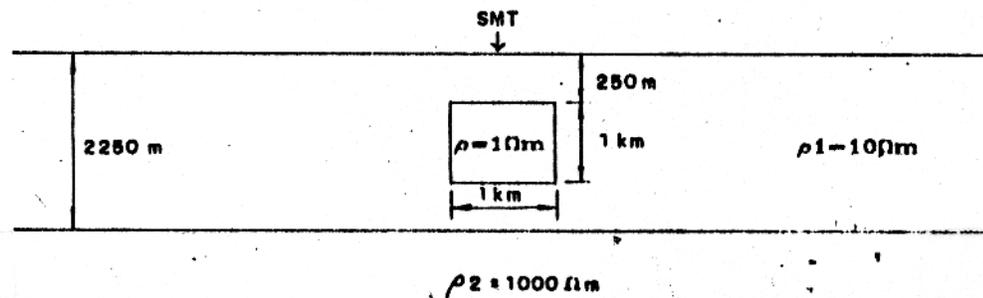


Figura 3.18 - Modelo bidimensional utilizado. Adaptado de MOTA (1991).

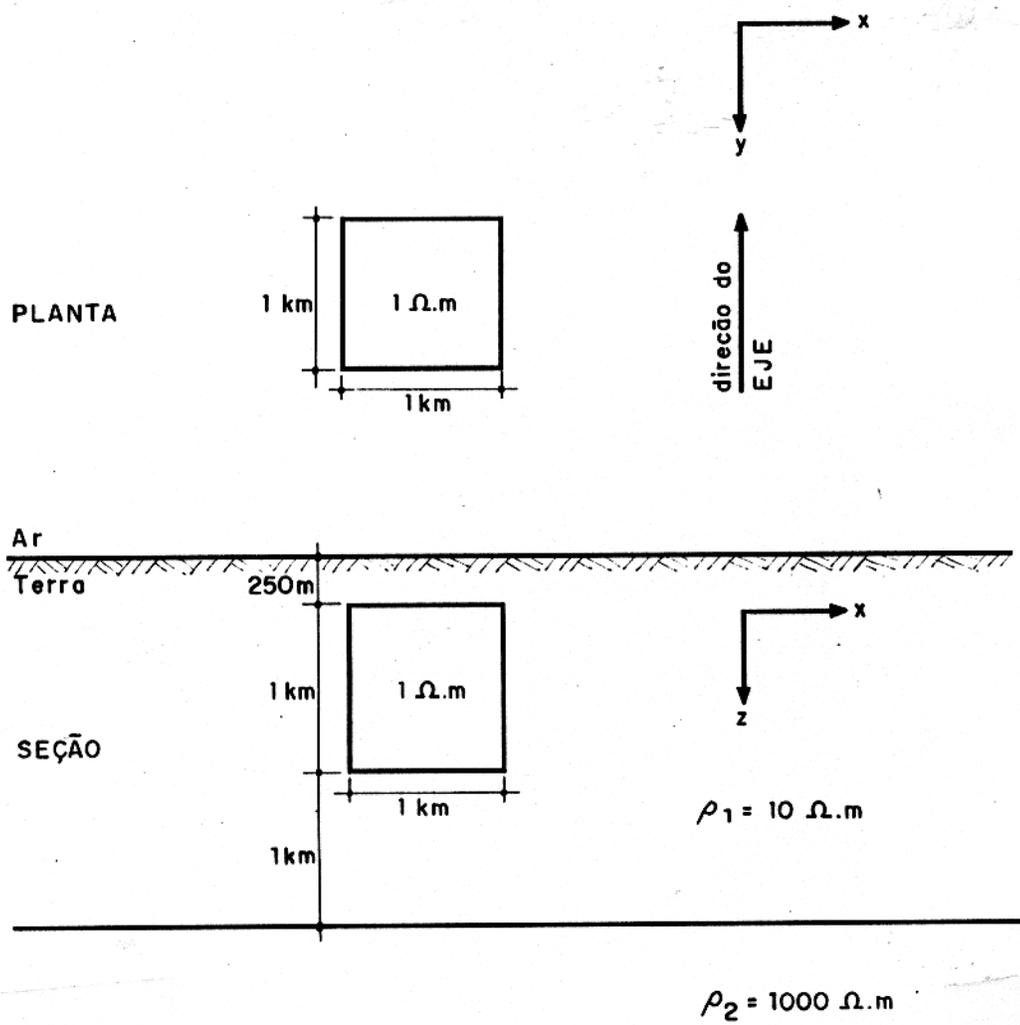
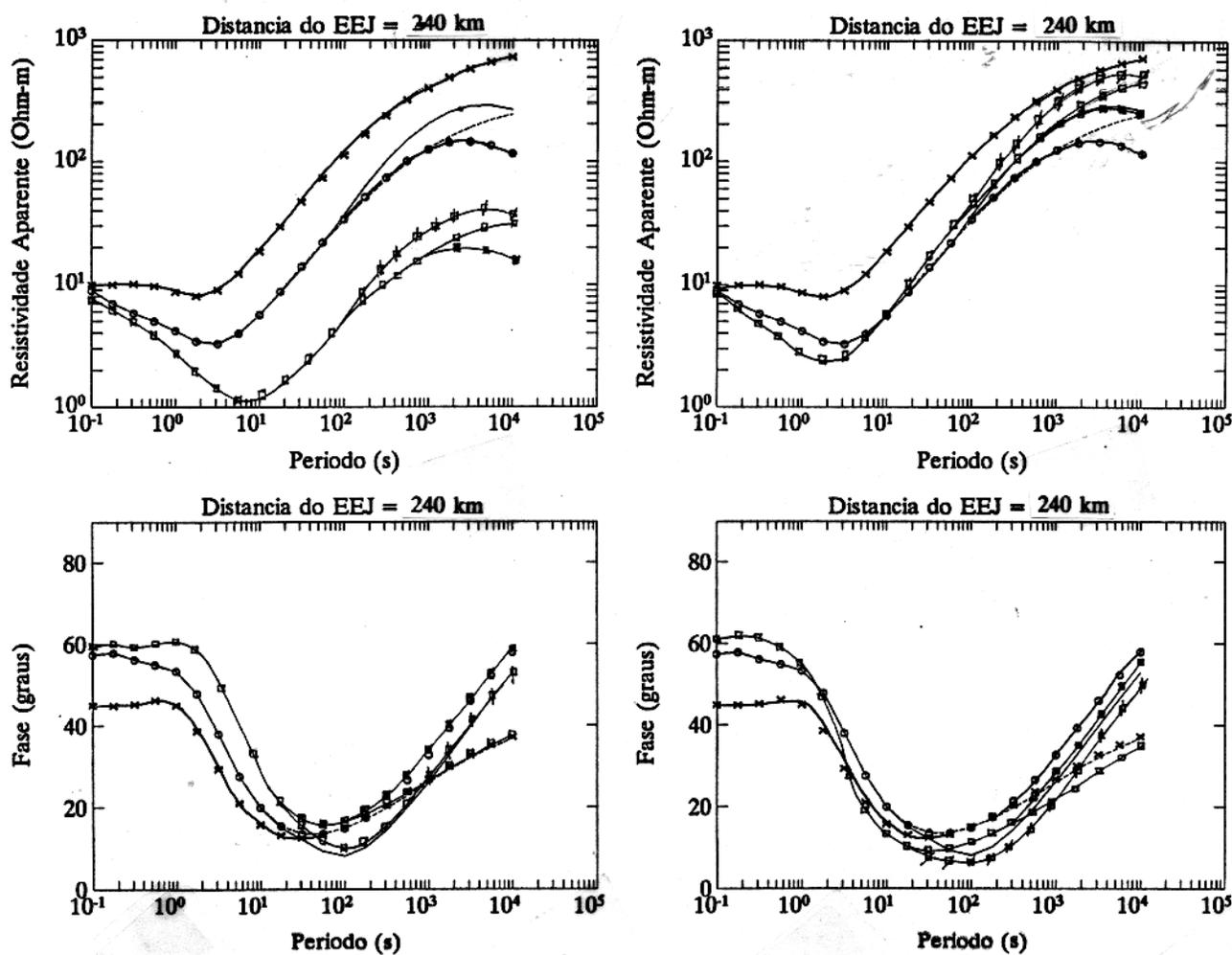


Figura 3.19 - Modelo tridimensional utilizado



POLARIZAÇÃO XY

- Onda plana 1D -x-x-x-
- Onda plana 2D -□-□-□- (TM)
- Linha de corrente 2D -z-z-z- (TM)
- Eletrojato gaussiano 2D -■-■-■- (TM)
- Onda plana 3D - - - - -
- Linha de corrente 3D - - - - -
- Eletrojato gaussiano 3D -○-○-○-

POLARIZAÇÃO YX

- Onda plana 1D -x-x-x-
- Onda plana 2D -□-□-□- (TE)
- Linha de corrente 2D -z-z-z- (TE)
- Eletrojato gaussiano 2D -■-■-■- (TE)
- Onda plana 3D - - - - -
- Linha de corrente 3D - - - - -
- Eletrojato gaussiano 3D -○-○-○-

Figura 3.20 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.19.

de se observar, ainda de acordo com esse gráfico, é que o modelo bidimensional com eletrojato gaussiano apresenta uma resposta mais acentuada do que o tridimensional com a linha de corrente.

A Figura 3.22 mostra as sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.21. Ressalta-se que nessa situação a estrutura tridimensional teve a dimensão aumentada na direção principal em 200% em relação à da Figura 3.19 (1 km para 2 km). Comparando o gráfico de resistividade aparente na polarização XY mostrado na Figura 3.20 com o respectivo da Figura 3.22, verifica-se que houve um pequeno afastamento das curvas tridimensionais em relação à curva unidimensional. Ou seja, o efeito galvânico aumentou com o aumento da dimensão na direção principal. Ao observar-se atentamente essas curvas, verificaremos que desde a frequência de 10^1 Hz até a frequência de 10^{-4} Hz, essas curvas se apresentam praticamente paralelas. Ainda de acordo com esse gráfico, constatamos que nas baixas frequências (grandes profundidades), a resistividade aparente referente ao modelo unidimensional é aproximadamente igual a $10^3 \Omega m$ para a frequência de 10^{-4} Hz. Em se tratando da polarização YX, podemos observar que nas altas frequências (pequena profundidade), a resistividade aparente na frequência de 10^1 Hz é igual a $10^1 \Omega m$, para os modelos unidimensional, bidimensional e tridimensional. Já nas baixas frequências, esse gráfico mostra que a curva bidimensional no modo TE para uma fonte tipo linha de corrente, é a que apresenta o maior valor de resistividade aparente na frequência de 10^{-4} Hz e, para o modelo tridimensional é a linha de corrente.

Com respeito a fase na polarização XY mostrada na Figura 3.22, verificamos que desde a frequência de 10^1 Hz até a frequência de 10^0 Hz, a fase permanece constante e igual a 45° para a curva unidimensional. Em se tratando das curvas bidimensional e tridimensional, para o mesmo intervalo de frequência, percebe-se que a fase permanece aproximadamente constante e igual a 60° . Para frequências que variam de 10^0 Hz até cerca de 10^{-2} Hz, o ângulo de fase decresce com a diminuição da frequência, para as curvas unidimensional, bidimensional e tridimensional. Na frequência de 10^{-2} Hz a fase para a curva tridimensional com linha de corrente é igual a 10° . Observe que esse é o menor valor para o ângulo de fase em todo o espectro de frequência mostrado no gráfico. Para frequências inferiores a 10^{-2} Hz o gráfico da fase na polarização XY mostra que para os três modelos estudados, a fase tende a aumentar com a diminuição do valor da frequência. Na frequência de 10^{-4} Hz a fase é igual a 60° tanto para a curva bidimensional no modo TM com eletrojato gaussiano, quanto para a curva tridimensional com eletrojato gaussiano. O gráfico da fase na polarização YX mostrado na Figura 3.22 nos mostra que houve uma maior aproximação das curvas bidimensionais em relação às curvas tridimensionais, se compararmos com as respectivas curvas da Figura 3.20. Constata-se também que na frequência de 10^{-4} Hz a curva tridimensional com eletrojato

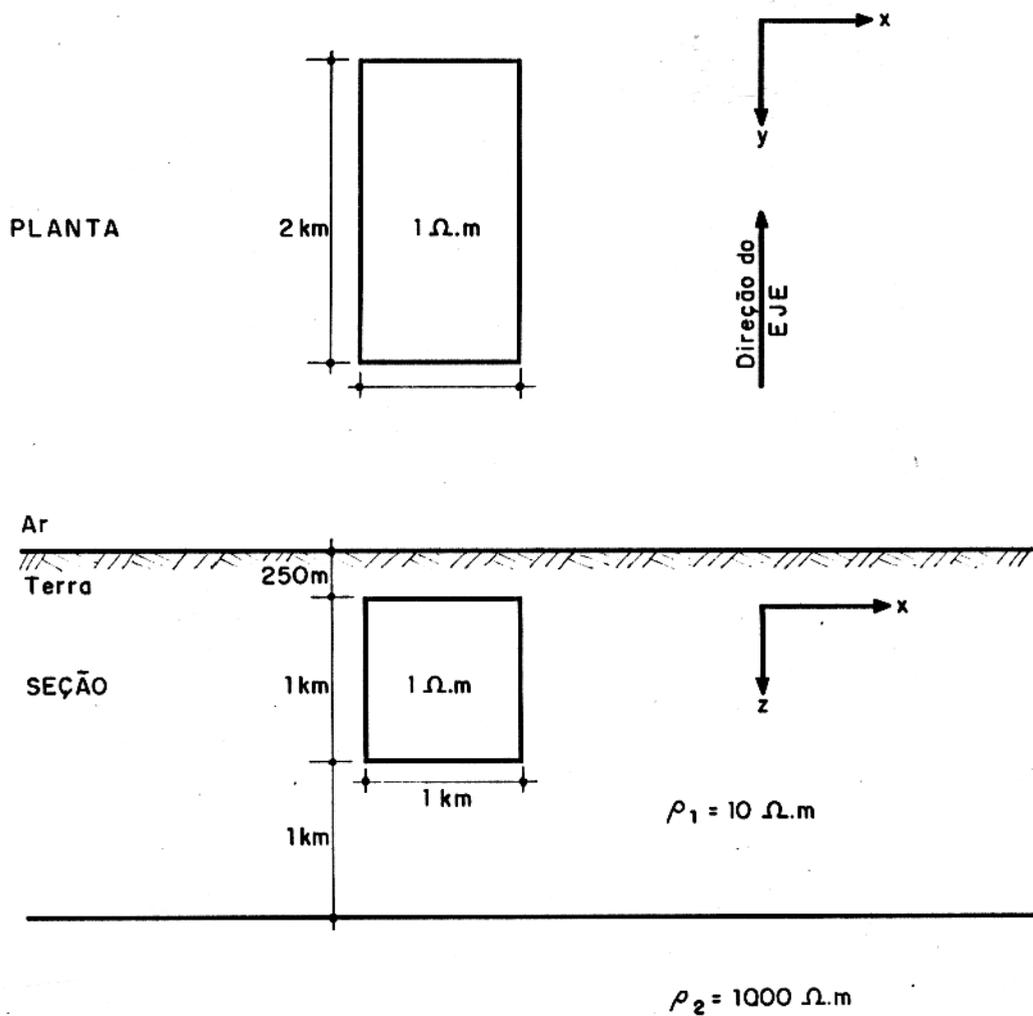
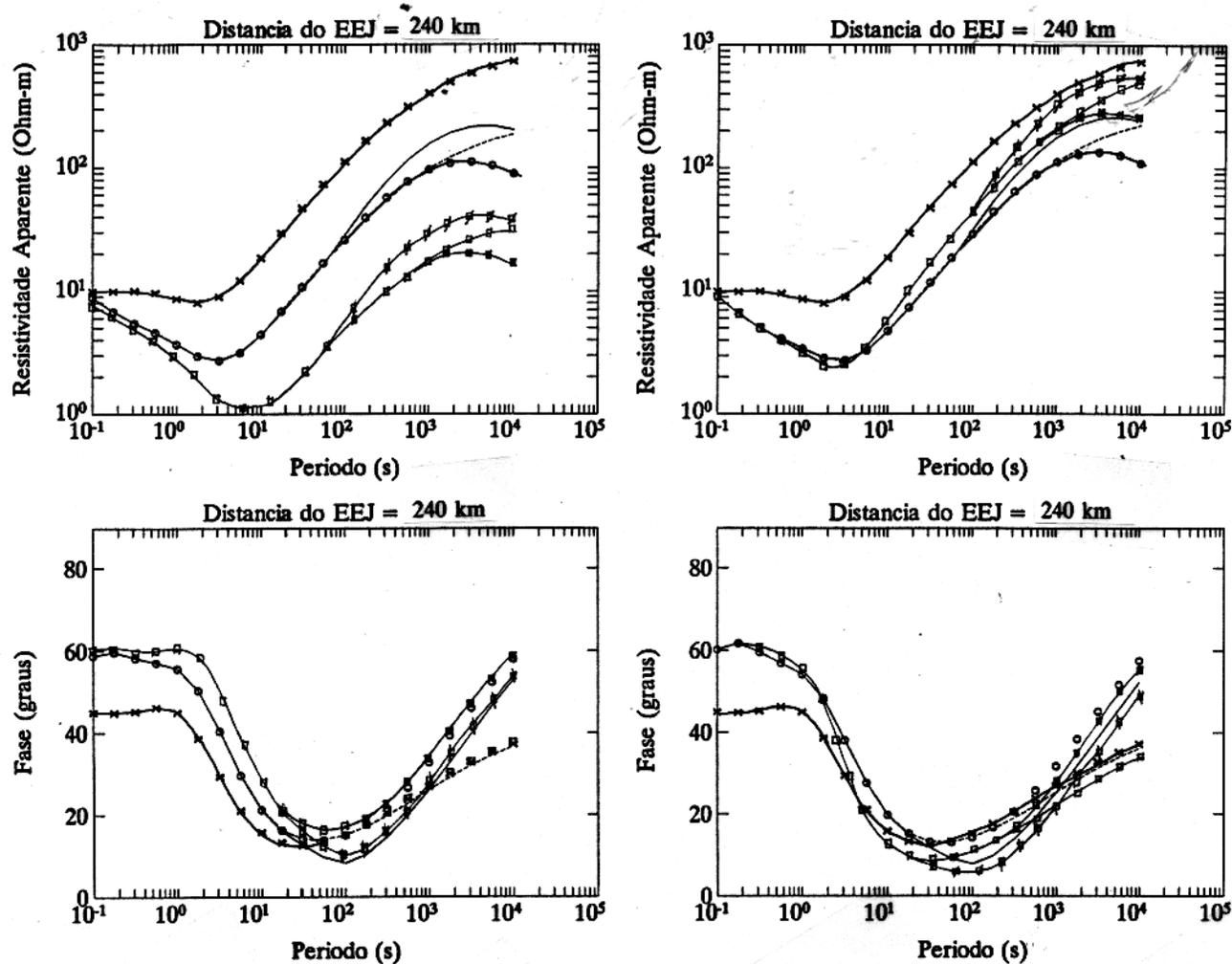


Figura 3.21 - Modelo tridimensional utilizado



POLARIZAÇÃO XY

Onda plana	1D	-x-x-x-
Onda plana	2D	-□-□-□ (TM)
Linha de corrente	2D	-z-z-z- (TM)
Eletrojoato gaussiano	2D	-■-■-■ (TM)
Onda plana	3D	-----
Linha de corrente	3D	—————
Eletrojoato gaussiano	3D	-○-○-○-

POLARIZAÇÃO YX

Onda plana	1D	-x-x-x-
Onda plana	2D	-□-□-□ (TE)
Linha de corrente	2D	-z-z-z- (TE)
Eletrojoato gaussiano	2D	-■-■-■ (TE)
Onda plana	3D	-----
Linha de corrente	3D	—————
Eletrojoato gaussiano	3D	-○-○-○-

Figura 3.22 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.21.

gaussiano é a que apresenta a maior fase, 60° .

A Figura 3.24 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.23. Observa-se nesse caso, que a estrutura tridimensional teve a sua dimensão aumentada na direção principal de 400% em relação à da estrutura da Figura 3.19 (1 km para 4 km). O gráfico da resistividade aparente na polarização XY mostrado na Figura 3.24, apresenta a resposta magnetotelúrica unidimensional com onda plana. Nesse gráfico também é mostrada a resposta de um modelo bidimensional, no modo TE, cujas fontes são: onda plana, linha de corrente e eletrojato gaussiano, como também a resposta tridimensional com as fontes: onda plana, linha de corrente e eletrojato gaussiano. De acordo com esse gráfico, para frequências inferiores a 10^{-2} Hz, o eletrojato equatorial afeta as sondagens bidimensional e tridimensional. Isso pode ser verificado na separação das curvas bidimensional e tridimensional. Comparando o gráfico de resistividade aparente na polarização XY da Figura 3.22 com o equivalente da Figura 3.24, nota-se que houve um pequeno afastamento entre a curva unidimensional e as curvas tridimensionais, evidenciando desse modo, que o efeito galvânico tende a crescer com o aumento da dimensão na direção principal. O gráfico da resistividade aparente na polarização YX, visto na Figura 3.24, mostra que no intervalo de frequência que vai de 10^1 Hz até cerca de 10^{-1} Hz, não se pode distinguir a resposta bidimensional da tridimensional pois, nesse intervalo de frequências as curvas provenientes dos dois modelos estão completamente sobrepostas.

De acordo com o gráfico da fase na polarização XY mostrado na Figura 3.24, vemos que para frequências inferiores a 10^{-2} Hz, o eletrojato equatorial afeta as sondagens magnetotelúricas. Para o caso da fase a frequência é um pouco maior que para o caso da resistividade aparente (10^{-1} Hz), desse modo, constata-se que a fase é um pouco mais sensível. Para frequências superiores a 10^{-2} Hz a curva bidimensional com onda plana no modo TM está completamente sobreposta à curva tridimensional na polarização XY com onda plana. Por outro lado, a curva bidimensional no modo TM com linha de corrente está completamente sobreposta à curva tridimensional na polarização XY com linha de corrente, assim como, à curva 1D. Finalmente, a curva bidimensional no modo TM com eletrojato gaussiano está completamente sobreposta à curva tridimensional na polarização XY com eletrojato gaussiano. Desse modo, para frequências superiores a 10^{-2} Hz a resposta magnetotelúrica tridimensional pode ser substituída pela resposta bidimensional. A fase na polarização YX mostra também que o eletrojato equatorial afeta as sondagens magnetotelúricas bidimensional e tridimensional, para frequências inferiores a 10^{-1} Hz. Para frequências que variam de 10^1 Hz até cerca 0,9 Hz, verifica-se que as sondagens bidimensional e tridimensional estão completamente sobrepostas.

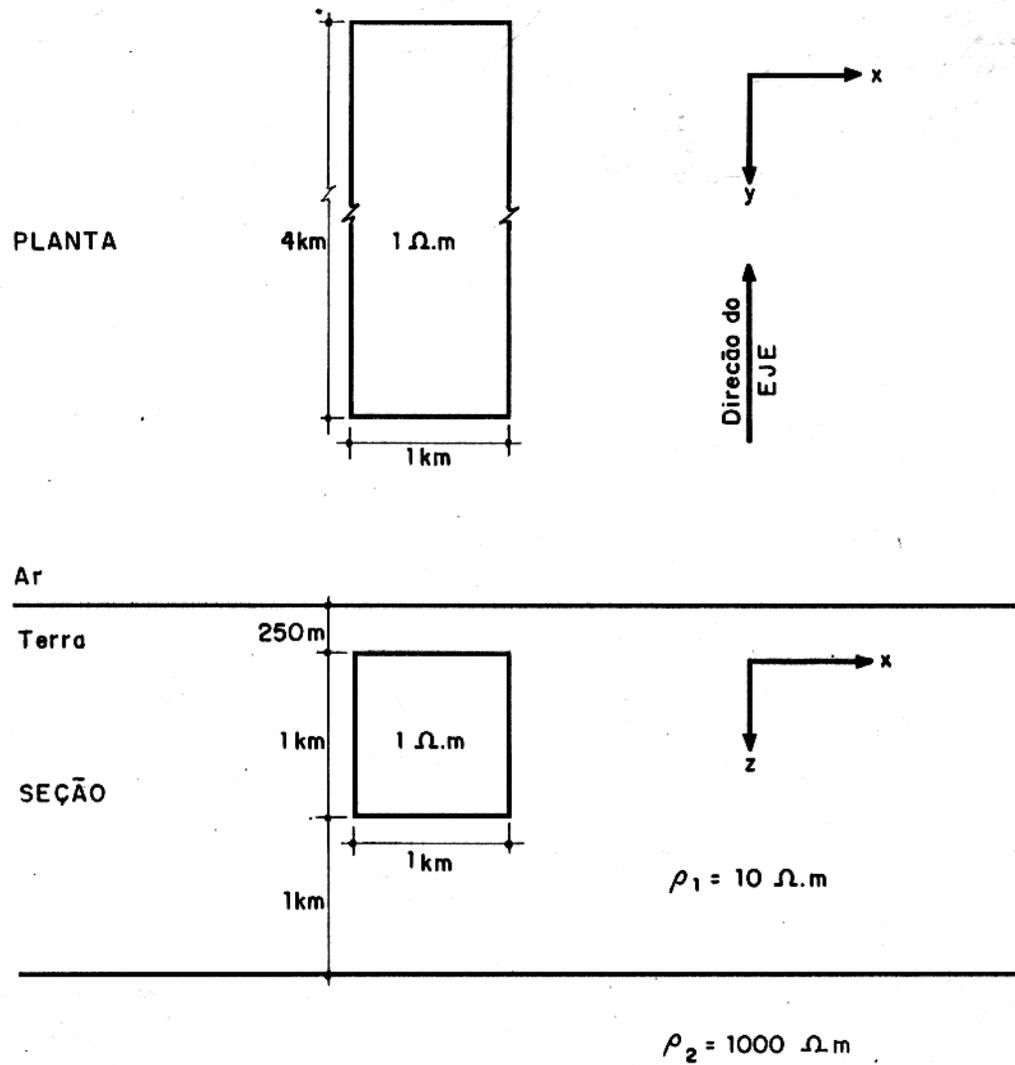
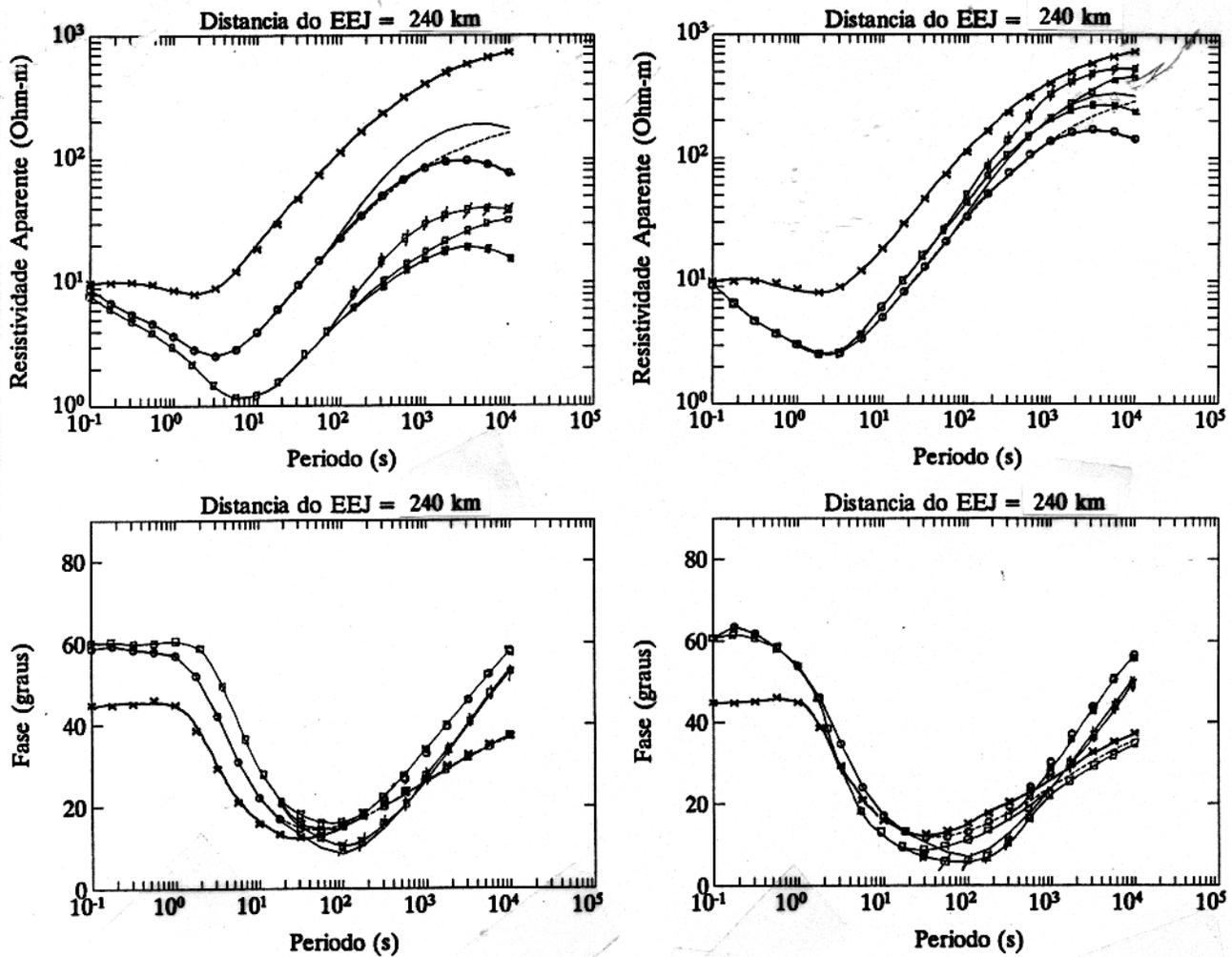


Figura 3.23 - Modelo tridimensional utilizado



POLARIZAÇÃO XY

Onda plana	1D	-x-x-x-
Onda plana	2D	-□-□-□- (TM)
Linha de corrente	2D	-z-z-z-z- (TM)
Eletrojato gaussiano	2D	-■-■-■- (TM)
Onda plana	3D	-----
Linha de corrente	3D	—————
Eletrojato gaussiano	3D	-○-○-○-

POLARIZAÇÃO YX

Onda plana	1D	-x-x-x-
Onda plana	2D	-□-□-□- (TE)
Linha de corrente	2D	-z-z-z-z- (TE)
Eletrojato gaussiano	2D	-■-■-■- (TE)
Onda plana	3D	-----
Linha de corrente	3D	—————
Eletrojato gaussiano	3D	-○-○-○-

Figura 3.24 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.23.

A Figura 3.26 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.25. Observa-se nesse caso, que a estrutura tridimensional teve a sua dimensão aumentada na direção principal em 800% em relação à da Figura 3.19 (1 km para 8 km). De acordo com o gráfico de resistividade aparente na polarização XY mostrado nesta figura, verificamos que o efeito galvânico do modelo bidimensional no modo TM em relação ao modelo unidimensional estratificado é bastante acentuado, ou seja, é até maior que o efeito galvânico relacionado ao modelo tridimensional. O que se percebe ao compararmos o gráfico de resistividade aparente na polarização XY da Figura 3.24 com o da Figura 3.26, é que a medida em que a dimensão na direção principal aumenta, ocorre um afastamento das curvas tridimensionais em relação à unidimensional, porém, tendem a se aproximar das curvas bidimensionais no modo TM. Essa tendência de aproximação nos induz a pensar que chegará um determinado momento em que a estrutura tridimensional terá uma dimensão na direção principal suficiente, para que a resposta magnetotelúrica dessa estrutura possa ser substituída pela resposta magnetotelúrica relacionada ao modelo bidimensional. O gráfico de resistividade aparente na polarização YX da Figura 3.26, nos mostra que para frequências que variam no intervalo de 10^1 Hz até aproximadamente 10^{-2} Hz, as curvas bidimensional e tridimensional estão completamente sobrepostas, desse modo, pode-se constatar que nesse intervalo de frequência a resposta magnetotelúrica referente ao modelo tridimensional pode ser substituída pela resposta magnetotelúrica do modelo bidimensional no modo TE.

Com relação à fase na polarização XY, o gráfico da Figura 3.26 nos mostra que as curvas unidimensional, bidimensional e tridimensional estão praticamente paralelas desde a frequência de 10^1 Hz até cerca 10^{-1} Hz. A partir deste valor de frequência ocorre uma sobreposição das curvas dos três modelos estudados. Salienta-se, ainda, que na frequência de 10^1 Hz a fase referente à curva unidimensional é aproximadamente igual a 45° e nessa mesma frequência a fase para as curvas bidimensional e tridimensional é cerca de 60° . Esses resultados são importantes porque mostram que apesar de estarmos aumentando gradualmente a dimensão na direção principal, a fase nas altas frequências praticamente não se altera. As altas frequências confirmam a tendência já observada na Figura 3.24, ou seja, a de que para frequências superiores a 10^{-2} Hz já é possível substituir a resposta magnetotelúrica tridimensional pela de um modelo bidimensional no modo TM. O gráfico da fase na polarização YX mostrado na Figura 3.26, nos mostra que para frequências que variam de 10^0 Hz até cerca de 0,8 Hz, pode-se substituir a resposta magnetotelúrica tridimensional pela do bidimensional TE. Para frequências superiores a 10^{-2} Hz, também é possível substituir uma resposta pela outra.

A Figura 3.28 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX,

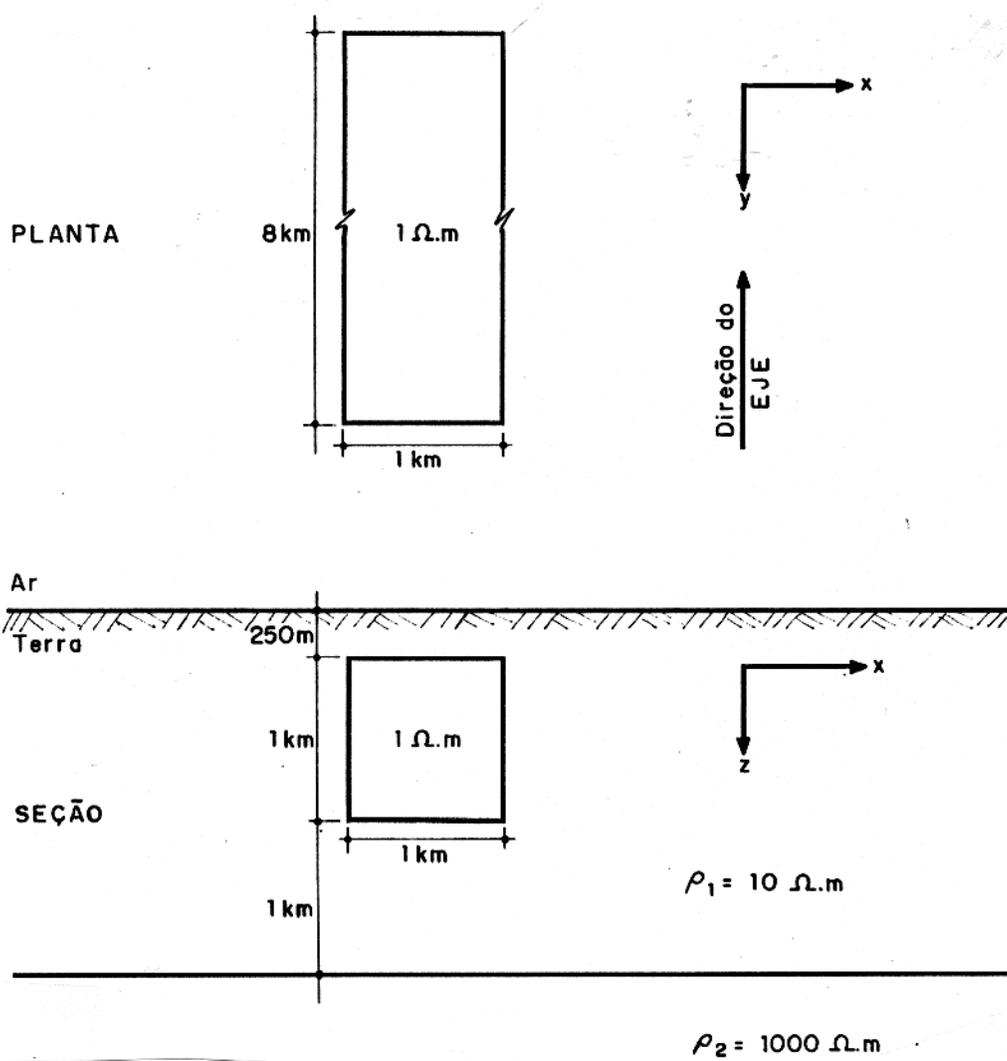
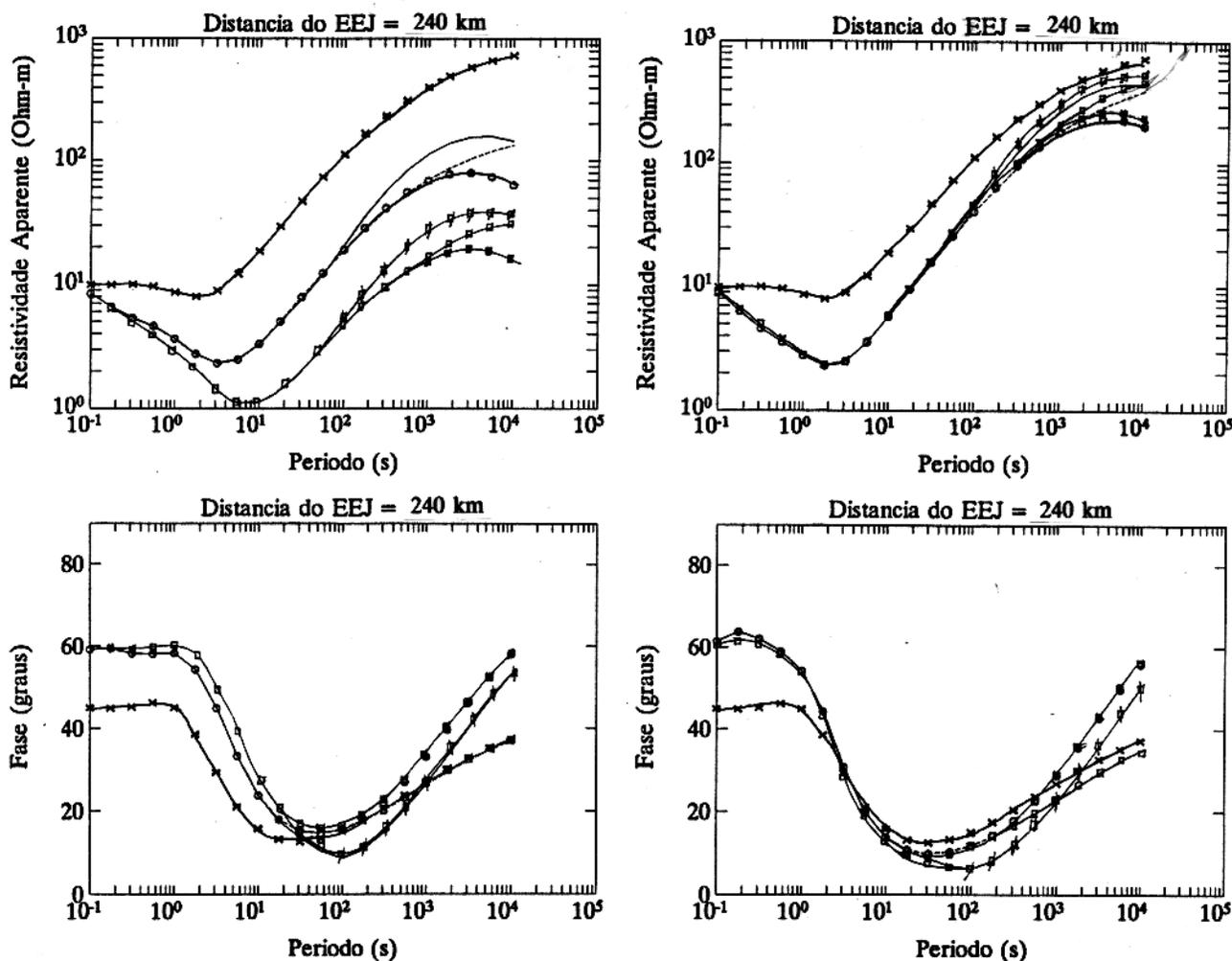


Figura 3.25 - Modelo tridimensional utilizado



POLARIZAÇÃO XY

Onda plana	1D	-x-x-x-
Onda plana	2D	-□-□-□- (TM)
Linha de corrente	2D	-z-z-z-z- (TM)
Eletrojato gaussiano	2D	-■-■-■- (TM)
Onda plana	3D	-----
Linha de corrente	3D	—————
Eletrojato gaussiano	3D	-○-○-○-

POLARIZAÇÃO YX

Onda plana	1D	-x-x-x-
Onda plana	2D	-□-□-□- (TE)
Linha de corrente	2D	-z-z-z-z- (TE)
Eletrojato gaussiano	2D	-■-■-■- (TE)
Onda plana	3D	-----
Linha de corrente	3D	—————
Eletrojato gaussiano	3D	-○-○-○-

Figura 3.26 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.25.

realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.27. Observa-se nesse caso, que a estrutura tridimensional teve a dimensão aumentada na direção principal de 1600% em relação à da Figura 3.19 (1 km para 16 km). Comparando o gráfico de resistividade aparente na polarização XY mostrado na Figura 3.26 com aquele da Figura 3.28, percebe-se que houve uma grande aproximação das curvas tridimensional e bidimensional. Isso pode ser verificado observando-se que na frequência de 10^{-4} Hz a curva bidimensional no modo TM com a linha de corrente, apresenta o mesmo valor para a resistividade aparente que a curva tridimensional na polarização XY com eletrojato gaussiano, ou seja, aproximadamente igual a $13 \Omega m$. O gráfico da resistividade aparente na polarização YX mostrado na Figura 3.28 é bastante importante, pois evidencia que para frequências que variam no intervalo de 10^1 Hz até 10^{-4} Hz, as sondagens magnetotéluricas bidimensional e tridimensional estão completamente sobrepostas mostrando, desse modo, em todo esse intervalo de frequência, que a resposta tridimensional pode ser substituída pela resposta bidimensional no modo TE. Portanto, verificamos que para a resistividade aparente, a polarização YX que corresponde ao modo TE bidimensional na nossa convenção, é a forma mais apropriada para se atingir a quase bidimensionalidade.

O gráfico da fase na polarização XY mostrado na Figura 3.28 evidencia que quando se aumenta a dimensão na direção principal em cerca de dezesseis vezes em relação a sua dimensão inicial, a resposta magnetotélurica dessa estrutura pode ser substituída pela de uma estrutura bidimensional no modo TM. A fase na polarização YX mostrado na Figura 3.28, nos mostra que ocorre a sobreposição das curvas de resposta magnetotélurica tridimensional em relação à bidimensional no modo TE. Ou seja, nessa situação a fase na polarização YX nos mostra que a resposta tridimensional pode ser substituída pela bidimensional no modo TE. Observe que em ambas as polarizações XY e YX, o eletrojato equatorial afeta as sondagens magnetotéluricas, principalmente nas baixas frequências, ou seja, inferiores a 10^{-2} Hz.

A Figura 3.30 mostra as sondagens magnetotéluricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.29. Observa-se nesse caso, que a estrutura tridimensional teve a sua dimensão aumentada na direção principal de 2000% em relação da Figura 3.19. Ou seja, passou de 1 km para 20 km. De acordo com a Figura 3.28, observamos que para a resistividade aparente na polarização YX e fase nas polarizações YX e XY, a resposta magnetotélurica tridimensional pode ser substituída pela bidimensional. O nosso objetivo agora é determinar quando essa quase bidimensionalidade poderá ser atingida para a resistividade aparente na polarização XY. De acordo com o gráfico de resistividade aparente mostrado na Figura 3.30 percebe-se, ao se comparar com o gráfico da Figura 3.28, que continua a tendência de aproximação das curvas tridimensionais em relação à bidimensional no modo TM. Contudo, isso se faz de forma bastante lenta e gradual. Esse resultado nos

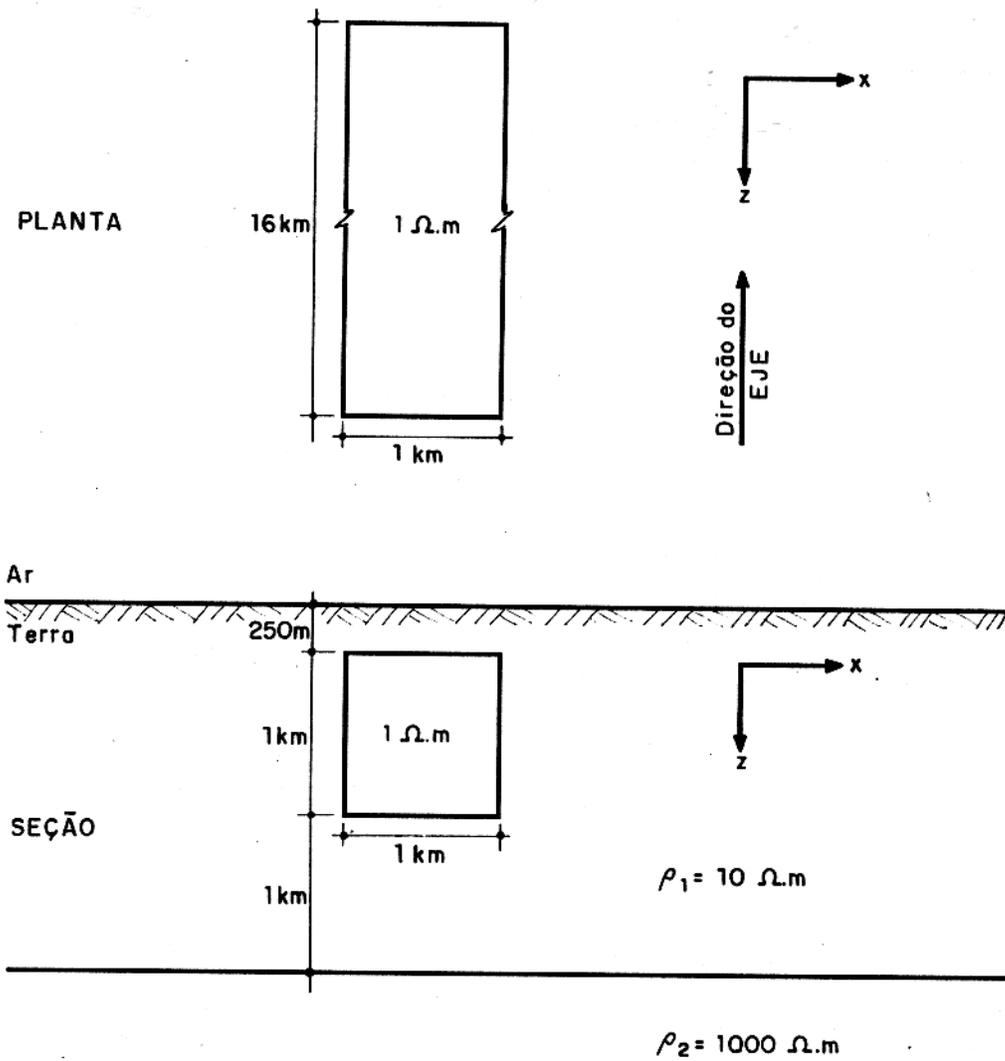
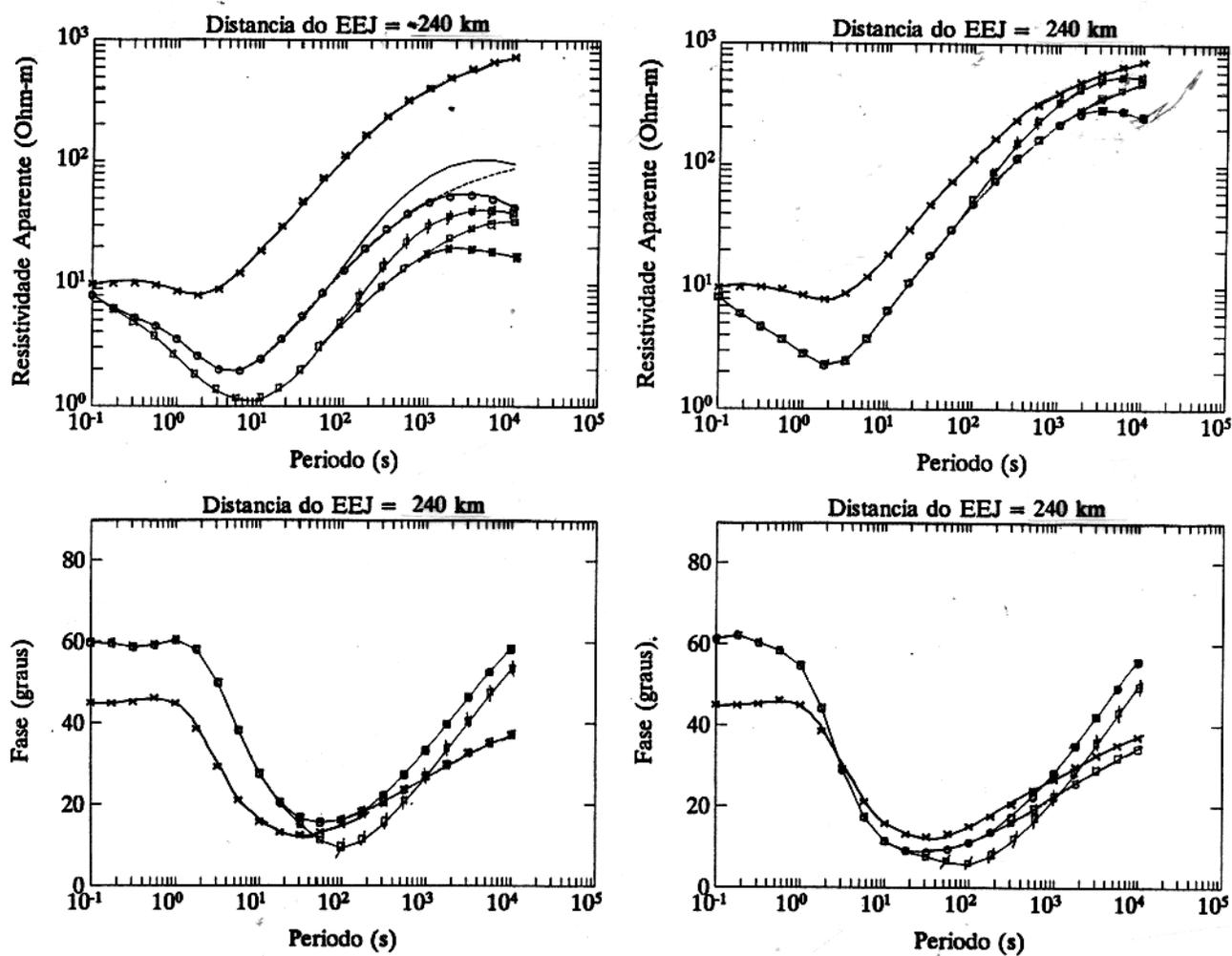


Figura 3.27 - Modelo tridimensional utilizado



POLARIZAÇÃO XY

Onda plana	1D	-x-x-x-
Onda plana	2D	-□-□-□ (TM)
Linha de corrente	2D	-z-z-z- (TM)
Eletrojato gaussiano	2D	-■-■-■ (TM)
Onda plana	3D	-----
Linha de corrente	3D	—————
Eletrojato gaussiano	3D	-○-○-○-

POLARIZAÇÃO YX

Onda plana	1D	-x-x-x-
Onda plana	2D	-□-□-□ (TE)
Linha de corrente	2D	-z-z-z- (TE)
Eletrojato gaussiano	2D	-■-■-■ (TE)
Onda plana	3D	-----
Linha de corrente	3D	—————
Eletrojato gaussiano	3D	-○-○-○-

Figura 3.28 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.27.

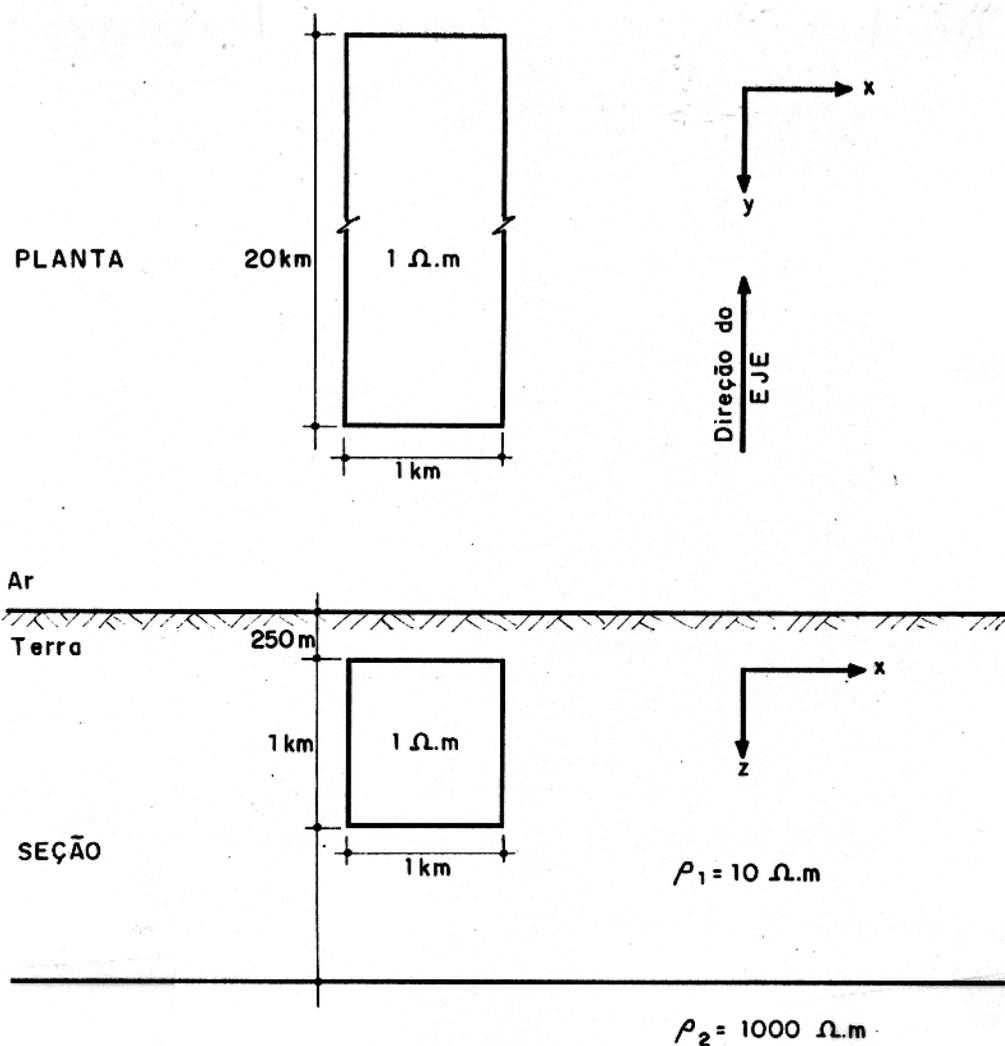
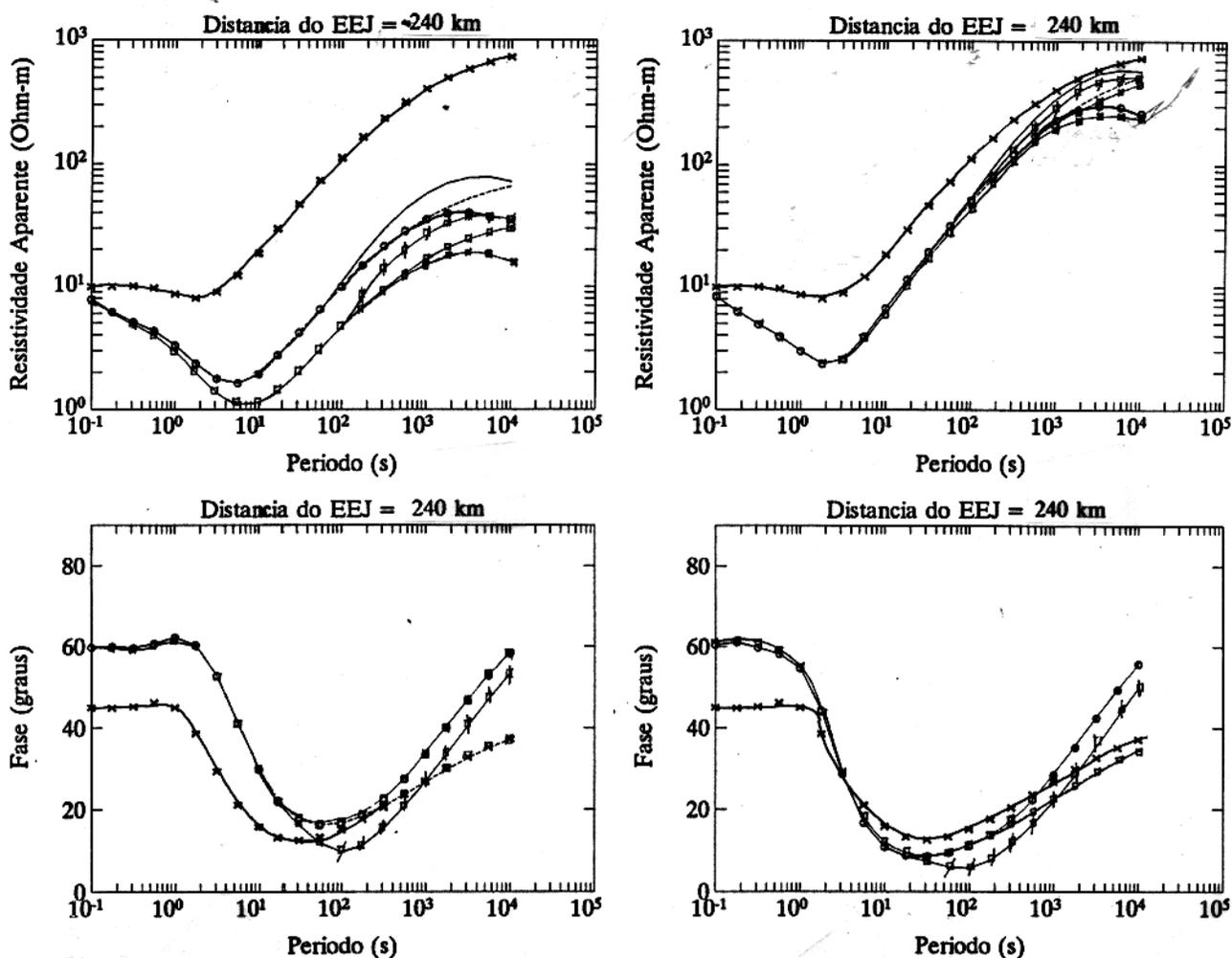


Figura 3.29 - Modelo tridimensional utilizado



POLARIZAÇÃO XY

- Onda plana 1D -x-x-x-
- Onda plana 2D □-□-□- (TM)
- Linha de corrente 2D -z-z-z- (TM)
- Eletrojato gaussiano 2D ■-■-■- (TM)
- Onda plana 3D -----
- Linha de corrente 3D ————
- Eletrojato gaussiano 3D ○-○-○-

POLARIZAÇÃO YX

- Onda plana 1D -x-x-x-
- Onda plana 2D □-□-□- (TE)
- Linha de corrente 2D -z-z-z- (TE)
- Eletrojato gaussiano 2D ■-■-■- (TE)
- Onda plana 3D -----
- Linha de corrente 3D ————
- Eletrojato gaussiano 3D ○-○-○-

Figura 3.30 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.29.

induz a pensar que precisamos aumentar ainda mais a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal para que se possa atingir a quase bidimensionalidade, tal como será feito no próximo passo.

A Figura 3.32 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.31. Neste caso, a estrutura tridimensional teve a sua dimensão na direção principal aumentada em 2400% em relação à da estrutura da Figura 3.19, passando de 1 km para 24 km. De acordo com o gráfico de resistividade aparente na polarização XY mostrado nesta figura, percebe-se que as curvas tridimensionais estão bastante próximas das curvas bidimensionais no modo TM. Para frequências que variam no intervalo que vai de 10^1 Hz até 0,05 Hz percebe-se que as curvas bidimensionais no modo TM estão completamente sobrepostas às curvas tridimensionais na polarização XY. Contudo, para frequências inferiores a 0,05 Hz as curvas desses modelos não apresentam nenhuma sobreposição. De acordo com esse mesmo gráfico de resistividade aparente, o efeito galvânico continua a aumentar. Isso pode ser verificado comparando as curvas de sondagem tridimensional com a unidimensional, apresentadas nas Figuras 3.30 e 3.32. É importante salientar, também, que de acordo com este gráfico o eletrojato equatorial afeta as sondagens magnetotelúricas para frequências inferiores a 10^{-2} Hz.

A Figura 3.34 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 3.33. A estrutura tridimensional, neste caso, teve a sua dimensão aumentada na direção principal em 2600% em relação à da estrutura tridimensional da Figura 3.19. Passou, então, de 1 km para 26 km. Esse gráfico de resistividade aparente na polarização XY apresentado na Figura 3.34 nos mostra, finalmente, que aumentando-se a dimensão na direção principal em cerca de vinte e seis vezes em relação a sua dimensão inicial, a resposta magnetotelúrica dessa estrutura pode ser substituída pela de uma estrutura bidimensional no modo TM. Observe que para se atingir a quase bidimensionalidade nessa polarização, em relação à resistividade aparente, é necessário se aumentar muito, a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal (vinte e seis vezes), pois na polarização YX é necessário aumentar apenas dezesseis vezes. Analisando os gráficos de resistividade aparente na polarização XY desde quando a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal era apenas 1 km até os 26 km, depreende-se que a medida em que essa dimensão aumenta, o efeito galvânico tende a se acentuar, culminando quando essa estrutura atinge a quase bidimensionalidade e esse efeito é máximo. De acordo com todas as Figuras apresentadas cujo embasamento é resistivo, pode-se perceber que o eletrojato equatorial afeta as sondagens magnetotelúricas numa razão maior que quando ele é condutivo.

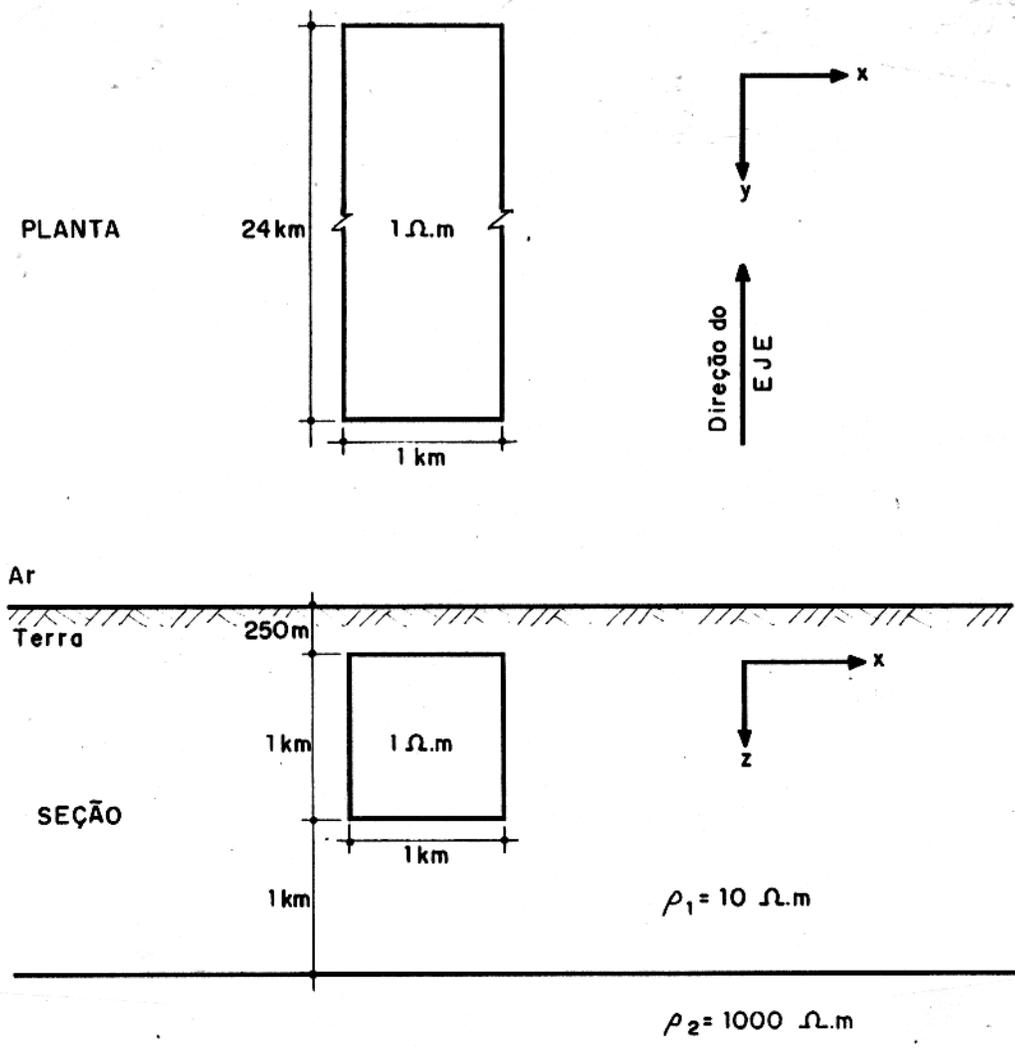
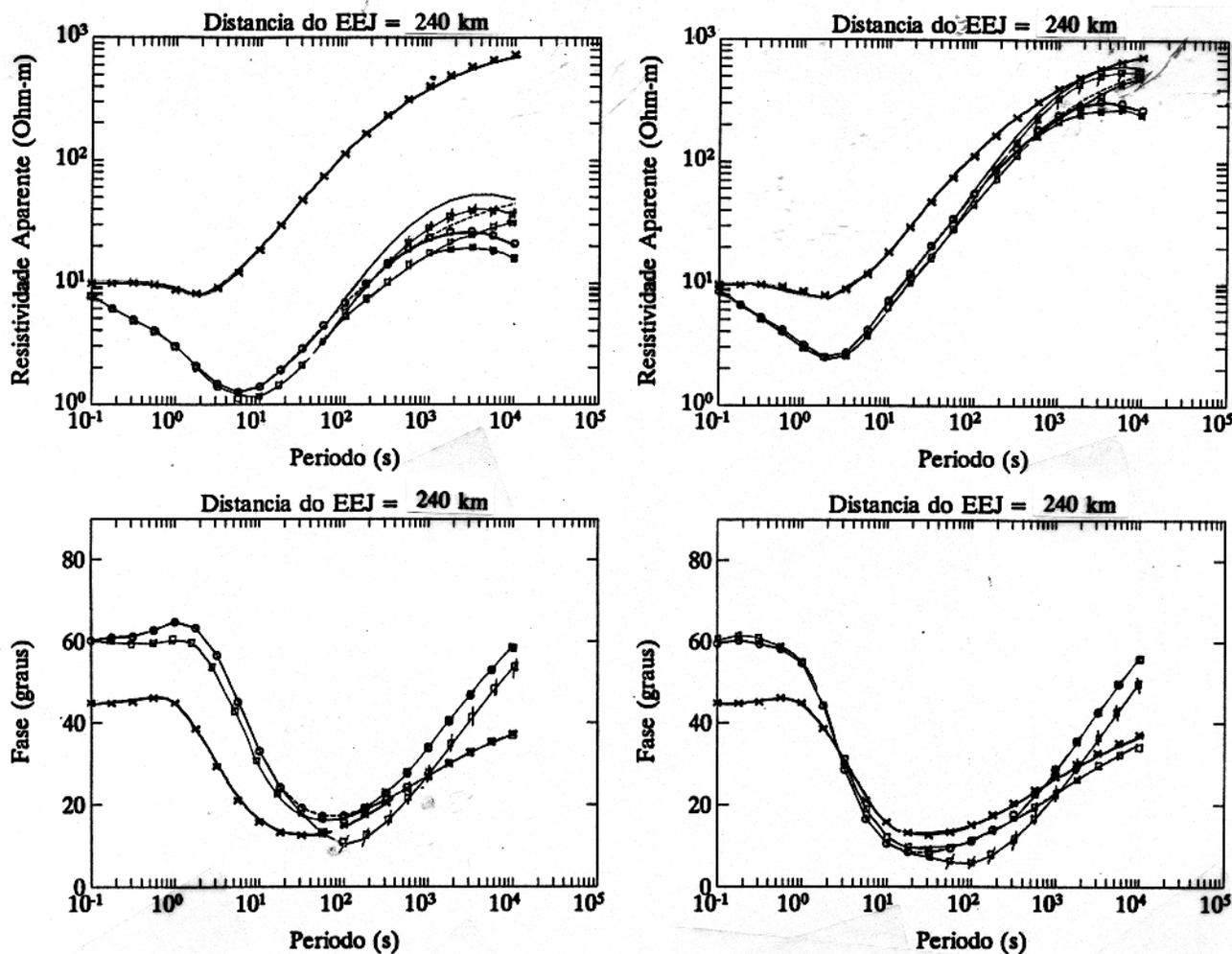


Figura 3.31 - Modelo tridimensional utilizado



POLARIZAÇÃO XY

Onda plana	1D	-x-x-x-
Onda plana	2D	-□-□-□ (TM)
Linha de corrente	2D	-z-z-z- (TM)
Eletrojato gaussiano	2D	-■-■-■ (TM)
Onda plana	3D	-----
Linha de corrente	3D	—————
Eletrojato gaussiano	3D	-○-○-○

POLARIZAÇÃO YX

Onda plana	1D	-x-x-x-
Onda plana	2D	-□-□-□ (TE)
Linha de corrente	2D	-z-z-z- (TE)
Eletrojato gaussiano	2D	-■-■-■ (TE)
Onda plana	3D	-----
Linha de corrente	3D	—————
Eletrojato gaussiano	3D	-○-○-○

Figura 3.32 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.31.

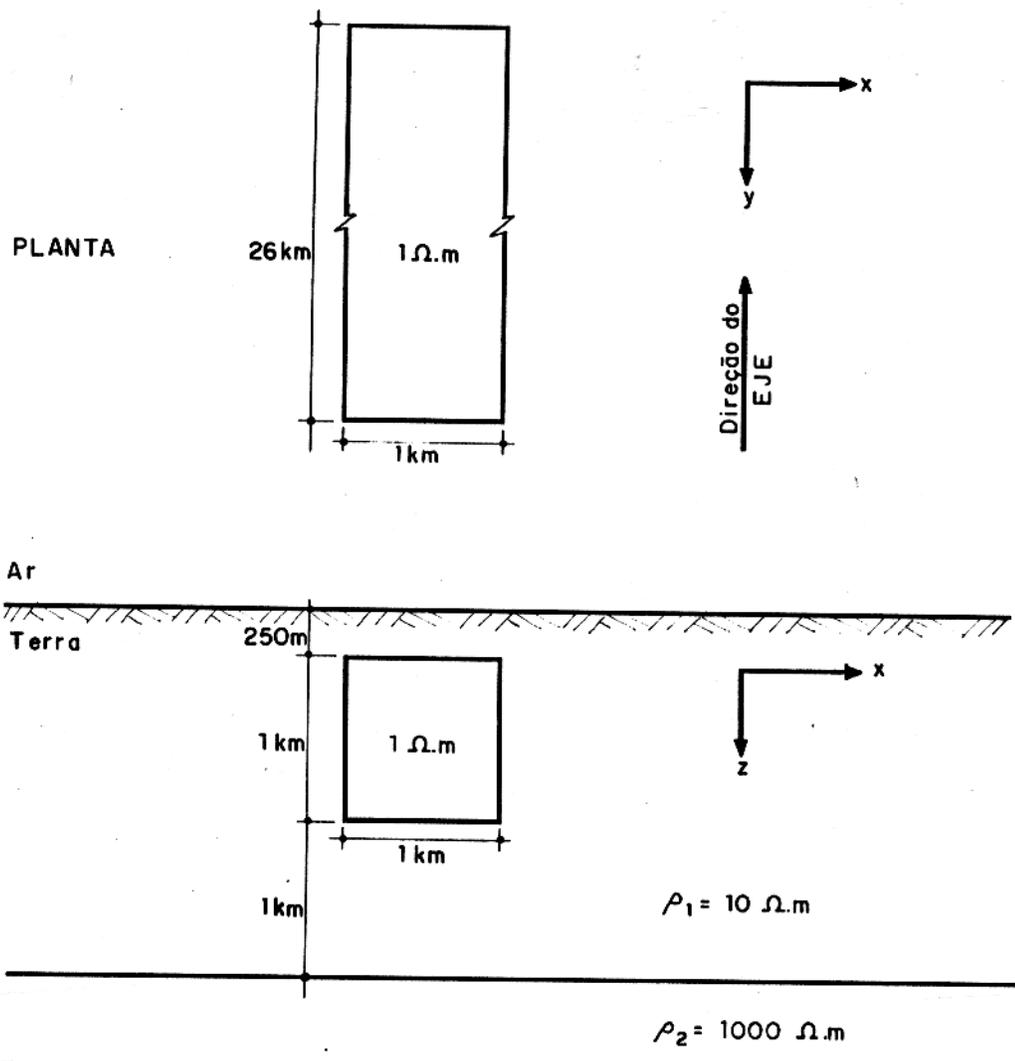
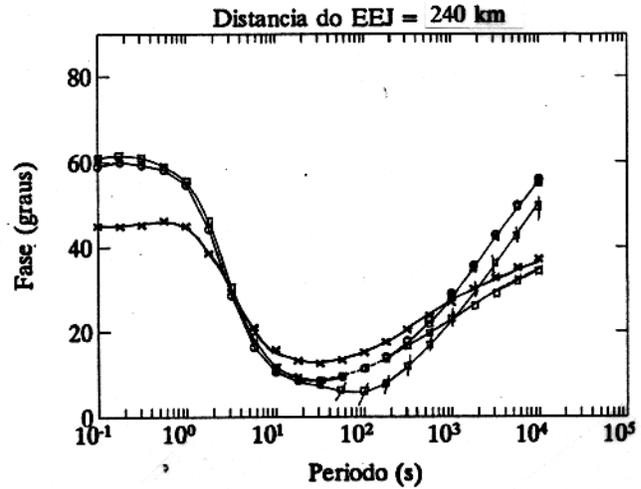
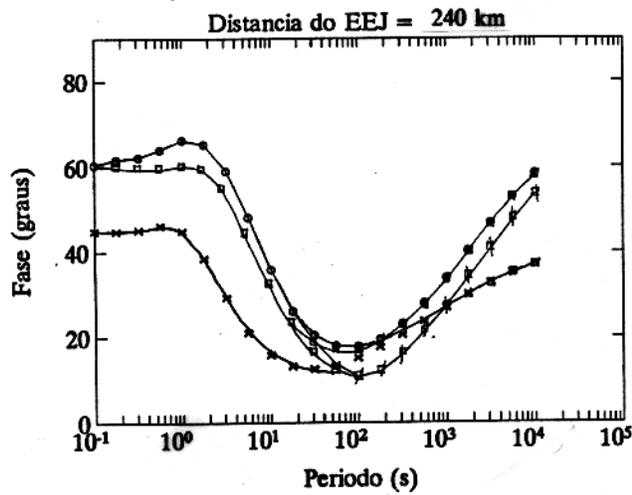
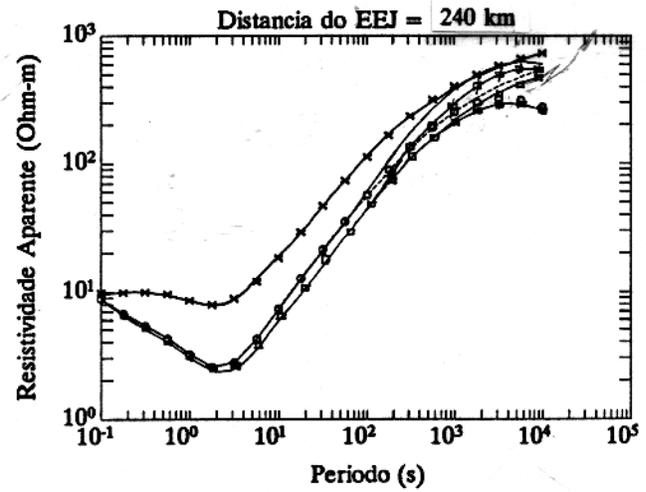
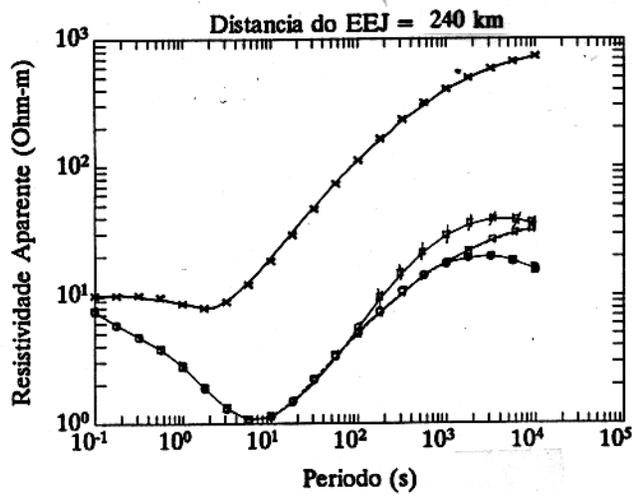


Figura 3.33 - Modelo tridimensional utilizado



POLARIZAÇÃO XY

Onda plana	1D	-x-x-x-
Onda plana	2D	-□-□-□- (TM)
Linha de corrente	2D	-z-z-z- (TM)
Eletrojato gaussiano	2D	-■-■-■- (TM)
Onda plana	3D	-----
Linha de corrente	3D	—————
Eletrojato gaussiano	3D	-○-○-○-

POLARIZAÇÃO YX

Onda plana	1D	-x-x-x-
Onda plana	2D	-□-□-□- (TE)
Linha de corrente	2D	-z-z-z- (TE)
Eletrojato gaussiano	2D	-■-■-■- (TE)
Onda plana	3D	-----
Linha de corrente	3D	—————
Eletrojato gaussiano	3D	-○-○-○-

Figura 3.34 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 3.33.

4 - DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS DO ELETROJATO EQUATORIAL ONWUMECHILLIANO

4.1 INTRODUÇÃO

A literatura nos mostra que o eletrojato equatorial encontra-se, aproximadamente, a 110 km de altura. Esses estudos mostram também, que o desvio padrão no caso do eletrojato gaussiano é de aproximadamente 240 km. Nesse estudo, consideramos um valor fixo para a resistividade do meio encaixante e do corpo, e variamos o valor da resistividade do embasamento. Para simular o eletrojato equatorial, vamos utilizar o modelo proposto por Onwumechilli, para vários valores do parâmetro α que está relacionado à reversão das correntes, e comparar com os modelos da onda plana 1D e 3D que estão relacionados à estratificação da bacia.

4.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste capítulo estão relacionados com a verificação dos efeitos provocados pelo eletrojato equatorial Onwumechilliano na resposta magnetotelúrica de uma estrutura tridimensional, quando se aumenta, gradualmente, a distância do corpo em relação ao eletrojato. A estrutura tridimensional está inserida num semi-espaço homogêneo, ou num meio de quatro camadas, com a última camada sendo ora resistiva ora condutiva.

4.3 MODELOS ESTUDADOS

Para determinar os efeitos do eletrojato equatorial Onwumechilliano nas estruturas tridimensionais, foram escolhidos os seguintes modelos:

MODELO-01

Este modelo, obtido da Tese de Doutorado de CARRASQUILLA (1993), consiste de uma estrutura tridimensional de resistividade igual a $5 \Omega\text{m}$, encaixada em um semi-espaço de $100 \Omega\text{m}$ de resistividade (Figura 4.1).

MODELO-02

O segundo modelo foi adaptado do trabalho de RIJO (1993). Este modelo consiste de uma estrutura tridimensional de resistividade igual a $5 \Omega\text{m}$, encaixada em um meio de quatro camadas cujas resistividades são, respectivamente, iguais a $10 \Omega\text{m}$, $1 \Omega\text{m}$, $500 \Omega\text{m}$ e $10 \Omega\text{m}$. Com este modelo pretendemos simular a bacia do Parnaíba (Figura 4.8).

MODELO-03

O terceiro modelo é semelhante ao anterior, porém com uma pequena diferença. Neste, o valor da resistividade do embasamento é igual a $1000 \Omega\text{m}$ (Figura 4.15).

4.4 RESULTADOS OBTIDOS

A seguir apresentamos os resultados dos modelos estudados.

MODELO - 01

A Figura 4.2 mostra os gráficos das sondagens magnetotéluricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.1, no que concerne à resistividade aparente e fase. Estes gráficos foram obtidos posicionando a estrutura tridimensional a 10 km de distância do centro do eletrojato equatorial Onwumechilliano. Para o meio encaixante deste modelo, cuja resistividade é $100 \Omega\text{m}$, verificamos que para ambas as polarizações, a resposta magnetotélurica da onda plana 1D na resistividade aparente é uma reta contínua. Esse resultado deve-se ao fato desta sondagem representar apenas o efeito da estratificação da subsuperfície. Para os outros tipos de fonte, as curvas da resistividade aparente só registram os efeitos do eletrojato equatorial para frequências inferiores a 10^{-2} Hz. Para frequências superiores a este valor, os efeitos do eletrojato equatorial Onwumechilliano nas sondagens magnetotéluricas são praticamente desprezíveis. Nesses gráficos o eletrojato ondulante é modelado utilizando vários valores para o parâmetro alfa, assim as curvas de resistividade aparente nos mostram que quanto menor é o valor deste parâmetro maior será o efeito sobre as sondagens magnetotéluricas. Esse resultado pode ser explicado porque este parâmetro está associado à reversibilidade da corrente, e quanto menor é este parâmetro maior é a intensidade desta reversibilidade. Assim, a curva que representa o eletrojato ondulante para $\alpha = -2,0$ apresenta um maior desvio que a curva que representa o eletrojato ondulante para $\alpha = -1,5$ e assim sucessivamente. Quando $\alpha = 0,0$ percebe-se que o efeito do eletrojato equatorial Onwumechilliano nas sondagens magnetotéluricas é bastante reduzido. Nota-se também nos gráficos da Figura 4.2, que o efeito galvânico é mais pronunciado nas sondagens magnetotéluricas na polarização YX do que na XY. O efeito galvânico nessa figura

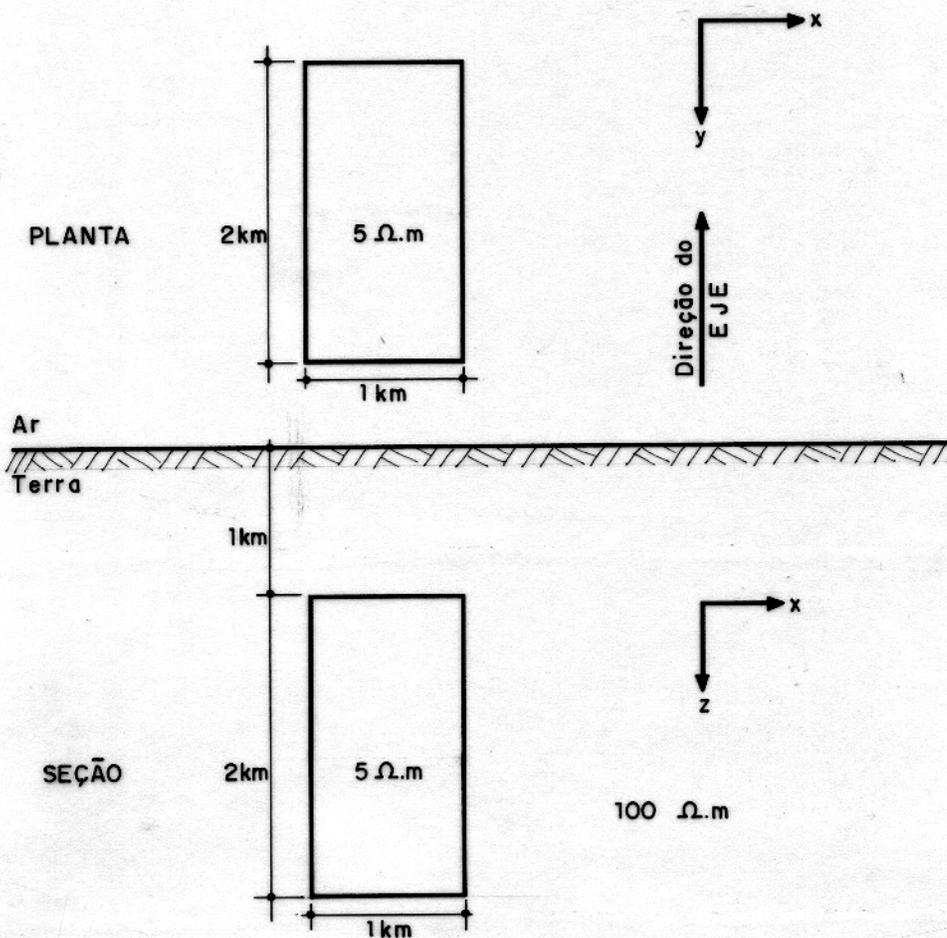
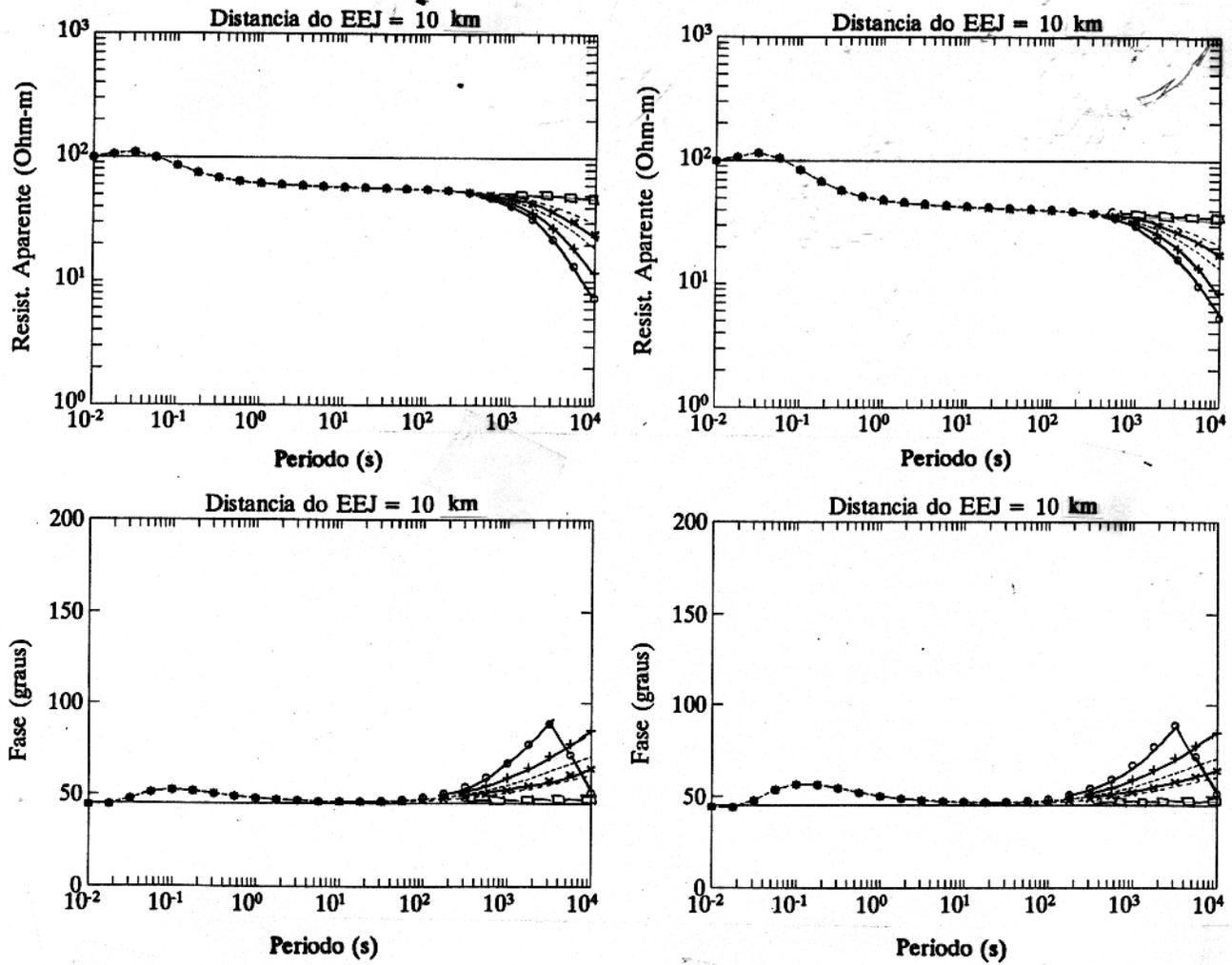


Figura 4.1 - Modelo tridimensional utilizado



POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	-·-·-·-
Onda plana	1D	—
Onda plana	3D	□-□-□

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	-·-·-·-
Onda plana	1D	—
Onda plana	3D	□-□-□

Figura 4.2 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.1.

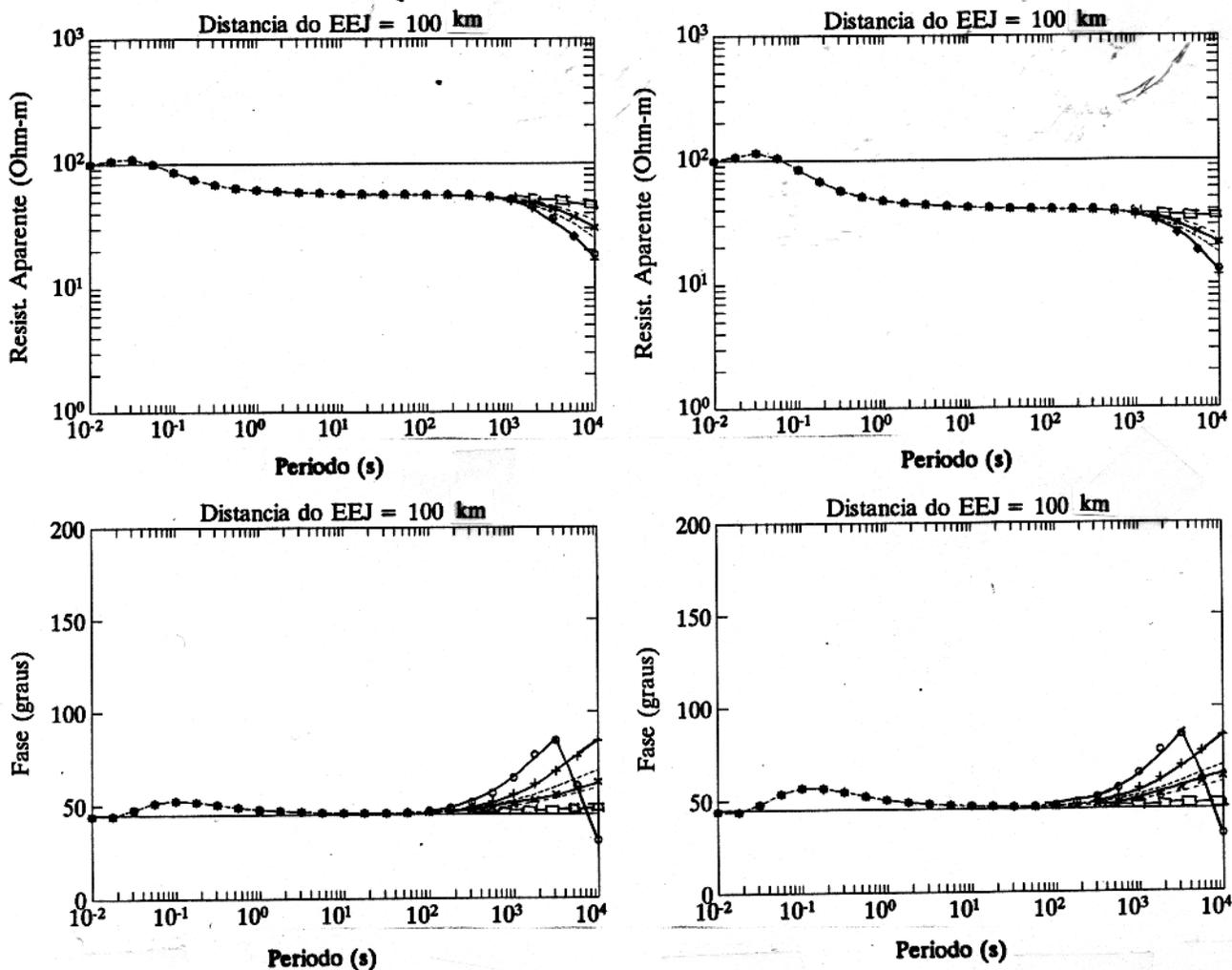
é bastante pronunciado visto que a estrutura tridimensional é bastante condutiva ($5 \Omega\text{m}$) e o meio encaixante é relativamente resistivo ($100 \Omega\text{m}$).

As curvas que representam os efeitos da fase tanto na polarização XY quanto na YX, mostram-se sempre invertidas em relação a aquelas da resistividade aparente. É também interessante notar que mesmo a polarização sendo diferente os efeitos da fase são praticamente análogos para esta figura. Os efeitos produzidos nas sondagens magnetotélúricas devido a tridimensionalidade da estrutura são bastante perceptíveis nas curvas das sondagens magnetotélúricas desta figura. Este fato pode ser comprovado para qualquer frequência inferior a 10^1 Hz no caso da resistividade aparente, uma vez que as curvas que representam os efeitos da estrutura tridimensional não se superpõem à curva que representa o efeito do semi-espaço. No caso da fase, entretanto, a presença da estrutura 3D provoca efeitos nas sondagens desde frequências menores que 10^2 Hz, porque a resposta do semi-espaço está representada pela reta 1D da onda plana.

A Figura 4.3 mostra os gráficos das sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.1, no que concerne à resistividade aparente e fase. Estes gráficos foram obtidos posicionando a estrutura tridimensional a 100 km de distância da fonte que é o eletrojato Onwumechilliano. Desses gráficos é possível observar que os efeitos do eletrojato nas curvas de resistividade aparente só aparecem quando as frequências são inferiores a 10^{-2} Hz, independentemente da polarização ser XY ou YX. É interessante notar que os efeitos do eletrojato para frequências inferiores a 10^{-2} Hz, tendem a apresentar um desvio maior para valores de alfa muito pequenos.

No que diz respeito à fase os efeitos do eletrojato também aparecem para frequências inferiores a 10^{-2} Hz. Analisando os quatro gráficos mostrados na Figura 4.3, verifica-se novamente que as curvas que representam os efeitos do eletrojato equatorial Onwumechilliano nas sondagens magnetotélúricas para resistividade aparente, apresentam-se invertidas em relação às curvas que representam o efeito da fase. Esta observação é válida independentemente da polarização ser XY ou YX.

Na Figura 4.4 mostram-se as sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.1, no que concerne à resistividade aparente e fase. Estas sondagens foram encontradas posicionando a estrutura tridimensional a 300 km de distância do eletrojato Onwumechilliano. Nesses gráficos se observa que os efeitos do eletrojato nas sondagens magnetotélúricas da resistividade aparente XY e YX, aparecem de forma diferenciada dependendo do valor do parâmetro alfa. De acordo com os gráficos mostrados nas Figuras 4.2 e 4.3, observa-se que quando as frequências são baixas, as curvas que representam os efeitos do eletrojato nas sondagens magnetotélúricas, apresentam



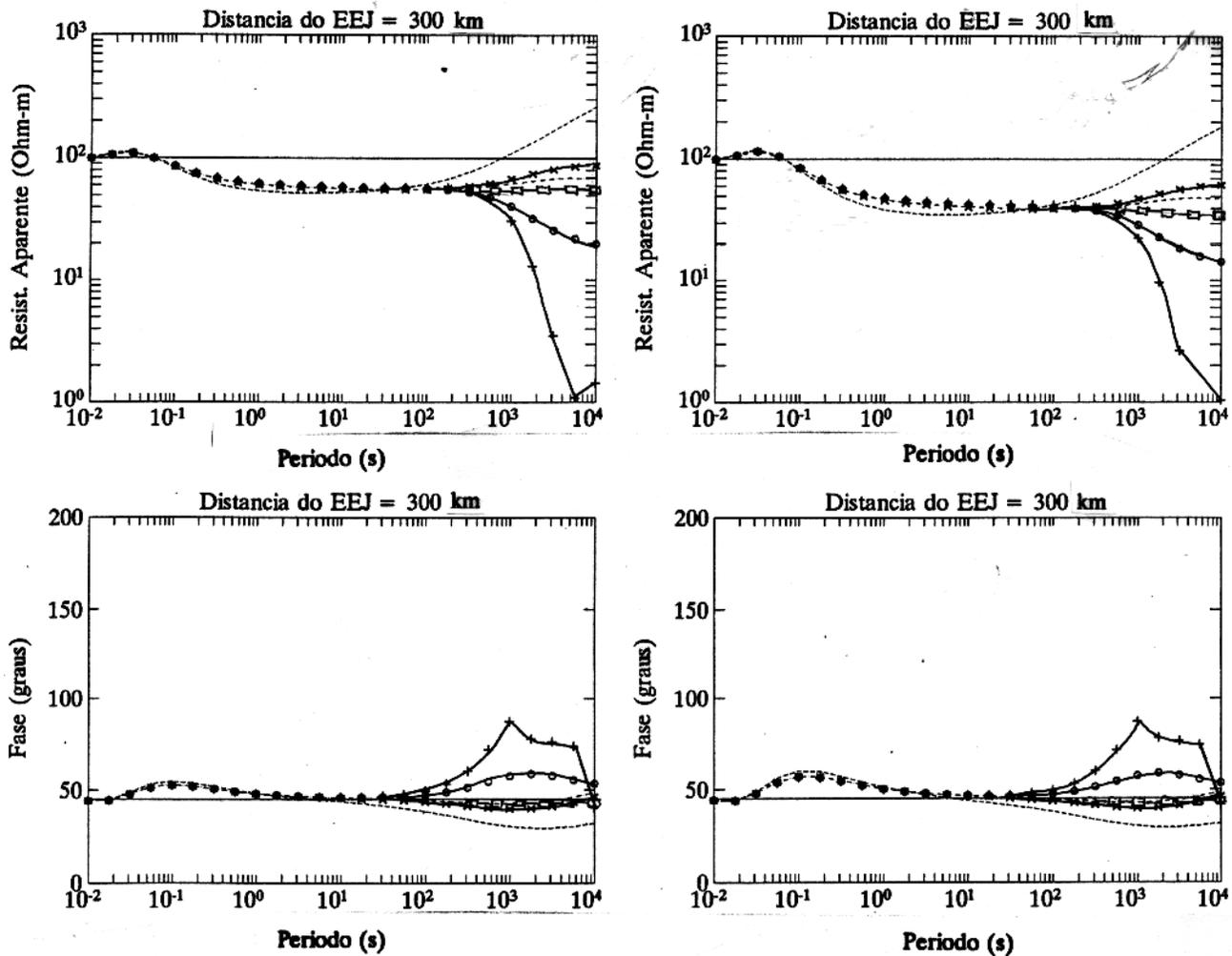
POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○-
Alfa	-1.5	++++
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	-□-□-

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○-
Alfa	-1.5	++++
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	-□-□-

Figura 4.3 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.1.



POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	-.-.-.-
Onda plana	1D	—
Onda plana	3D	-□-□-

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	-.-.-.-
Onda plana	1D	—
Onda plana	3D	-□-□-

Figura 4.4 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.1.

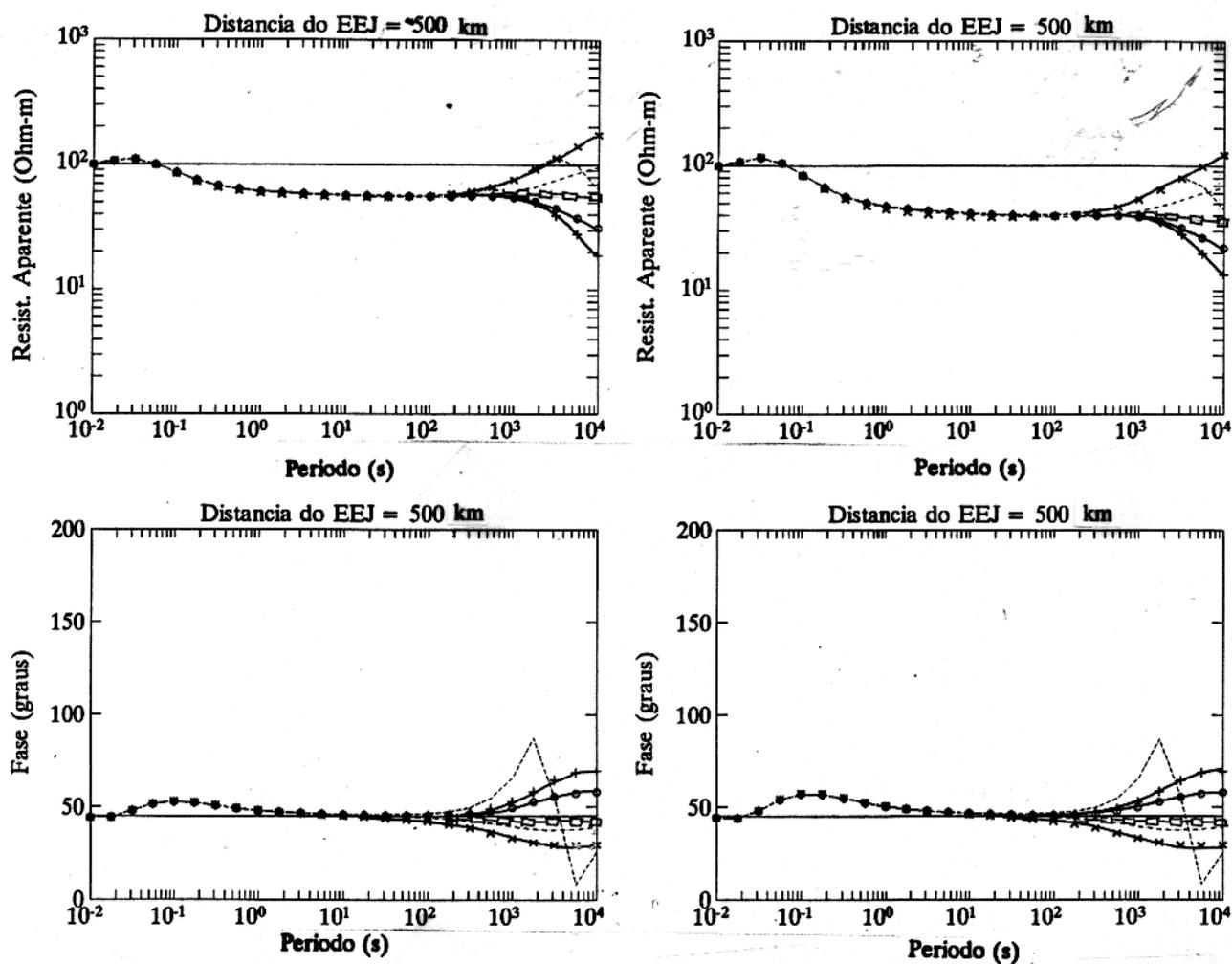
um comportamento bastante regular. No entanto, no presente caso os efeitos do eletrojato apresentam-se de forma bastante irregular para o mesmo intervalo de frequência. De acordo com esta figura, a curva para $\alpha = -1,5$ apresenta um comportamento mais errático que a curva para $\alpha = -2,0$. Isso nos induz a pensar que nem sempre é verdadeira a afirmação de que quanto menor for o valor do parâmetro alfa maior será o desvio da curva. Da mesma forma, a curva para $\alpha = -1,0$ é a que apresenta um maior desvio dos valores da onda plana. No caso da resistividade aparente, quando $\alpha = -1,0$ os efeitos do eletrojato ondulante nas sondagens magnetotéluricas podem ser percebidos quando as frequências são inferiores a 10^{-2} Hz, independentemente da polarização ser XY ou YX; para os demais valores de alfa esses efeitos só são percebidos em frequências inferiores a 10^{-3} Hz.

A fase mostra-se também bastante sensível nesses gráficos da Figura 4.4. Assim verifica-se que quando $\alpha = -1,0$ os efeitos do eletrojato ondulante nas sondagens magnetotéluricas podem ser percebidos quando as frequências são inferiores a 10^{-1} Hz, independentemente da polarização. Para os demais valores de alfa esses efeitos são percebidos em frequências inferiores a 10^{-2} Hz.

A Figura 4.5 nos mostra a mesma situação que nos casos anteriores, mas agora com a estrutura 3D posicionada a 500 km de distância do eletrojato Onwumechilliano. Da mesma forma que nos testes anteriores, os gráficos de resistividade aparente relacionados a esta figura demonstram que o efeito galvânico na polarização YX é muito mais acentuado que na polarização XY; pois a curva da primeira está mais afastada da reta que representa os efeitos da onda plana unidimensional, que na segunda polarização. Esses gráficos também nos mostram, no caso da resistividade aparente na XY, que a curva para $\alpha = 0,0$ na frequência de 10^{-4} Hz apresenta o mesmo valor da resistividade do meio encaixante mostrado na Figura 4.1. Na polarização YX, entretanto, esse papel é representado pela curva para $\alpha = -0,5$ na mesma frequência. No caso da resistividade aparente, os efeitos do eletrojato ondulante nas sondagens magnetotéluricas podem ser percebidos quando as frequências são inferiores a 10^{-2} Hz, independentemente da polarização ser XY ou YX.

A fase, nessa mesma figura mostra efeitos para frequências inferiores a 10^{-2} Hz, independentemente da polarização ser XY ou YX. Quando as frequências são baixas ($\approx 10^{-4}$ Hz), as respostas devidas ao eletrojato, em ambas as polarizações, estão bastante defasadas em relação à onda plana 1D (45°). Isto é mostrado com os valores de 70° , 60° , 45° , 40° e 30° para os valores de $\alpha = -1,5$, $-2,0$, $0,0$, $-0,5$, e $-1,0$, respectivamente.

A Figura 4.6 mostra as sondagens magnetotéluricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro de uma estrutura tridimensional igual a da Figura 4.1, a qual está localizada a 1000 km de distância do eletrojato. Esses gráficos nos mostram que os efeitos do eletrojato



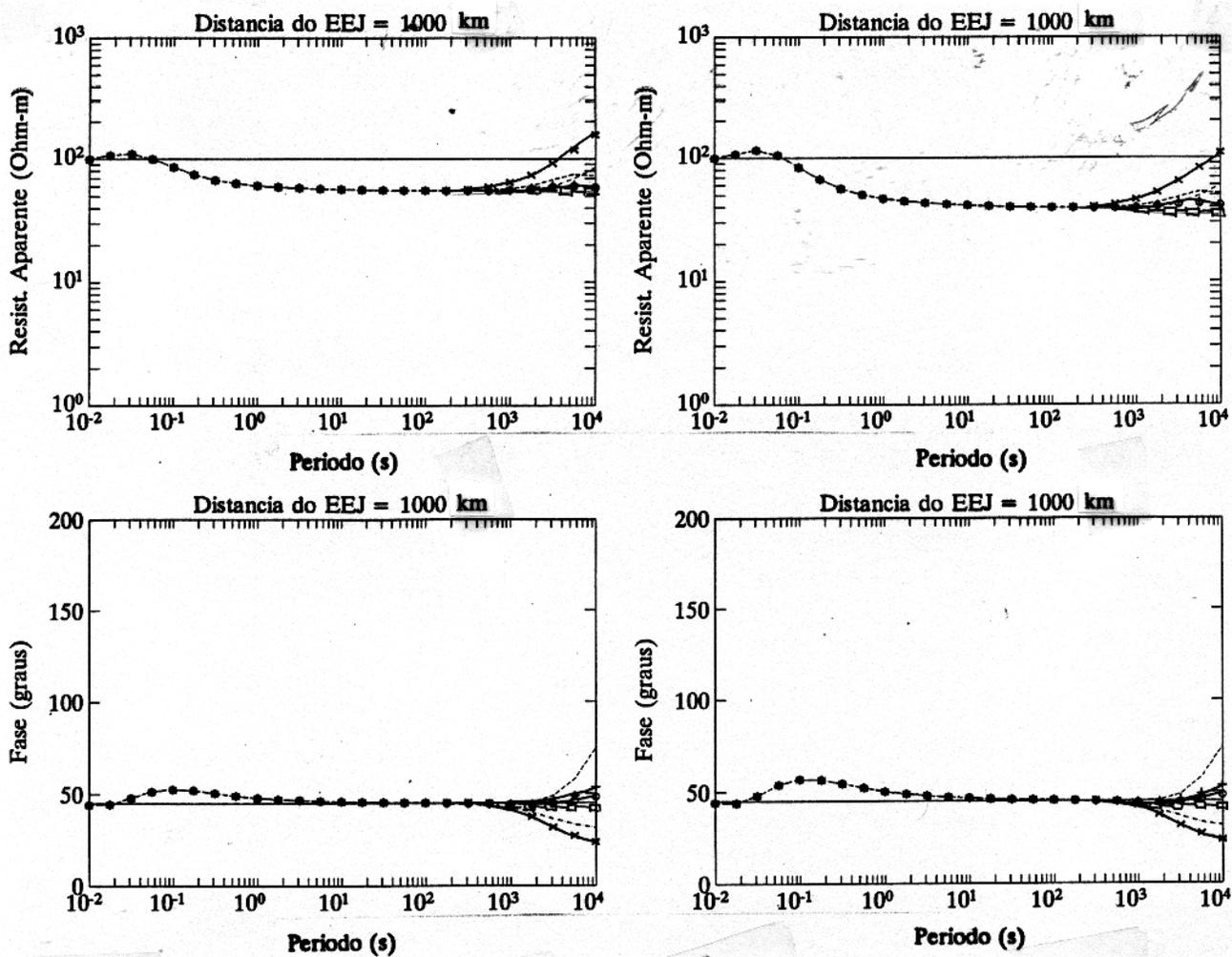
POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	——
Onda plana	3D	-□-□-

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	——
Onda plana	3D	-□-□-

Figura 4.5 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.1.



POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	-o-o-o-
Alfa	-1.5	-+ + + -
Alfa	-1.0	- - - - -
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	- -
Onda plana	1D	—
Onda plana	3D	-□-□-□-

POLARIZAÇÃO YX

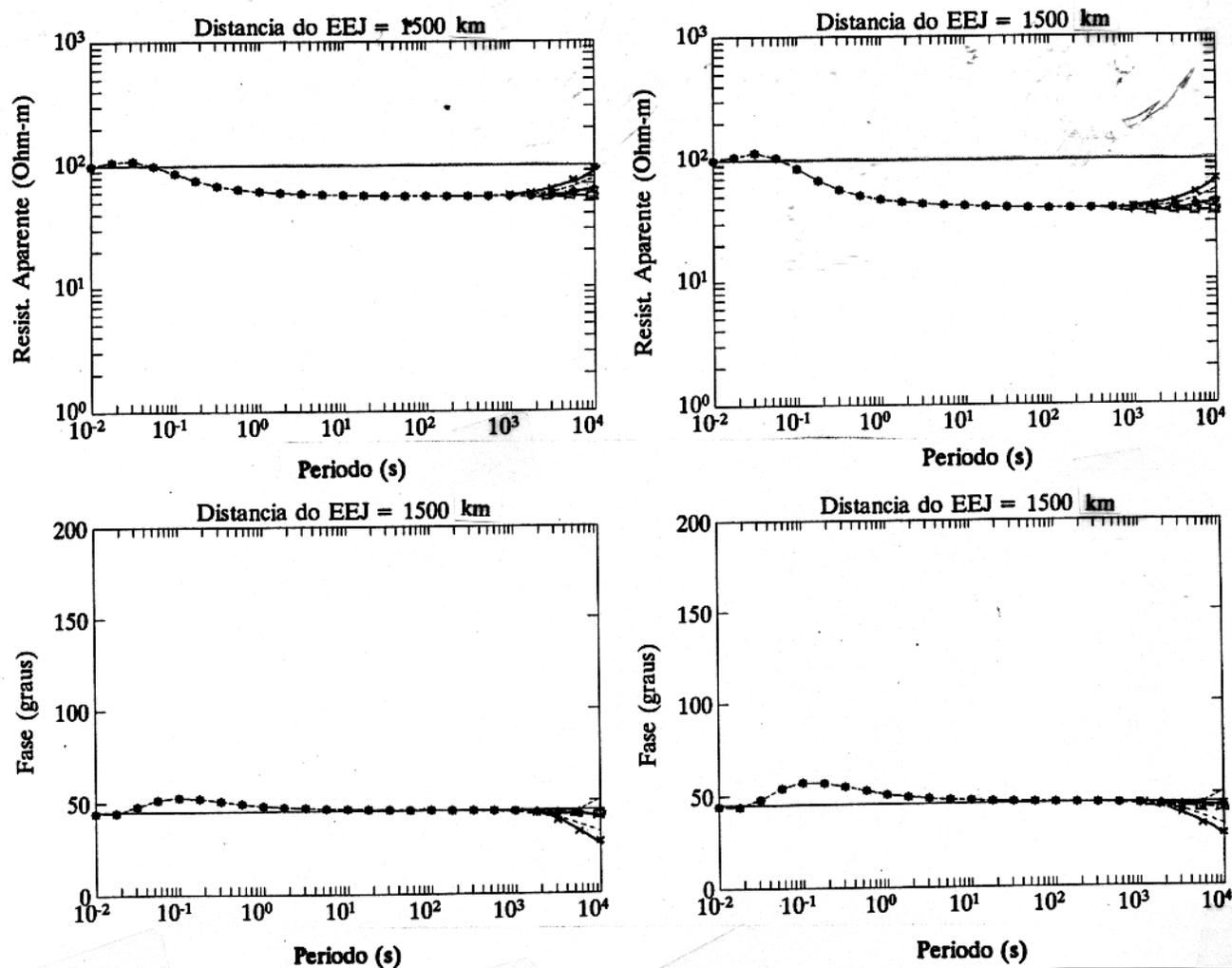
Alfa	-2.0	-o-o-o-
Alfa	-1.5	-+ + + -
Alfa	-1.0	- - - - -
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	- -
Onda plana	1D	—
Onda plana	3D	-□-□-□-

Figura 4.6 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.1.

ondulante nas sondagens magnetotélúricas só podem ser observados quando as frequências são inferiores a aproximadamente 5×10^{-3} Hz, para a resistividade aparente nas duas polarizações. Para o eletrojato com $\alpha = -0,5$ é a que apresenta um comportamento com maior desvio à onda plana. Quando a polarização é YX, as curvas de resistividade aparente para $\alpha = -1,5$ e $\alpha = -2,0$ estão completamente sobrepostas. Na frequência de 10^{-4} Hz, essa resistividade aparente é igual a $40 \Omega\text{m}$. Na polarização XY, são as curvas de resistividade aparente para $\alpha = -1,5$ e $\alpha = -2,0$ as que estão também completamente sobrepostas, sendo essa resistividade aparente de $60 \Omega\text{m}$ para a frequência 10^{-4} Hz.

Na Figura 4.7 aparecem as sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.1, agora posicionada a 1500 km de distância do eletrojato equatorial. Nesses gráficos se observa que os efeitos do eletrojato ondulante nas sondagens magnetotélúricas são menores que nos outros casos, mesmo nas baixas frequências. Essas observações são válidas para ambas as polarizações para a resistividade aparente e fase. Comparando as curvas de resistividade aparente para as duas polarizações, observa-se que o efeito galvânico é outra vez mais pronunciado quando a polarização é YX, como é observado no maior afastamento desta curva em relação à onda plana 1D. Os gráficos também nos mostram que nesta distância os efeitos do eletrojato aparecem em frequências menores a 10^{-3} Hz, sendo isto válido para as duas polarizações.

A fase, normalmente é mais sensível que a resistividade aparente, só apresenta desta vez efeitos perceptíveis do eletrojato ondulante em frequências inferiores a 10^{-3} Hz para ambas as polarizações. Assim a medida em que se distancia a estrutura tridimensional do eletrojato, a fase tende para 45° , principalmente as curvas com valores de alfa mais baixos, tais como: $\alpha = -1,0$, $\alpha = -1,5$ e $\alpha = -2,0$.



POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+ + +
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+ + +
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

Figura 4.7 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.1.

MODELO - 02

A Figura 4.9 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.8. Estes resultados foram obtidos posicionando a estrutura tridimensional a 10 km de distância do centro do eletrojato. Observando as curvas de resistividade aparente nas polarizações XY e YX para vários valores do parâmetro alfa, verifica-se que o eletrojato Onwumechilliano só afeta as sondagens magnetotelúricas para frequências inferiores a 10^{-3} Hz. De acordo com esse gráfico, para o eletrojato com $\alpha = -2,0$ existe uma resistividade aparente de $\approx 7\Omega m$ na frequência de 10^{-4} Hz. Neste caso, o efeito galvânico é muito pequeno assim ocorrendo para frequências inferiores a 10^{-1} Hz, ou seja, é a partir desse valor de frequência que ocorre a separação entre as curvas do modelo unidimensional e do modelo tridimensional. Para ambos tipos de polarização, no intervalo de frequência que vai de 10^2 Hz até cerca de 10^{-1} Hz, existe uma coincidência entre as respostas uni e tridimensionais.

A fase mostra para ambas as polarizações que os efeitos do eletrojato equatorial Onwumechilliano só são percebidos para frequências inferiores a 10^{-2} Hz (Figura 4.9). De acordo com esse gráfico existe uma superposição entre as respostas uni e tridimensionais, desde a frequência de 10^2 Hz até cerca de 6×10^{-3} Hz. Na frequência 10^2 Hz o gráfico da fase na polarização XY, mostra que as sondagens magnetotelúricas uni e tridimensionais apresentam uma fase de aproximadamente 45° . Na frequência de 10^{-4} Hz, a fase para o modelo unidimensional é cerca de 45° , porém, para o modelo tridimensional a resposta para $\alpha = -2,0$ é a que apresenta a maior diferença de fase, cerca de 70° . Para o eletrojato com $\alpha = 0,0$, apresenta-se a menor diferença de fase, aproximadamente igual a 52° . Com relação ao gráfico da fase na polarização YX constatamos que seus resultados são praticamente análogos aos já encontrados no gráfico da fase na polarização XY.

A Figura 4.10 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.8. Estes gráficos foram obtidos posicionando a estrutura tridimensional a 100 km de distância do centro do eletrojato equatorial Onwumechilliano. A resistividade aparente na polarização XY nos mostra que as respostas do modelo tridimensional, para vários valores de alfa, apresentam-se completamente sobrepostas em todo o espectro de frequência mostrado (10^2 Hz até 10^{-4} Hz), não acontecendo influências do eletrojato nas sondagens magnetotelúricas. Os resultados para a polarização YX são semelhantes, existindo somente diferenças nos valores da resistividade para as frequências menores (10^{-4} Hz), que no caso XY é $9 \Omega m$ e no YX $7 \Omega m$.

Na mesma figura a fase na polarização XY mostra que para frequências inferiores a 10^{-3} Hz, o eletrojato Onwumechilliano afeta as sondagens magnetotelúricas. Por outro lado, a fase

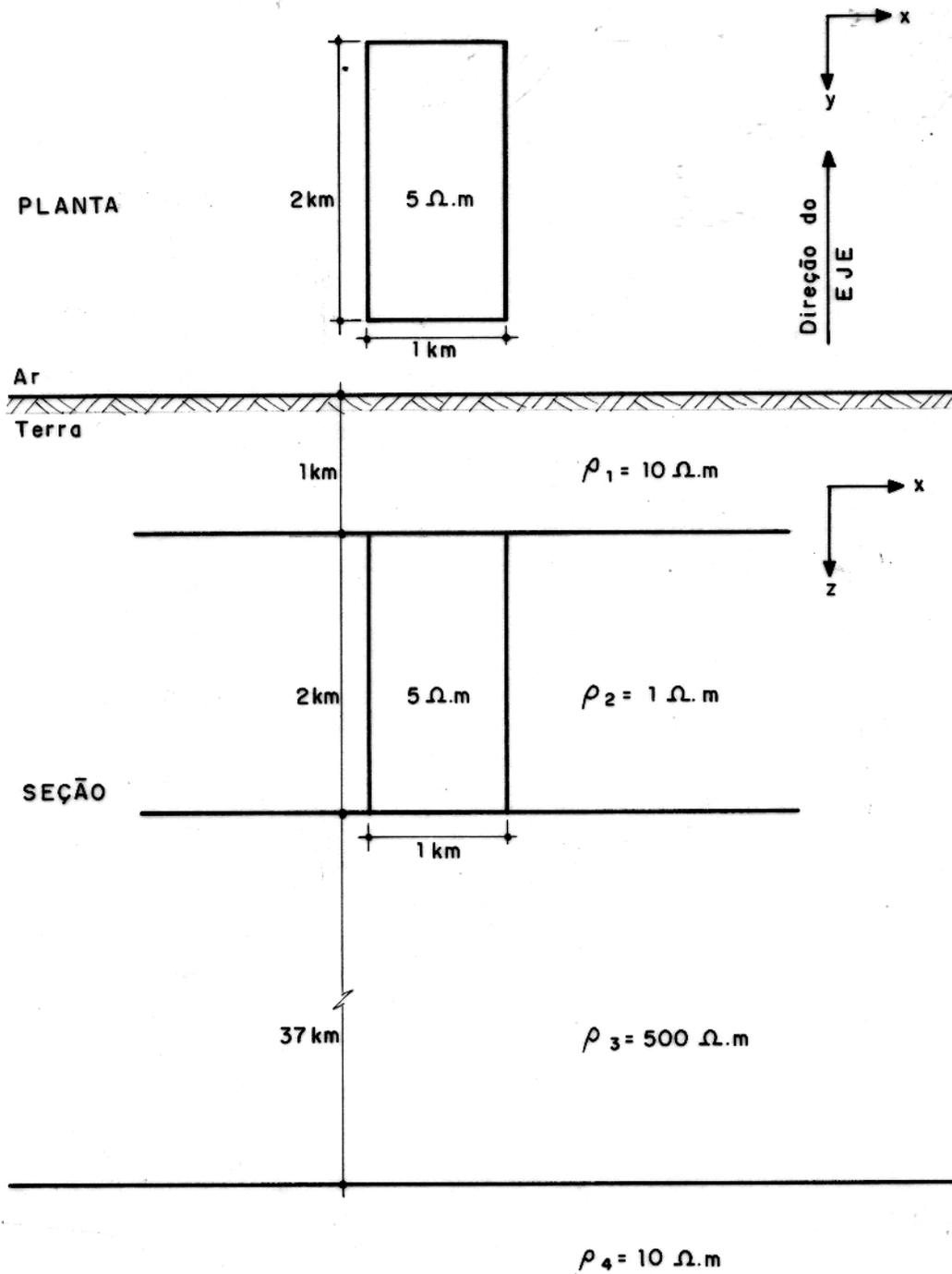
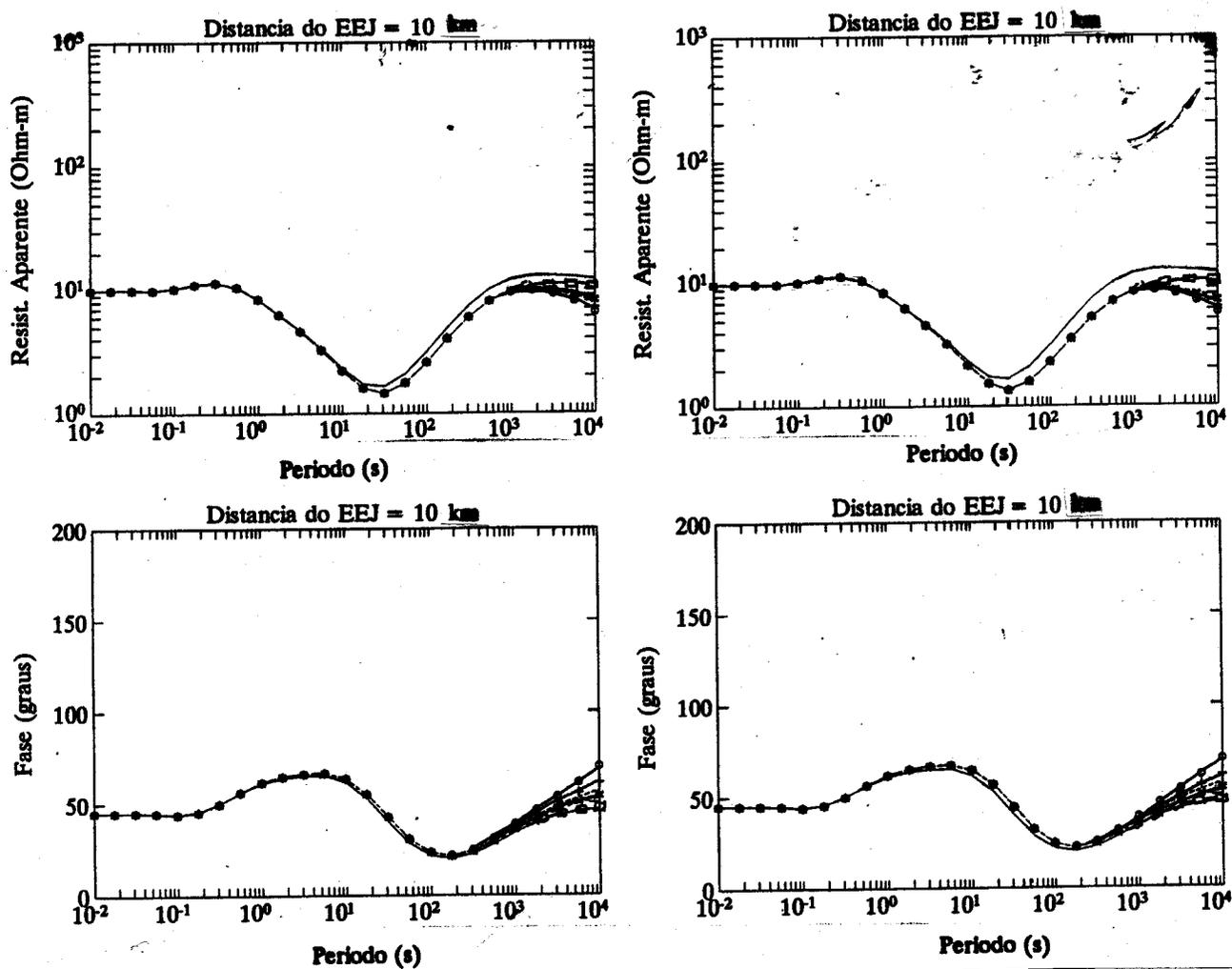


Figura 4.8 - Modelo tridimensional utilizado



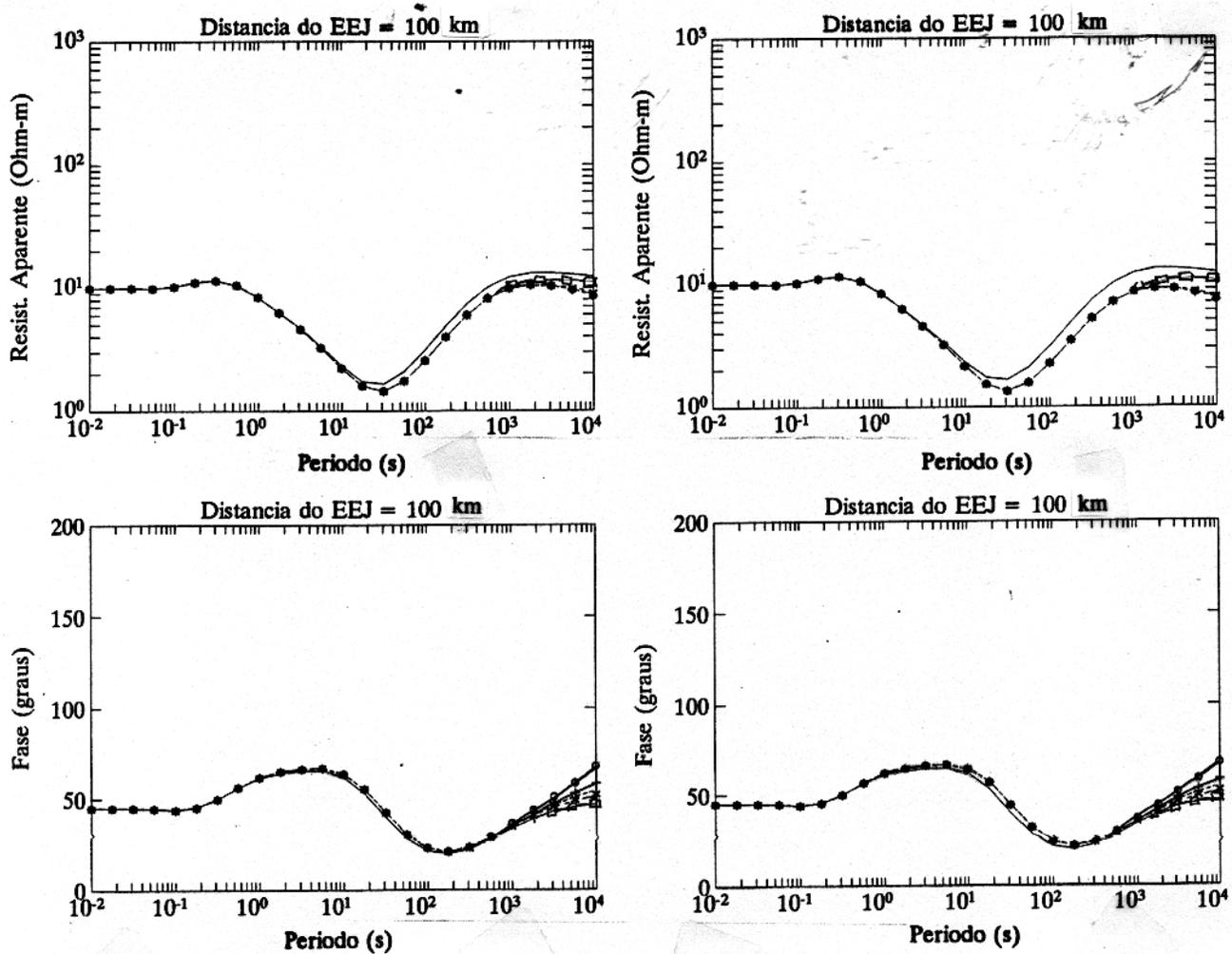
POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+--+
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+--+
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

Figura 4.9 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.8.



POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+--+
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+--+
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

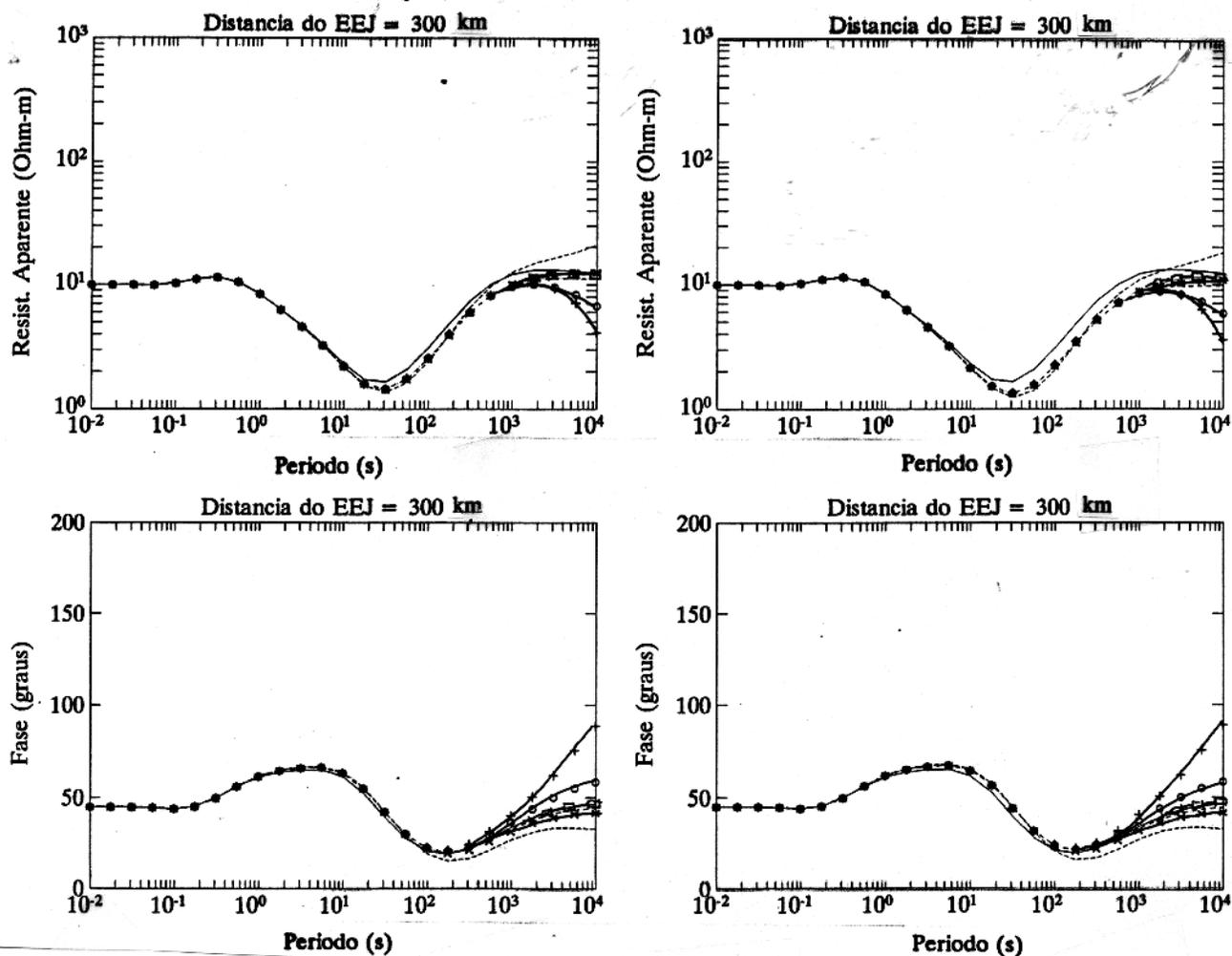
Figura 4.10 - Sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.8.

na polarização YX mostra que no intervalo de frequência que vai de 10^0 Hz até cerca de 10^{-2} Hz as curvas uni e tridimensionais apresentam um certo paralelismo. Dã mesma forma, nas baixas frequências, ocorre separação entre as curvas de resposta, o que mostra também a influência do eletrojato nesta polarização.

A Figura 4.11 mostra as sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.8, localizada a 300 km de distância do centro do eletrojato. Na polarização XY no caso da resistividade aparente ocorre, nas baixas frequências, uma pequena separação das curvas tridimensionais, sendo esta separação melhor caracterizada para frequências inferiores a 10^{-3} Hz. Para frequências menores que 10^{-3} Hz, a curva para $\alpha = -1,0$ sobe adquirindo valores maiores que as outras. Para a resistividade aparente na polarização YX a curva para $\alpha = -0,5$ apresenta praticamente o mesmo valor que a curva do modelo unidimensional na frequência de 10^{-4} Hz, ou seja, cerca de $10^1 \Omega\text{m}$. Esta polarização também mostra que para frequências inferiores a 10^{-3} Hz ocorre a separação das curvas para os vários valores de alfa. A curva para $\alpha = -1,5$ apresenta o menor valor de resistividade aparente ($3,6 \Omega\text{m}$) em relação as demais.

A fase na polarização XY nos mostra que para frequências inferiores a 10^{-2} Hz as curvas tridimensionais apresentam-se de forma bastante errática em relação à onda plana, estando, entretanto sobrepostas para frequências maiores. Essas curvas também mostram que na frequência de 10^2 Hz a fase unidimensional e tridimensional são aproximadamente iguais a 45° , tendo valores que variam entre 35° a 87° para os diferentes alfas na frequência de 10^{-4} Hz. O gráfico da fase na polarização YX nos mostra praticamente os mesmos resultados obtidos no gráfico da fase na polarização XY; observando-se inclusive que os efeitos do eletrojato aparecem somente para frequências inferiores a 10^{-2} Hz.

Na Figura 4.12 aparecem as sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.8, posicionando a estrutura tridimensional a 500 km de distância do centro do eletrojato Onwumechilliano. Para a resistividade aparente na polarização XY, esta figura nos mostra que os efeitos do eletrojato só são percebidos quando as frequências são inferiores a 10^{-3} Hz, estando sobrepostas as sondagens uni e tridimensionais para frequências superiores a 10^{-3} Hz. Comparando os gráficos de resistividade aparente na polarização XY apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12, verifica-se que as curvas do modelo tridimensional mostradas na Figura 4.12 apresentam-se menos espalhadas que as apresentadas na Figura 4.11. Assim, observa-se que no gráfico da Figura 4.11 a resistividade aparente, na frequência de 10^{-4} Hz, variava de $4 \Omega\text{m}$ para a curva correspondente a $\alpha = -1,5$ até $20 \Omega\text{m}$ para a curva correspondente a $\alpha = -1,0$, enquanto no gráfico da Figura 4.12 a resistividade aparente, na mesma frequência, varia de $9 \Omega\text{m}$ para



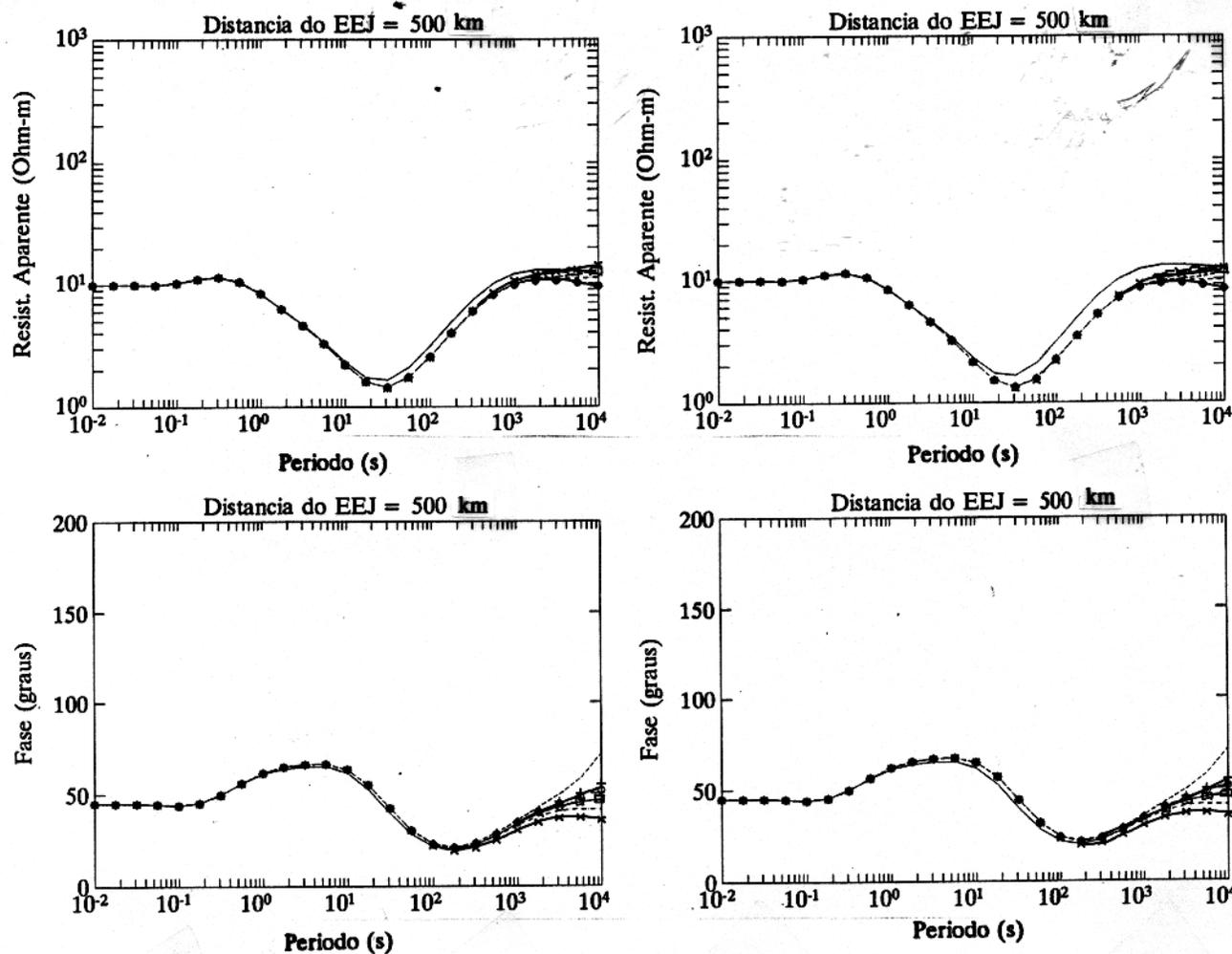
POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+ + + +
Alfa	-1.0	- - - -
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	-.-.-.-
Onda plana	1D	—
Onda plana	3D	□-□-□

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+ + + +
Alfa	-1.0	- - - -
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	-.-.-.-
Onda plana	1D	—
Onda plana	3D	□-□-□

Figura 4.11 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.8.



POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+--+
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+--+
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

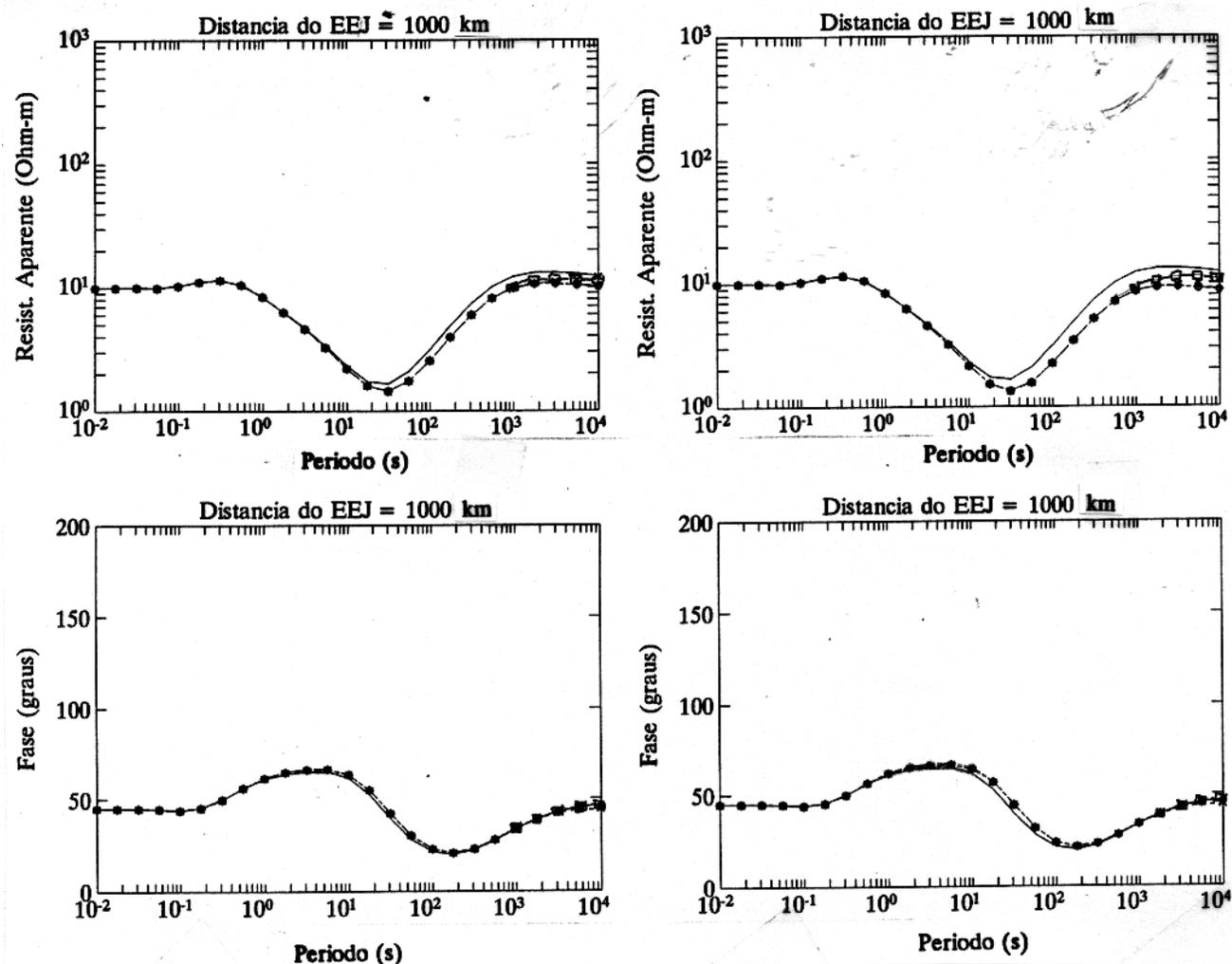
Figura 4.12 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.8.

$\alpha = -1,5$ e $\alpha = -2,0$ até cerca de $15 \Omega\text{m}$ para $\alpha = -0,5$. O gráfico da resistividade aparente na polarização YX mostrado na Figura 4.12 apresenta efeito galvânico mais acentuado que o gráfico de resistividade aparente na polarização XY, como se constata na maior separação entre as respostas uni e tridimensionais a partir da frequência de 10^{-1} Hz.

O gráfico da fase na polarização XY apresentado na Figura 4.12 nos mostra que os efeitos do eletrojato nas sondagens magnetotélúricas realizadas no centro da estrutura da Figura 4.8, só aparecem para frequências inferiores a 10^{-2} Hz, quando ocorre a separação das curvas uni e tridimensionais. Observando atentamente as curvas para a fase na polarização XY, constatamos que a frequência de cerca de 8×10^{-3} Hz é a que apresenta o menor valor para a fase. Nessa frequência existe uma superposição entre as curvas unidimensional e tridimensional para $\alpha = -0,5$ com valor aproximado de 22° . Para a polarização YX, a fase nos mostra no intervalo de 10^0 Hz até cerca de 10^{-2} Hz, que as curvas tridimensionais apresentam uma pequena separação em relação à curva unidimensional. Se compararmos o gráfico da fase na polarização YX com o da polarização XY, verificamos que no intervalo de frequência considerado, a separação é mais acentuada na polarização YX que na XY. De um modo geral, os dois gráficos da fase nas polarizações XY e YX apresentados na Figura 4.12 são bastante semelhantes.

A Figura 4.13 mostra os gráficos das sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.8, posicionando a estrutura tridimensional a 1000 km de distância do centro do eletrojato. Para a resistividade aparente, na polarização XY, verifica-se que os efeitos do eletrojato Onwumechilliano nas sondagens magnetotélúricas tridimensionais tendem a ser menos intenso, ou seja, só aparecem em frequências inferiores a 10^{-3} Hz. Assim, com exceção da curva para $\alpha = -0,5$ as demais curvas referentes ao modelo tridimensional estão completamente sobrepostas. Para a polarização XY na frequência de 8×10^{-2} Hz, as curvas tridimensionais apresentam o menor valor de resistividade aparente, cerca de $1,5 \Omega\text{m}$. Na frequência de 10^{-4} Hz, as curvas unidimensional e tridimensional para $\alpha = 0,0$ e $\alpha = -0,5$ apresentam resistividade aparente aproximadamente igual a $12 \Omega\text{m}$, enquanto as curvas com alfa igual a $-1,0$, $-0,5$ e $-2,0$ apresentam resistividade aparente igual a $10^1 \Omega\text{m}$. O gráfico da resistividade aparente na polarização YX mostra os mesmos efeitos do eletrojato nas sondagens.

O gráfico da fase na polarização XY apresentado na Figura 4.13 nos mostra que os efeitos do eletrojato nas sondagens magnetotélúricas tridimensionais só são percebidos para frequências inferiores a 10^{-3} Hz; contudo, esses efeitos são relativamente pequenos. Esse mesmo gráfico mostra que a curva de resposta magnetotélúrica referente ao modelo unidimensional e as curvas tridimensionais com vários alfas, apresentam-se sempre invertidas em



POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+--+
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

POLARIZAÇÃO YX

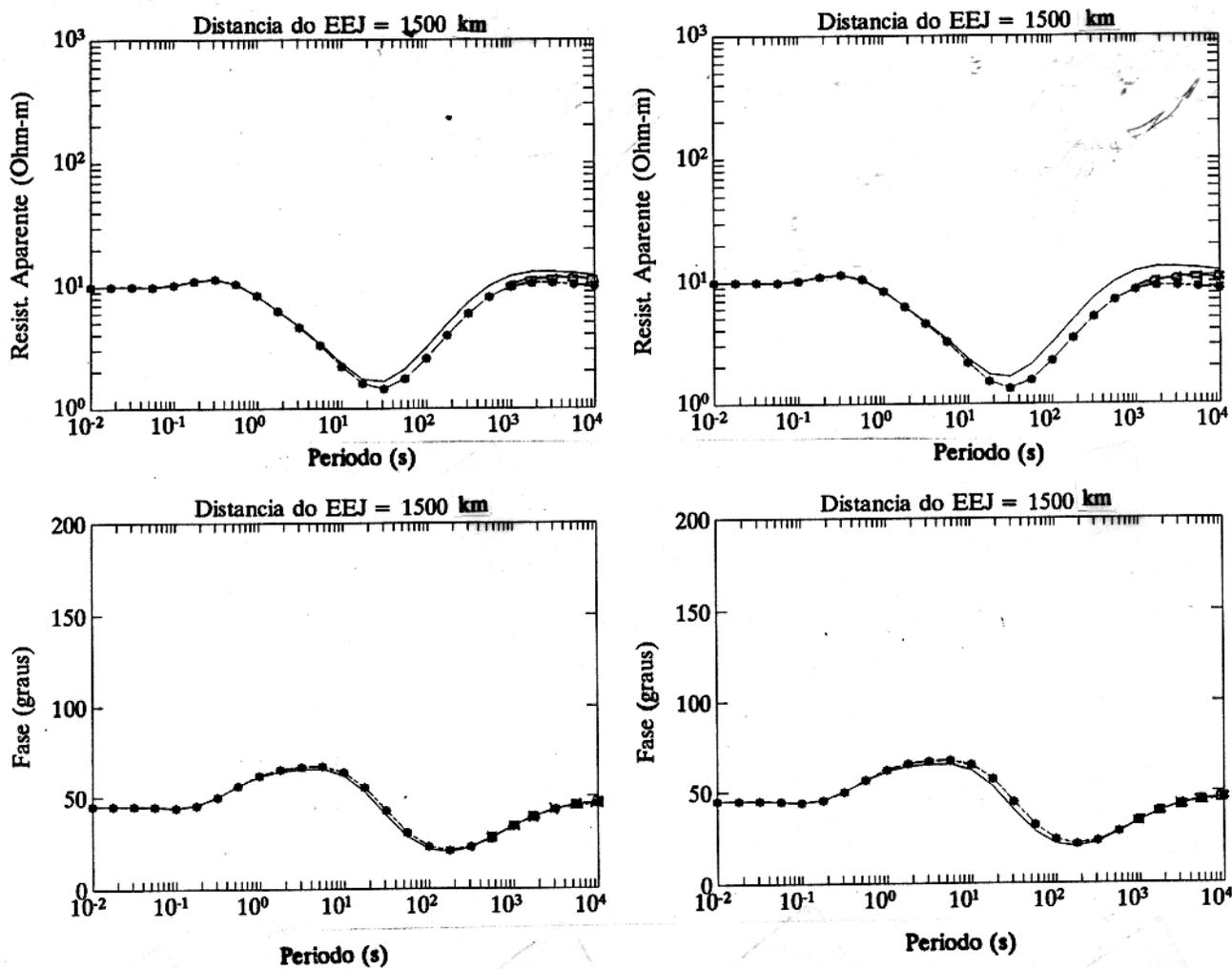
Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+--+
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

Figura 4.13 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.8.

relação às curvas de resistividade aparente, ou seja, onde ocorre um crescimento da resistividade aparente ocorre também um decréscimo no valor da fase. Da mesma forma, pode-se constatar que na frequência de 10^{-4} Hz a fase varia muito pouco em relação às curvas dos modelos unidimensional e tridimensional. No que concerne à fase na polarização YX, os resultados são bastante semelhantes ao que se obteve para o gráfico da fase na polarização XY. O que mais chama a atenção nas curvas de resposta magnetotelúrica apresentadas nesse gráfico é que mesmo nas baixas frequências os efeitos do eletrojato equatorial Onwumechilliano nas sondagens magnetotelúricas tridimensionais são praticamente desprezíveis.

A Figura 4.14 mostra os gráficos das sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.8, posicionando a estrutura tridimensional a 1500 km de distância do centro do eletrojato. A resistividade aparente na polarização XY nos mostra que não há efeitos do eletrojato equatorial Onwumechilliano nas sondagens magnetotelúricas tridimensionais. Essa afirmação pode ser constatada verificando-se que as curvas tridimensionais estão completamente sobrepostas, para vários valores do parâmetro alfa, desde a frequência de 10^2 Hz até 10^{-4} Hz. Para a polarização YX também se constata que não há efeitos do eletrojato equatorial Onwumechilliano nas sondagens magnetotelúricas tridimensionais, pois em todo o espectro de frequência analisado, as curvas tridimensionais estão totalmente sobrepostas, independentemente do valor do parâmetro alfa adotado. Ao comparar as respostas uni e tridimensionais apresentadas nesse gráfico, verificamos que o efeito galvânico é semelhante aos outros casos apresentados anteriormente. O que se pode depreender ao analisarmos os gráficos de resistividade aparente nas polarizações XY e YX mostrados ao longo dessas figuras é que quando a estrutura tridimensional é paulatinamente afastada da fonte, que nesse caso é o eletrojato equatorial Onwumechilliano, os efeitos nas sondagens magnetotelúricas tendem a ser menores.

No gráfico da fase na polarização XY apresentado na Figura 4.14 percebe-se que não há efeitos do eletrojato equatorial Onwumechilliano nas sondagens magnetotelúricas tridimensionais mesmo nas baixas frequências, pois em todo o intervalo de frequência apresentado as curvas referentes aos modelos unidimensional e tridimensional estão completamente sobrepostas. Esse gráfico é importante porque nos mostra que apesar da fase ser uma grandeza física bastante sensível, quando se distancia muito a estrutura tridimensional do eletrojato, ela praticamente não é afetada. Para a fase na polarização YX também não se constata nenhum efeito do eletrojato nas sondagens magnetotelúricas tridimensionais, mesmo empregando-se vários valores para o parâmetro alfa. Comparando os dois gráficos para a fase nas polarizações XY e YX apresentadas nesta figura, verifica-se que tanto nas altas como nas baixas frequências a fase se apresenta com um valor de 45° .



POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	-----
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	-----
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

Figura 4.14 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.8.

MODELO - 03

A Figura 4.16 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.15, posicionando a estrutura tridimensional a 10 km de distância do centro do eletrojato. Para a resistividade aparente na polarização XY, constata-se que os efeitos do eletrojato equatorial podem ser percebidos para frequências inferiores a 10^{-2} Hz. De acordo com esse gráfico, no intervalo de frequência que vai de 10^2 Hz até cerca de 6×10^{-1} Hz as curvas uni e tridimensionais estão completamente sobrepostas. Para frequências superiores a 6×10^{-1} Hz, contudo, a curva unidimensional não se apresenta mais sobreposta à curva tridimensional. Em relação ao efeito galvânico, constatamos que ele é mais pronunciado na polarização YX, devido a maior separação entre as sondagens uni e tridimensionais.

Em relação à fase, na polarização XY, da Figura 4.16, se observa que quando a estrutura tridimensional é posicionada próxima ao eletrojato, os efeitos nas sondagens magnetotelúricas tendem a ser bastante pronunciados. Nesse gráfico, observa-se que para frequências que variam de 10^2 Hz até cerca de 10^{-2} Hz as respostas tridimensionais estão completamente sobrepostas, independentemente do valor de alfa adotado. Entretanto, para frequências inferiores a 10^{-2} Hz ocorre uma grande separação entre as curvas referentes ao modelo tridimensional dependendo do valor de alfa adotado, ou seja, a partir desse valor frequência os efeitos do eletrojato equatorial passam a afetar as sondagens magnetotelúricas tridimensionais. Para a polarização YX na frequência de 10^2 Hz a fase tanto para a curva unidimensional quanto a tridimensional é igual a 45° . Nas baixas frequências, como por exemplo em 10^{-4} Hz, a fase varia dependendo do tipo de modelo empregado e com o valor do parâmetro alfa adotado. Assim, ao se utilizar o modelo unidimensional, a fase é cerca de 16° , quanto que o menor valor da fase para a resposta tridimensional é 43° para $\alpha = 0,0$.

A Figura 4.17 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.15, obtidas posicionando a estrutura tridimensional a 100 km de distância do centro do eletrojato equatorial. Para a resistividade aparente na polarização XY, verifica-se que as curvas tridimensionais para vários valores de alfa, tendem a se aproximar da curva unidimensional, o que implica, conseqüentemente, numa diminuição do efeito galvânico nessa polarização. De acordo com esse gráfico, a curva para $\alpha = -2,0$ foi a que mais se aproximou da curva do modelo unidimensional. Comparando os gráficos de resistividade aparente nas polarizações XY e YX, verifica-se que o efeito galvânico é maior na polarização YX que na polarização XY, como se mostra na maior separação entre as curvas uni e tridimensionais para vários valores de alfa. Esses dois gráficos também nos

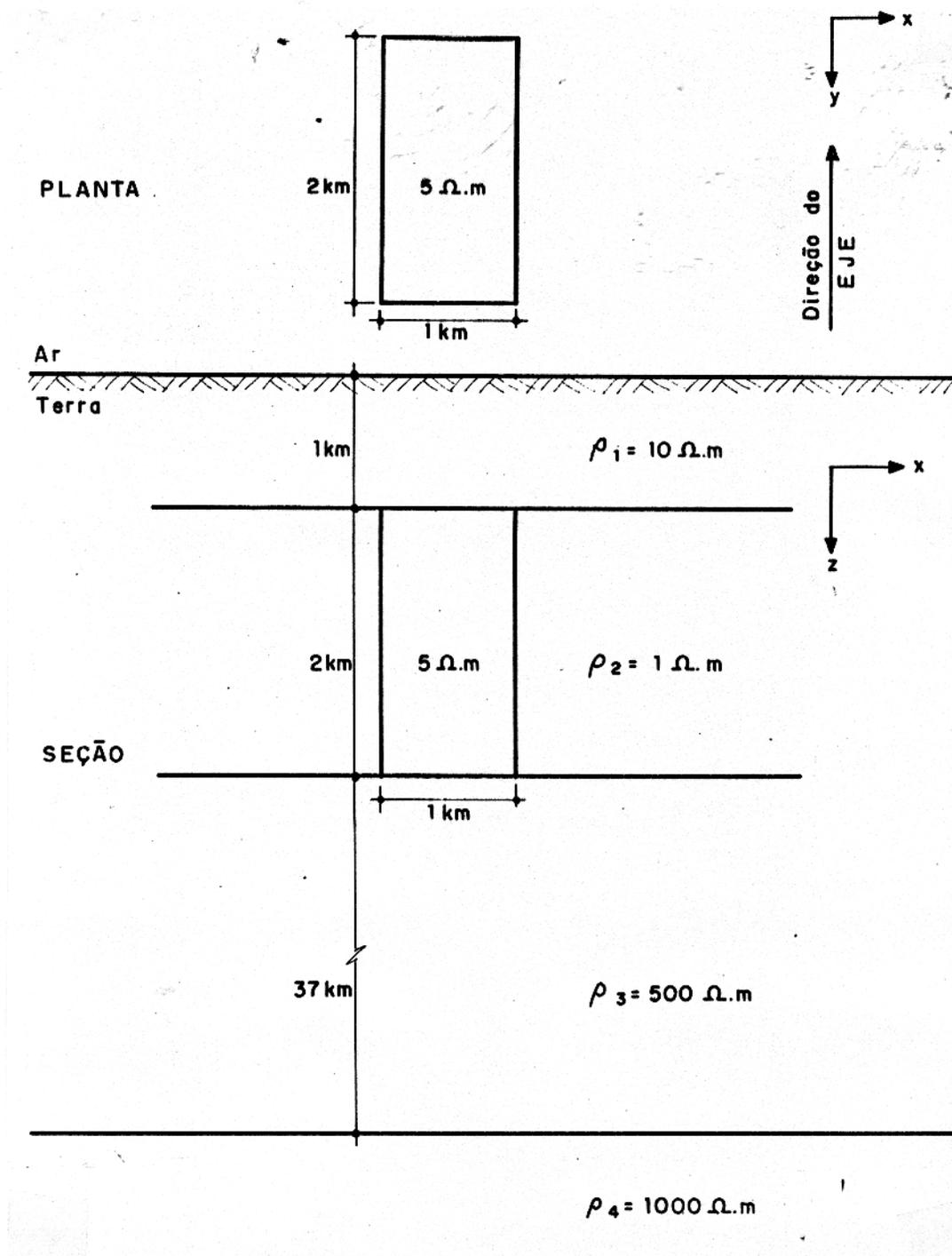
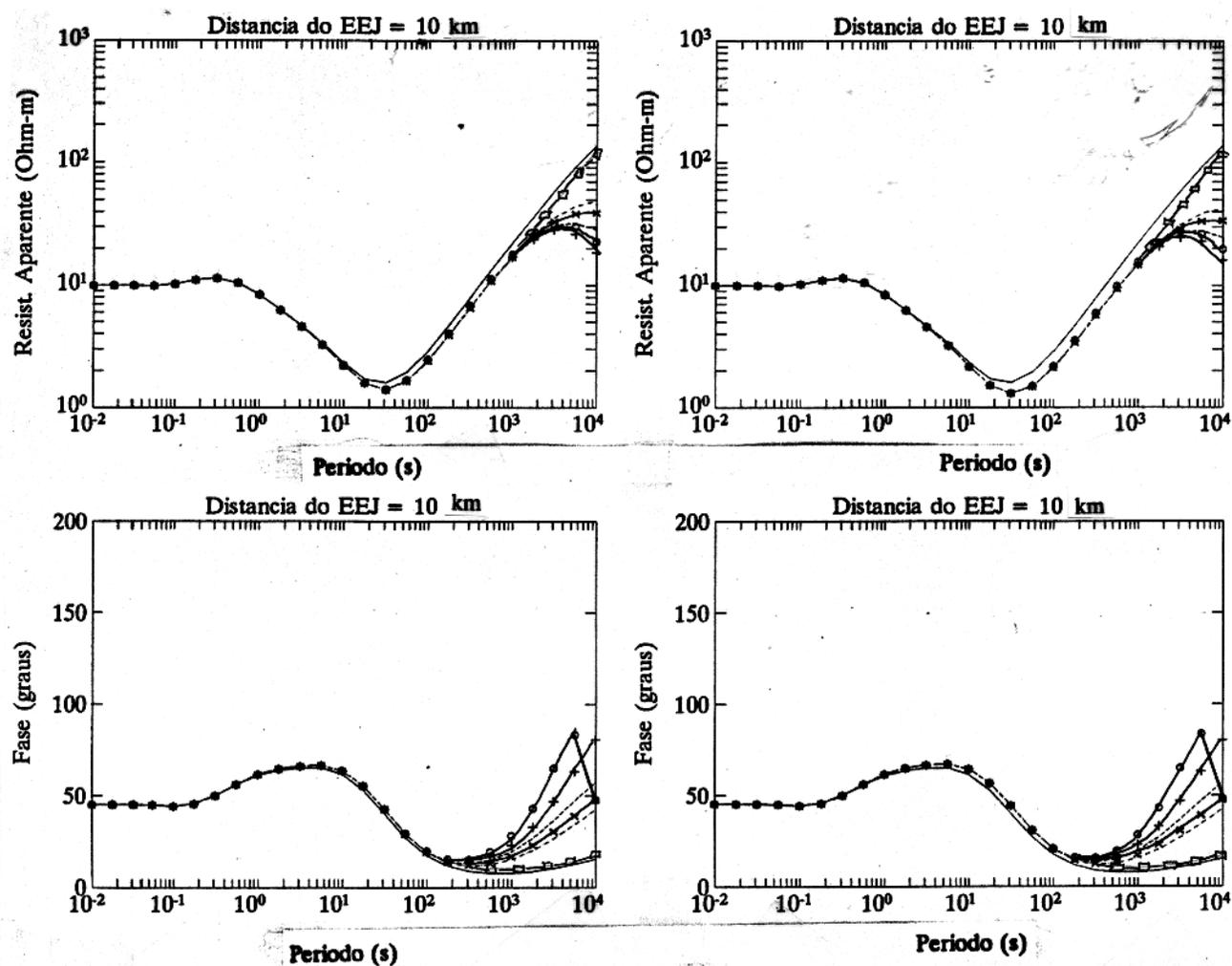


Figura 4.15 - Modelo tridimensional utilizado



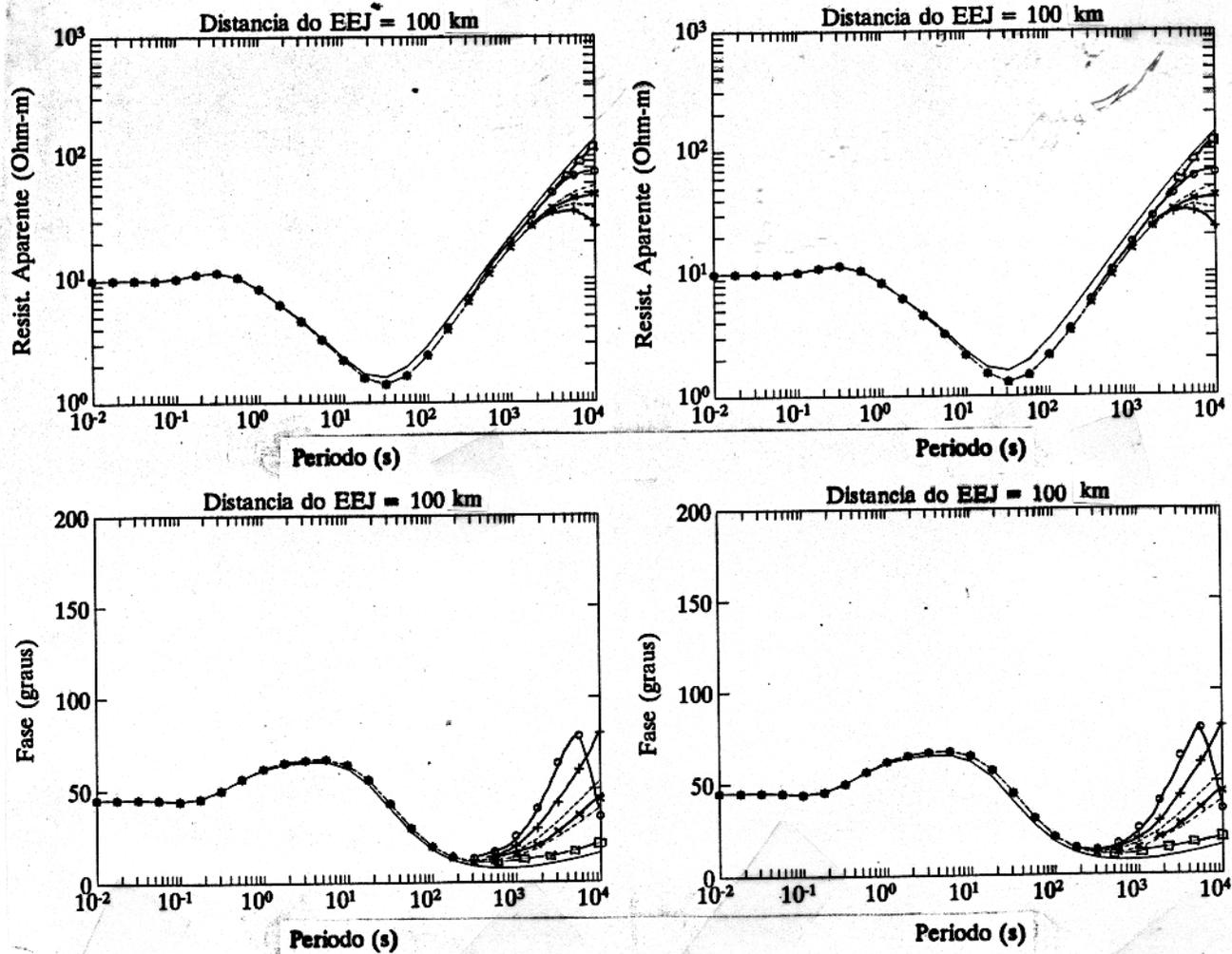
POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	——
Onda plana	3D	□-□-□

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	——
Onda plana	3D	□-□-□

Figura 4.16 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.15.



POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

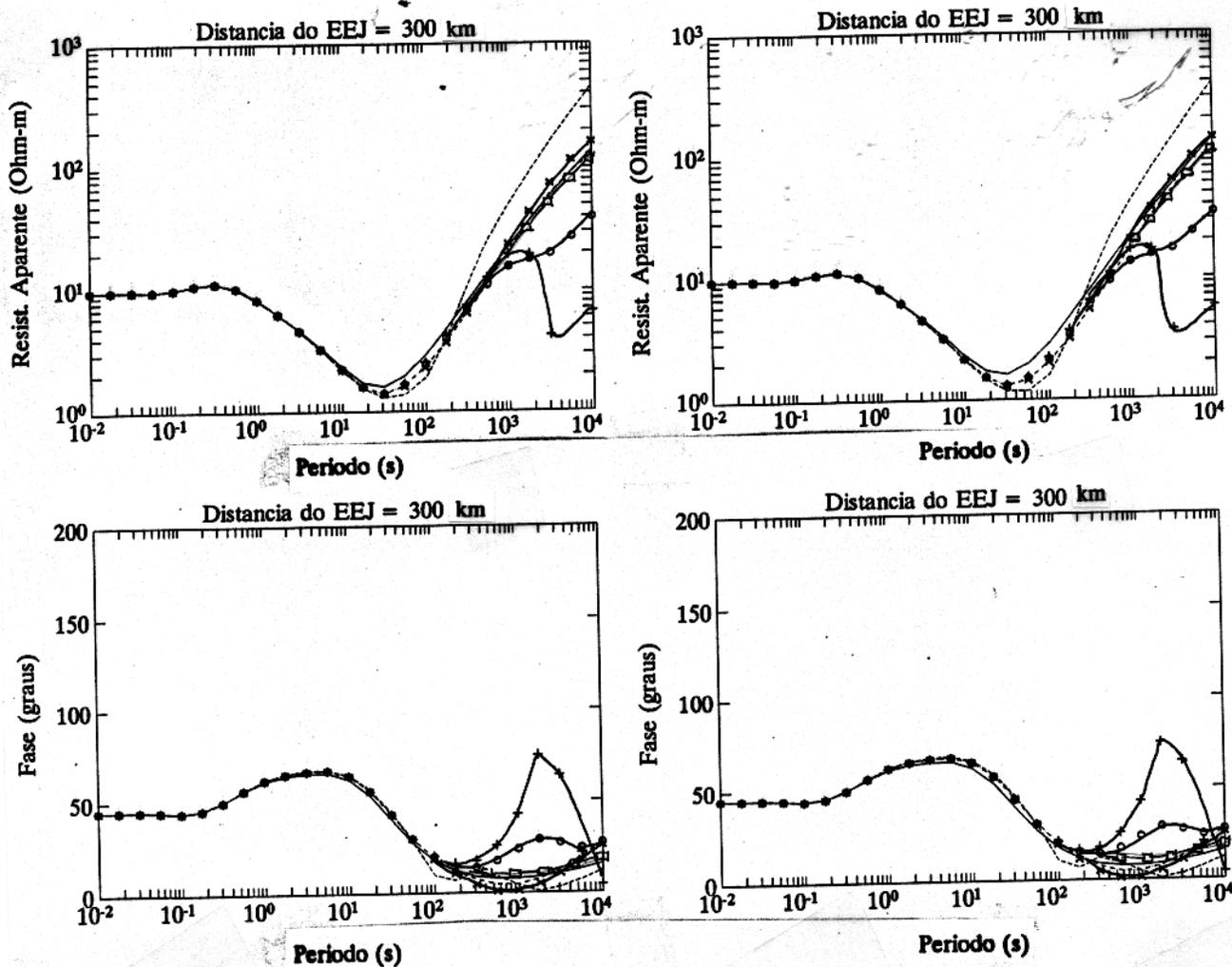
Figura 4.17 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.15.

mostram que na frequência de 10^{-4} Hz a resposta referente ao modelo tridimensional na polarização XY, apresenta valores de resistividade aparente mais elevados que os apresentados nas curvas da polarização YX. .

Nesta mesma figura, a fase para ambas polarizações nos mostra que até a frequência de 1 Hz ocorre uma superposição entre as curvas unidimensional e tridimensional. A partir dessa frequência ocorre separação dessas curvas dependendo do valor do parâmetro alfa, ou seja, quanto menor for o valor desse parâmetro, maior também será a defasagem. No gráfico da fase em ambas polarizações verifica-se que até a frequência de 9 Hz a fase permanece constante e igual a 45° , e acontecendo variações só para frequências inferiores. O gráfico da fase na polarização YX apresenta um maior afastamento entre as curvas dos modelos unidimensional e tridimensional para frequências inferiores a 10^0 Hz.

A Figura 4.18 mostra as sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.15, obtidas posicionando a estrutura tridimensional a 300 km de distância do centro do eletrojato. Para a resistividade aparente na polarização XY as curvas tridimensionais, se comportam de forma bastante errática, ou seja, estão bastante perturbadas nas baixas frequências. Percebe-se inclusive que a curva para $\alpha = -1,0$ apresenta resistividade aparente maior que a curva unidimensional para frequências inferiores a cerca de 9×10^{-3} Hz. A resistividade aparente na polarização YX mostra na frequência de 10^{-4} Hz para o modelo unidimensional e para os tridimensionais com $\alpha = 0,0, -0,5, -1,0, -1,5$ e $-2,0$ os seguintes valores respectivos: 150, 100, 150, 400, 6 e 35 Ωm .

Em relação à fase na polarização XY e na mesma figura as curvas referentes aos modelos unidimensional e tridimensional apresentam-se praticamente paralelas desde a frequência de 10^2 Hz até aproximadamente 6×10^{-2} Hz. Para frequências inferiores a 6×10^{-2} Hz o gráfico nos mostra que o eletrojato Onwumechilliano afeta as sondagens magnetotélúricas tridimensionais. De acordo com o gráfico da fase na polarização XY constatamos também que ela é maior nas altas frequências que nas baixas frequências. Verifica-se assim que na frequência de 10^2 Hz o valor da fase é igual a 45° para as curvas unidimensional e tridimensional, enquanto, na frequência de 10^{-4} Hz o maior valor para a fase ocorre para a curva tridimensional com $\alpha = -2,0$, que é aproximadamente igual a 25° . Para o gráfico da fase na polarização YX, verificamos que para frequências inferiores a 10^0 Hz a curva de resposta magnetotélúrica referente ao modelo unidimensional apresenta um pequeno afastamento em relação a aquelas do modelo tridimensional para vários valores de alfa. Observa-se para ambas as polarizações que na frequência de 2×10^{-3} Hz a fase é aproximadamente igual a 0° , para a resposta da estrutura tridimensional com $\alpha = -1,0$. Entretanto, nesta mesma frequência a fase para $\alpha =$



POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+ + + +
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+ + + +
Alfa	-1.0	-----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	————
Onda plana	3D	□-□-□

Figura 4.18 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.15.

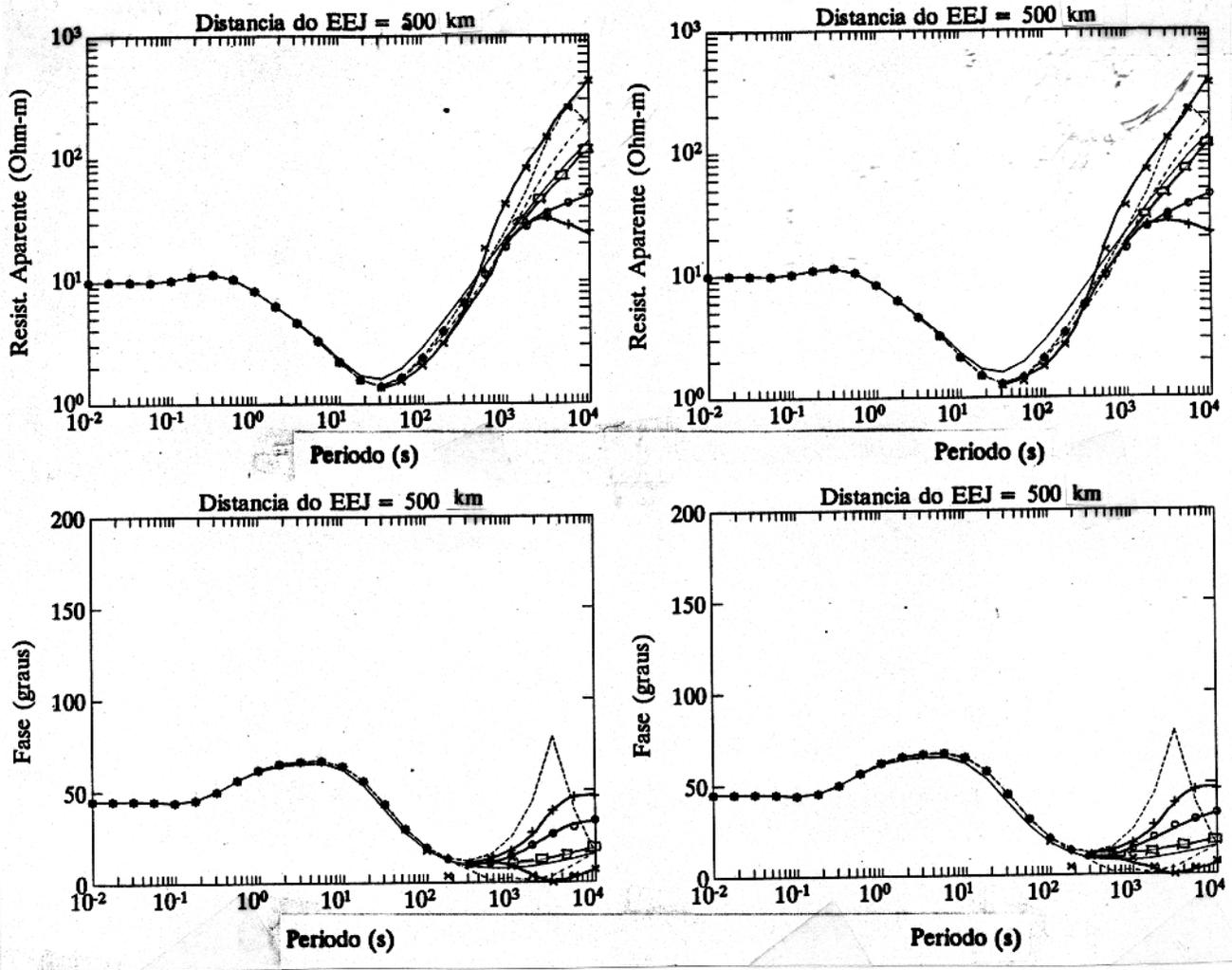
-0,5 é igual a 75° .

A Figura 4.19 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.15 e foram obtidas posicionando a estrutura tridimensional a 500 km de distância do centro do eletrojato. A resistividade aparente nas duas polarizações nos mostra que para frequências inferiores a 10^{-1} Hz ocorre a separação entre as curvas unidimensional cuja fonte é a onda plana e tridimensional cuja fonte é o eletrojato equatorial Onwumechilliano. Esses gráficos também mostram que a separação maior ocorre na polarização YX, ou seja, nessa polarização o efeito galvânico é mais intenso. Em ambas as polarizações, verificamos que nas baixas frequências, (grandes profundidades), o gráfico referente a polarização XY apresenta maiores valores em termos de resistividade aparente que o gráfico na polarização YX. Por exemplo, na frequência de 10^{-4} Hz tridimensional na polarização XY para $\alpha = -0,5$ nos dá um valor de $430 \Omega m$, enquanto na polarização YX para $\alpha = -0,5$ nos mostra um valor igual a $380 \Omega m$.

Comparando os gráficos da fase nas polarizações XY e YX, mostrados na Figura 4.19, verificamos que para frequências inferiores a 10^{-2} Hz aparecem os primeiros efeitos do eletrojato nas sondagens magnetotelúricas tridimensionais. Isto é facilmente percebido no afastamento que acontece entre estas curvas e a resposta do modelo unidimensional. De acordo com esses gráficos em ambas as polarizações, verifica-se que a fase em muitas ocasiões é igual a zero, assim como, atinge seu valor máximo em apenas uma ocasião, que é o caso da curva para $\alpha = -1,0$ na frequência de aproximadamente 8×10^{-2} Hz, em que esse valor é igual a 80° . Esses resultados demonstram que quando se afasta a estrutura tridimensional da fonte, os efeitos do eletrojato sobre as sondagens magnetotelúricas em ambas as polarizações são muito semelhantes. Isto nos induz a pensar que nessa situação é praticamente indiferente se optar pela polarização XY ou pela YX.

A Figura 4.20 mostra as sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.15, obtidas posicionando a estrutura tridimensional a 1000 km de distância do centro do eletrojato equatorial Onwumechilliano. Comparando os gráficos da Figura 4.20, com os da Figura 4.19, verificamos que no primeiro caso os efeitos do eletrojato tendem a ser menores, o que era de se esperar pois no último caso a estrutura tridimensional está mais próxima da fonte.

Comparando os dois gráficos da fase nas polarizações XY e YX apresentados na Figura 4.20, verificamos que os efeitos do eletrojato nas sondagens magnetotelúricas tridimensionais estão, pouco a pouco, diminuindo. Nesta figura, eles aparecem apenas para frequências inferiores a 10^{-3} Hz. Constata-se em ambos os gráficos que o maior valor para a fase é obtido na frequência de 10^{-4} Hz para a curva tridimensional com $\alpha = -1,0$ e é igual a 75° . Nessa



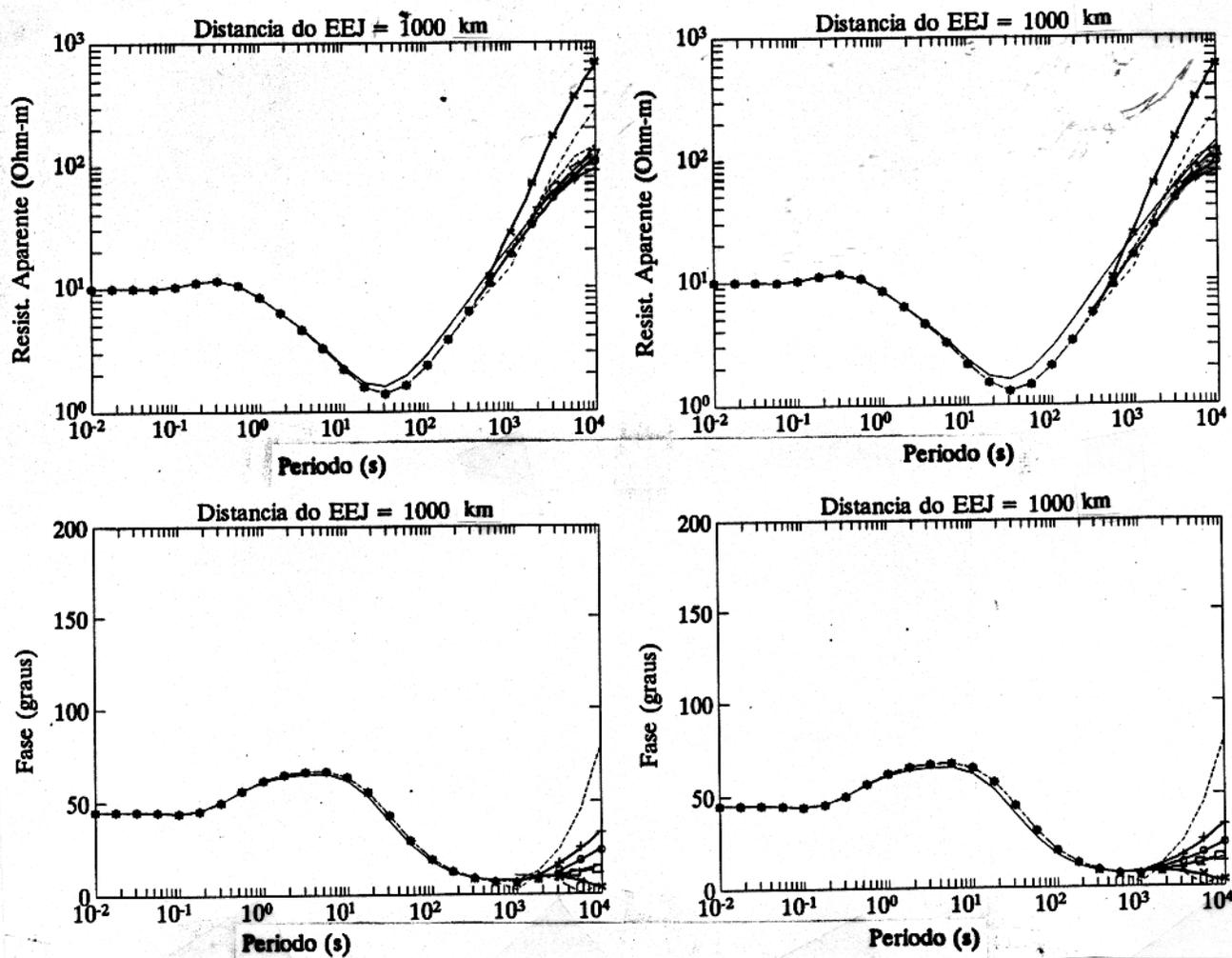
POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	——
Onda plana	3D	□-□-□

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	——
Onda plana	3D	□-□-□

Figura 4.19 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.15.



POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	-·-·-·-
Onda plana	1D	———
Onda plana	3D	□-□-□

POLARIZAÇÃO YX

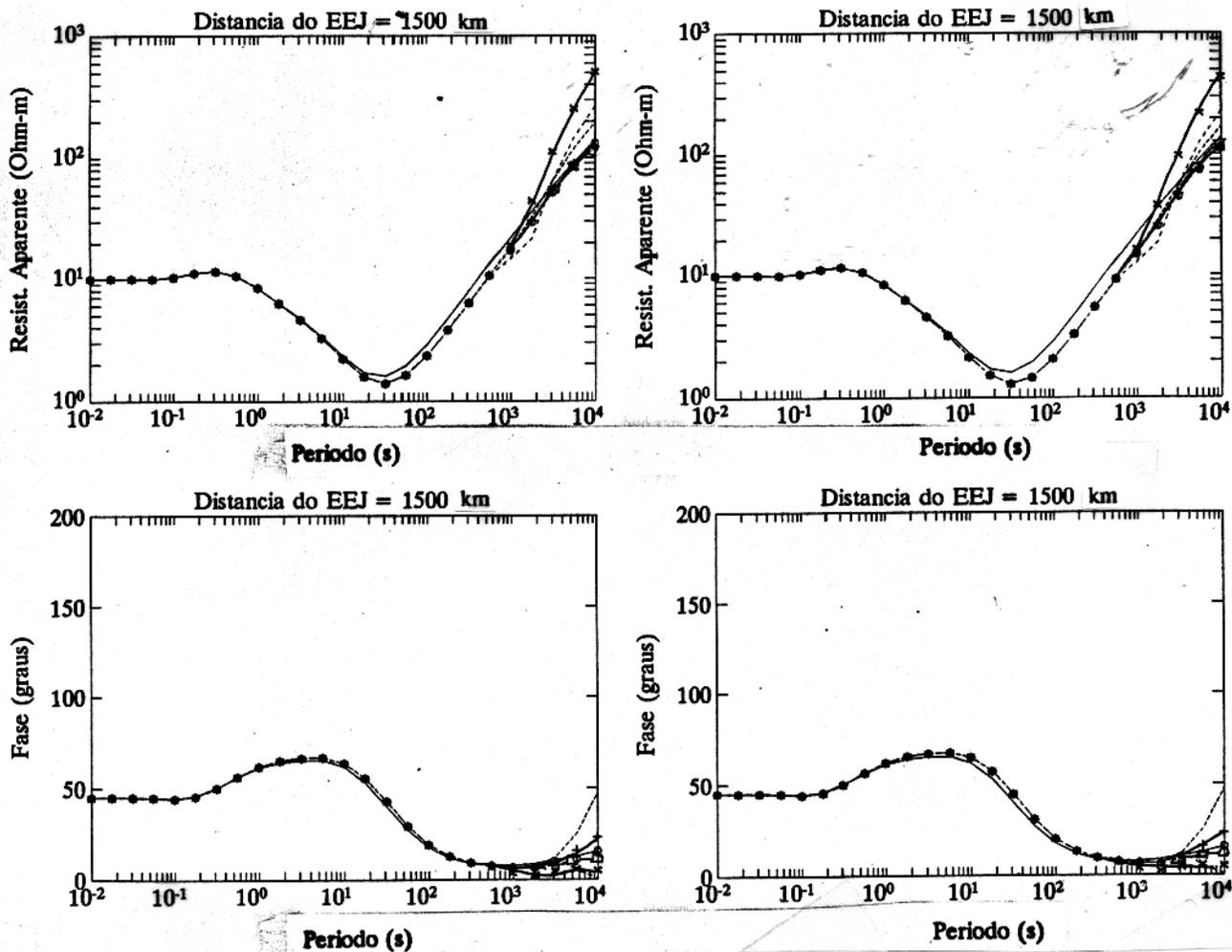
Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+++
Alfa	-1.0	----
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	-·-·-·-
Onda plana	1D	———
Onda plana	3D	□-□-□

Figura 4.20 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.15.

mesma frequência, para os eletrojatos com $\alpha = 0,0, -0,5, -1,5$ e $-2,0$ são iguais a $5^\circ, 5^\circ, 30^\circ$ e 20° , respectivamente. Esses resultados mostram que nem sempre é verdadeiro se pensar que quanto maior é o valor do parâmetro alfa maior será o valor da fase ou vice-versa. Ou seja, dependendo da resistividade das camadas do meio encaixante, da resistividade da estrutura tridimensional colocada nesse meio, da distância entre a estrutura tridimensional e a fonte e etc., os efeitos do eletrojato equatorial Onwumechilliano sobre as sondagens magnetotélúricas tridimensionais podem apresentar-se de forma bastante variada.

Finalmente, a Figura 4.21 mostra as sondagens magnetotélúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura tridimensional da Figura 4.15, obtidas posicionando a estrutura tridimensional a 1500 km de distância do centro do eletrojato. De acordo com o gráfico da resistividade aparente na polarização XY, verificamos que apesar de termos posicionado a estrutura tridimensional a 1500 km de distância do eletrojato, os efeitos do eletrojato sobre as sondagens magnetotélúricas tridimensionais ainda se fazem presentes para frequências inferiores a 10^{-3} Hz. Para a resistividade aparente na polarização YX percebe-se também que o eletrojato afeta as sondagens magnetotélúricas tridimensionais para frequências inferiores a 10^{-3} Hz. Esses resultados são importantes pois nos mostram que quando o embasamento é resistivo os efeitos do eletrojato aparecem mesmo quando a distância entre a estrutura tridimensional e a fonte é muito grande. Observa-se também, de acordo com os dois gráficos de resistividade aparente nas polarizações XY e YX, que o efeito galvânico é mais pronunciado no gráfico cuja polarização é YX que na XY. Esse fato pode ser constatado observando-se que as curvas tridimensionais estão mais afastadas da curva unidimensional na polarização YX que na polarização XY.

Nessa mesma figura, a fase na polarização XY nos mostra também que mesmo posicionando-se a estrutura tridimensional a 1500 km de distância da fonte, ainda assim, os efeitos do eletrojato podem ser percebidos para frequências inferiores a 10^{-3} Hz. De acordo com o gráfico da fase na polarização YX, constatamos também que para frequências inferiores a 10^{-3} Hz o eletrojato afeta as sondagens magnetotélúricas tridimensionais. Portanto, os gráficos da fase para as polarizações XY e YX confirmam que quando o embasamento é resistivo esses efeitos do eletrojato permanecem até a grandes distâncias da fonte. Na prática, a importância deste resultado é que se precisa ter cuidado quando se obtém sondagens magnetotélúricas até cerca de 1500 km de distância do eletrojato, principalmente em regiões equatoriais cujo embasamento é resistivo.



POLARIZAÇÃO XY

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+ + + +
Alfa	-1.0	.....
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	——
Onda plana	3D	□□□

POLARIZAÇÃO YX

Alfa	-2.0	○-○-○
Alfa	-1.5	+ + + +
Alfa	-1.0	.....
Alfa	-0.5	-x-x-x-
Alfa	0.0	.....
Onda plana	1D	——
Onda plana	3D	□□□

Figura 4.21 - Sondagens magnetotelúricas para as polarizações XY e YX, realizadas no centro da estrutura da Figura 4.15.

5 - CONCLUSÕES

Verificou-se através de vários modelos estudados nesta tese que é possível substituir a resposta magnetotelúrica de uma estrutura tridimensional por aquela de uma estrutura bidimensional. esta substituição pode ocorrer tanto na polarização YX para estruturas tridimensionais que corresponde ao modo TE bidimensional, quanto na polarização XY para estruturas tridimensionais que corresponde ao modo TM bidimensional. As simulações foram realizadas para embasamentos condutivo ($\rho = 1 \Omega m$) e resistivo ($\rho = 1000 \Omega m$), obtendo as respostas para à resistividade aparente e fase.

Para embasamento condutivo, as respostas dos diversos modelos estudados mostram que se aumentarmos a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal cerca de *dezesseis vezes* em relação à dimensão inicial, a resposta magnetotelúrica dessa estrutura pode ser substituída pela de uma estrutura bidimensional. Esta afirmação é válida para a resistividade aparente na polarização YX, que corresponde ao modo TE bidimensional, e para a fase nas polarizações YX e XY, que corresponde, respectivamente, aos modos TE e TM bidimensional. Para a resistividade aparente na polarização XY, correspondente ao modo TM bidimensional, os resultados mostram que se aumentarmos a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal em cerca de *vinte e seis vezes* em relação à dimensão inicial, a resposta magnetotelúrica dessa estrutura pode ser substituída pela de uma estrutura bidimensional. No caso de embasamentos deste tipo, as curvas de resistividade aparente e fase, nas polarizações XY e YX, mostram que o eletrojato equatorial não afeta as sondagens magnetotelúricas bi e tridimensionais, mesmo nas baixas frequências.

No caso de embasamento resistivo, as curvas da resistividade aparente na polarização YX, que corresponde ao modo TE bidimensional, e fase nas polarizações YX e XY, que correspondem respectivamente aos modos TE e TM bidimensional, mostram que é necessário aumentar a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal cerca de *dezesseis vezes*, em relação à dimensão inicial, para que a resposta magnetotelúrica proveniente dessa estrutura possa ser substituída pela resposta magnetotelúrica da estrutura bidimensional. Para o caso da resistividade aparente na polarização XY, que corresponde ao modo TM bidimensional, os resultados mostram que é necessário aumentar a dimensão da estrutura tridimensional na direção principal cerca de *vinte e seis vezes*, em relação à dimensão inicial, para que a resposta magnetotelúrica proveniente dessa estrutura possa ser substituída pela

resposta magnetotelúrica da estrutura bidimensional. Os resultados também mostram que para um embasamento resistivo, o eletrojato equatorial afeta as sondagens magnetotelúricas bi e tridimensionais. Para a resistividade aparente, nas polarizações XY e YX, esses efeitos podem ser verificados para frequências inferiores a 10^{-2} Hz. No caso da fase nas polarizações XY e YX, esses efeitos podem ser observados para frequências inferiores a 10^{-1} Hz.

De acordo com os três modelos estudados no quarto capítulo (semi-espaço, modelo de quatro camadas com embasamento condutivo e modelo de quatro camadas com embasamento resistivo) constatou-se que o eletrojato equatorial Onwumechilliano pode afetar as sondagens magnetotelúricas tridimensionais dependendo, principalmente, da distância entre a estrutura tridimensional e a fonte, do valor da resistividade do embasamento (condutivo ou resistivo) e do valor da frequência.

No caso da estrutura tridimensional inserida num semi-espaço cuja resistividade é igual a $100 \Omega m$, verificou-se que efeitos produzidos pelo eletrojato equatorial Onwumechilliano, nas sondagens magnetotelúricas tridimensionais nas polarizações XY e YX, só são percebidas para frequências inferiores a 10^{-2} Hz. Contudo, a medida em que se afasta a estrutura tridimensional do eletrojato, percebe-se que os efeitos tendem a ser menores. Como exemplo, observamos que quando o corpo está posicionado a 1500 km de distância da fonte os efeitos só são perceptíveis para frequências inferiores a 10^{-3} Hz, tanto para a resistividade aparente quanto para a fase. De acordo com esse modelo, os resultados mostram que o efeito galvânico é mais preponderante na polarização YX que na XY.

De acordo com o modelo de quatro camadas com embasamento condutivo, que simula a bacia do Parnaíba, verificou-se que os efeitos do eletrojato equatorial Onwumechilliano nas sondagens magnetotelúricas tridimensionais com polarizações XY e YX, são muito pequenos e aparecem somente para frequências inferiores a 10^{-3} Hz, no caso da resistividade aparente. Para a fase esses efeitos são percebidos para frequências inferiores a 10^{-2} Hz. Ao afastarmos a estrutura tridimensional a 1500 km de distância da fonte, se verifica que não ocorrem efeitos perceptíveis do eletrojato nas sondagens magnetotelúricas tridimensionais. Os resultados desse modelo também mostram que o efeito galvânico é mais intenso na polarização YX que na XY.

O modelo de quatro camadas, com embasamento resistivo, nos mostrou que o eletrojato Onwumechilliano afeta as sondagens magnetotelúricas tridimensionais para frequências inferiores a 10^{-2} Hz, no que concerne à resistividade aparente e fase e nas polarizações XY e YX. Com a estrutura tridimensional posicionada a 1500 km de distância da fonte os efeitos do eletrojato são, ainda assim, percebidos para frequências inferiores a 10^{-3} Hz. Esse modelo também confirma que o efeito galvânico é maior na polarização YX que na XY.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKER, W.G & MARTYN, D.F. 1953. Electric currents in the ionosphere. **Phil. Trans. Roy. Soc. London, A**, 246: 281-320.
- BALSLEY, B.B. 1973. Electric fields in the equatorial ionosphere: A review of techniques and measurements. **Journal of Atmospheric Terrestrial Physics**, 35: 1035-1044.
- CAGNIARD, L. 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. **Geophysics**, 18: 605-635.
- CAHILL, L.J. 1959. Investigation of the equatorial electrojet by rocket magnetometer. **Journal of Geophysical Research**, 64: 489-503.
- CANTWELL, T. 1960. **Detection and analysis of low frequency magnetotelluric signals**. Boston, Massachusetts Institute of Technology. 170p. Thesis (Ph.D. Geology and Geophysics)-M.I.T., 1960.
- CARRASQUILLA, A.A.G. 1993. **Modelagem numérica da influência do eletrojato equatorial em dados magnetotelúricos produzidos por estruturas tridimensionais**. Belém, Universidade Federal do Pará. 176p. Tese(Doutorado em Geofísica) - Curso de Pós - Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1993.
- CHAPMAN, S. 1948. The abnormal daily variations of horizontal force at Huancayo and in Uganda. **Journal of Geophysical Research**, 53: 247.
- CHAPMAN, S. 1951. Some phenomena of the upper atmosphere. **Procedures of the Physics Society London, B**, 64: 833-843.
- CHAPMAN, S. 1956. The electrical conductivity of the ionosphere: a review. **Nuovo Cimento**, 4: 1385-1412.
- CHAPMAN, S. & RAJA RAO, K.S. 1965. The H and Z variations along and near the equatorial electrojet in India, Africa and the Pacific. **Journal of Atmospheric Terrestrial Physics**, 27: 559-581.
- COWLING, T.G. 1932. The electrical conductivity of an ionized gas in the presence of a magnetic field. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**. 93: 90-98.

- DAVIS, T.N.; BURROWS, K.; STOLARIK, J.D. 1967. A latitude survey of the equatorial electrojet with rocket-borne magnetometers. **Journal of Geophysical Research**, 72: 1845-1861.
- DMITRIEV, V.I. & BERDICHEVSKIY, M.N. 1979. The fundamental model of magnetotelluric sounding. **Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers**, 67: 1034-1044.
- EGEDAL, J. 1947. The magnetic diurnal variation of the horizontal force near the magnetic equator. **Terrestrial Magnetic Atmospheric Electricity**, 52: 449-451.
- EGEDAL, J. 1948. Daily variation of the horizontal magnetic force at the magnetic equator. **Nature**, 161: 443-444.
- GIESECKE, A.A. 1951. Report of the special committee to promote observations of daily magnetic variations in low latitudes. **Brussels Meeting, IATME Bull**, 14: 288-289.
- HERMANCE, J.F. & GARLAND, G.D. 1968. Experiments in Iceland. **Earth and Planetary Science Letters**, 4: 469-474.
- HERMANCE, J.F. & PELTIER, W.R. 1970. Magnetotelluric fields of a line current. **Journal of Geophysical Research**, 75: 3351-3356.
- HESSE, D. 1982. An investigation of the equatorial electrojet by means of groundbased magnetic measurements in Brazil. **Annales de Gèophysique**, 38: 315-320.
- HIBBS, R.D. & JONES, F.W. 1973a. Electromagnetic induction in the earth by a symmetric non-uniform source. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, 25: 75-86.
- HIBBS, R.D. & JONES, F.W. 1973b. Electromagnetic induction in the earth by a non-symmetric non-uniform source. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, 25: 75-86.
- HOFFMAN, A.J. & HORTON, C.W. 1966. An analysis of some magnetotelluric results from Tikhaya Bay, URSS. **Journal of Geophysical Research**, 72: 4047-4052.
- HUTTON, R. 1972. Some problems of electromagnetic induction in the equatorial electrojet region - Magnetotelluric relations. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**, 28: 267-284.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H. 1991. **Introdução à geofísica espacial**. São paulo, Editora da Universidade de São Paulo. 149p.

- McNISH, A.G. 1938. Heights of electric currents near the auroral zone. **Terr. Mag. Atmos. Elec.**, 43: 67-75.
- MARESCHAL, M. 1986. Modelling of natural sources of magnetospheric origin in the interpretation of regional induction studies: a review. **Survey in Geophysics**, 8: 261-300.
- MASSEY, H.S.W. & BOYD, R.L.F. 1958. **The upper atmosphere**. London, Hutchinson. p. 10.
- MATSUSHITA, S. & CAMPBELL, W.H. 1967. **Physics of Geomagnetic Phenomena**. New York, Academic Press. 2V.
- MAYNARD, N.C. 1967. Measurements of ionospheric currents off the coast of Peru. **Journal of Geophysical Research**, 72: 1863-1875.
- MAYNARD, N.C. & CAHILL, L.J. 1965. Measurements of the equatorial electrojet over India. **Journal of Geophysical Research**, 70: 5923-5936.
- MAYNARD, N.C.; CAHILL, L.J.; SASTRY, T.S.G. 1965. Preliminary results of measurements of the equatorial electrojet over India. **Journal of Geophysical Research**, 70: 1241-1245.
- MERRILL, R.T. & McELHINNY, M.W. 1983. **The Earth's Magnetic Field**. London, Academic Press. 401p.
- MOTA, J.P. 1991. **Avaliação do eletrojato equatorial na interpretação de dados magnetotélúricos**. Belém, Universidade Federal do Pará. 93p. Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós - Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1991.
- MOTA, J.P. & RIJO, L. 1991. Efeitos devido ao eletrojato equatorial nos dados magnetotélúricos de estruturas 2D paralelas e perpendiculares ao eletrojato, **Revista Brasileira de Geofísica**, 9: 161-177.
- ONWUMECHILLI, A. 1967. Geomagnetic variations in the equatorial zone. In MATSUSHITA, S. & CAMPBELL, W.H. **Physics of Geomagnetic Phenomena**. New York, Academic Press. p. 425-507.
- PARKINSON, W.D. 1983. **Introduction to Geomagnetism**. Edinburg, Scottish Academic Press. 433p.
- PEDERSEN, P.O. 1927. **The propagation of radio waves along the surface of the earth and in the atmosphere**. Copenhagen, Danmarks Natur.

- PELTIER, W.R. & HERMANCE, J.F. 1971. Magnetotelluric fields of a gaussian electrojet. **Canadian Journal of Earth Sciences**, 18: 338-346.
- PRAMANICK, S.K. & YEGNANARAYANAN, S. 1952. Diurnal magnetic variation in the equatorial regions. **Indian Journal of Meteorological Geophysics**, 3: 212-216.
- PRICE, A.T. 1962. The theory of magnetotelluric methods when the source field is considered. **Journal of Geophysical Research**, 67: 1907-1918.
- PRICE, A.T. 1973. The theory of geomagnetic induction. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, 7:227 - 233.
- REDDY, C.A. 1981. The equatorial electrojet: A review of the ionospheric and geomagnetic aspects. **Journal of Atmospheric Terrestrial Physics**, 43: 557-571.
- REDDY, C.A. 1989. The equatorial electrojet. **Pure and Applied Geophysics**, 131: 485-514.
- REDDY, C.A.; VIKRAMKUMAR, B.T.; VISWANATHAN, K.S. 1987. Electric fields and currents in the equatorial electrojet deduced from VHF radar observations - I. A method of estimating electric fields. **Journal of Atmospheric Terrestrial Physics**, 49: 183-191.
- RICHMOND, A.D. 1973a. Equatorial electrojet - I. Development of a model including winds and instabilities. **Journal of Atmospheric Terrestrial Physics**, 35: 1083-1103.
- RICHMOND, A.D. 1973b. Equatorial electrojet - II. Use of the model to study the equatorial ionosphere. **Journal of Atmospheric Terrestrial Physics**, 35: 1105-1118.
- RIJO, L. 1991. A influência das ondulações do eletrojato equatorial nos levantamentos magnetotélúricos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 2., Salvador, 1991. **Anais**. Salvador, SBGF. v.1, p. 323-330.
- RIJO, L. 1992. **Teoria dos métodos eletromagnéticos I**: Notas de aula. Belém, UFPA 211p. (no prelo).
- RIJO, L. 1993. The effects of the Onwumechillian equatorial electrojet model on MT soundings. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 3., Rio de Janeiro, 1993. **Anais**. Rio de Janeiro, SBGF. v.2, p. 1441-1445.

- SAMPATH, S. & SASTRY, T.S.G. 1979. Results from in situ measurements of ionospheric currents in the equatorial region - I. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, 31: 373-379.
- STENING, R.J. 1985. Modelling the equatorial electrojet. **Journal of Geophysical Research**, 90: 1705-1719.
- STENING, R.J. 1986. Inter-relations between current and electron density profiles in the equatorial electrojet and effects of neutral density changes. **Journal of Atmospheric Terrestrial Physics**, 48: 163-170.
- SUGIURA, M. & POROS, D.J. 1969. An improved equatorial electrojet with a meridional current system. **Journal of Geophysical Research**, 74: 4025-4034.
- TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E.; KEYS, D.A. 1975. **Applied Geophysics**. Cambridge, Cambridge University Press. 860 p.
- TIKHONOV, A.N. 1950. On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust. **Doklady**, 73: 295-297.
- TING, S.C. & HOHMANN, G.W. 1984. Integral equation modeling of three-dimensional magnetotelluric response. **Geophysics**, 46: 182-197.
- UNTIEDT, J. 1967. A model of the equatorial electrojet involving meridional currents. **Journal of Geophysical Research**, 72: 5799-5810.
- WAIT, J.R. 1954. On the relation between telluric currents and the earth's magnetic field. **Geophysics**, 19: 281-289.
- WAIT, J.R. 1962. Theory of magnetotelluric fields. **Journal of Research of the National Bureau of Standards-D, Radio Propagation**, 66: 509-541.
- WANNAMAKER, P.E.; HOHMANN, G.W.; WARD, S.H. 1984. Magnetotelluric responses of the three-dimensional bodies in layered earths. **Geophysics**, 49: 1517-1533.
- WARD, S.H. & MORRISON, H.F. 1966. Discussion of a paper by Hoffmann e Horton (1966). **Journal of Geophysical Research**, 71: 4053-4054.