

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

MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS À PROSPECÇÃO DE COBRE NA SERRA DOS
CARAJÁS - PARÁ

Tese Apresentada por

ENRIQUE CAMPBELL HOOKER

como requisito parcial à obtenção do grau de

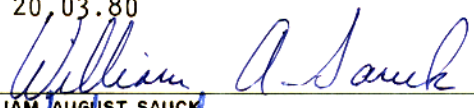
MESTRE EM CIÊNCIAS

Na área de

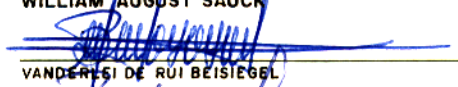
GEOFÍSICA

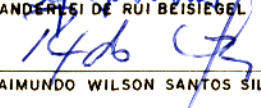
Conferido pelo Programa de Pós-Graduação em
Ciências Geofísicas e Geológicas da
Universidade Federal do Pará

Aprovado: 20.03.80


WILLIAM AUGUST SAUCK

(ORIENTADOR)


VANDERLEI DE RUI BEISIEGEL


RAIMUNDO WILSON SANTOS SILVA

Comitê de Tese

T97 Hooker, Enrique Campbell

Métodos Geofísicos Aplicados à Prospeção de Cobre
na Serra dos Carajás - Pará. Belém, UFPa, 1980.

79 p.

Tese apresentada ao Núcleo de Ciências Geofísicas e
Geológicas - Universidade Federal do Pará, para obten
ção do grau de mestre em ciências na área de Geofísica.

1. Geofísica - Prospeção. 2. Cobre - Prospeção.
I. Universidade Federal do Pará - NCGG. II. Título.

CDD. 6221581

À Frente Sandinista de Liberação Nacional,
vanguarda de luta do povo nicaraguense.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de externar meus agradecimentos às seguintes pessoas e entidades que colaboraram decisivamente para a realiza
ção deste trabalho:

- Ao Dr. William August Sauck, pela intensa colabora
ção ao orientar este trabalho.

- Ao Geólogo Vanderley Ruy Beisiegel e ao Geofísico Rai
mundo Wilson Santos da Silva, pelas sugestões como integrantes da
Banca Examinadora.

- À Universidade do Panamá, que proporcionou a realiza
ção do curso de mestrado no Brasil.

- Ao pessoal técnico e administrativo do Núcleo de Ci
ências Geofísicas e Geológicas da Universidade Federal do Pará, pe
la ajuda prestada.

- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico
e Tecnológico (CNPq) e Programa Nuclear (PRONUCLEAR) pela conces
são de bolsas de estudo.

- As Companhias Amazônia Mineração S.A. (AMZA) e Rio
Doce Geologia e Mineração S.A. (DOCEGEO), pelo apoio logístico, sem
o qual este trabalho não teria sido realizado.

R E S U M O

Através de um convênio entre o Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas da UFPa e a Companhia Rio Doce Geologia e Mineração S.A., um trabalho geofísico foi realizado na área denominada ALVO 1, MM1, Serra dos Carajás, sul do Pará, Brasil. Foram aplicados os métodos magnético, polarização elétrica induzida e AFMAG, visando determinar a existência e a distribuição de sulfetos de cobre em subsuperfície. O trabalho foi realizado em uma malha de reconhecimento de 9 km² (ALVO 1) e em outra de detalhe com aproximadamente 0.63 km² (Corpo 2).

O método AFMAG detectou vários condutores deslocados entre si por prováveis falhamentos. A orientação destes condutores, coincide com o "strike" dominante do xisto, o qual contém sulfetos de cobre associado a uma formação ferrífera. Pela estreita correlação que guardam com as anomalias magnéticas é possível supor-se que as anomalias de AFMAG são provocadas primeiramente pela formação ferrífera e secundariamente pelos sulfetos.

O método magnético detectou fortes anomalias sobre a formação ferrífera. O deslocamento dos segmentos de anomalias implica em falhamento. Este método é muito importante na área, pela relação mantida entre a zona dos sulfetos e a formação ferrífera.

O método polarização elétrica induzida/resistividade detectou anomalias com EPF variando de 6 a 12% aproximadamente. Várias destas anomalias foram confirmadas com furos de sondagem e trabalho de laboratório (Rocha, 1979). Verificou-se que essas anomalias provavelmente são provocadas por efeito combinado da formação ferrífera magnética e do sulfeto.

A pesquisa geofísica realizada nesta área piloto tem grande importância porque os resultados obtidos poderão ser estendidos a uma área maior, em condições geológicas semelhantes.

ABSTRACT

Through an agreement between the Federal University of Para and the Rio Doce Geologia e Mineração Company, a geophysical research was carried out in the area known as ALVO 1, MM1, Serra dos Carajás, south of Para, Brasil. The magnetic, electrical induced polarization and AFMAG methods were applied, to detect the distribution of copper in subsurface. This work was carried out both on a 9 km² reconnaissance area (ALVO 1) and on a 0.63 km² detail area (Corpo 2).

The AFMAG method detected various conductors displaced from each other by possible faulting. The orientation of these conductors, coincides with the dominant strike of the body of schist which contains copper sulfide, associated with an iron formation. The close correlation they have with the magnetic anomaly, may imply that the AFMAG anomalies are caused, firstly by the iron formation and secondarily by the sulfide.

The magnetic method detected strong anomaly over the iron formation. The displacement of the segment of the anomaly implies faulting. This method is very important in the area due to the association of the sulfide zone with the iron formation.

The electrical induced polarization/resistivity method detected anomalies with PFE, varying from 6 to 12% approximately. Several of these anomalies were confirmed by mechanical sounding and laboratory research (Rocha, 1979). It was verified that these anomalies were caused by a combined effect of the iron formation and the sulfide body.

The geophysical research carried out at this pilot area turned out to be very important considering the fact that its results can be successfully extrapolated to a larger area with the same geological characteristics.

S U M Á R I O

Pag

AGRADECIMENTO

RESUMO

ABSTRACT

INTRODUÇÃO

1. TRABALHOS ANTERIORES

1.1. Geologia Regional	4
1.1.1. Geomorfologia	4
1.1.2. Estratigrafia e Litologia	4
1.1.3. Estruturas	5
1.1.4. Metamorfismo	5
1.2. Geologia Local	8
1.2.1. Gnaisses	8
1.2.2. Xistos	8
1.2.3. Formação Ferrífera	8
1.2.4. Anfibólitos	10
1.2.5. Metabásicas	10
1.2.6. Granitos	10
1.2.7. Cangas Lateríticas	11
1.2.8. Sedimentos Recentes	11
1.2.9. Mineralização na Área MM1	11
1.3. Levantamento Geoquímico	12
1.4. Levantamento Geofísico	13
1.5. Poços Escavados	13
1.6. Sondagem Mecânica	13

2. MÉTODO AUDIOFREQUÊNCIA MAGNÉTICA (AFMAG)

2.1. Revisão de Conceitos	16
2.2. Metodologia de Trabalho	19
2.3. Comportamento do campo em Relação ao tempo	22

2.4. Análise e Interpretação de Dados	22
3. <u>MÉTODO MAGNÉTICO</u>	
3.1. Revisão de Conceitos	30
3.2. Metodologia de Trabalho	33
3.3. Análise e Interpretação de Dados	38
3.3.1. Interpretação Magnética sobre a Malha de Reconhecimento (ALVO 1)	38
3.3.2. Interpretação Magnética sobre a Malha de Detalhe (Corpo 2)	40
4. <u>POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE</u>	
4.1. Revisão de Conceitos	45
4.2. Metodologia de trabalho	48
4.3. Análise e Interpretação dos Dados	51
4.3.1. Análise e Interpretação sobre a Malha de Reconhecimento	51
4.3.2. Análise e Interpretação de Dados sobre a Malha de Detalhe (Corpo 2)	59
4.3.3. Discussão de Resultados Obtidos	72
5. <u>INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS E CONCLUSÃO</u>	73
6. <u>BIBLIOGRAFIA</u>	77

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

- FIG. 1 - Mapa de localização do distrito dos Carajás.
- FIG. 2 - Relações estratigráficas entre as rochas da Serra dos Carajás.
- FIG. 3 - Mapa geológico preliminar da Serra dos Carajás.
- FIG. 4 - Mapa geológico-geoquímico da Área MM1-ALVO 1, com localização das linhas de picadas.
- FIG. 5 - Perfis de sondagem mecânicas dos furos F7, F9 e F11.
- FIG. 6 - Comportamento do eixo maior da elipse de polarização para o período 14.01.79 a 23.02.79, LT.5500NE.
- FIG. 7 - Comportamento do eixo maior da elipse de polarização para o período 15.01.79 a 05.02.79, LT6250NE.
- FIG. 8 - Perfis de AFMAG nas frequências de 140 Hz a 470 Hz.
- FIG. 9 - Perfis suavizados de AFMAG (140 Hz e 470 Hz).
- FIG. 10 - Perfil magnético suavizado, linha 350 W.
- FIG. 11 - Componentes simétrica e assimétrica da curva magnética suavizada, linha 350 W.
- FIG. 12 - Perfis magnéticos, campo total, da área MM1, ALVO 1.
- FIG. 13 - Perfis magnéticos, campo total, da área MM1, ALVO 1, Corpo 2.
- FIG. 14 - Mapa magnético da Área MM1, ALVO 1, Corpo 2.
- FIG. 15 - Linha 5250, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 16 - Linha 5500, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 17 - Linha 5750, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 18 - Linha 6000, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.

- FIG. 19 - Linha 6250, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 20 - Linha 6500, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 21 - Linha 6750, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 22 - Linha 7000, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 23 - Linha 7250, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 24 - Linha 200 E, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 25 - Linha 100 E, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 26 - Linha 00, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 27 - Linha 100 W, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 28 - Linha 150 W, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 29 - Linha 250 W, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 30 - Linha 350 W, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.
- FIG. 31 - Linha 450 W, pseudo-seção de polarização elétrica induzida/resistividade.

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - Parâmetros calculados e resultados obtidos da interpretação semiquantitativa de AFMAG.

TABELA 2 - Susceptibilidade magnética de algumas rochas, segundo Telford et al., 1976.

TABELA 3 - Parâmetros calculados e resultados obtidos da interpretação semi-quantitativa de magnetometria, linha 350W.

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO 1 - Curva-padrão obtida a partir do modelo-disco; usada para estimar o mergulho (α).
- ANEXO 2 - Curva-padrão obtida a partir do modelo-disco; usada para estimar o produto $\sigma t A$ e a razão $\frac{D}{A}$, quando o disco é vertical.
- ANEXO 3 - Curva-padrão obtida a partir do modelo-disco, usada para estimar o produto $\sigma t A$ e a razão $\frac{D}{A}$, quando o disco é vertical.
- ANEXO 4 - Curva-padrão obtida a partir do modelo-disco, usada para estimar $\frac{\Delta X}{A}$, quando se conhece a razão $\frac{D}{A}$.
- ANEXO 5 - Apresentação vetorial de dados AFMAG, na frequência de 470 Hz.
- ANEXO 6 - Apresentação vetorial de dados de AFMAG, na frequência de 140 Hz.
- ANEXO 7 - Interpretação geofísica integrada, sobre a malha ALVO 1.
- ANEXO 8 - Interpretação geofísica integrada, sobre a malha Corpo 2.

INTRODUÇÃO

A demanda de cobre no Brasil, país em via de desenvolvimento, é cada vez maior. Atualmente o cobre é importante, criando uma situação de dependência. Diante desta conjuntura, programas de pesquisa em prospecção de cobre estão sendo desenvolvidos em várias regiões do País.

O presente trabalho é parte de um programa de prospecção de cobre desenvolvido na área ALVO 1 - MM1, Serra dos Carajás, através de um convênio entre a Universidade Federal do Pará e a Companhia Rio Doce Geologia e Mineração S.A. (DOCEGEO). A área MM1 está localizada entre as latitudes $5^{\circ}50'$ e $6^{\circ}05'$ sul e as longitudes $50^{\circ}15'$ e $50^{\circ}45'$ a oeste de Greenwich (Fig. 1). Esta área abrange um conjunto de elevações na direção NW-SE com desníveis de 300 m, representando a divisa dos igarapés Azul e Águas Claras, afluentes do rio Itacaiunas (Beisiegel e Farias, 1978). Estende-se por cerca de 30 km desde os limites da jazida de ferro de N1 da Serra dos Carajás até o rio Itacaiunas. O ALVO 1, subárea de MM1, está localizado a 25 km a Noroeste de N1 que, por sua vez, se situa no conjunto denominado Serra Norte.

O acesso à área, durante a primeira fase de trabalho, foi feito por helicóptero porém, posteriormente, foi construída uma estrada que liga o acampamento principal N1 e a Área ALVO 1.

A área de trabalho é drenada pela rede hidrográfica do rio Itacaiunas, onde subafluentes de pequena expressão cortam a região. Este fato é modificado no período das chuvas, época em que o volume de água dos igarapés aumenta consideravelmente. O clima da região é tropical de monção, com um período seco no inverno, e um período úmido, bastante acentuado, com chuvas torrenciais no verão (Projeto RADAM, 1974).

Levantamento geoquímico realizado na área pela Companhia Amazônia Mineração S.A. (AMZA) evidenciou faixa anômala para cobre (1000 ppm) associada à rocha metamórfica, tipo anfibólio-biotita-xisto. Com esta descoberta, um estudo sistemático foi iniciado na área compreendendo geologia, geoquímica, geofísica, furos de

sondagem e poços escavados.

A aplicação de métodos geofísicos teve como objetivos determinar a ocorrência de minerais metálicos, inclusive sulfetos de cobre, bem como definir uma nova metodologia de pesquisa neste ambiente físico e geológico.

Estudos anteriores de geologia na área evidenciaram uma formação ferrífera encaixada em xisto. Esta formação, que é magnética, está correlacionada à ocorrência de sulfeto de cobre. Isto justifica a magnetometria como um método indireto para detectar as regiões mineralizadas.

Os métodos AFMAG e polarização elétrica induzida/resistividade têm suas aplicações justificadas, respectivamente, pelo fato de que o sulfeto (calcopirita) pode ocorrer na forma de um corpo maciço e disseminado.

Os métodos geofísicos, Magnetometria, Polarização Elétrica Induzida/resistividade e AFMAG, foram aplicados sobre uma malha de reconhecimento de 9 km² e sobre uma malha de detalhe 0.63 km². O método magnético foi aplicado sobre as linhas transversais, num total de 46 km lineares de levantamento. Com o método do AFMAG foram levantados aproximadamente 25 km lineares. Os métodos de Polarização Elétrica Induzida/Resistividade foram aplicados sobre áreas restritas, definidas por anomalias geoquímicas para uma cobertura em subsuperfície de aproximadamente 6 km lineares.

A coleta de dados começou em julho de 1977 e foi completada em julho de 1978. Durante este período, foram feitas dez viagens ao campo, cada uma de aproximadamente dez dias.

CAPÍTULO 1

TRABALHOS ANTERIORES

Poucos trabalhos de geologia são encontrados referentes à área da Serra dos Carajás. Estes tratam normalmente da geologia regional da área e, sobretudo, das ocorrências do minério de ferro. Citam-se como exemplos trabalhos publicados por Tolbert et al. (1971), Suszczynsky (1972) e Beisiegel et al. (1973). Por outro lado, na área MM1, somente um trabalho preliminar foi publicado por Beisiegel e Farias (1978).

Neste item, descreve-se de maneira sucinta a geologia regional, geologia local e outros trabalhos anteriores, tomando como base Beisiegel et al. (1973) e Beisiegel e Farias (1978).

1.1. Geologia Regional

1.1.1. Geomorfologia

Na região da Serra dos Carajás, os aspectos mais salientes de conformação do terreno são:

- a) Vales cobertos pela mata virgem
- b) Serras alongadas e íngremes
- c) Chapadas ou mesas em situação dominante, de vegetação rala (clareiras), assentando sobre materiais superficiais associados a minérios de ferro.

1.1.2. Estratigrafia e Litologia

O Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás é essencialmente constituído de rochas Pré-Cambrianas de origens variadas e de distintos graus de metamorfismo. Tais rochas estão associadas a um grande sinclínório, em cujos flancos ocorrem exposições de formação ferrífera (itabirito) e rochas paleovulcânicas, nas ser

ras Norte e Sul. Essas grandes estruturas observadas permitem estabelecer a ordem cronológica das camadas do distrito. A figura 2 apresenta a coluna estratigráfica e a figura 3, o mapa regional. Existem rochas de embasamento não diferenciado, ocorrendo ao norte e ao sul dos flancos do sinclinório. Estas rochas são, predominantemente, gnaisses do Complexo Xingu. Em cima, ocorrem a formação ferrífera e rochas paleovulcânicas associadas (Grupo Grão Pará). No interior do sinclinório ocorrem sedimentos clásticos, principalmente arenosos da Formação Gorotire. Um corpo granítico mais jovem corta as seqüências anteriores. Há também diques, sobretudo de diabásio, que cortam as litologias já citadas. A cobertura é de solos ligados a processos mais atuais. A formação ferrífera, dentro do sinclinório, nas áreas prospectadas para ferro, é designada formalmente de Formação Carajás.

1.1.3. Estruturas

A estrutura maior da área da Serra dos Carajás é interpretada como um sinclinório falhado, com os flancos aparecendo em relevo nas Serras Norte e Sul, constituído pelas rochas do Grupo Grão Pará. O eixo do sinclinório é orientado segundo um rumo que varia entre W-NW. Há uma falha regional conhecida como falha Carajás, que corta o sinclinório ao longo do eixo maior. Estas estruturas também são cortadas por várias falhas, geralmente orientadas na direção NE.

1.1.4. Metamorfismo

As principais feições texturais e mineralógicas das rochas metamórficas da área sugerem o seu enquadramento dentro das fácies xisto verde e anfibolito (embasamento). A Formação Gorotire, em geral, não apresenta metamorfismo ou é fracamente metamorfisada.

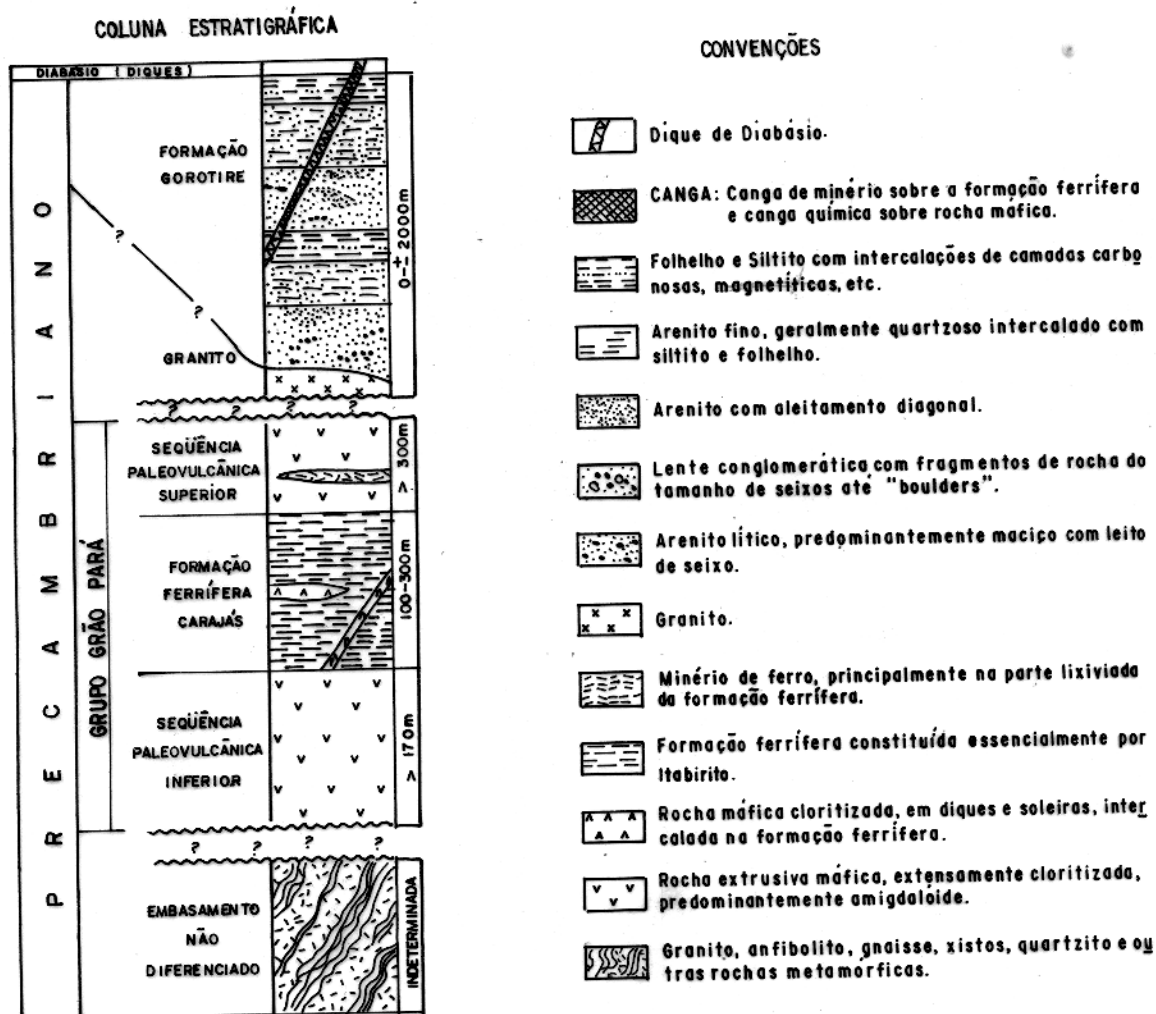
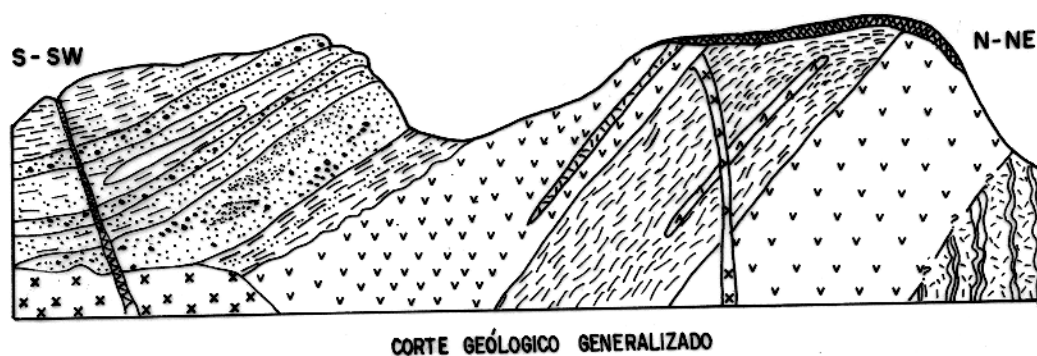


FIG.2 - RELAÇÕES ESTRATIGRÁFICAS ENTRE AS ROCHAS DA SERRA DOS CARAJÁS, SEGUNDO BEISIEGEL ET AL., 1973.

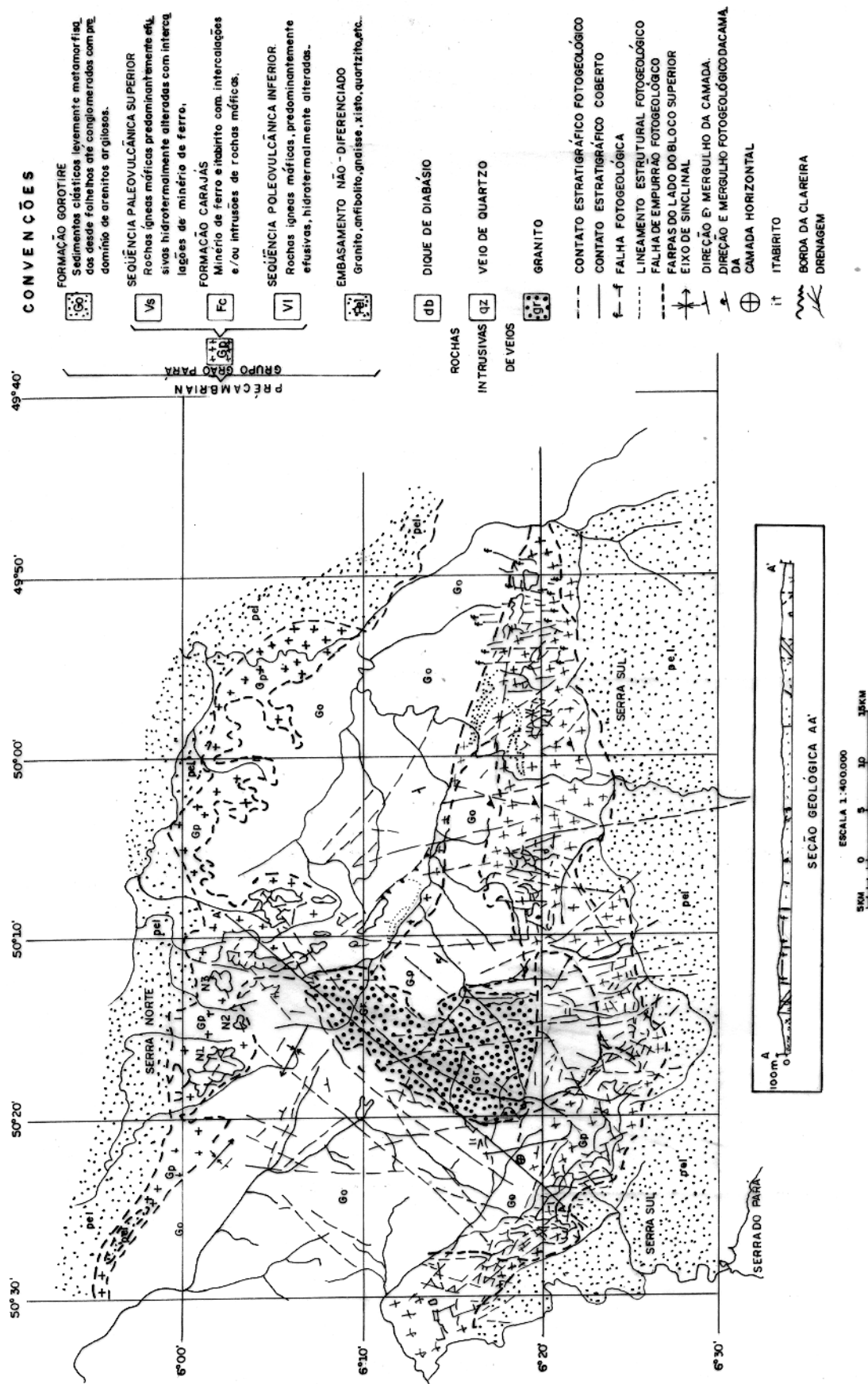


FIG. 3 - MAPA GEOLÓGICO PRELIMINAR DA SERRA DOS CARAJÁS, SEGUNDO BEISIEGEL ET AL. (1973).

1.2. Geologia Local

As unidades litológicas definidas na área MM1 são gnaisses, xistos, anfibolitos, formação ferrífera, metabásicas e granitos, todos provavelmente pertencentes ao Pré-Cambriano. Algumas dessas unidades podem ser observadas na figura 4. Também são encontradas na área, cangas lateríticas e sedimentos recentes.

1.2.1. Gnaisses

São rochas de granulação média com um bandejamento mineralógico raramente bem definido. Sua composição mineralógica consta de plagioclásio, quartzo e biotita.

Os dados de mapeamento geológico sugerem que estes gnaisses não fazem parte do embasamento (Complexo Xingu).

1.2.2. Xistos

A ocorrência de cobre na área MM1 está encaixada em uma seqüência de xisto, principalmente anfibólio e biotita que sobressaem no terreno, compondo um conjunto de serras alinhadas. Este conjunto inicia imediatamente a noroeste da clareira N1 da Serra dos Carajás e se prolonga neste rumo pelo menos em 30 km, cruzando o rio Itacaiunas.

A seqüência apresenta direção noroeste-sudeste, cujo mergulho para nordeste é localmente muito variável, mantendo uma média para o pacote, em torno de 55°.

1.2.3. Formação Ferrífera

Forma um pacote de rochas compostas por diversos níveis decimétricos a métricos de formação ferrífera bandeadas compostas predominantemente de quartzo e magnetita/hematita, intercalados em quartzo-anfibólio-biotita xistos e quartzo-biotita-anfibólio xistos. A largura média deste pacote de rochas é de 100 metros.

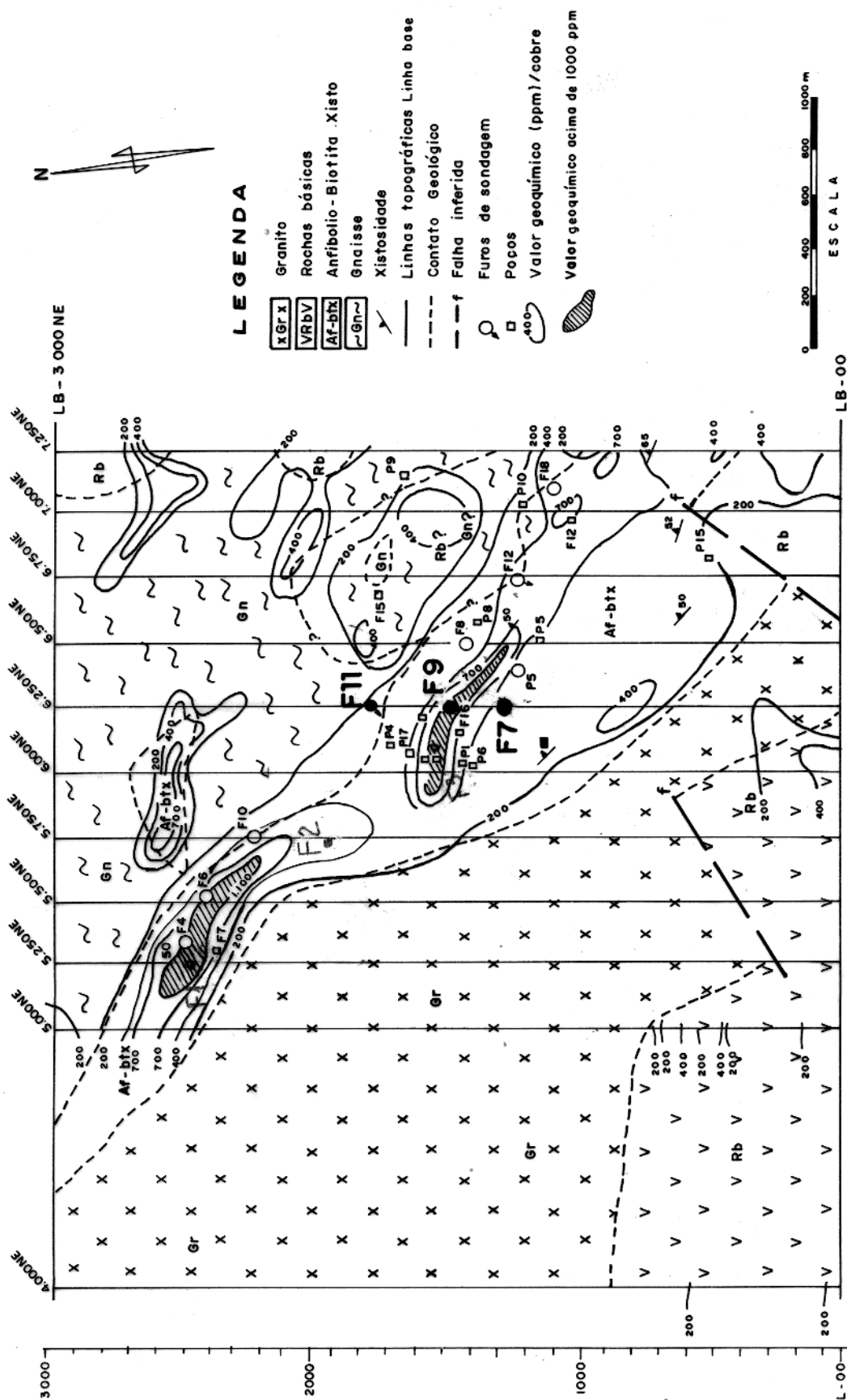


FIG. 4 - MAPA GEOLÓGICO-GEOQUÍMICO DA ÁREA MM1-ALVOL, COM LOCALIZAÇÃO DAS LINHAS DE PICADAS, SEGUNDO BEISIEGEL E FARIAS, 1978.

Superficialmente, apresenta-se na forma de blocos rola
dos, centimétricos a métricos. Em corte de estrada, foram verificada
dos afloramentos com direções idênticas às demais unidades litoló
gicas.

1.2.4. Anfibolitos

Não foram observados afloramentos de anfibolito na
área. As exposições ocorrem sob a forma de pequenos fragmentos de
dimensões centimétricas e blocos decimétricos dentro do conjunto
gnáissico.

As observações de campo indicam que estes corpos são
concordantes com a direção geral dos gnaisses.

A composição mineralógica consta de hornblenda, plagio
clásio, biotita e apatita.

1.2.5. Metabásicas

Na área existem corpos de rochas básicas metamorfisa
das, variando desde basaltos até gabros.

Os corpos de rochas básicas ocorrem em raros afloramento
s. Mapeamento geológico sugere que estes corpos intrusivos te
nham preenchido principalmente zonas de falha e de maior fraqueza.
Localmente estes diques e "sills" de rochas básicas foram afetadas
por soluções ácidas e transformadas em "hornfels".

1.2.6. Granitos

Os granitos apresentam características semelhantes às
da intrusão central da Serra dos Carajás. É a unidade que apresenta
maior número de afloramento, muitas vezes de grandes extensões.
O maior destes corpos se encontra na porção sul do ALVO 1 e tem
dimensões aproximadamente de 1700 m de largura por 2700 m de com
primento.

Estes maciços graníticos apresentam contatos discordantes e aparentemente não causaram grandes modificações na composição geral das rochas encaixantes.

Datações radiométricas efetuadas em amostras do granito Carajás, sugerem em cerca de 1.8 bilhões de anos a sua idade. Supõe-se que esta idade é a mesma dos granitos da área MM1.

1.2.7. Cangas Lateríticas

Este tipo de material é comum na área. Geralmente ocorre na forma de grandes blocos, distribuídos pela área.

Quase todas as litologias da área mostram algum efeito dos processos laterizantes. Existem aquelas pouco afetadas superficialmente, outras revestidas apenas por uma couraça centimétrica que mascara todas as suas características.

1.2.8. Sedimentos Recentes

Sedimentos e rochas sedimentares de idades recentes (quaternárias) e possivelmente cretáceas, cobrindo as diferentes unidades litológicas, correspondem aproximadamente a 10% da área mapeada.

1.2.9. Mineralização na Área MM1

A mineralização cuprífera da área MM1 ocorre associada a uma seqüência de xistos, principalmente a anfibólio e biotita, e a uma formação ferrífera magnética.

Sua distribuição é irregular ao longo dos testemunhos de sondagem, mas se fez presente, com maior ou menor teor, nos furos realizados.

A mineralização a calcopirita e pirita ocorre sob forma disseminada, principalmente onde predomina o anfibólio. É comum

mum a presença de níveis milimétricos acompanhando a xistosidade da rocha, onde os sulfetos estão finamente disseminados e altamente concentrados. Um furo (F9) chega a apresentar 72 m com um teor de 1% de cobre.

Abaixo do nível estratigráfico a partir do qual se inicia o aparecimento de granada, começam a ocorrer bornita e calcopirita.

O caráter da mineralização parece ser singenético, sugerido pela disseminação de sulfetos ao longo de níveis preferenciais (Beisiegel e Farias, 1978).

1.3. Levantamento Geoquímico

Levantamentos geoquímicos de reconhecimento e detalhe foram executados pela Companhia AMZA e, posteriormente, pela DOCEGEO. O levantamento geoquímico de reconhecimento foi executado, em malhas de 1000 m x 200 m, coletando-se as amostras a uma profundidade de 20 a 50 cm. Os resultados das análises indicaram uma zona anômala para cobre com, pelo menos, 10 km de comprimento. Esta zona apresenta três picos principais com valores de até 1000 ppm de Cu.

O levantamento geoquímico de detalhe foi executado sobre a faixa anômala detectada, no ALVO 1, utilizando-se uma malha de 250 m x 50 m. A malha original de amostragem consistiu em linhas com rumo N22°E, sendo depois refeita com linhas rumo N70E, amarradas a uma linha-base.

Aplicando um método estatístico, a AMZA determinou que os valores acima de 500 ppm indicam, com uma boa margem de confiabilidade, a existência de mineralização de cobre, enquanto que os valores abaixo de 500 ppm indicam possível mineralização ou mudança litológica. Uma faixa anômala bem definida ocorre no xisto.

1.4. Levantamento Geofísico

A Companhia LASA, contratada pela Companhia Meridional de Mineração, realizou um levantamento aeromagnético na Serra dos Carajás no ano de 1968. A altura de voo foi de 150 m e a malha de voo, quadrada, de lado 2°15'. Os dados foram apresentados em mapa de isogamas na escala 1:10.000 com intervalo de contorno de 10γ.

1.5. Poços Escavados

Foi estabelecido um programa de abertura de poços pela Companhia AMZA no período de junho de 1976 a julho de 1977, para uma primeira avaliação dos tipos litológicos existentes na área a través do estudo do solo residual e rochas intemperizadas, bem como da distribuição dos elementos metálicos de interesse. Foram executados 18 poços com um total de 278 m escavados. As amostras foram analisadas para Cu, Mn, Fe, Ag e Au e eventualmente para Pb. A maioria desses poços revelaram altos valores para cobre.

1.6. Sondagem Mecânica

Entre outubro de 1978 e junho de 1979, 12 furos de sondagem foram executados pela Companhia AMZA e, posteriormente, pela DOCEGEO sobre a anomalia principal do ALVO 1. Os furos foram descritos e amostrados em intervalos de 0.5 m e 1 m, sendo as amostras analisadas para Cu, Mo e Au e, eventualmente, para Pb, Mn, Ni, Co, Cr, Fe, Mn e Ag (Beisiegel e Farias, 1978).

Os furos F1, F5, F7 e F8, foram interrompidos a uma profundidade de, aproximadamente, 100 m, enquanto que os outros foram encerrados, depois de atravessarem alguns metros do granito intrusivo subjacente (Beisiegel e Farias, 1978).

Na figura 5 estão apresentados os resultados dos furos F7, F9 e F11. Estes três furos estão localizados na linha 6250 NE,

nas estações 1300, 1500 e 1800, respectivamente. O F7 apresenta material decomposto em uma espessura de 40 m, contendo teor de cobre variando de 0.2 a 0.85%. Logo a seguir apresenta anfibólio-biotitaxisto com espessura de quase 50 m e teor de cobre normalmente abaixo de 0.2%. O furo F9 contém material decomposto com aproximadamente 20 m de espessura. Depois, surgem gradações de anfibólio-biotita-xisto. Dentro destas unidades é encontrada uma faixa de cobre de 1% com espessura de 70 m. Fora desta faixa, o teor oscila entre valores menores que 0.2 e 0.4%.

O furo F11 apresenta uma cobertura de solo de aproximadamente 30 m. A partir daí, encontrou-se anfibólio-biotita-xisto e gnaisse com espessura de 100 m e, por último, gradações entre anfibólio e biotita-xisto com intercalações de formação ferrífera. O teor médio de cobre deste furo é inferior a 0.2%.

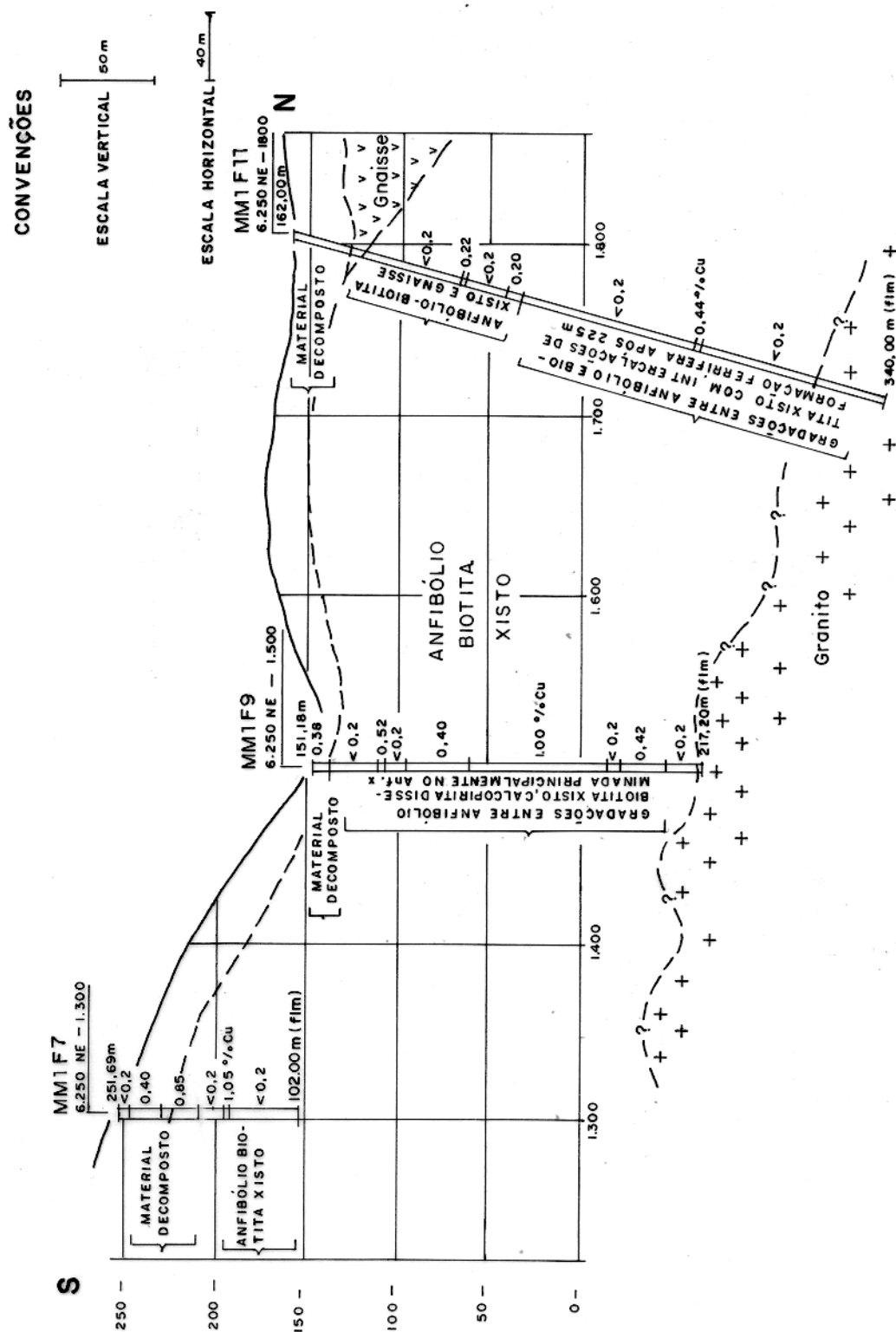


FIG. 5 - SEÇÃO GEOLÓGICA ATRAVÉS DA CORRELAÇÃO ENTRE OS PERFS DE
SONDAGENS MECÂNICAS DOS FUROS F₇, F₉, E F₁₁, SEGUNDO BEISIE
GEL E FARIAS, 1978.

CAPÍTULO 2

MÉTODO AUDIOFREQUÊNCIA MAGNÉTICA (AFMAG)

2.1. Revisão de Conceitos

O método de prospecção geofísica, audiofrequência magnética (AFMAG) foi desenvolvido por Ward et al. (1958). Trata-se de um método eletromagnético indutivo, onde as fontes são campos naturais, na banda de audiofrequência, gerados por descargas elétricas na atmosfera (Ward et al., 1958). Existem outras fontes de energia tais como:

- a) A interação de radiações corpusculares do sol com a ionosfera em presença do campo magnético terrestre (Jewell e Ward, 1963).
- b) Ruídos culturais, por exemplo, explosão nuclear e linhas de transmissão de 50 e 60 Hz (Ward, 1959).

A energia se propaga em um guia de onda esférica, limitada pela superfície da terra e pela camada inferior da ionosfera.

A faixa de frequência está, aproximadamente, entre 1 Hz e 1000 Hz segundo Telford et al. (1976). Para a prospecção geofísica, as melhores frequências são 150 Hz e 510 Hz, porque estas evitam harmônicos de 60 Hz, provenientes de campos de linhas de transmissão elétrica e também porque essas frequências estão próximas da frequência de amplitude máxima (Ward et al., 1966).

A energia das ondas de audiofrequência, em um determinado ponto, pode ser representada por uma série de funções delta de intensidade do campo magnético. Estas intensidades se apresentam com amplitudes e distribuição temporal aleatórias (Ward et al., 1966). A distribuição azimutal, por outro lado, é bastante ordenada, originando uma elipse de polarização quando se considera

um espaço de tempo suficientemente grande.

Para fontes distantes, e considerando-se que o ponto de observação está situado em um semi-espaço homogêneo, o plano da elipse de polarização é horizontal. Entretanto, em presença de variações laterais de resistividade, particularmente em presença de zonas de alta condutividade, o plano da elipse de polarização se inclina em relação à horizontal (Ward, 1967).

A energia pode ser medida em qualquer das três direções ortogonais. Assim, é preferível que se considere um elipsóide de polarização para definir a polarização do campo. Os valores de excentricidade do elipsóide de polarização no plano horizontal e vertical são, aproximadamente, 0 e 0.96, respectivamente. O azimute do eixo maior sofre variações temporais e pode variar até 90° durante um período de 24 horas. Na ausência de um condutor, a inclinação do eixo menor em relação à vertical é notadamente estável, raramente variando mais do que 2° (Ward et al., 1966).

O campo de audiofrequência eletromagnético varia em intensidade durante o ano, sendo mais intenso de maio a setembro, nas altas latitudes do hemisfério norte e de novembro a março, nas altas latitudes do hemisfério sul. No cinturão equatorial, o campo é relativamente forte durante o ano. A intensidade do campo aumenta durante o dia, sendo mais intenso à tarde e à noite do que pela manhã (Orellana, 1972).

Com o método AFMAG são medidos normalmente o azimute e o ângulo de inclinação do eixo maior da elipse de polarização. Isso é feito com um amplificador-detector e duas bobinas ortogonais com núcleos ferrimagnéticos.

Os ângulos de inclinação de AFMAG podem ser representados como nos outros métodos convencionais de inclinação eletromagnética. Entretanto, muitas vezes torna-se útil considerar não só o ângulo de inclinação, mas também o azimute. Para tal, uma representação vetorial dos dados pode ser usada, isto é, cada leitura é representada por um vetor (Hallof e Sutherland, 1962). A magnitude do vetor corresponde ao ângulo de inclinação e a direção representa o azimute do eixo maior da elipse de polarização. A forma veto

rial dessas medidas é importante porquanto pode indicar a presença de condutores, mesmo que nenhum dos perfis intercepte a zona condutora, e nenhum "crossover" seja observado (Keller e Frischnecht, 1966).

Os dados de AFMAG podem ser interpretados como os outros métodos eletromagnéticos. Um modelo analítico simples, o do disco delgado, desenvolvido por Ward et al. (1968) é usado na interpretação de AFMAG. Este modelo permite estimar mergulho, profundidade e o parâmetro $\sigma t A$, onde:

σ - condutividade

t - espessura

A - raio do disco

A maior limitação deste modelo é desprezar o efeito do semi-espaço dissipativo onde se encontra o corpo anômalo. (Um semi-espaço dissipativo provoca uma mudança no perfil do ângulo de inclinação no sistema AFMAG).

As vantagens do AFMAG sobre outros métodos eletromagnéticos são:

- a) Alcança maior profundidade de exploração.
- b) Suas fontes são campos naturais.
- c) O campo primário é planar.
- d) Possibilita a obtenção de melhores resultados no mapeamento de falhas e zonas de cisalhamento sendo portanto, de grande utilidade no controle estrutural de depósitos minerais.
- e) É um método relativamente simples para se operar no campo.

As desvantagens do método AFMAG são:

- a) Os campos magnéticos naturais nas frequências próximas a 150 Hz e 510 Hz apresentam uma acentuada variação sazonal, sendo praticamente impossível seu uso em alguns períodos do ano.

- b) Mesmo nos períodos de maior intensidade, o campo ainda sofre variações diurnas, o que limita o uso do método a certas horas do dia.
- c) É difícil ou quase impossível mapear condutores cujos eixos sejam paralelos ao campo indutor.
- d) As medidas de ângulo de inclinação e do azimute nem sempre são reproduzíveis, ou seja, as medidas obtidas em um dia não coincidem, necessariamente, com as de outro dia, num mesmo ponto.

2.2. Metodologia de Trabalho

O método AFMAG foi aplicado na área ALVO 1-MM1 (Fig. 4). A malha do ALVO 1 consta de:

- a) Duas linhas-base na direção aproximadamente E-W, uma ao sul da área, denominada LB-0 e a outra ao norte denominada LB 3000.
- b) Dez linhas transversais, com espaçamento de 250 m e orientação N70°E, que estão numeradas de LT 5000 NE (oeste) até LT 7250 NE (leste). A extensão dessas linhas varia em torno de 4 km e estão piqueteadas de 50 em 50 m. Uma média de 2,5 km foi levantada em cada linha, perfazendo um levantamento total de 25 km.

Devido à topografia acidentada da área, a técnica convencional de medida de AFMAG não foi utilizada; preferiu-se medir o ângulo de inclinação de duas componentes: uma na direção da linha de picada e a outra perpendicular a ela. A partir dessas duas componentes e fazendo uso de relações trigonométricas, foi possível determinar o mergulho e a direção do eixo maior do elipsóide de polarização. A convenção que se usou foi a de colocar o amplificador-detector ao sul das bobinas, ficando o operador sempre de frente para o sul. Para tomada de medidas na direção paralela às picadas, o clinômetro estava sempre de frente para oeste. Usando os critérios indicados por Ward (1967), considerou-se positiva a

inclinação do eixo maior da elipse para oeste, e negativa quando se inclinava para leste, sendo o "crossover" o ponto de inflexão.

Um levantamento preliminar foi realizado sobre o perfil LT 6000 NE, visando a viabilidade da técnica acima descrita. Os resultados do mesmo foram favoráveis e essa técnica de medida foi eleita para a execução do trabalho.

As medidas de AFMAG foram tomadas em novembro de 1977; em janeiro e em fevereiro de 1978, intermitentemente. No mês de novembro foram levantadas as linhas LT 5750 e LT 6000; em janeiro, as linhas LT 6250, LT 6500, LT 6750, LT 7000 e LT 7250; e em fevereiro, as linhas LT 5000, LT 5250 e LT 5500.NE.

O aparelho usado neste levantamento foi o AFMAG, construído pela McPhar Geophysics Company, modelo nº A-651, com frequências de 140 Hz e 470 Hz.

Os dados foram apresentados tanto em perfis dos ângulos de inclinação do eixo maior da elipse de polarização, como na forma vetorial.

Nos perfis onde foram feitas interpretações semiquantitativas, suavizaram-se as curvas de ângulo de inclinação, usando-se o filtro média ponderada (Equação 1).

$$\bar{y}_i = \frac{y_{i-1} + 2y_i + y_{i+1}}{4} \quad (1)$$

onde o valor em cada ponto ($\bar{y}_i$) é igual à soma do valor anterior, (y_{i-1}) mais duas vezes o valor nesse ponto (y_i), mais o valor imediatamente posterior (y_{i+1}), dividido por quatro.

As interpretações dos dados de AFMAG foram de caráter qualitativo e semiquantitativo. A interpretação qualitativa foi feita através de uma análise dos dados, em conjunto com as informações de geologia, geoquímica e de furos de sondagens existentes na área. Os cálculos dos parâmetros foram baseados em perfis cujas curvas suavizadas caracterizam bem o "crossover". Esta interpretação baseou-se nos trabalhos de Ward et al. (1958) e Ward et al.

(1968). Uma estimativa da condutividade foi feita a partir da razão das amplitudes pico a pico da curva na frequência baixa em relação à de frequência alta. Segundo Ward (1959), para um bom condutor a razão das amplitudes é aproximadamente 1, enquanto que para um mau condutor esta razão é menor que 0,4. Também foram feitas estimativas de profundidade, mergulho e parâmetros (σA) e (σt) . O parâmetro σt é denominado condutância longitudinal no método geoeletrico de corrente contínua. Estas estimativas foram feitas da seguinte maneira: determinaram-se as razões $\frac{\alpha^+}{\alpha^-}$, $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ e $\frac{\Delta W}{\Delta x}$, onde:

α^+ - amplitude máxima positiva do ângulo de inclinação, quando a frequência é alta.

α^- - amplitude máxima negativa do ângulo de inclinação, quando a frequência é alta.

α_1 - valor pico a pico da frequência baixa.

α_2 - valor pico a pico da frequência alta.

ΔW - distância horizontal entre dois pontos da curva de ângulos de inclinação positiva, quando a amplitude se reduz à metade.

Δx - distância horizontal entre o pico positivo e o negativo.

As curvas-modelo para interpretação estão representadas nos anexos de 1 a 3. Nesses anexos temos:

δ - mergulho do condutor

D - profundidade ao topo do condutor

t - espessura do condutor

β - ângulo entre o campo indutor e a direção do condutor

ϕ - fase da resposta do condutor medida em relação a fase do campo indutor.

2.3. Comportamento do Campo em Relação ao Tempo

Foram repetidas umas medidas nas linhas LT 6250 NE e 5500 NE depois de períodos de dez e trinta dias, respectivamente (Figuras 6 e 7). Nestas figuras se pode observar:

- a) Para o período de dez dias, sobre a linha 6250 NE, nota-se que o azimuth do eixo maior do elipsóide de polarização, assim como o ângulo de inclinação, tanto para a frequência alta como para a baixa, se manteve constante, com exceção de alguns pontos.
- b) Para o período de 30 dias, as medidas repetidas sobre a linha 5500 NE, mostram que, para frequência alta, o azimuth do eixo maior se manteve aproximadamente constante, enquanto que o ângulo de inclinação aumentou na maioria dos pontos observados. Na frequência de 140 Hz houve uma mudança do azimuth do eixo maior, porém o ângulo de inclinação, se manteve constante.

2.4. Análise e Interpretação de Dados

Os dados de AFMAG contêm uma certa margem de erro, de corrente da dificuldade de tomada de medidas, devido à topografia bastante acidentada. As leituras repetidas numa mesma estação, apresentam uma margem de erro em torno de 0,5%.

O método AFMAG evidencia, na área, vários eixos de condutores, como pode ser observado nos perfis de ângulo de inclinação (Figura 8). Estes condutores apresentam uma orientação aproximadamente igual ao "strike" dominante do xisto. Os condutores nº 1 com orientação $N24^{\circ}W$, nº 2 com orientação $N30^{\circ}W$ e o condutor nº 3 com direção $N47^{\circ}W$ localizam-se dentro do xisto. Estes xistos parecem indicar corpos condutores que, provavelmente, correspondem à formação ferrífera e/ou a zona mineralizadas com sulfetos. O condutor nº 4 apresenta uma orientação aproximada de $N40^{\circ}W$ e está localizado no corpo de xisto isolado. Estas orientações dos eixos dos

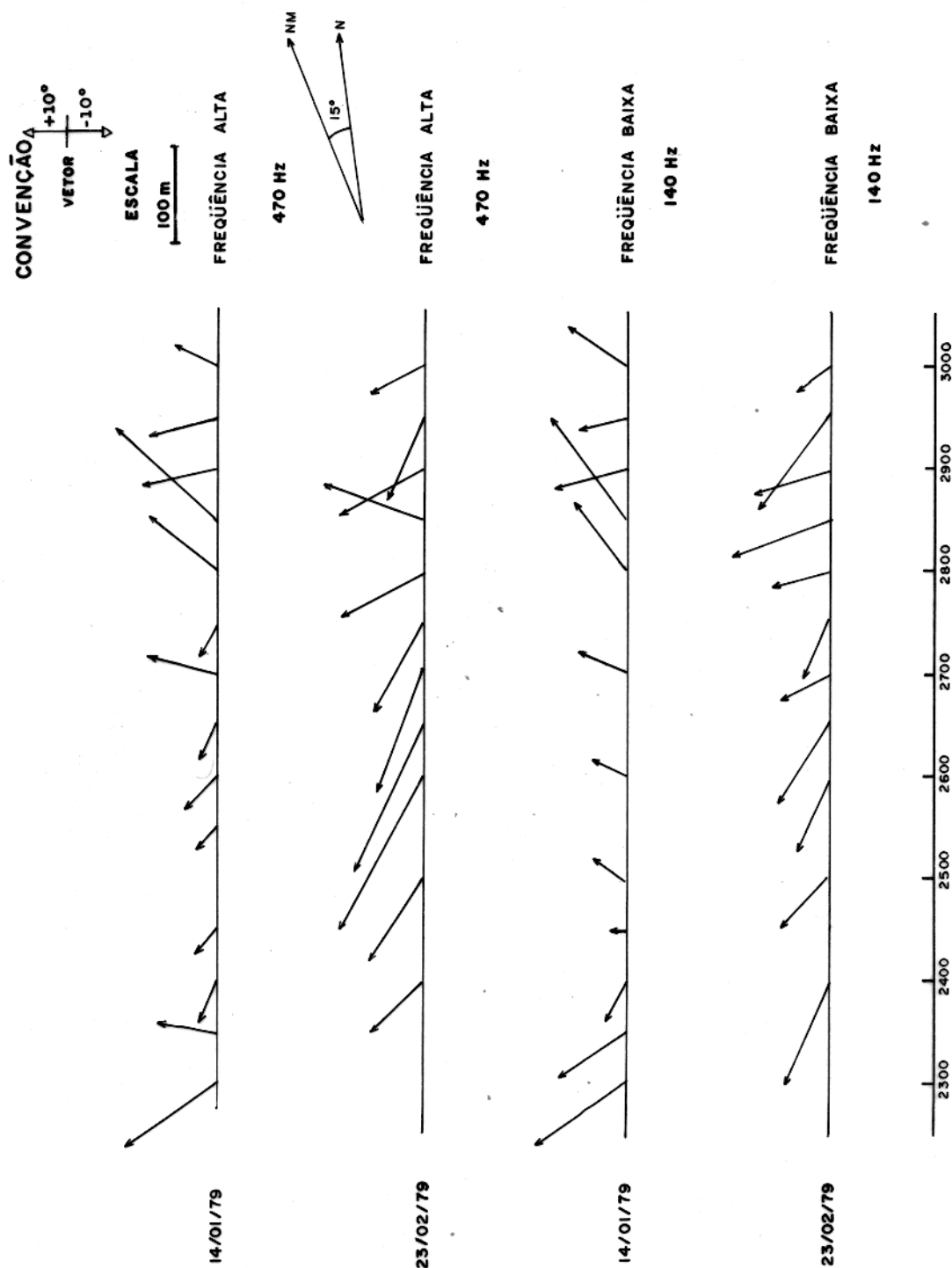
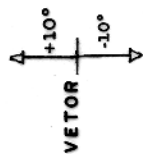


FIG. 6 - COMPORTAMENTO DO EIXO MAIOR DA ELIPSE DE POLARIZAÇÃO OBSERVADO NOS DIAS 14/01/79 E 23/02/79, EM TRECHOS DA LINHA 5500 NE.

CONVENÇÃO



FREQUÊNCIA ALTA
470 Hz

100 m ESCALA

FREQUÊNCIA ALTA
470 Hz



FREQUÊNCIA BAIXA
140 Hz

FREQUÊNCIA BAIXA
140 Hz

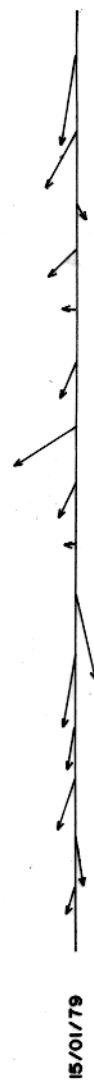
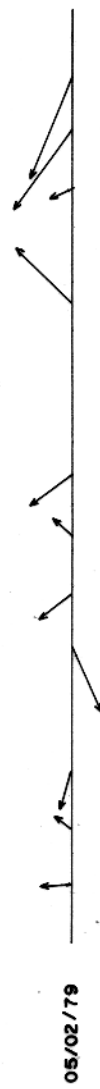
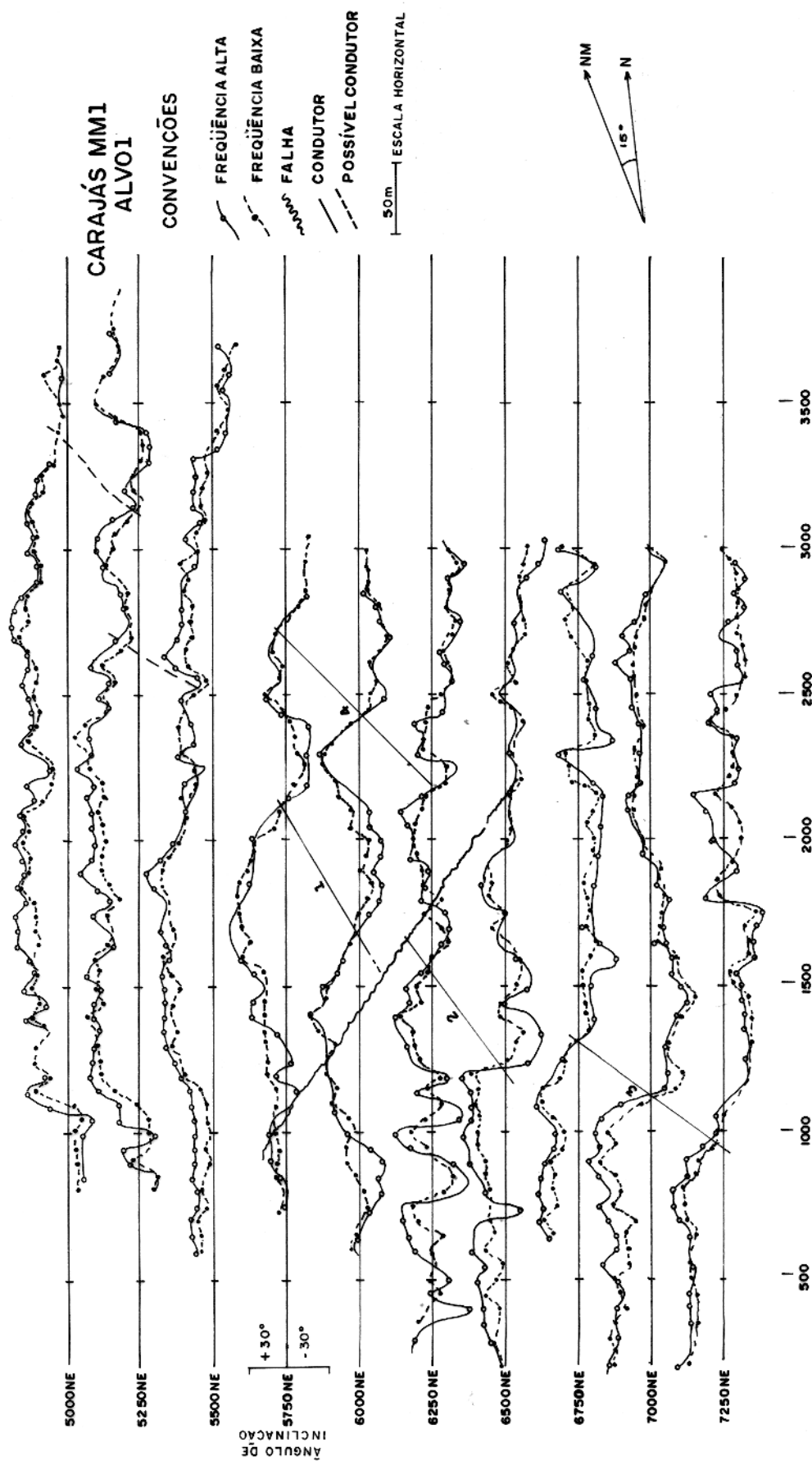


FIG. 7 - COMPORTAMENTO DO EIXO MAIOR DA ELIPSE DE POLARIZAÇÃO OBSERVADO NOS DIAS 15/01/79 E 05/02/79, EM TRECHOS DA LINHA 6250 NE.



**FIG. 8 - PERFIS DE AFMAG NAS FREQUÊNCIAS DE 140Hz E 470Hz.
ÁREA MM1 - ALVO 1.**

condutores acompanham bem a formação ferrífera, a qual está contida no xisto.

As anomalias correspondentes aos condutores 1, 2 e 3 apresentam um "crossover" nítido. É possível que estes condutores correspondam a um mesmo corpo que sofreu dois deslocamentos: um, entre as linhas LT 6000 NE e 6250 NE e outro, entre 6500 e 6750 NE, sugerindo prováveis falhamentos nessa região. As anomalias correspondentes ao condutor nº 4, não são tão acentuadas como no caso anterior. Provavelmente, trata-se de um condutor de pequena extensão e/ou corpo menos condutivo.

Os perfis 5500 NE, 5250 NE e 5000 NE apresentam anomalias não muito bem definidas. Isto pode ser devido a uma interrupção do material condutor nessa região, ou a um condutor de pequenas dimensões, ou ainda pode corresponder a um corpo de baixa condutividade.

As oscilações observadas no perfil 6250 NE, entre as estações 500 m e 1000 m podem ser causadas por condutores rasos e/ou corpos de pequena extensão. Então, essas oscilações são superposições de anomalias de polaridade diferente da parte superior e inferior do condutor. Outra possibilidade poderia ser relacionada à instabilidade do campo na ocasião da tomada de medidas.

Os perfis suavizados (Figura 9), foram interpretados semiquantitativamente, como foi mencionado no item 2.2. Os parâmetros usados para fazer as estimativas e os resultados obtidos são apresentados na tabela 1.

Os resultados obtidos desta interpretação mostram que:

- a) O condutor nº 1 apresenta uma boa condutividade; a condutância longitudinal varia entre 8-16 mho; o mergulho é aproximadamente igual a 70°NE e uma profundidade até o topo de 81 m, aproximadamente.
- b) O condutor nº 2 mostra uma condutividade entre boa e moderada, sua condutância longitudinal varia entre 7-35 mho; o mergulho é aproximadamente 60°NE e sua profundidade até o topo é de 92 m.

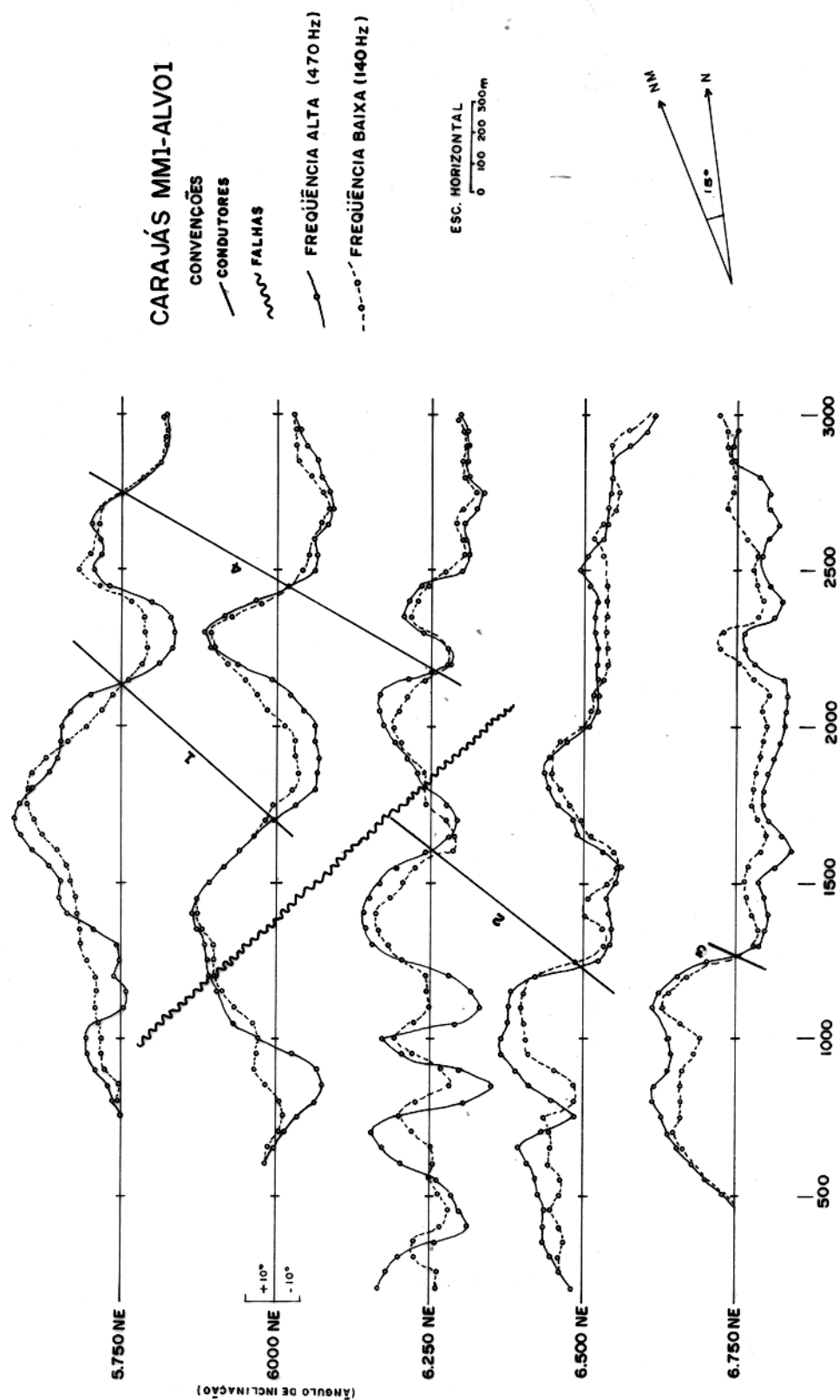


FIG-9 - PERFIS SUAVIZADOS DE AFMAG (140Hz E 470Hz).
ÁREA MM1 - ALVO1.

PERFIL	CONDUTOR Nº	α_+	α_-	α^*/α	α_1	α_2	α_1/α_2	Δx	Δw	$\Delta x/\Delta w$	ω	D/A	$\Delta x/A$	A	D	σ^*A	σ^*t
LT 5750 NE	Nº 1	35	17	2,1	48	52	0,92	600m	600m	1,0	75°	0,03	0,22	2727	81m	$4,5 \times 10^4$	16 mho
LT 6000 NE		27	14	1,9	37	41	0,84	540m	540m	1,0	70°	0,06	0,31	1742	104m	$1,4 \times 10^4$	8 mho
LT 6250 NE	Nº 2	22	8	2,7	27	30	0,90	300m	300m	1,0	63°	0,12	0,43	697	63m	$2,5 \times 10^4$	35 mho
LT 6500 NE		25	9	2,8	25	34	0,73	460m	400m	1,1	60°	0,08	0,40	1150	92m	$0,8 \times 10^4$	7 mho
LT 6750 NE	Nº 3	25	15	1,7	27	40	0,62	68m	65m	1,1	71°	0,03	0,22	3090	93m	$4,5 \times 10^4$	15 mho

TABELA 1 - PARÂMETROS CALCULADOS E RESULTADOS OBTIDOS DA INTERPRETAÇÃO SEMIQUANTITATIVA DE AFMAG, ÁREA MM², ALVO 1.

- c) O condutor nº 3 apresenta uma condutividade moderada, condutância longitudinal de aproximadamente 15 mho; um mergulho de aproximadamente 71° NE e profundidade até o topo de 93 m.

Na área MM1, ALVO 1, pode-se observar que a faixa fortemente anômala situa-se entre as linhas 5750 NE e 6750 NE. Nesta faixa nota-se que a condutividade e a condutância longitudinal não estão regularmente distribuídas, levando à hipótese da existência de concentrações metálicas irregulares em um nível estratigráfico bem definido.

Na linha 6250 NE correspondente ao condutor, observa-se que a condutividade e a condutância longitudinal são bastante altas o que se atribui a uma concentração de material condutor perto da provável região de falha, detectada através do método AFMAG.

Quanto ao mergulho do condutor, observa-se que o mesmo é para leste. Isto está de acordo com o sentido geral do mergulho das rochas na área. Todos os condutores parecem ter o seu topo a uma profundidade de 90 m, em média.

A interpretação, usando o modelo de disco, deve ser tomada como uma primeira aproximação, porque este modelo, não considera o efeito da rocha encaixante, nem a geometria do corpo condutor.

CAPÍTULO 3

MÉTODO MAGNÉTICO

3.1. Revisão de Conceitos

O método magnético aplicado à prospecção mineral visa determinar os contrastes de suscetibilidade magnética através de medidas das distorções do campo geomagnético. Estas distorções normalmente são da ordem de 10^{-4} do campo magnético terrestre. A intensidade do campo geomagnético vale em média 50.000 gamas, sendo que 1 gama (1γ) = 10^{-5} oerstead. No Sistema Internacional de medidas a unidade de intensidade magnética é o Tesla ($1\gamma = 10^{-9} \text{T}$).

O campo geomagnético é formado por três contribuições:

- a) O campo principal, provavelmente gerado por processos eletrodinâmicos no núcleo da Terra, que varia lentamente com o tempo e cuja mudança se denomina variação secular (Jacobs, 1967). Este campo é bastante semelhante ao de um grande dipolo, com seus polos norte e sul localizados, aproximadamente, a $78.5^{\circ}\text{N}, 69^{\circ}\text{W}$ e $78.5^{\circ}\text{S}, 11^{\circ}\text{E}$. O momento do dipolo corresponde a um valor de intensidade de 8×10^{25} emu (Grant e West, 1965).

Em qualquer ponto da Terra, o campo pode ser caracterizado pela sua intensidade total ($\vec{E}$), declinação (D) e sua inclinação (I). Às vezes, outras componentes são usadas. Estas componentes estão ligadas por relações trigonométricas simples.

- b) O campo externo, que é uma pequena parte do campo total, origina-se fora da Terra e parece estar associado a correntes elétricas na camada ionizada da atmosfera (Telford et al., 1976). Sua variação com o tempo é muito mais rápida que a do campo principal. Alguns efeitos devidos a este campo externo

são: variação diurna, com período de 24 horas e amplitude de cerca de 30γ ; variação lunar cíclica durante o mês, com período de 25 horas e amplitude de 2γ ; tempestades magnéticas, com amplitude até 1000γ ; um ciclo de 11 anos de duração, associado a manchas solares e a suas emissões de partículas.

- d) Anomalias magnéticas devidas a variações no conteúdo de minerais magnéticos nas rochas próximas à superfície da terra. Ocasionalmente, estas anomalias são suficientemente grandes para duplicar o campo principal. Em geral, não persistem em grandes extensões. Variações devidas a estas fontes são de interesse na prospecção geofísica.

Os minerais magnéticos de importância na prospecção geofísica são em número pequeno. Os mais comuns pertencem a membros da série de solução sólida, magnetita-ulvospinel, hematita-ilmenita e magnetita-maghemita (Strangway, 1967). O mineral pirrotita, também comum na natureza, apresenta uma alta suscetibilidade.

A suscetibilidade magnética das rochas por sua vez, depende do conteúdo de minerais magnéticos. As rochas básicas (basalto, gabro) são as que apresentam maior suscetibilidade. Na tabela 2, há uma lista de suscetibilidades magnéticas para uma variedade de rochas (Telford et al., 1976).

A magnetização das rochas pode ser induzida, remanente ou ambas. A magnetização induzida requer a presença de um campo indutor externo. Esta magnetização é proporcional ao campo indutor, sendo a suscetibilidade a constante de proporcionalidade (Sharma, 1976). A magnetização remanente pode ser de vários tipos, tais como: magnetização isothermal, viscosa, termoremanente e magnetização deposicional (Doell e Cox, 1967). A magnetização termoremanente é a mais importante em estudos paleomagnéticos. A direção de magnetização remanente, em muitos casos, não coincide com a direção do campo induzido atual. Este é um dos grandes problemas na interpretação de dados magnéticos.

A interpretação de dados magnéticos pode ser qualitati

TIPO DE ROCHA	SUSCETIBILIDADE x 10 ⁶ UNIDADE (CGS)	
	VARIAÇÃO	VALOR MÉDIO
SEDIMENTARES		
DOLOMITO	0 - 75	10
CALCÁREO	2 - 280	25
ARENITO	0 - 1660	30
FOLHELHO	5 - 1480	50
METAMÓRFICAS		
ANFIBÓLITO		60
XISTO	25 - 240	120
FILITO		130
GNAISSE	10 - 2000	
QUARTZITO		350
SERPENTINITO	250 - 1400	
ÍGNEAS		
GRANITO	0 - 4000	200
OLIVINA DIABÁSIO		2000
DIABÁSIO	80 - 13000	4500
GABRO	80 - 7200	6000
BASALTO	20 - 14500	6000
PERIDOTITO	7600 - 15600	13000
ANDESITO		13500

TABELA 2 - SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DE ALGUMAS ROCHAS, SEGUNDO TELFORD ET AL. ; 1976.

va e quantitativa. A interpretação qualitativa é feita mediante uma análise dos dados apresentados na forma de perfis e/ou mapas de contorno. Do ponto de vista de prospecção mineral, a análise é dirigida para definir domínios magnéticos que estejam relacionados direta ou indiretamente a zonas potencialmente portadoras de mineralização.

A interpretação quantitativa tem como objetivo calcular certos parâmetros do corpo anômalo, tais como: profundidade, mergulho, extensão e espessura. Geralmente, se inicia com técnicas mais simples, como aquelas que utilizam alguns pontos notáveis da curva de campo tais como: máximo, mínimo e ponto de inflexão. Cita-se como exemplo, a técnica de interpretação para modelos de polo, dipolo, linhas de polo e linhas de dipolo (Barker, 1975 e Smilie, 1976). Estas técnicas são simples e rápidas, porém, na prática, as anomalias dificilmente se ajustam a estes modelos simples. Uma técnica de interpretação mais precisa, baseia-se na determinação dos parâmetros característicos, a partir da superposição de curvas de campo com curvas teóricas, calculadas para vários modelos (Gay, 1963). Os métodos mais modernos de interpretação, usam a técnica de tentativa e erro (Curva Matching). Este método consiste em gerar modelos automaticamente no computador e comparar com as curvas de campo. Exemplificando, citam-se programas tipo Talwani, para corpos bidimensionais e modelos tipo prisma para corpos tridimensionais.

3.2. Metodologia de Trabalho

O método magnético foi aplicado sobre a malha de reconhecimento de 9 km² (ALVO 1) e sobre uma malha de detalhe de 0.63 km² (corpo 2), num período de 30 dias de trabalho de campo.

A malha corpo 2, subárea do ALVO 1, consta de uma linha-base (LB-C2), cortada perpendicularmente por 11 picadas, cada qual com extensão de 650 m, ficando 400 m ao norte e 250 m ao sul da linha-base. Estas picadas estão numeradas, começando por 750 W e terminando em 200 E. Nesta malha, as estações de medidas estão

separadas por 25 metros entre si. Em cada estação foram tomadas 3 leituras, considerando-se como valor representativo de cada ponto medido, a média dessas leituras. A estação-base de magnetometria, para este levantamento, ficou localizada no cruzamento da linha-base LB-C2 com a linha 250 W. As leituras, na base, foram tomadas a intervalos de 15 minutos. Os dados obtidos na estação-base foram utilizados na correção diurna.

Avaliou-se em cerca de 60 gamas o valor da variação diurna média e registrou-se o valor de 27.000 gamas como sendo o valor da estação-base.

Das leituras feitas numa mesma estação obtiveram-se variações em torno de 10 a 15 gamas, mostrando com isso uma pequena margem de erro. Isto significa que os dados são confiáveis.

O equipamento usado para o levantamento magnetométrico na área foi o magnetômetro GP-70, campo total, precessão protônica, construído pela McPhar Geophysics Company. Este instrumento é dotado de uma precisão de 1 gama (γ).

Os dados obtidos estão apresentados tanto na forma de perfis, como na forma de mapa de contorno de isogamas, com intervalo de contorno de 500 gamas.

As interpretações foram feitas tanto qualitativa como quantitativamente. A interpretação qualitativa foi feita através de uma análise dos dados apresentados na forma de perfis e mapa de isogamas, correlacionando suas características com as estruturas geológicas da área e usando também as curvas teóricas calculadas através do método de Talwani e Heirtzler (1964). Esta interpretação foi realizada visando definir, posicionar e correlacionar as diversas fontes de anomalias. A interpretação semiquantitativa baseou-se no trabalho de Koulomzine et al. (1970). Este modelo considera que os corpos anômalos tenham a forma de diques de dimensões infinitas em profundidade e comprimento. Somente o perfil 350 W do corpo foi interpretado semiquantitativamente, porque é o melhor definido e o que apresenta menos ruídos. Este perfil foi filtrado, usando-se o filtro de três pontos móveis, definido na equação 1.

Os parâmetros usados no modelo Koulomzine foram cal

culados da seguinte maneira:

- a) Determinou-se o ponto zero, no eixo das abcissas, que corresponde ao centro do corpo anômalo, a partir de alguns pontos da curva suavizada 350 W (Fig. 10).
- b) Localizou-se o "datum" magnético usando o ponto calculado em (a).
- c) Decompôs-se a curva em seus componentes.

$$S(x) = \frac{\Delta F(x) + \Delta F(-x)}{2} \quad (2)$$

$$A(x) = \frac{\Delta F(x) - \Delta F(-x)}{2} \quad (3)$$

onde $S(x)$ e $A(x)$ são os componentes simétricos e assimétricos, respectivamente (Figura 11). $\Delta F(x)$ e $\Delta F(-x)$ representam os valores da anomalia em cada ponto, nas direções positiva e negativa, respectivamente.

- d) Duas profundidades independentes puderam ser calculadas: uma a partir da componente simétrica, e a outra a partir da componente assimétrica, pelas equações:

$$h = \frac{x_{1/2} (\Phi)^2 - 1}{2} \quad (4)$$

$$h = \frac{2 x_e (1-\mu)}{2} \quad (5)$$

onde,

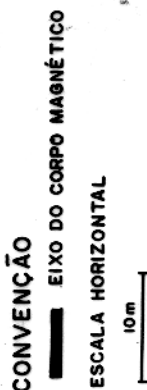


FIG.10 - PERFIL MAGNÉTICO SUAVIZADO, LINHA 350W. (ÁREA MMI, ALVO1, CORPO2)

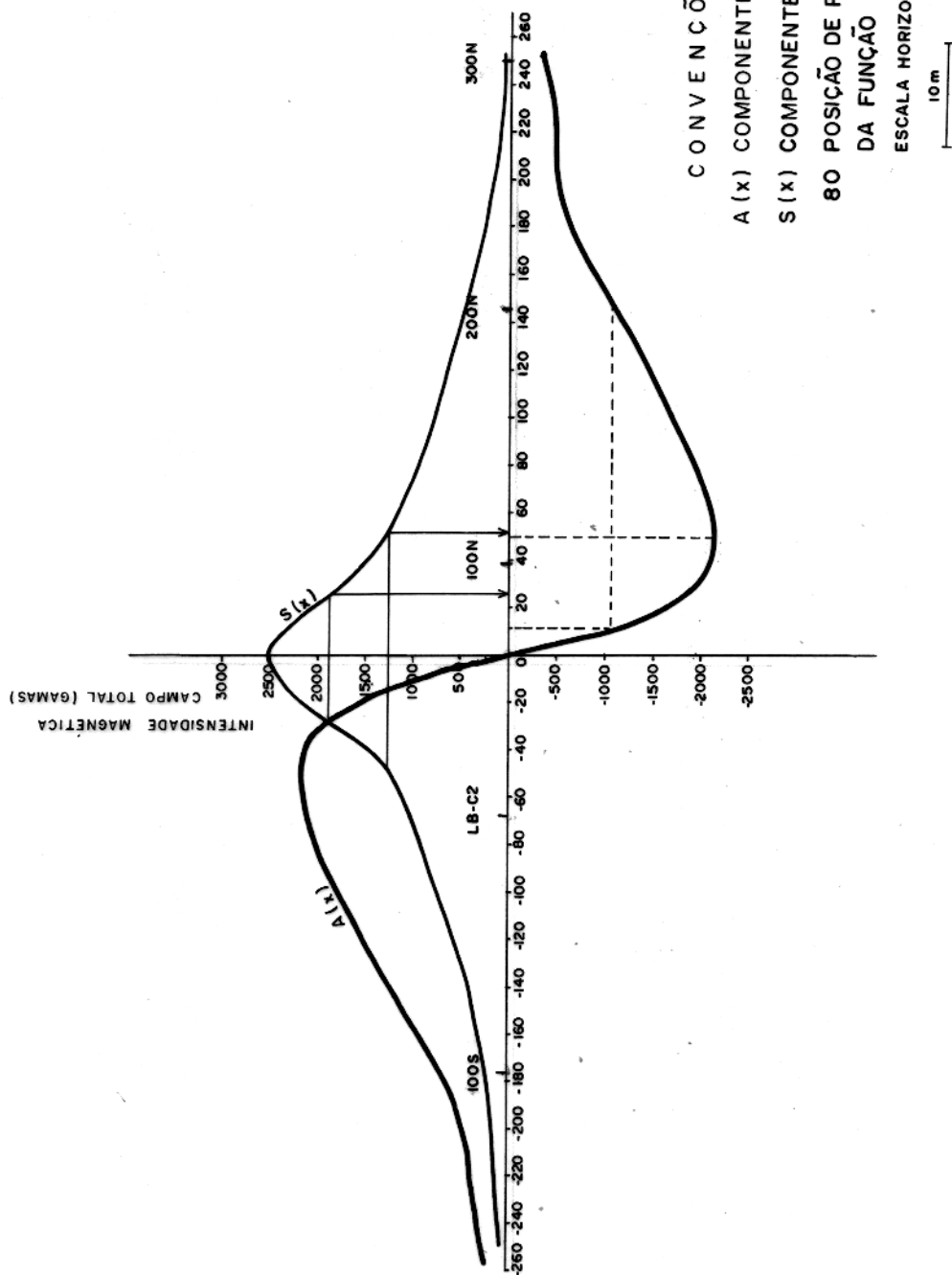


FIG. 11 - COMPONENTES SIMÉTRICA E ASSIMÉTRICA DA CURVA SUAVIZADA, 350W,
ÁREA MM1, CORPO 2.

- $x_{1/2}$ - distância horizontal da origem até um ponto sobre a curva, quando a amplitude é a metade da máxima.
- x - distância horizontal da origem até um ponto sobre a curva quando a amplitude é $3/4$ da máxima.
- Φ - razão entre $x_{1/2}$ e $x_{3/4}$
- x_e - distância horizontal desde a origem até o ponto em que $A(x)$ adquire seu valor máximo.
- μ - razão entre x_e e $x_{1/2}$

O mergulho e espessura também podem ser calculados se o corpo apresenta magnetização uniforme e limites bem definidos.

3.3. Análise e Interpretação dos Dados

3.3.1. Interpretação Magnética Sobre a Malha de Reconhecimento (ALVO 1).

Na figura 12, sob a forma de perfis, estão apresentados os dados do levantamento magnético sobre a malha de reconhecimento. Nestes perfis observam-se anomalias associadas à formação ferrífera (concentrações de magnetita), intercaladas no anfibólio-biotita-xisto, que ocorre na área. A faixa fortemente anômala está localizada dentro do xisto, mais próxima do limite norte, e se estende na porção central da área com direção NW. As anomalias tornam-se mais fracas e menores de este para oeste, de modo que a faixa anômala se estreita, concordando com a área de ocorrência dos anfibólio-biotita-xistos. Algumas anomalias de menor expressão são encontradas na parte leste da área.

Foi feita uma interpretação qualitativa usando-se curvas-modelo de tipo Talwani e Heirtzler (1964), como foi dito no item anterior, visando posicionar o eixo do corpo magnético. De acordo com este modelo, para uma inclinação de campo geomagnético de 10° , mergulho do corpo de 60° NE e corpos de dimensões infinitas

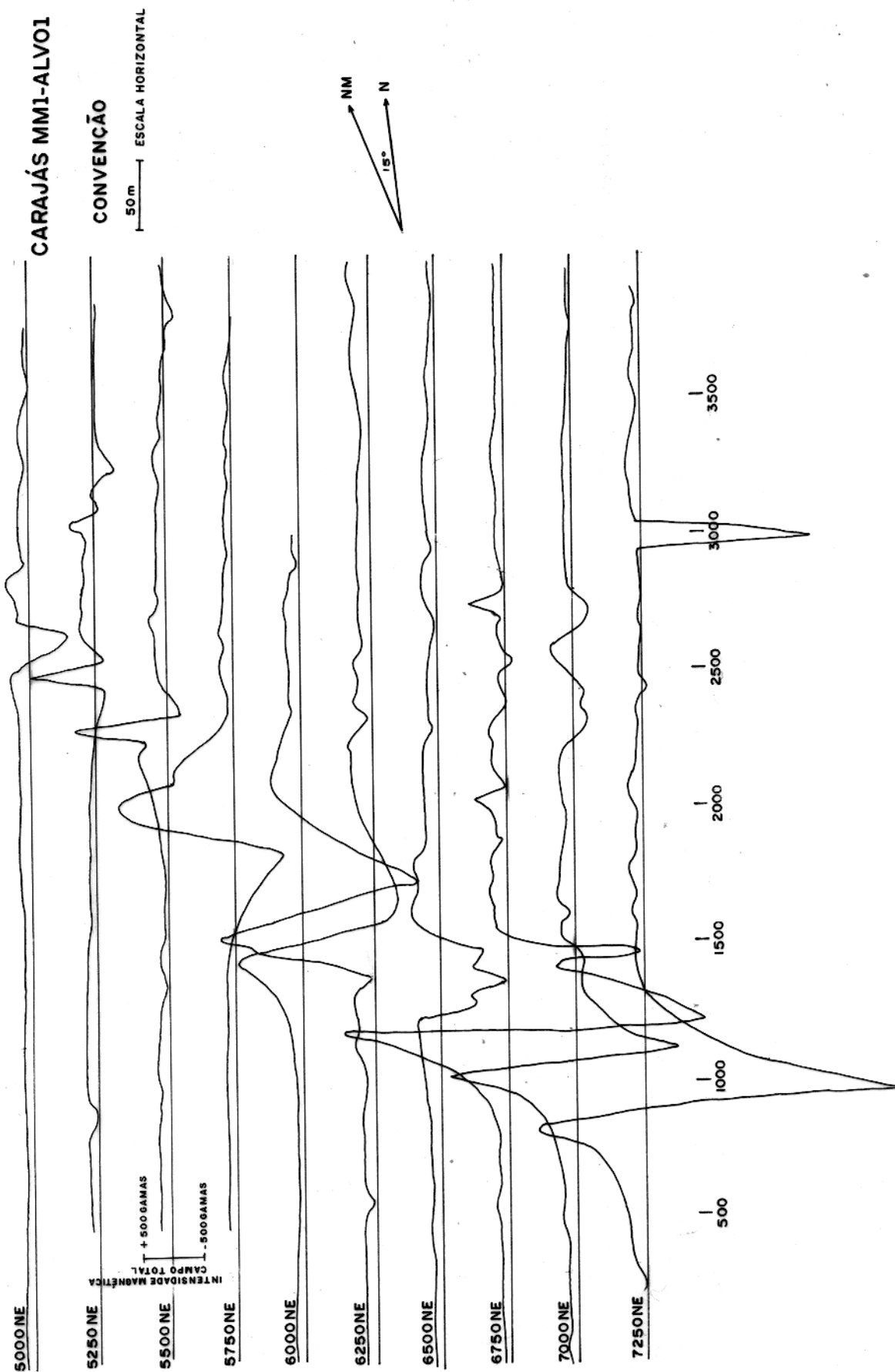


FIG. 12 - PERFIS MAGNÉTICOS, CAMPO TOTAL, DA ÁREA MM1, ALVO 1.

em profundidade e largura, o eixo do corpo localiza-se mais ou menos entre o mínimo e o ponto médio. Os resultados desta interpretação estão apresentados no Anexo 7. Desta interpretação, é possível inferir que a anomalia magnética é provocada por um corpo que apresenta deslocamento devido à falha de direção NE.

3.3.2. Interpretação Magnética sobre a Malha de Detalhe (Corpo 2).

Nas figuras 13 e 14 estão apresentados os resultados do levantamento na forma de perfis e mapa de contorno de isogamas. A partir dos perfis, observam-se anomalias localizadas próximo à linha-base, conforme posicionamento no anexo 8. Como foi dito na seção anterior, estas anomalias estão associadas à formação ferrífera intercalada no anfibólio-biotita-xisto.

No mapa de isogamas, observaram-se três zonas anômalas bem definidas, interrompidas e deslocadas entre si por zonas de falhas entre as linhas 250 W e 150 W e as linhas 100 E e 00. Estas anomalias apresentam um lineamento aproximadamente paralelo ao "strike" dominante do xisto e suas formas sugerem corpos tabulares. A zona anômala I, localizada entre 250 W e 750 W, apresenta linhas de contornos de isogamas variando desde -2500 gamas até +3000 gamas, com referência à estação-base de magnetometria. Também se observa nesta zona, uma região de gradiente forte a oeste da linha 450 W, sugerindo provável falhamento ou outra zona de menor expressão magnética.

As zonas anômalas II e III apresentam contornos desde -4000 gamas até 1500 gamas. Observa-se que a amplitude das anomalias destas zonas é 1000 gamas menor que a amplitude da zona I. Esta diferença é possivelmente provocada por alguns dos seguintes fatores:

- a) Maior concentração de minerais magnéticos a oeste da linha 250 W.
- b) Geometria do corpo, bem como mudança no mergulho.

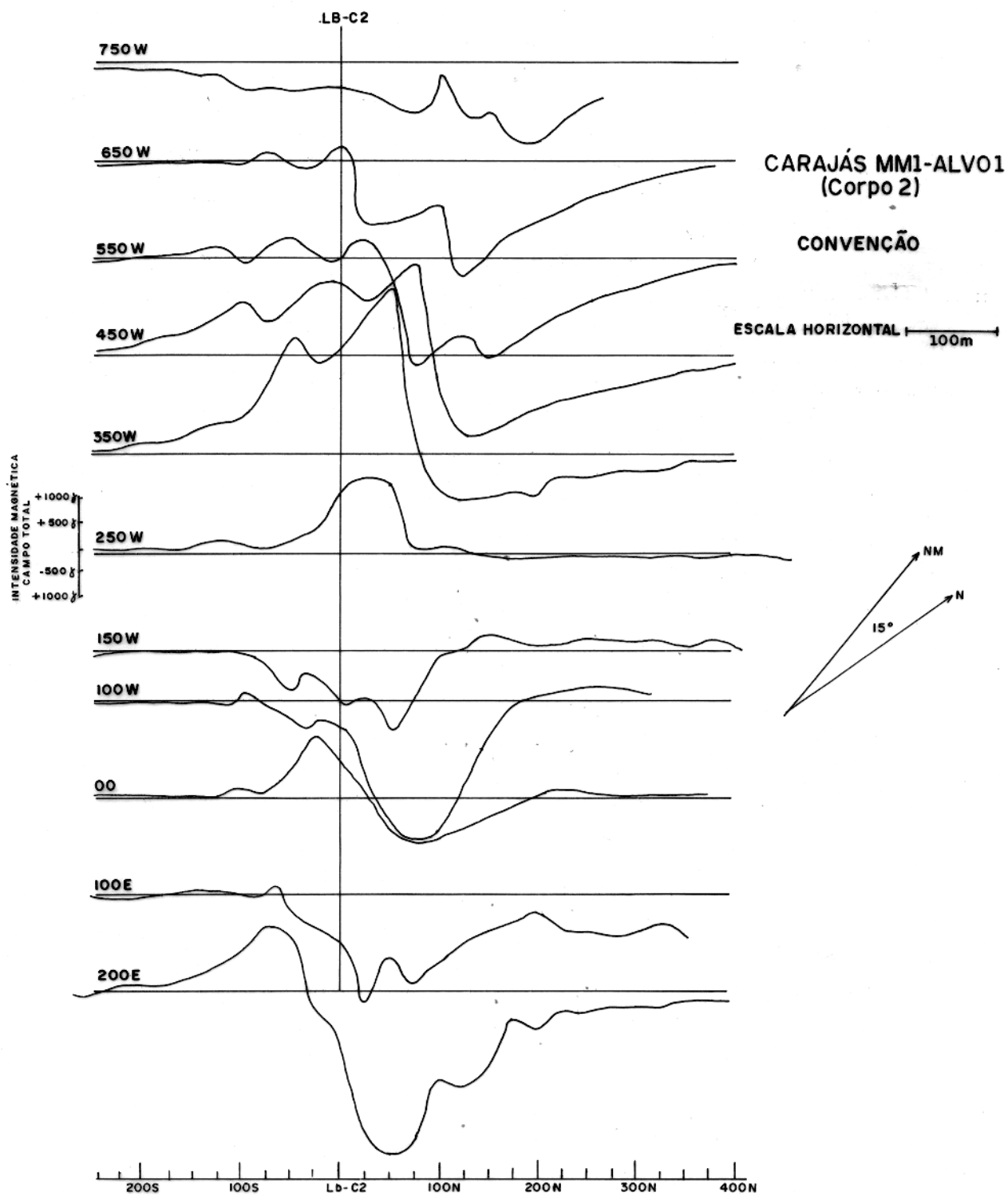


FIG. 13- PERFIS MAGNÉTICOS, CAMPO TOTAL, DA ÁREA MM1,
ALVO 1, CORPO 2.

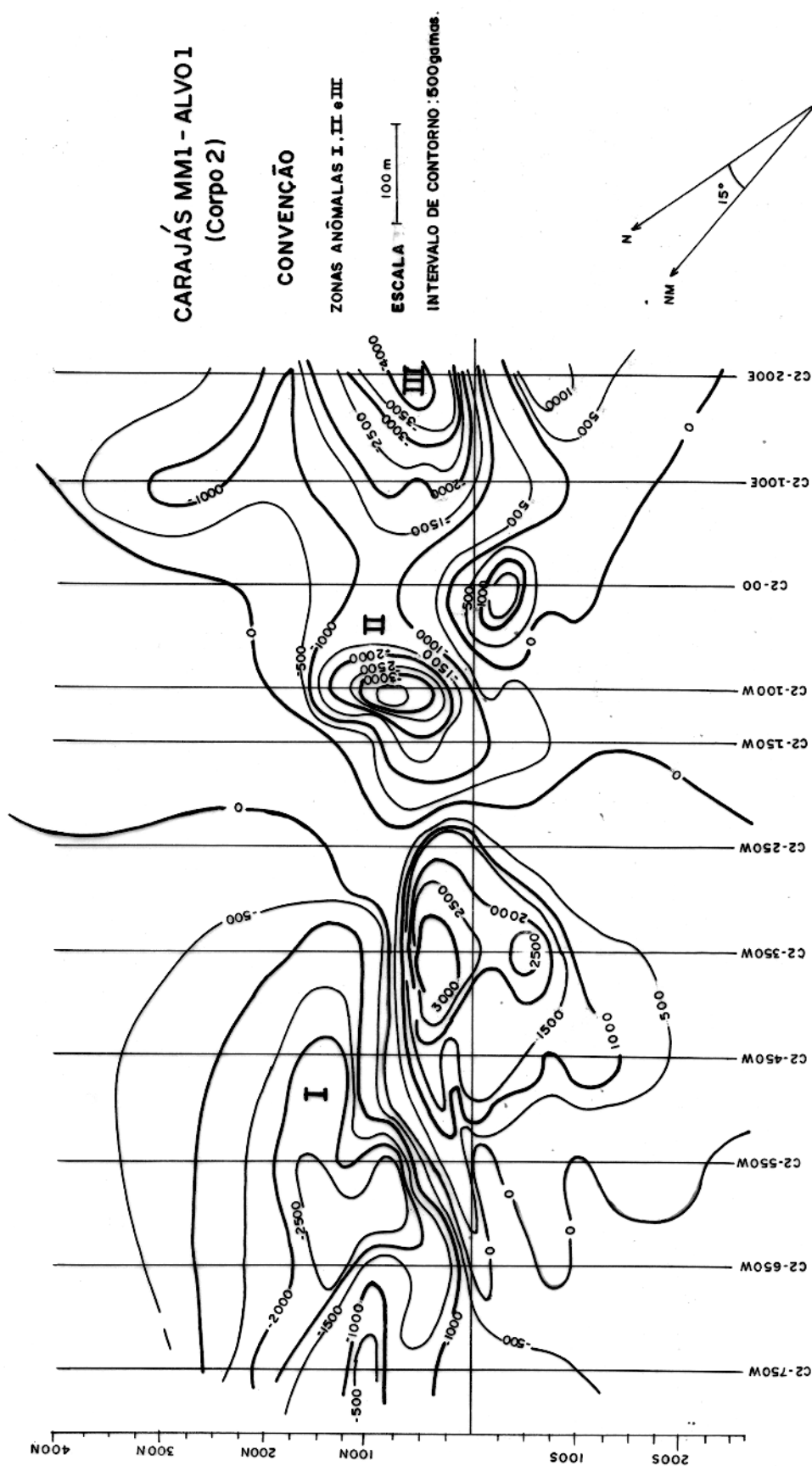


FIG. 14 - MAPA MAGNÉTICO DA ÁREA MM1, ALVO 1, CORPO 2.

Além das zonas anômalas principais observadas no mapa de isogamas e nos perfis, observam-se três faixas anômalas de menor expressão dentro do anfibólio-biotita-xisto. Uma delas se estende desde 100 E até 150 W ao sul da linha-base; a outra se estende desde 350 W até 650 W ao sul da linha-base; a terceira, entre 450 W e 650 W, ao norte da linha-base. Estas anomalias são provocadas possivelmente por corpos de pequenas dimensões e/ou baixa concentração magnética.

A interpretação qualitativa usando as curvas-modelo mencionadas, mostra que o eixo do corpo magnético principal ocorre ao norte, próximo à linha-base (Ver anexo 8).

Os resultados e parâmetros da interpretação semiquantitativa do perfil suavizado 350 W (Figura 10), usando a técnica de Koulomzine et al. (1970), estão apresentados na tabela 3. De acordo com a tabela, observa-se que a profundidade calculada a partir da componente par $S(x)$ e componente ímpar $A(x)$ é de 78 m e 61 m, respectivamente. Para esta interpretação, é provável que 70 m seja um valor representativo da profundidade. Não foi possível calcular o mergulho e espessura do corpo, porque o cálculo destes parâmetros exige valores de Φ e μ menores do que $\sqrt{3}$ e $(2+\sqrt{3})$, respectivamente, no modelo de Koulomzine et al. (1970). Segundo este modelo, para valores de Φ e μ maiores, pode-se inferir que o campo magnético não tem distribuição uniforme de magnetização.

Tanto a interpretação qualitativa, usando curvas-modelo, como a interpretação semiquantitativa empregadas neste trabalho não são inteiramente válidas, já que estes modelos representam corpos uniformemente magnetizados, bem definidos e bidimensionais. Isto certamente não é a situação na área de trabalho. Os resultados obtidos a partir destas interpretações representam somente uma primeira aproximação. Isto explica provavelmente a discordância entre a profundidade calculada e a observação no campo de corpos magnéticos quase aflorantes.

PARÂMETROS	RESULTADOS OBTIDOS
SMAX = 2500 gamas Amax = 2150 gamas	Profundidade calculada a partir de S(x) - 78m
$X_{1/2} = 52\text{ m}$ $X_{3/4} = 26\text{ m}$ $X_{9/12} = 12\text{ m}$ $\Phi = 2.00$ $\mu = 4.16$	Profundidade calculada a partir de A(x) - 61m W (espessura) - Indeterminada α (mêrgulho) - Indeterminado

TABELA 3 - PARÂMETROS CALCULADOS E RESULTADOS OBTIDOS DA INTERPRETAÇÃO SEMI-QUANTITATIVA DE MAGNETOMETRIA, LINHA 350 W, ÁREA MM1, ALVO1, CORPO2.

CAPÍTULO 4

POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE

4.1. Revisão de Conceitos

Polarização elétrica induzida (IP) é um método de prospecção, usado com bastante êxito na exploração de minerais metálicos básicos, e, em menor grau, na exploração de água subterrânea.

Dois efeitos de polarização podem ser considerados: eletrodo e membrana. A polarização de eletrodo ou sobrevoltagem está ligada à variação entre a condutividade iônica e eletrônica nos poros e fraturas das rochas, onde ocorrem minerais metálicos e soluções eletrolíticas. A presença destes minerais e de um campo elétrico externo, resulta na formação de uma dupla camada elétrica com um acúmulo de íons nas interfaces sólido-líquido (Marshall e Madden, 1959). A conversão de condução iônica à eletrônica, requer uma reação química em ambas as interfaces. Se o íon ganha um elétron, o processo constitui uma redução; se perde um elétron, o processo constitui uma oxidação (Keller e Frischknecht, 1966). Quando se interrompe a corrente, a voltagem residual decai, enquanto os íons voltam à sua posição de equilíbrio original.

Alguns minerais metálicos que apresentam efeito de polarização são: sulfetos metálicos (exceto esfalerita), grafita, óxidos, como magnetita e pirolusita, metais nativos e outros minerais portadores de brilho metálico. Em geral, minerais metálicos disseminados dão forte contribuição à polarização induzida.

A magnitude da polarização de eletrodo depende da corrente externa e de certas características do meio, tais como: concentração de minerais, porosidade da rocha, conteúdo de fluido na rocha, permeabilidade do fluido, geometria dos poros, tamanho dos grãos do mineral e salinidade do fluido (Telford et al., 1976).

A polarização de membrana é superficial como a polari

zação de eletrodo, porém não ocorre reação química na interface sólido-líquido. Este fenômeno ocorre com muitos minerais, especialmente as argilas, uma vez que apresentam carga negativa na interface sólido-líquido. O potencial resultante, chamado potencial zeta, atrai íons positivos próximos à superfície, enquanto os íons negativos são repelidos (Madden e Cantwell, 1967). Esta concentração de carga positiva, pode estender-se a uma distância de até 100 Å (Madden e Cantwell, 1967). Se a ordem de grandeza da largura dos poros é também 100 Å, íons negativos se acumulam a um lado quando uma diferença de potencial é aplicada (Telford et al., 1976).

O efeito de polarização elétrica induzida é medido tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. No domínio do tempo, consiste em injetar corrente no solo e medir o decaimento de voltagem com o tempo quando a corrente enviada é interrompida. A expressão do efeito de IP seria dada pela relação V_e/V_o , onde V_e é a diferença de potencial estabilizada e V_o é a tensão medida no momento de interrupção.

Alguns instrumentos integram V_t durante um intervalo $t=t_2-t_1$. Obtem-se então, a cargabilidade (M):

$$M = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V(t) dt}{V_e} \quad (6)$$

No domínio da frequência, estuda-se a variação de impedância em função da frequência da corrente. Esta variação denomina-se efeito de frequência. O efeito percentual de frequência (EPF) é dado por:

$$EPF = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \times 100 \quad (7)$$

sendo: ρ_1 - a resistividade quando a frequência da corrente é baixa.

ρ_2 - a resistividade quando a frequência da corrente é alta.

Um outro parâmetro utilizado em polarização induzida é o fator metálico (FM). Este parâmetro é usado para enfatizar o conteúdo de metálicos principalmente quando o corpo é condutor e apresenta pouco valor de EPF. O fator metálico é dado por:

$$FM = \frac{2\pi \times 10^3 \text{ EPF}}{\rho_1} \quad (8)$$

Como os domínios do tempo e frequência estão relacionados entre si pela transformada de Fourier, as informações do domínio de frequência podem ser obtidas, aproximadamente, pelas informações no domínio do tempo e vice-versa.

Algumas das configurações de eletrodos normalmente usadas num levantamento de polarização induzida são: dipolo-dipolo, polo-dipolo, Wenner, Schlumberger.

O levantamento de polarização induzida é afetada por ruídos telúricos e acoplamento eletromagnético. O ruído telúrico afeta as medidas feitas no domínio do tempo, enquanto que no domínio da frequência, as medidas são afetadas por acoplamento eletromagnético. O acoplamento eletromagnético dá-se nas circunstâncias em que os circuitos do transmissor e receptor se comportam como o embobinamento primário e secundário de um transformador elétrico (Summer, 1976).

Outras formas de ruídos são: acoplamento resistivo, capacitivo e ruídos culturais.

As vantagens do método IP são:

- a) É o melhor método geofísico utilizado na exploração de sulfetos disseminados. Pode detectar regiões com pequena quantidade de minerais metálicos.
- b) É útil na exploração de sulfetos maciços, especialmente em algumas zonas, onde o método eletromagnético

co não deteta anomalia.

As limitações do método são as seguintes:

- a) O método é relativamente caro e lento.
- b) É difícil transportar o equipamento em regiões aci-
dentadas.
- c) O sulfeto pirita e a grafita dão boas anomalias de IP.
- d) Existem poucos modelos de interpretação quantitativa.

4.2. Metodologia de Trabalho

O método polarização induzida foi aplicado sobre as a nomalias geoquímicas das malhas ALVO 1 e CORPO 2, em várias oca siões entre julho de 1977 e setembro de 1978. Não foi possível a plicá-lo sobre toda a área pelas dificuldades no transporte do e quipamento em uma região tão acidentada e, ainda, por ser este um método relativamente lento.

No levantamento, usou-se a configuração de eletrodos dipolo-dipolo, com espaçamento entre os eletrodos de 50 m, exceto nas linhas 6250 NE e 6500 NE onde se usou $a=60$ m. A separação en tre eletrodos de corrente e eletrodos receptores é designada gene ricamente por "na", onde n varia de 1 a 5. Esta configuração foi preferida por ser simétrica e por permitir boas resolução e pene tração. Admite-se que com o espaçamento $a=50$ m e os valores maio res de n, é provável que a profundidade de investigação seja sufi ciente para atingir a rocha fresca nesta área. Foram usados oito eletrodos de corrente (papel de alumínio) para cada posição de Tx, enterrados a uma profundidade de aproximadamente 25 cm. Um dia an tes do trabalho, era adicionada água salgada aos buracos que conti nham os eletrodos, buscando assegurar que a resistência do contato fosse a menor possível. Para o receptor foram utilizados eletrodos não polarizáveis, contendo uma solução saturada de sulfato de co bre. Estes eletrodos foram mantidos em conexão elétrica entre si

e colocados na solução acima mencionada pelo menos doze horas antes de iniciar o trabalho. Com isto objetivou-se manter cada eletrodo aproximadamente com o mesmo potencial.

Antes de iniciar a tomada das medidas, foram tomadas as seguintes precauções:

- a) Assegurar que os fios transmissores estivessem separados o máximo possível entre si para diminuir o acoplamento eletromagnético.
- b) Assegurar que a resistência para cada par de eletrodos de corrente fosse menor que 1.500 ohms (Ω). Nas estações que apresentavam maior resistência de contato, foi adicionada uma maior quantidade de água salgada.
- c) Calibrar cada par de eletrodos de corrente. Os resultados obtidos com esta calibração foram usados para correção dos dados de campo.

As leituras foram feitas deslocando-se o receptor (Rx) ao longo da linha de picada, enquanto o transmissor permaneceu fixo numa estação-base. Um dos eletrodos receptores foi mantido a uma distância de 50 metros na frente do Rx, enquanto que o outro foi deslocado junto do Rx. Para cada posição do Rx foi enviada corrente para vários pares de eletrodos de corrente e, conseqüentemente, várias separações (na). Foram necessários pelo menos dois rádios ("Walkietalkie") para manter o contato entre os operadores do transmissor e do receptor. Alguns pontos foram repetidos, trocando-se os eletrodos de corrente pelos eletrodos de potencial, o que significa uma aplicação do princípio da reciprocidade (Kunetz, 1966).

O equipamento utilizado para realizar o levantamento foram os modelos 650 e 660 construídos pela McPhar Geophysics Company.

Esses modelos constam de:

- a) Transmissor que transforma e retifica a saída do gerador, e envia correntes simultaneamente nas fre

quências 0.3125 Hz e 5 Hz para o terreno, através dos eletrodos de correntes.

- b) Receptor Rx, que separa os dois sinais e apresenta as diferenças de amplitude em percentagem.
- c) Motor-gerador, com uma frequência de saída de aproximadamente 400 c.p.s. e voltagem de 127 V.

Os dados de campo foram corrigidos, para diminuir possíveis efeitos de polarização, provocados pelas interações entre os eletrodos de corrente e o polo. Esta correção foi feita usando-se os resultados obtidos na calibração dos pares de eletrodos de corrente.

A resistividade aparente foi calculada a partir das leituras de Tx e Rx, da maneira exigida para este sistema 650, e convertido para $\Omega.m$, e para o sistema 660, usando-se a equação

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (9)$$

onde ΔV é a diferença de potencial medida no dipolo receptor; I , a corrente injetada; e K , fator geométrico que depende do arranjo entre os eletrodos.

O fator metálico foi calculado a partir da equação 7.

Os dados de polarização elétrica induzida/ resistividade de estão apresentados em forma de pseudo-seção para cinco níveis. O intervalo de contorno de EPF é de 1%, enquanto que para resistividade aparente e fator metálico foram usados intervalos logarítmicos.

A repetição de medidas do EPF mostrou que a margem de erro não ultrapassou 5%. Em vista disso, os dados foram considerados bastante confiáveis.

4.3. Análise e Interpretação dos Dados

4.3.1. Análise e Interpretação sobre a Malha de Reconhecimento.

Os dados de polarização elétrica induzida/resistividade de obtidos sobre a malha de reconhecimento estão apresentados na forma de pseudo-seções (Figuras 15 a 23). Nesta malha, cada linha foi interpretada individualmente. Para melhor orientação na interpretação através do EPF considera-se entre 3% a 4% o "background" da área.

Os resultados vêm a seguir:

Linha 5250 NE (Fig. 15)

Nesta linha, observa-se uma anomalia com valores de EPF, variando entre 6% a 11%, numa faixa centrada entre 2410 e 2470 m. A forma desta anomalia é aproximadamente simétrica, sugerindo corpo simples com mergulho quase vertical. Além da anomalia principal, há também uma superficial, centrada entre 2650 e 2750 m, próxima do contato xisto-gnaiss. A anomalia EPF, com relação aos baixos valores de resistividade aparente, apresenta um deslocamento relativo.

Linha 5500 NE (Fig. 16)

A anomalia na linha 5500 NE é semelhante à da linha 5250 NE. Apresenta valores de EPF entre 6% a 11% e está centrada entre 2310 e 2375 m.

Também há uma anomalia superficial, entre as estações 2550 e 2625 m, próximo ao contato xisto-gnaiss. Pela semelhança entre as anomalias desta linha e a da linha 5250 NE, é possível que ambas tenham sido provocadas pelo mesmo corpo.

Linha 5750 NE (Fig. 17)

Os dados de EPF mostram um "chevron", invertido, característico de corpo simples, com mergulho vertical. Esta anomalia

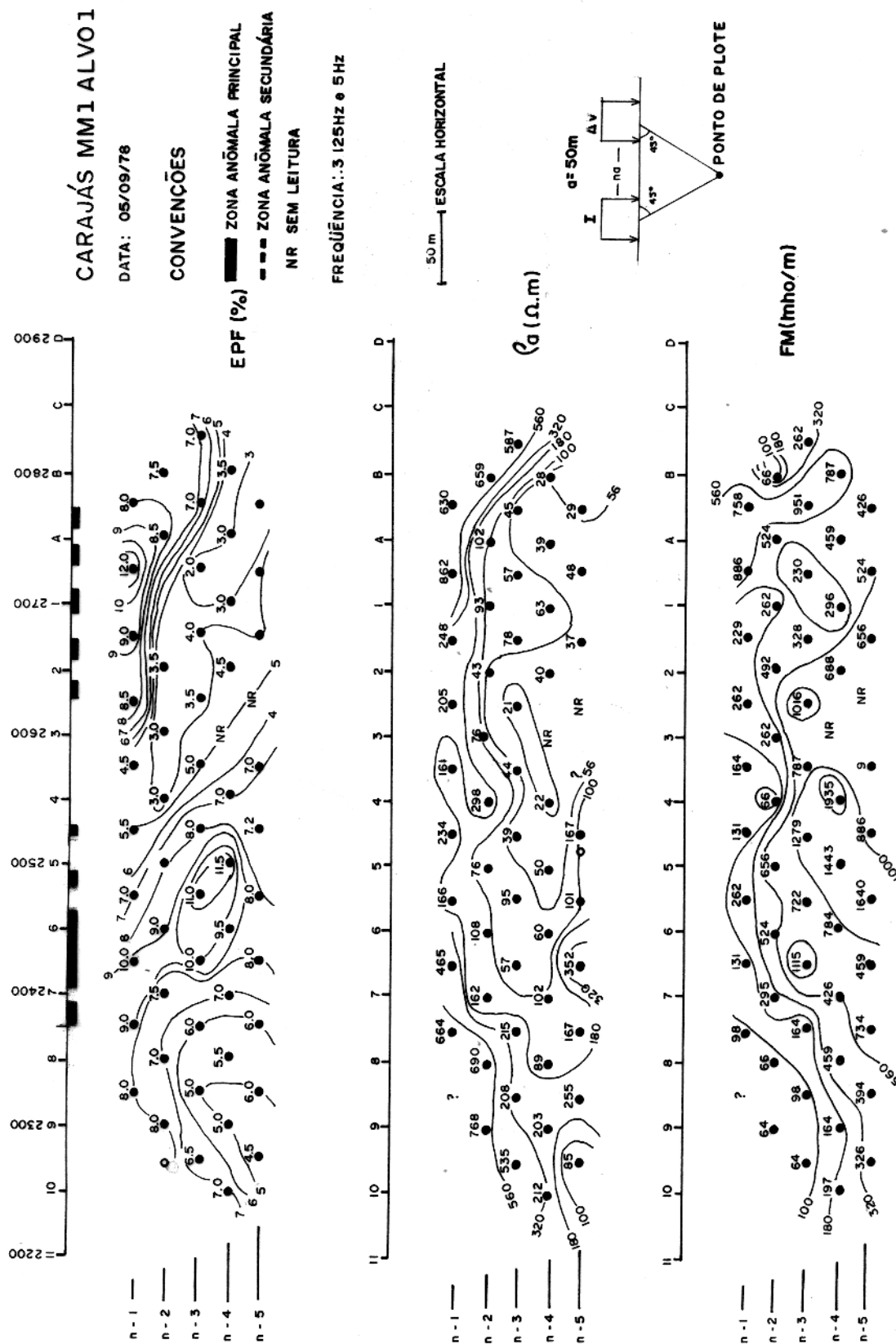


FIG. 15- LINHA 5250NE, PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE

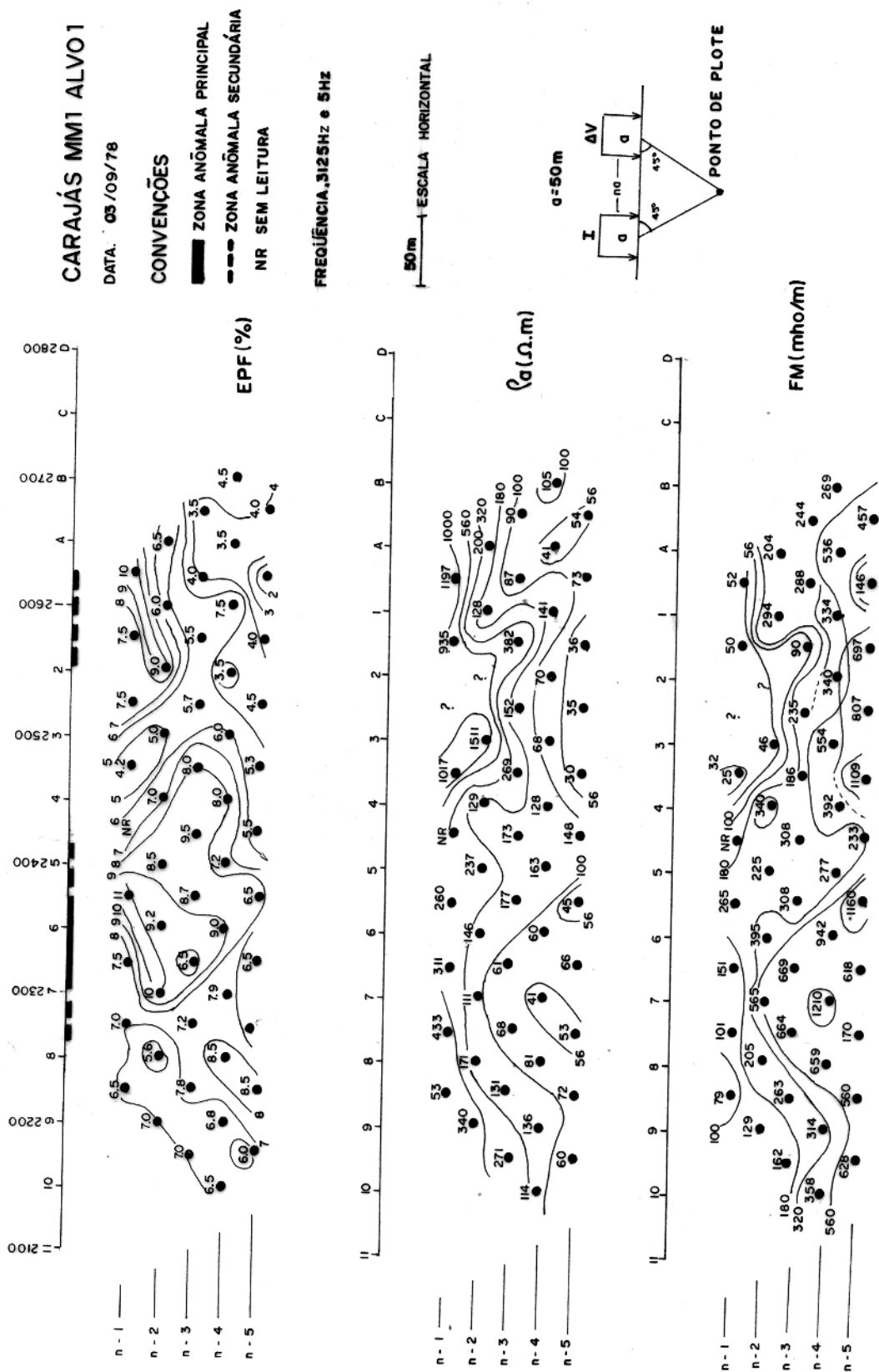


FIG. 16 - LINHA 5500NE, PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE.

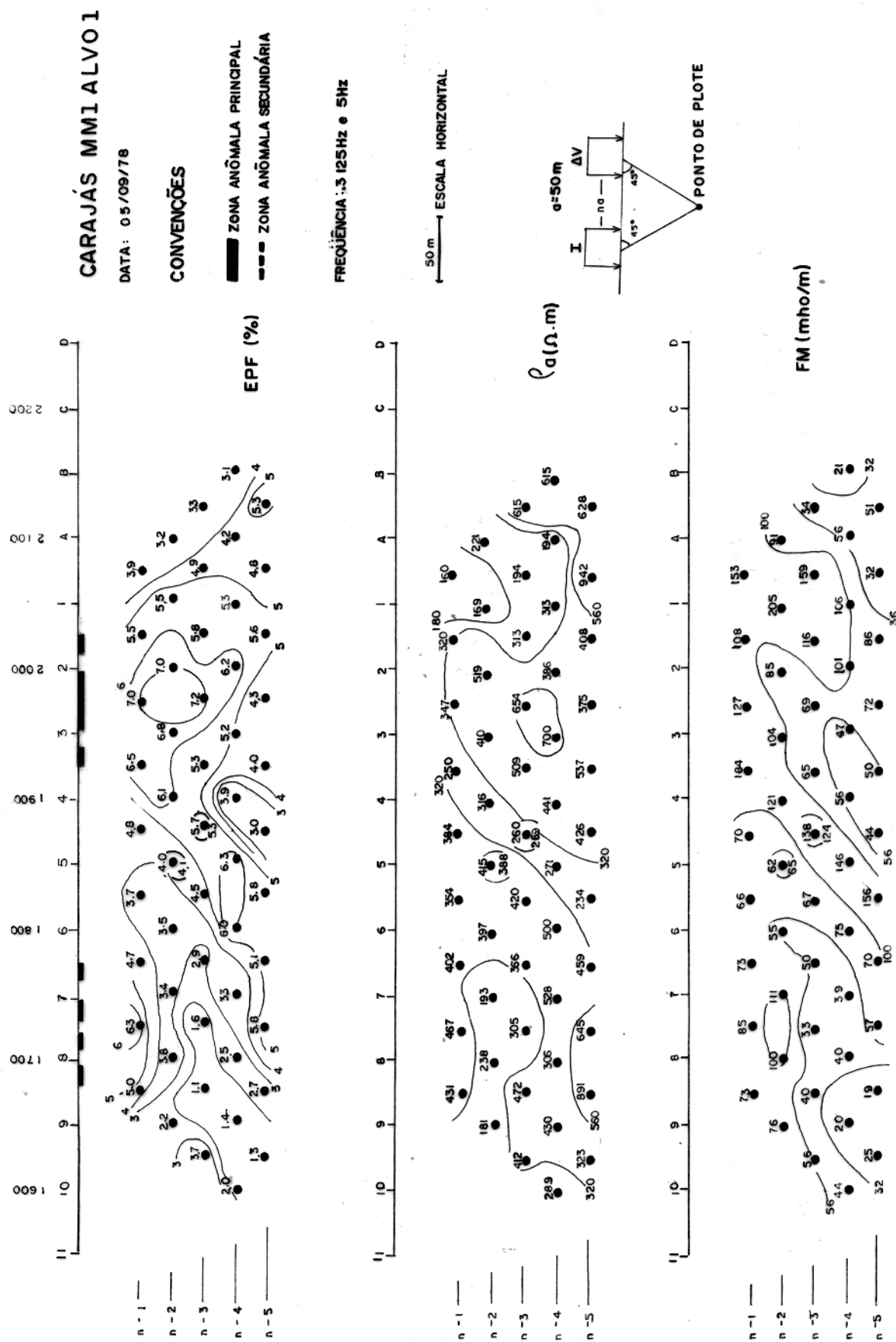


FIG. 17 - LINHA 5750NE, PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE.

apresenta valores de EPF máximo de 7% e está centrada entre 1950 e 2000 m. Também se observa uma anomalia rasa centrada em 1725 m. Esta anomalia possivelmente é provocada por uma zona de menor concentração de mineralização, ou por lentes de formação ferrífera as sociadas a sulfeto.

Linha 6000 NE (Fig. 18)

Na 6000 NE, observa-se uma anomalia bem acentuada entre as estações 2500 e 2600 m. Esta anomalia está associada a um corpo de xisto isolado do corpo principal e é diferente das outras observadas no xisto principal. A anomalia chega a atingir 20% de EPF. Esta anomalia provavelmente é provocada por sulfetos mais concentrados do que em qualquer zona nesta malha. Na mesma linha, observam-se duas anomalias superficiais, próximas ao contato xisto-gnaisses.

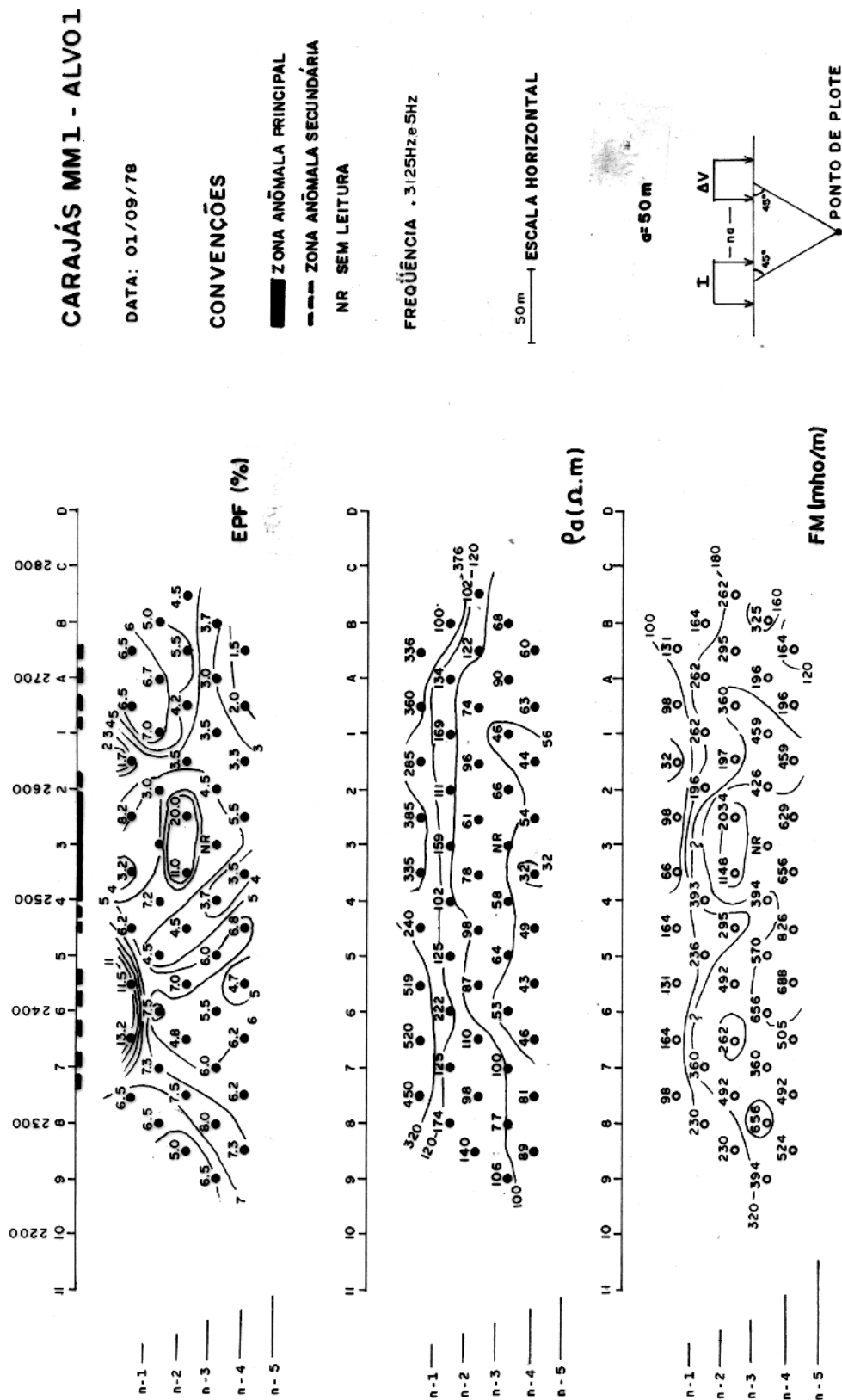
Não foi possível fazer medidas sobre o corpo de xisto principal, devido à alta resistência de contato que este apresenta, dificultando a penetração de corrente no solo.

Linha 6250 NE (Fig. 19)

Apresenta anomalia com EPF máximo de 10%, centrada em 1490 m e limitada em ambos os lados. O corpo é, possivelmente, mais raso em 1490 m. Existe outra anomalia mais profunda entre 1250 m e 1160 m, que sugere uma zona de baixo teor, abaixo da zona principal.

Linha 6500 NE (Fig. 20)

A 6500 NE, apresenta uma anomalia de IP com valor máxiimo de EPF de 9.5%. A anomalia está centrada em 1380 m. Esta anomalia parece mais rasa e melhor definida que na linha 6250 NE. Além da anomalia principal 1, há outra de profundidade maior localizada entre 1140 m e 1200 m.



CARAJÁS MMI ALVOI

DATA 24/08/77

CONVENÇÕES

■ ZONA ANÔMALA PRINCIPAL
 --- ZONA ANÔMALA SECUNDÁRIA
 NR SEM LEITURA

FREQÜÊNCIA 3125 Hz e 5 Hz

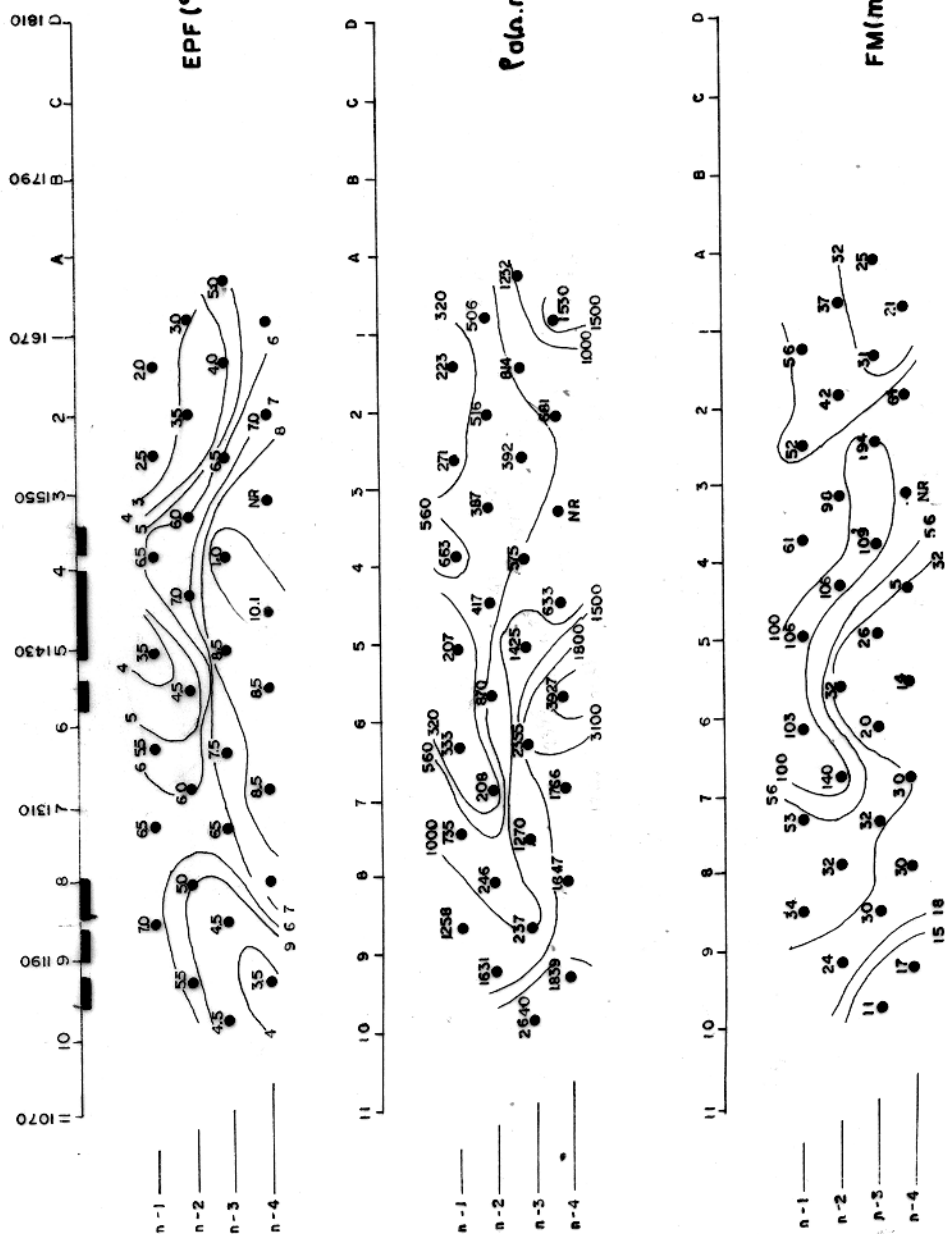


FIG. 19 - LINHA 6250NE. PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE.

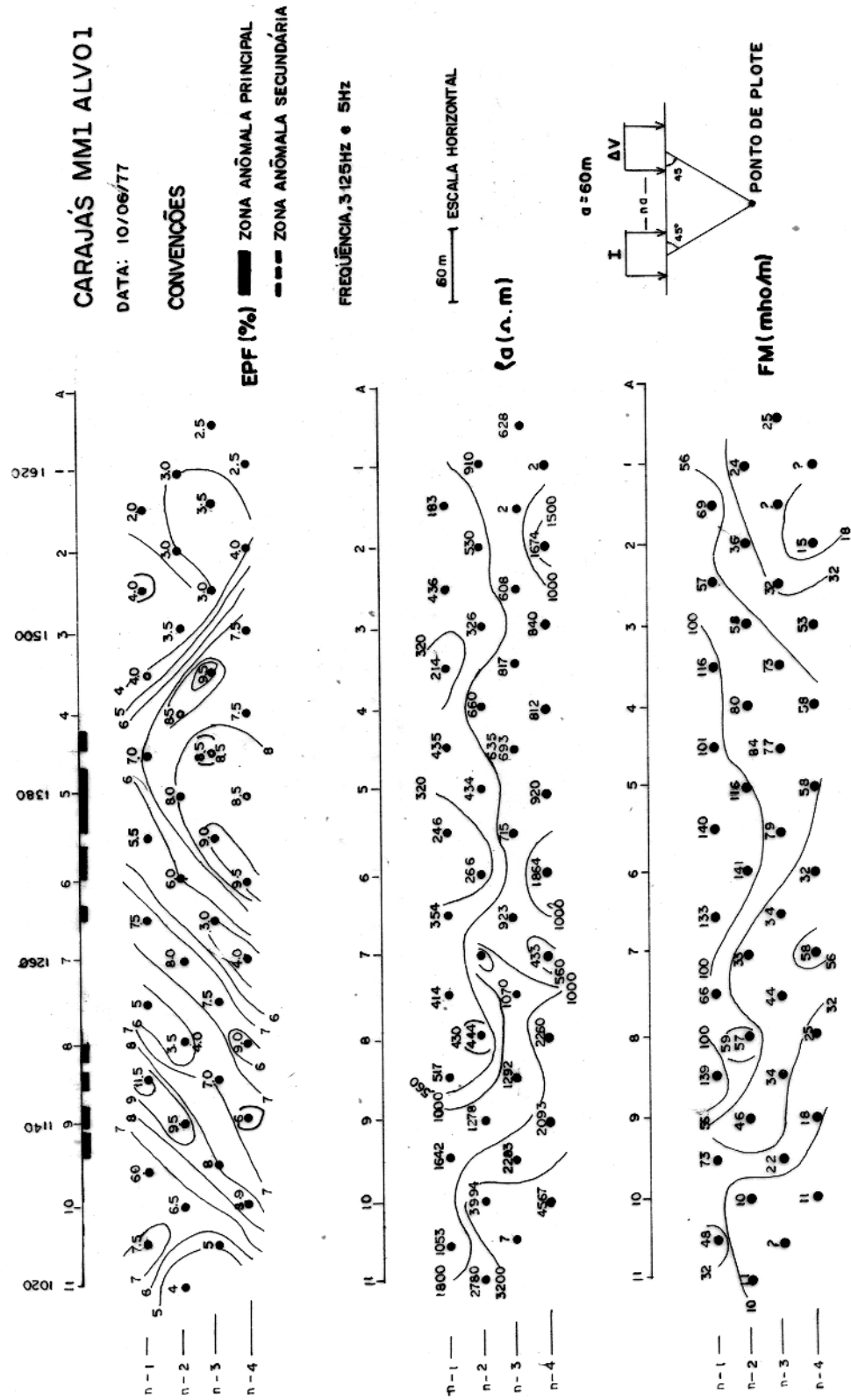


FIG.20 - LINHA 6500NE. PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE

Linha 6750 NE (Fig. 21)

Nesta linha, observa-se anomalia com valores máximos de EPF variando entre 9 a 10%. Esta anomalia não está bem definida. O "chevron" invertido começa a aparecer em 1250 m, no extremo sul do perfil, que corresponde ao início do xisto. A anomalia de EPF apresenta boa correlação com valores baixos de resistividade aparente. Próximo a 1250 m observa-se uma faixa bem estreita de valores de resistividade aparente. Esta faixa possivelmente marca o contato. Outra explicação para isto pode ser a existência de uma zona rica em quartzo ou simplesmente uma subunidade mais resistiva no xisto.

Linha 7000 NE (Fig. 22)

A anomalia em 7000 NE está centrada em 1500 m e apresenta valores máximos de EPF variando entre 8% a 10%. Esta anomalia apresenta correlação com a anomalia geoquímica, que está isolada dentro do metabasito.

Linha 7250 NE (Fig. 23)

Na linha 7250 NE há uma anomalia de EPF, com valores extremamente altos (17% a 19%) se comparadas com outras linhas. Esta anomalia está centrada entre 950 e 1010 m, próximo ao contato xisto-metabasito. É possível que esta anomalia seja provocada por uma zona de alta concentração de minerais magnéticos. Esta hipótese é bastante viável, porque, nesta zona, ocorre um bloco de formação ferrífera exposto pela construção de uma estrada.

Também se observa uma anomalia superficial entre 1210 e 1340 m.

4.3.2. Análise e Interpretação de Dados sobre a Malha de Detalhe (Corpo 2).

A interpretação dos dados de polarização elétrica indu

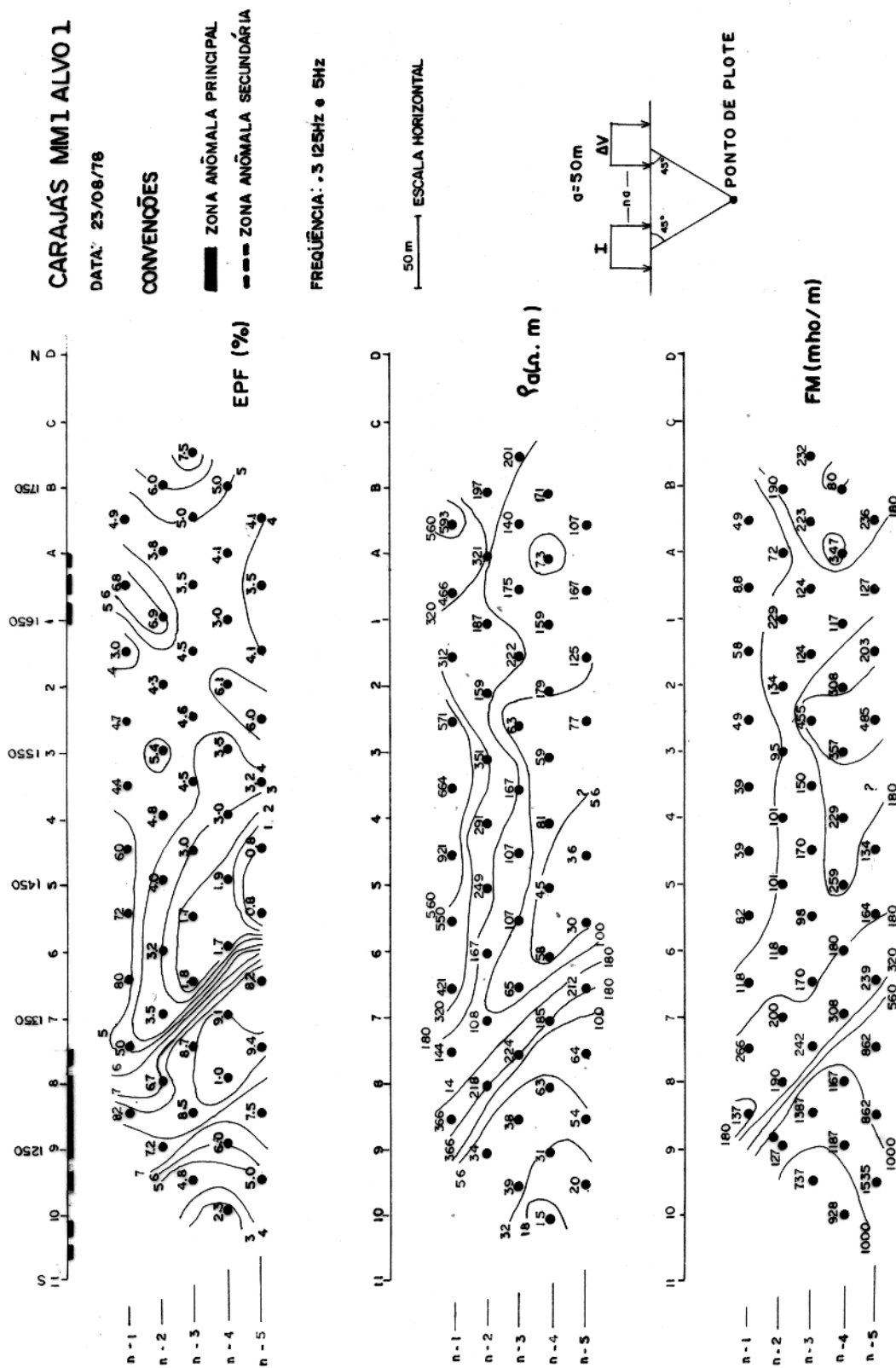
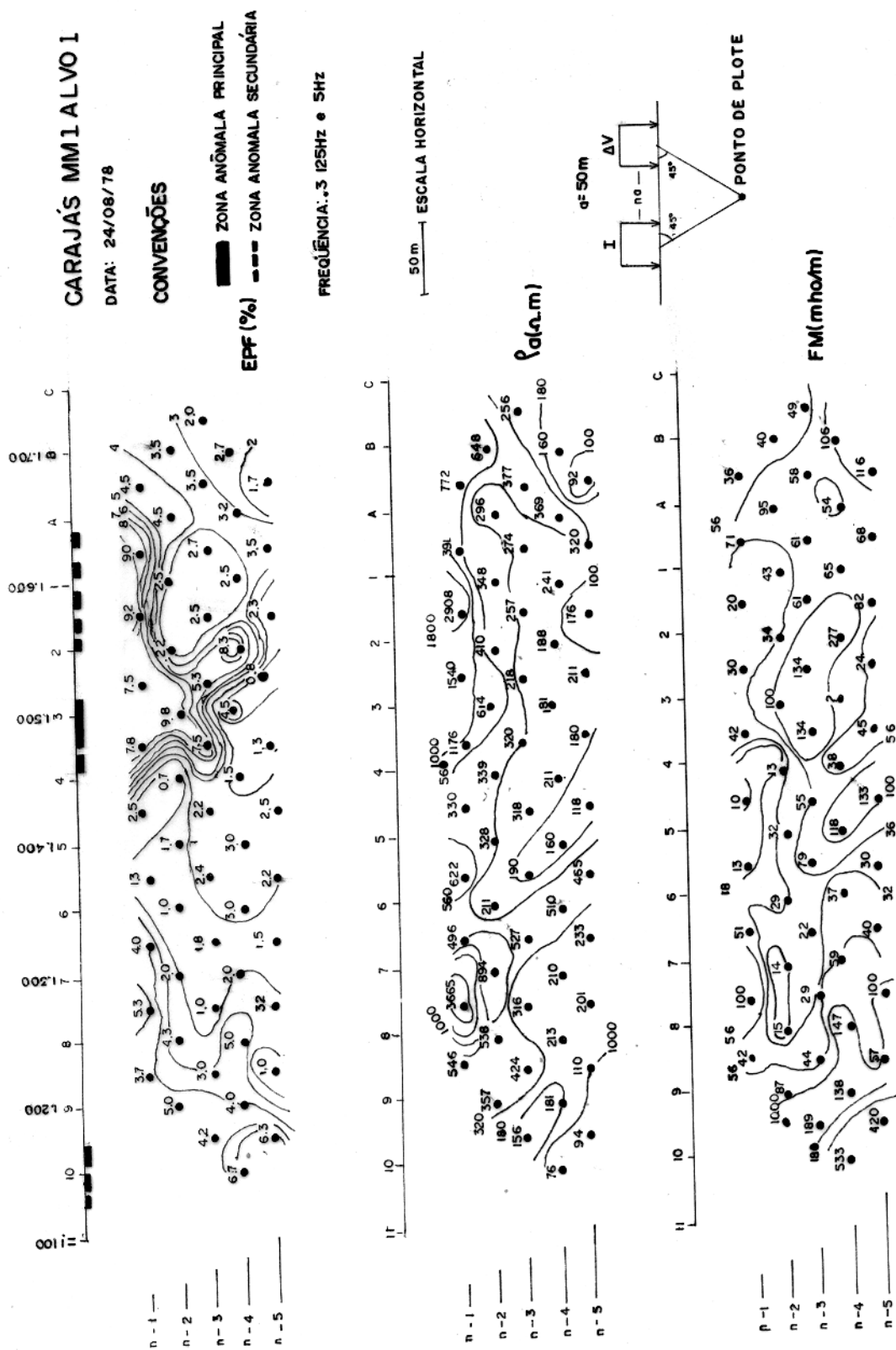


FIG.21 - LINHA 6750NE, PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE.



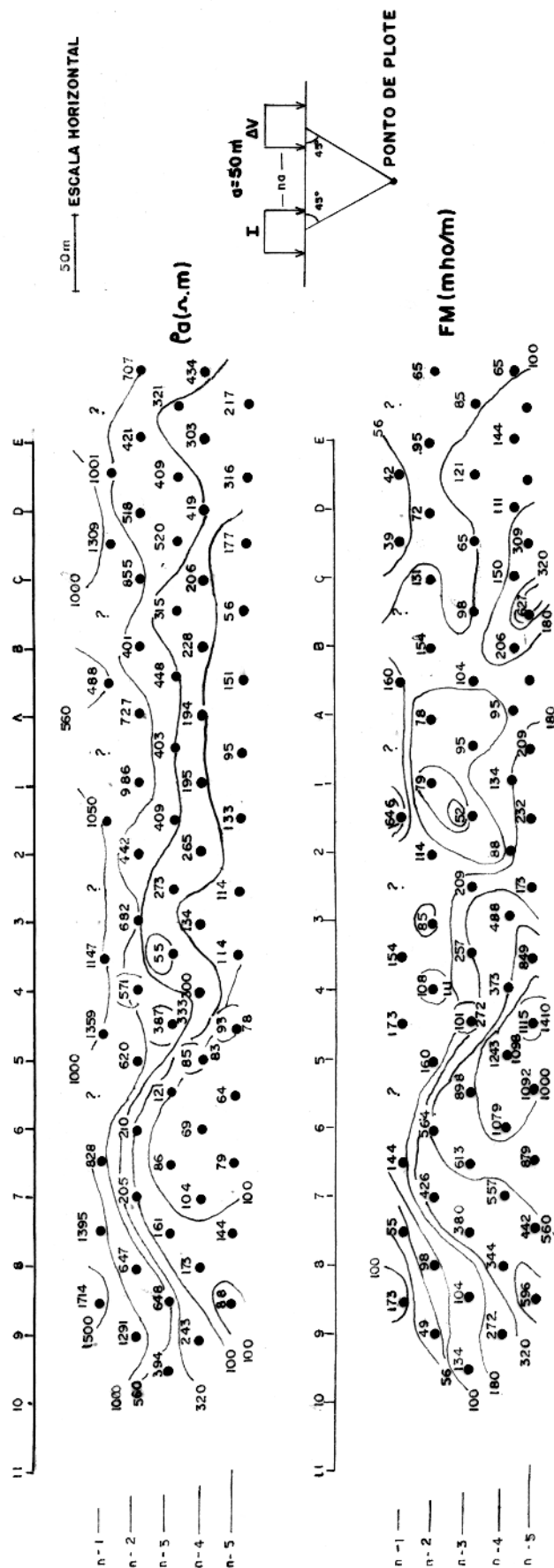
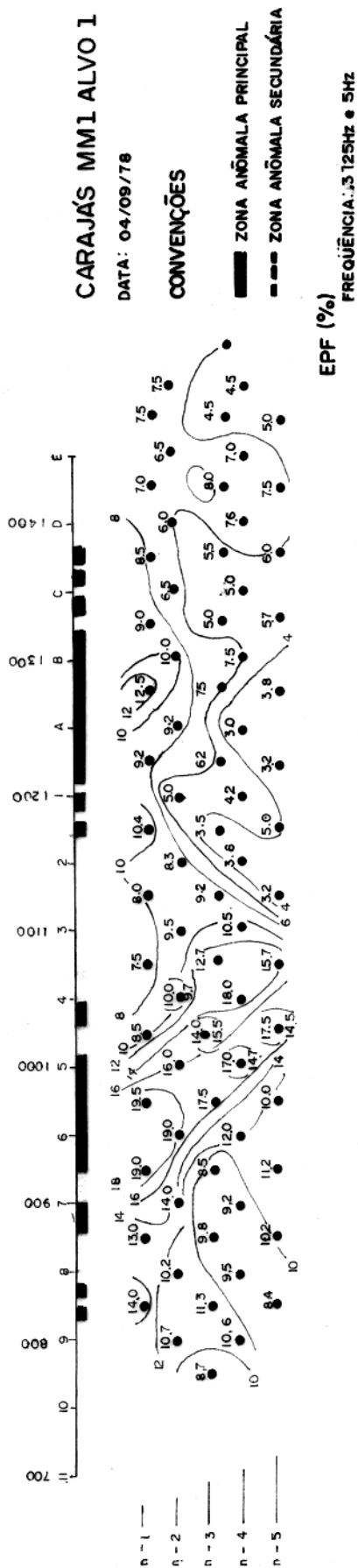


FIG. 23 - LINHA 7250 NE, PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA / RESISTIVIDADE.

zida/resistividade nesta malha é semelhante à feita na seção anterior, porém, algumas das linhas foram interpretadas juntas pela semelhança das anomalias que apresenta. Os resultados, vêm a seguir:

Linha 200 E, 100 E, 00, 100 W (Fig. 24, 25, 26, 27)

Estas linhas apresentam anomalias com semelhanças marcantes. As anomalias são bem definidas, apresentam EPF variando entre 6% a 12%, a exceção de alguns pontos, e estão centradas aproximadamente entre as estações 38 N. A forma das mesmas sugere corpos tabulares simples, com mergulho quase vertical. Há uma correlação entre a anomalia de EPF e os baixos valores de resistividade aparente. A semelhança das anomalias sugere uma continuidade geológica lateral.

Também nestas quatro linhas, observam-se anomalias superficiais entre 200 S e 100 S. Estas anomalias são, possivelmente, provocadas por uma zona de baixa concentração de sulfetos e/ou uma faixa de formação ferrífera dentro do biotita-xisto.

Linha 150 W (Fig. 28)

Na 150 W, observa-se uma anomalia profunda com EPF variando entre 6,5% e 10% e centrada entre 38 S e 38 N. Também se observa uma anomalia superficial, localizada da estação 95 N, a 125N.

Linha 250 W (Fig. 29)

Esta linha apresenta anomalia centrada entre as estações 25 S e 40 N. A forma desta anomalia é bem complexa. Tal complexidade, provavelmente, se deve ao fato de que esta linha corta a possível zona de falha, detectada pelos métodos magnético e AFMAG. Aqui não se apresentam as anomalias encontradas nas outras linhas.

Linha 350 W e 450 W (Fig. 30, 31)

Nestas duas linhas, observam-se duas zonas anômalas:

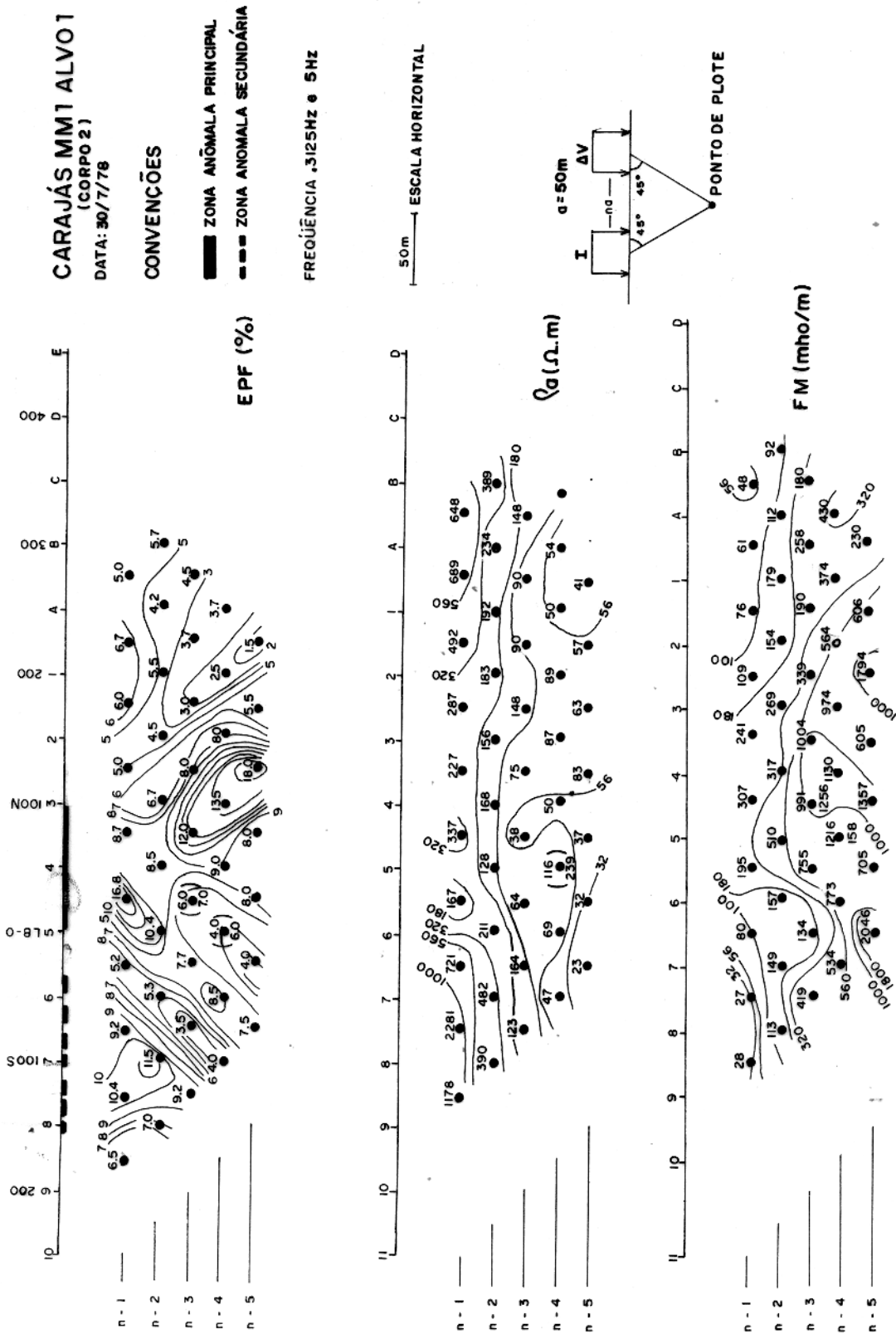


FIG. 24 - LINHA 200E, PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE.

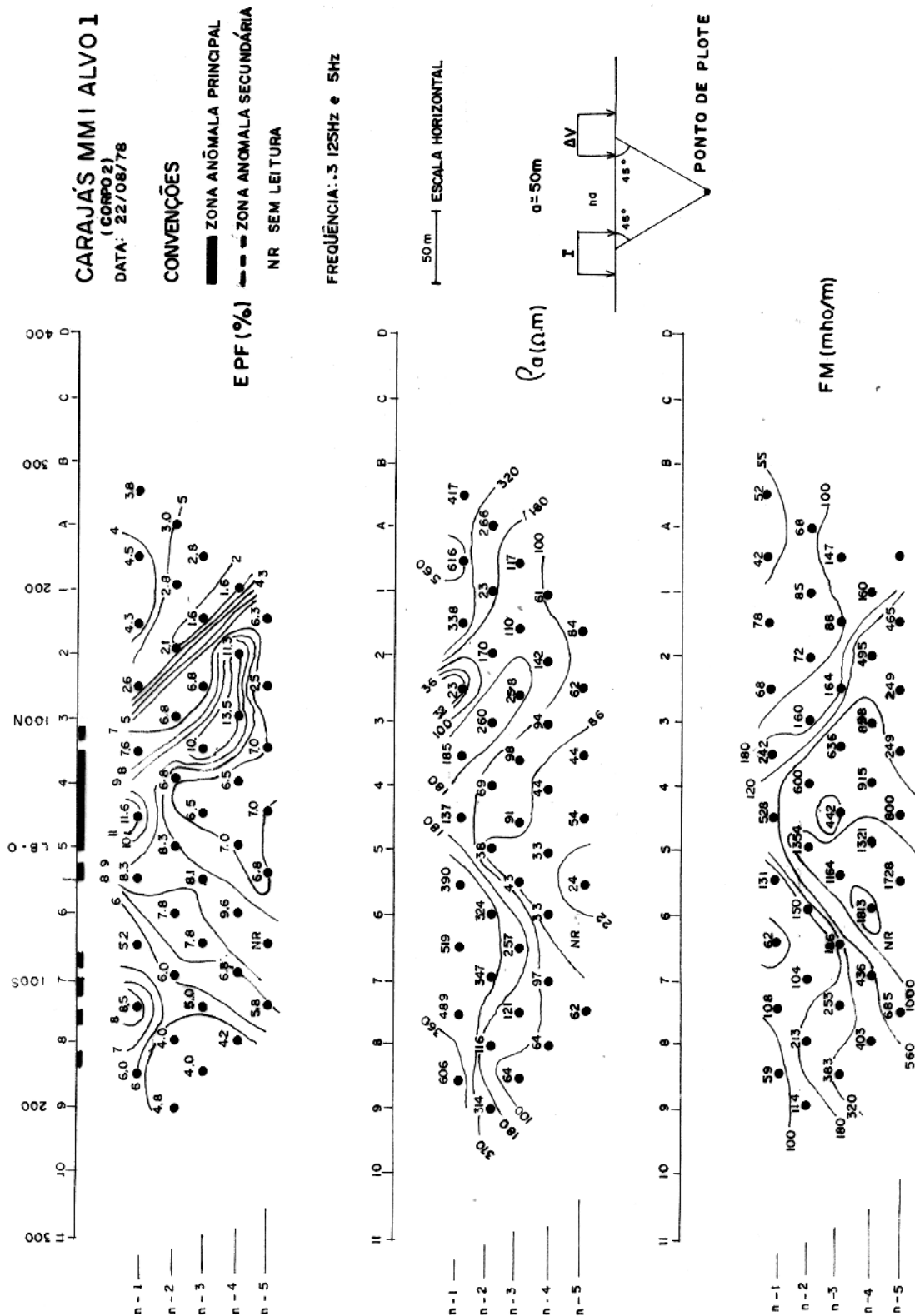
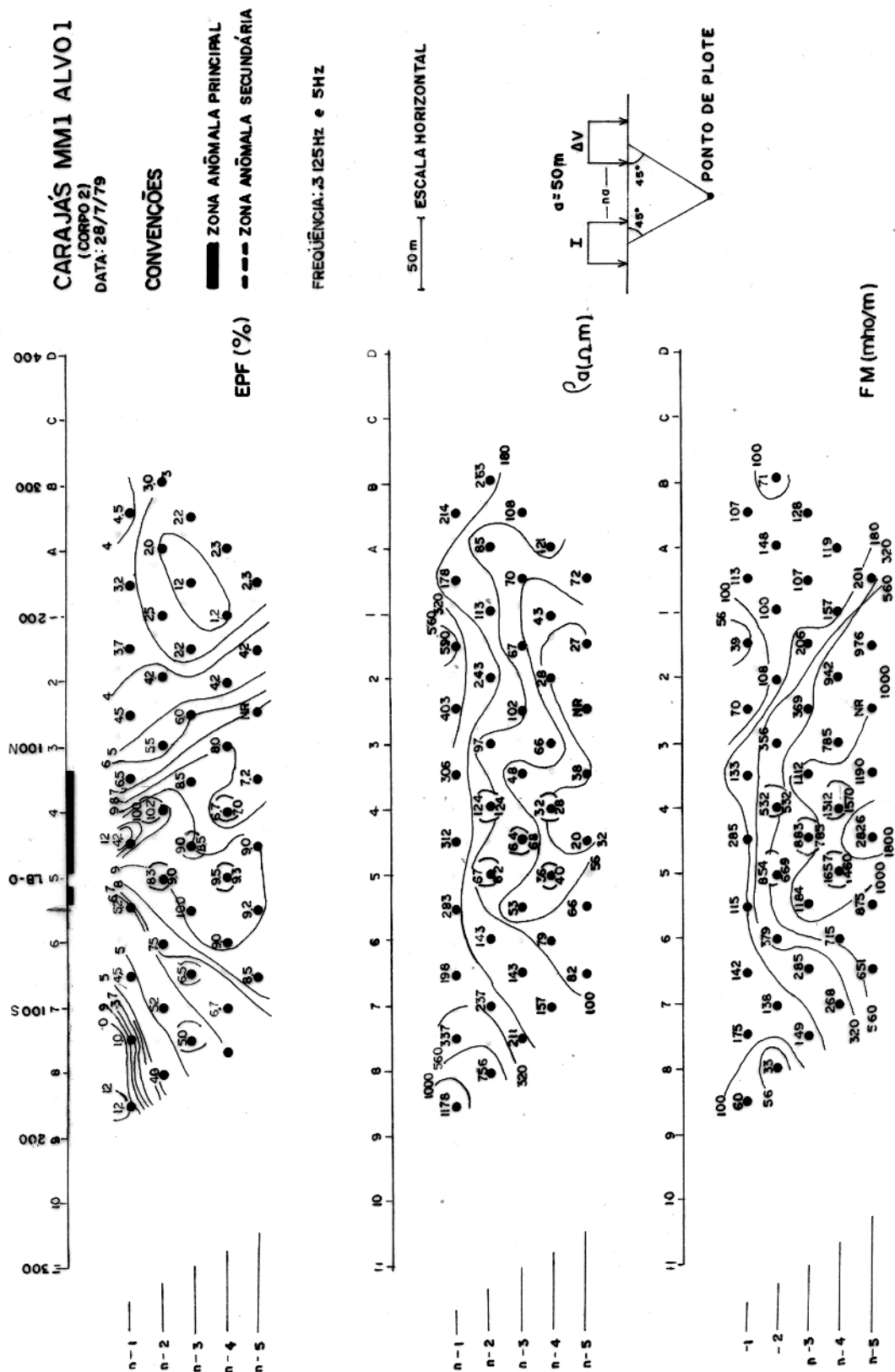


FIG. 25 - LINHA 100E, PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE.



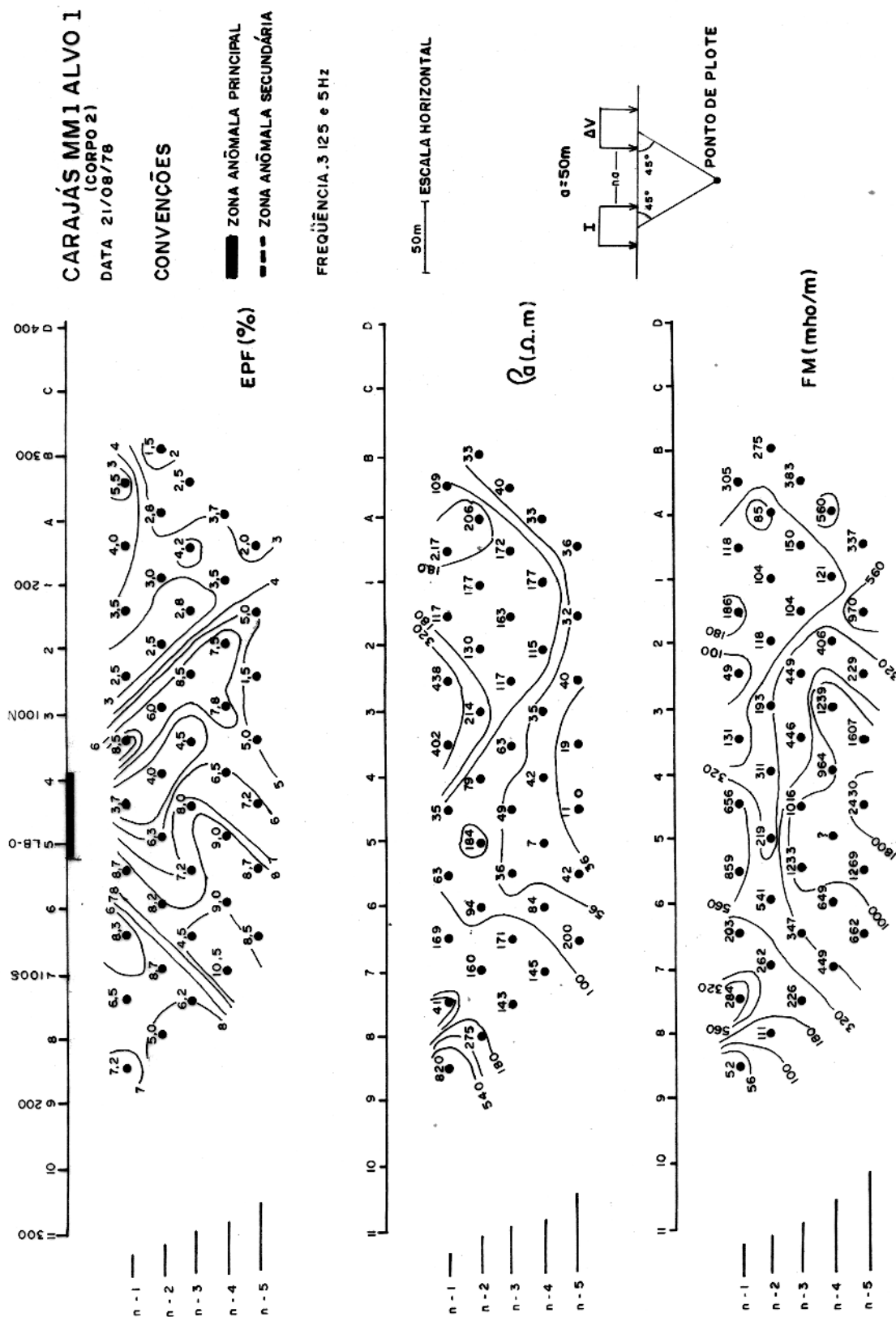


FIG.27 - LINHA 100W, PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE.

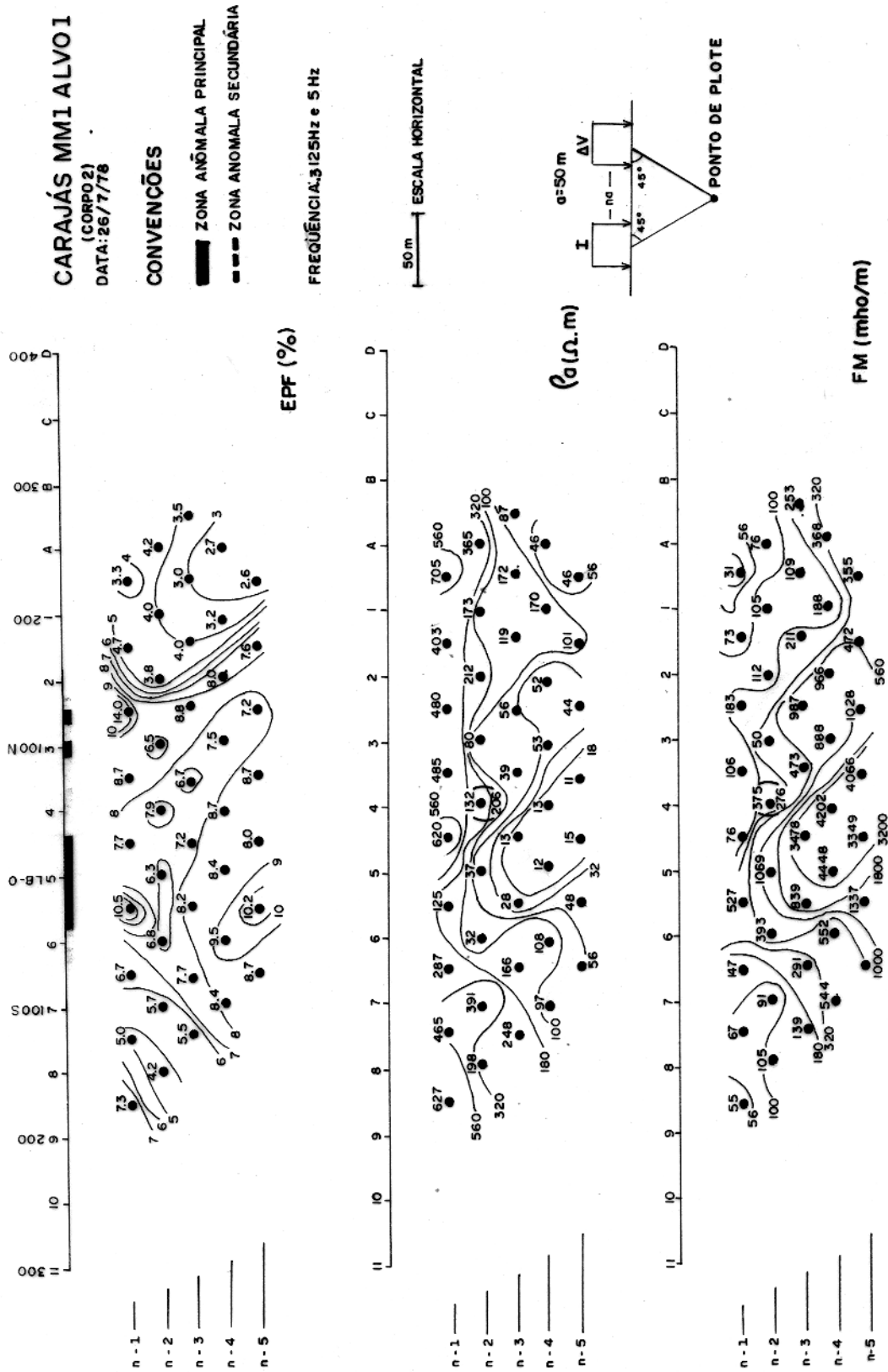


FIG. 28 - LINHA 150W, PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE.

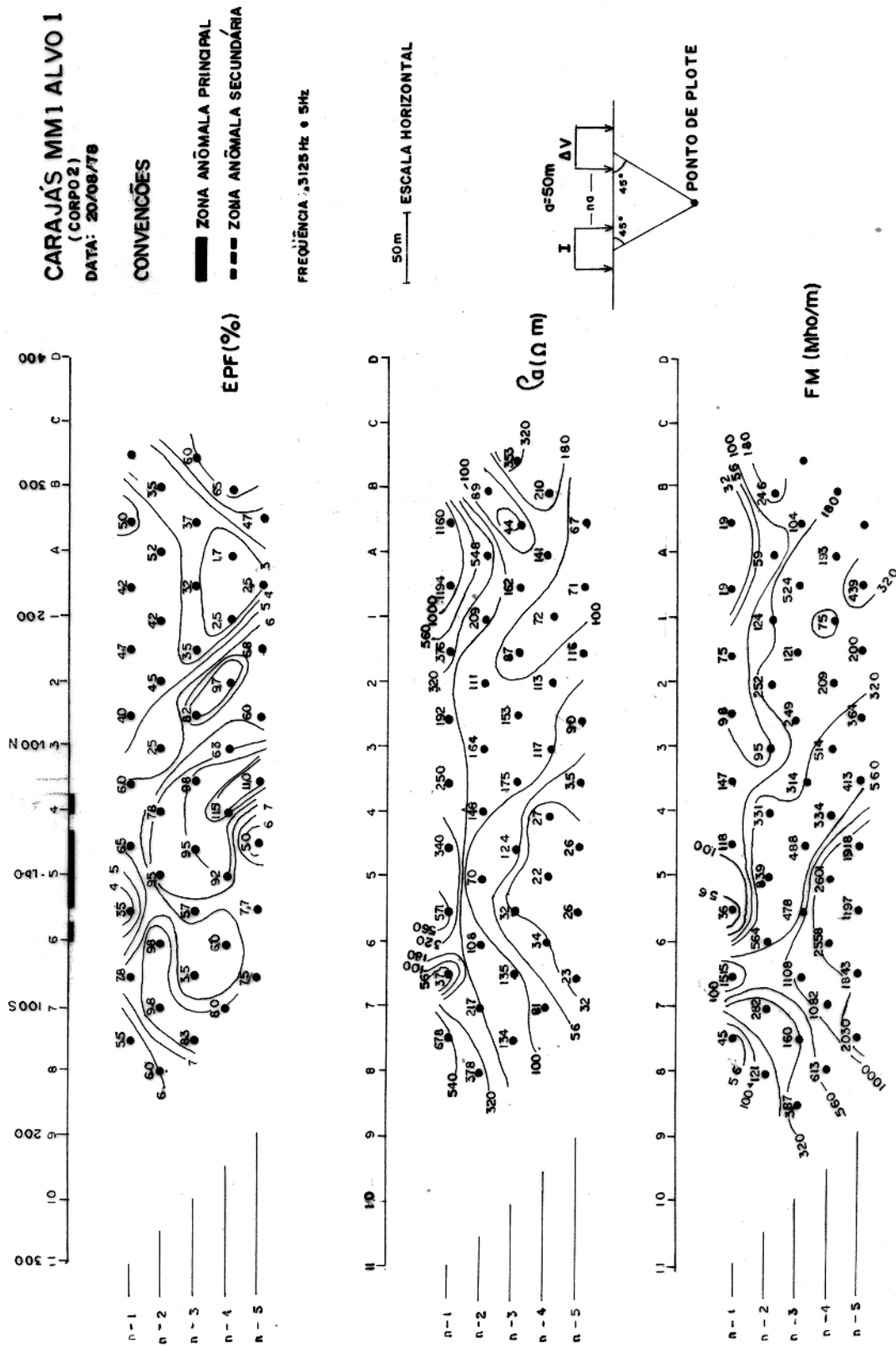


FIG. 29 - LINHA 250W, PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE.

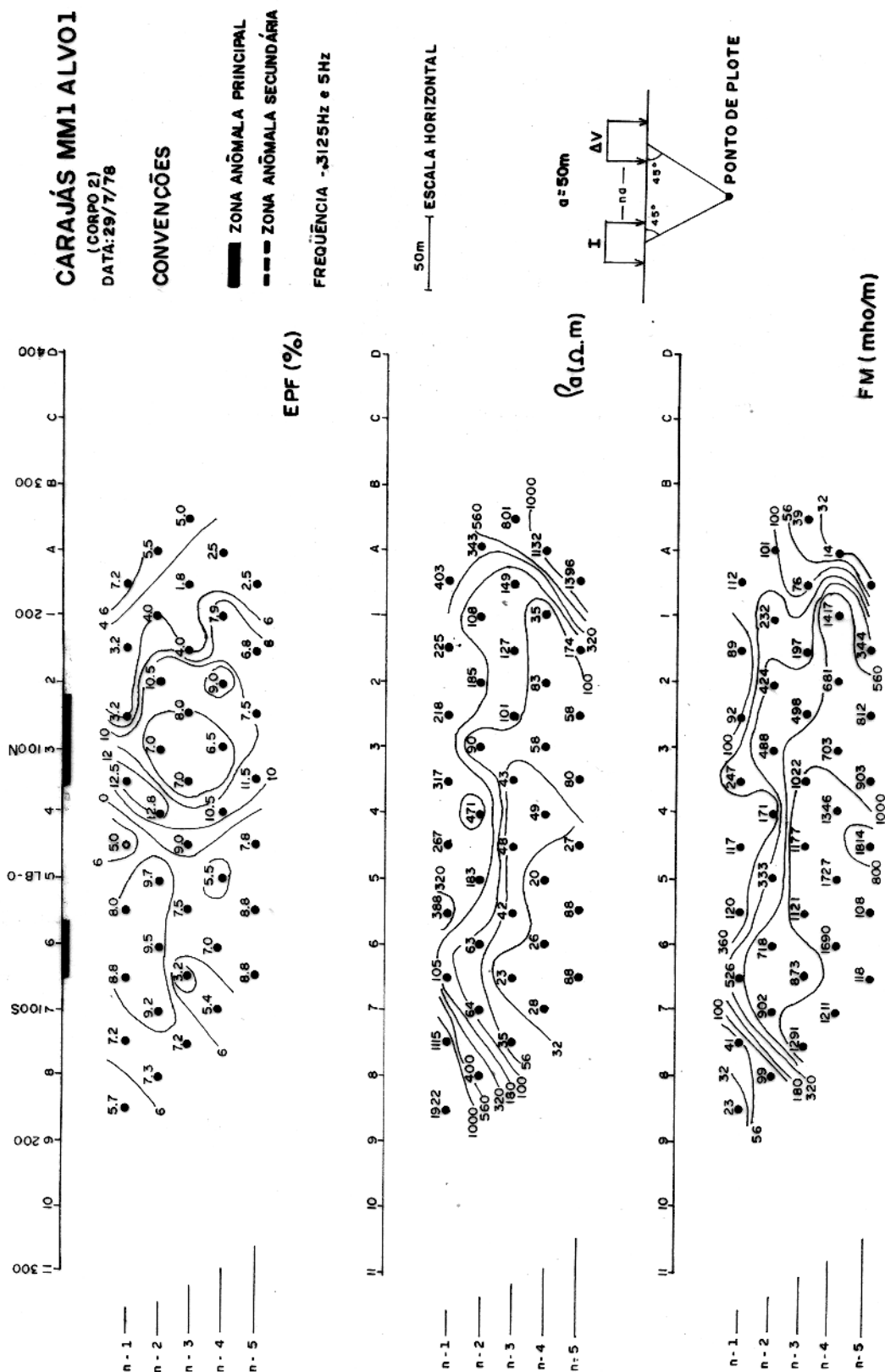


FIG. 30 - LINHA 350W, PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE.

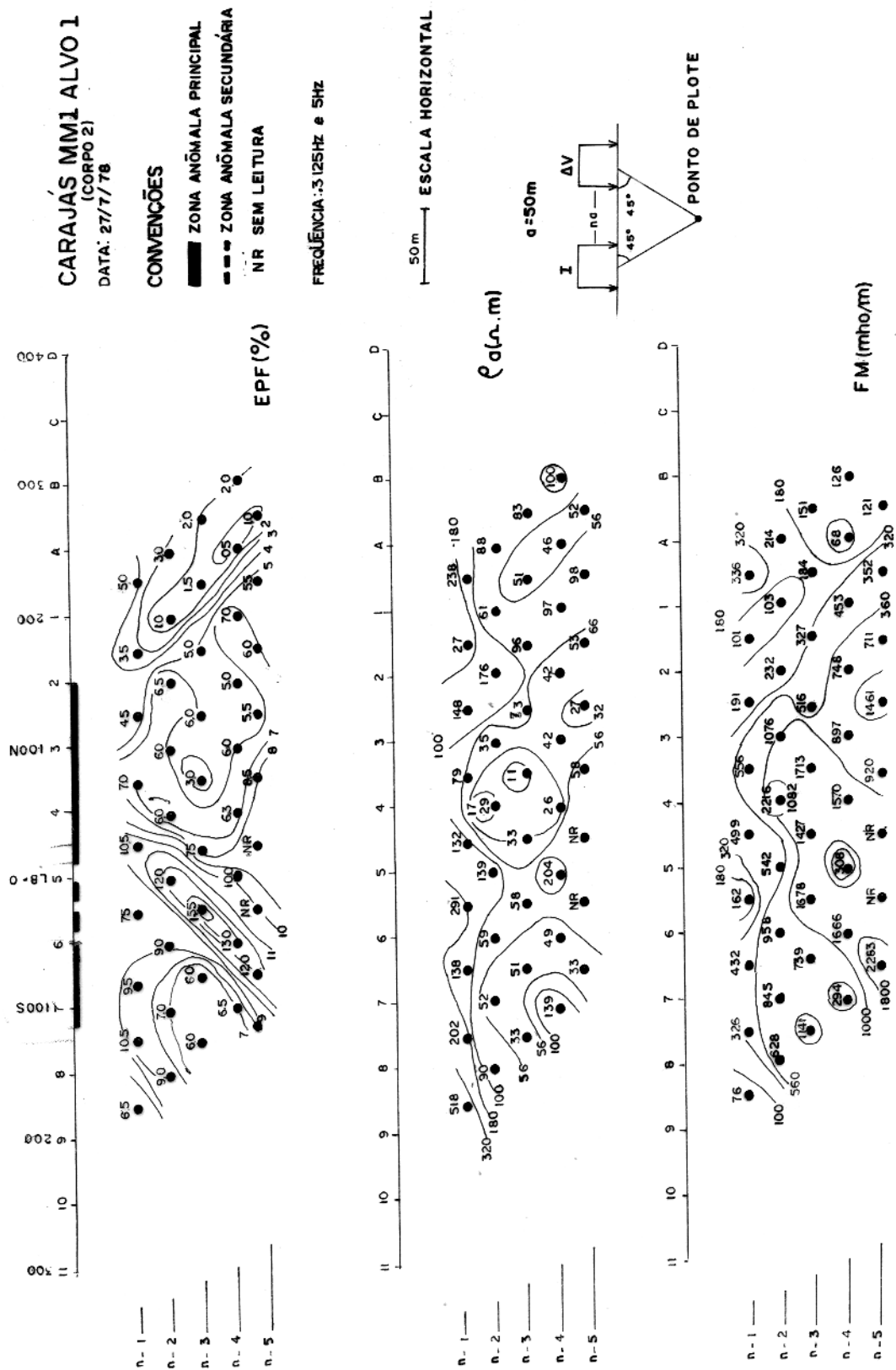


FIG.31 - LINHA 450W, PSEUDO-SEÇÃO DE POLARIZAÇÃO ELÉTRICA INDUZIDA/RESISTIVIDADE.

uma centrada em 75 N, e a outra entre 0 a 100 S. A primeira é bastante complicada. Possivelmente é provocada por mais de um corpo e/ou corpos de forma irregular. A outra anomalia talvez seja provocada por uma zona de menor concentração de sulfetos e/ou faixa de formação ferrífera que ocorre ao sul da linha-base.

4.3.3. Discussão e Resultados Obtidos

O levantamento de polarização elétrica induzida evidencia, na área, algumas anomalias simples e simétricas, sugerindo corpos tabulares, enquanto que as mais complicadas possivelmente são provocadas por mais de um corpo ou por corpos irregulares. É provável que estas anomalias se devam a uma maior concentração de sulfetos disseminados que ocorre debaixo da formação ferrífera, ou a uma combinação do efeito da formação ferrífera e dos sulfetos a ela associados. As anomalias rasas parecem estar associadas à zona de contatos litológicos, à zona de baixa concentração de sulfeto ou a blocos de formação ferrífera.

5. INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS E CONCLUSÃO

Nos anexos 7 e 8 estão apresentadas as anomalias obtidas com a aplicação dos métodos magnetométrico, polarização elétrica induzida/resistividade e AFMAG, na área estudada. O significado geológico dessas anomalias foi obtido através da correlação com trabalhos anteriores de geologia, geoquímica e furos de sondagem nesta área. A partir desses trabalhos, foi determinada uma faixa anômala para cobre, dentro de uma unidade metamórfica, mais especificamente, rocha do tipo anfibólio-biotita-xisto ocorrente na área. Esta unidade apresenta intercalações de formação ferrífera associada ao sulfeto de cobre. Também foi realizado um trabalho de propriedades elétricas das rochas (Rocha, 1979), em amostras de três furos (F1, F2, F3), visando determinar as fontes causadoras das anomalias de polarização induzida e AFMAG. Dos resultados deste trabalho, concluiu-se que, pelo menos na zona próxima a esses furos, a causa das anomalias é a formação ferrífera com calcopirita. Tais resultados foram muito úteis para a interpretação dos dados geofísicos.

Nos anexos acima mencionados, observa-se que as anomalias geofísicas ocorrem dentro do xisto, geralmente acompanhando a anomalia geoquímica. A boa correlação entre as anomalias magnéticas, AFMAG e algumas das anomalias de polarização induzida, sugere que as fontes causadoras são primeiramente a formação ferrífera e, secundariamente, sulfetos com baixo teor de cobre. Além desta zona principal, foram delimitadas várias faixas anômalas de menor expressão, tal como se pode observar entre as linhas 5500 NE e 5250 NE (anexo 7), onde um enfraquecimento das anomalias magnéticas e AFMAG corresponde a um adelgaçamento da formação ferrífera.

Os métodos magnético e AFMAG permitiram inferir várias zonas de falhamentos. Uma destas falhas, com orientação NE-SW, corta as linhas 6000 NE e 6250 NE da malha de reconhecimento (anexo 7), e também pode ser observada na malha de detalhe (anexo 8). As zonas de falhamentos não foram detectadas diretamente com o método AFMAG, como se esperava. Somente foram inferidas, a partir do deslocamento dos eixos de condutores (corpos magnéticos). Isto pro

vavelmente se deve à orientação do campo AFMAG, coincidente com a direção da falha. Esta falha foi confirmada pela geologia. O furo 9 (Fig. 4), localizado próximo a esta zona, evidenciou calcopirita de maior teor que nos outros furos realizados na área. Nele não foi encontrada a formação ferrífera fato este confirmado pelo deslocamento da anomalia magnética para o norte deste furo, como pode ser observado no mapa de contorno de isogamas. Na mesma zona, foi detectada uma forte anomalia de polarização induzida. Este fato é muito importante, pois mostra que nem sempre a anomalia de IP é provocada unicamente pela formação ferrífera nesta área. Extrapolando esta informação à linha 6000 NE que corta um corpo de xisto isolado, localizado entre as linhas 5500 NE e 6250 NE na malha de reconhecimento, é possível dizer que a anomalia de IP encontrada sobre esta linha foi provocada por concentrações de sulfetos de alto teor de cobre, já que nesta zona não foi detectada anomalia magnética.

Com relação a contatos geológicos, pode-se dizer que os mesmos não foram evidenciados pelos métodos geofísicos usados. O método magnético talvez não os tenha detectado pelo fato de que os contatos apresentam, quase sempre, direção aproximadamente paralela ao campo magnético.

Uma interpretação semiquantitativa sobre vários perfis de AFMAG determinou que o mergulho varia de 60 a 75°, geralmente aumentando de oeste para leste e coincidindo com o mergulho observado na área. A profundidade e o parâmetro σt para o corpo foram aproximadamente de 90 m e 10 mho, respectivamente. Por outro lado a interpretação semiquantitativa sobre o perfil magnético 350 W, corpo 2, estimou a profundidade do corpo em 80 m.

De modo geral, pode-se dizer que os métodos geofísicos aplicados na área mostraram resultados satisfatórios. As anomalias geofísicas apresentam boas correlações com a geologia, geoquímica e furos de sondagem.

A magnetometria pode ser considerada um dos métodos mais importantes para ser aplicado nesta área. Os resultados mostraram que a formação ferrífera magnética é um guia bastante segu

ro para detectar zonas potencialmente mineralizadas com cobre, pois formação ferrífera e zona mineralizada guardam uma correlação muito significativa nesta área.

A polarização induzida se mostrou útil, pois define muito bem zonas de concentração de sulfetos. Uma limitação deste método é que a resistividade aparente pode ser grosseiramente utilizada na interpretação, porque este parâmetro é bastante influenciado pela topografia acidentada, como ocorre na área MM1.

O AFMAG não foi considerado um método prioritário para esta área, porque a detecção da formação ferrífera é mais viável através da magnetometria, além de não existir mineralização maciça.

Na área MM1, os sulfetos se encontram disseminados numa zona de grande extensão; porém a maior parte dessa área é inviável economicamente, por ser baixo o teor de cobre.

Sabe-se que essa área sofreu remobilização, devido ao metamorfismo e à intrusão granítica. É importante, então, localizar estruturas geológicas como falhas, dobras, mudanças bruscas na orientação do "strike" do corpo, porque, nestas zonas, a mineralização pode estar bem mais concentrada. Os métodos AFMAG e magneto-metria permitiram inferir zonas de falhas, enquanto que a polarização induzida definiu um corpo isolado.

Como se enfatizou, a formação ferrífera magnética é um guia bastante útil para a detecção das zonas mineralizadas para cobre. Por isto, sugere-se para áreas similares a seguinte metodologia de pesquisa geofísica-geológica.

- a) Primeiramente, deve ser realizado um levantamento aeromagnético em escala regional. Isto visa selecionar zonas anômalas mais promissoras.
- b) Em seguida, devem ser executados os levantamentos terrestres de magnetometria e estudos geoquímicos e geológicos, sobre as zonas anômalas selecionadas através de dados aeromagnéticos. Com o método magnético terrestre visa-se rastrear a formação ferrífera e através de geoquímica de solos, procura-se determinar a existência de anomalias geoquímicas de

sulfetos metálicos, em particular sulfeto de cobre.

- c) Sendo satisfatórios os resultados de A e B, faz-se o levantamento de polarização induzida. Este levantamento poderá detectar anomalias positivas, as quais evidenciam a presença de sulfeto de cobre disseminado (no caso de se obter resultados negativos, deve-se dar prioridade secundária para a área). Alguns furos de sondagem devem ser executados visando confirmar anomalias geofísicas. Sendo positivos os resultados obtidos através destes furos, recomenda-se a continuação do trabalho em uma área mais ampla de mesmas características. Uma vez obtidas anomalias pouco significativas de polarização elétrica induzida/resistividade sugere-se abandonar a área de pesquisa.

Finalmente, na área estudada recomenda-se a execução de dois (2) furos de sondagens com a finalidade de confirmar os resultados geofísicos:

- a) Um furo localizado sobre a linha 7270 NE (área ALVO 1) aproximadamente na estação 950. Nesta zona a anomalia de IP observada atinge valores de até 19%, que corresponde a quatro vezes o "background" sendo assim considerada uma anomalia bastante forte. Também aí, a anomalia magnética é bem acentuada.
- b) Outro furo sobre a linha 6000 NE (área ALVO 1), próximo à estação 2550, onde se encontra um corpo de xisto isolado, apresentando boa anomalia de IP, boa anomalia geoquímica e nenhuma expressão magnética.

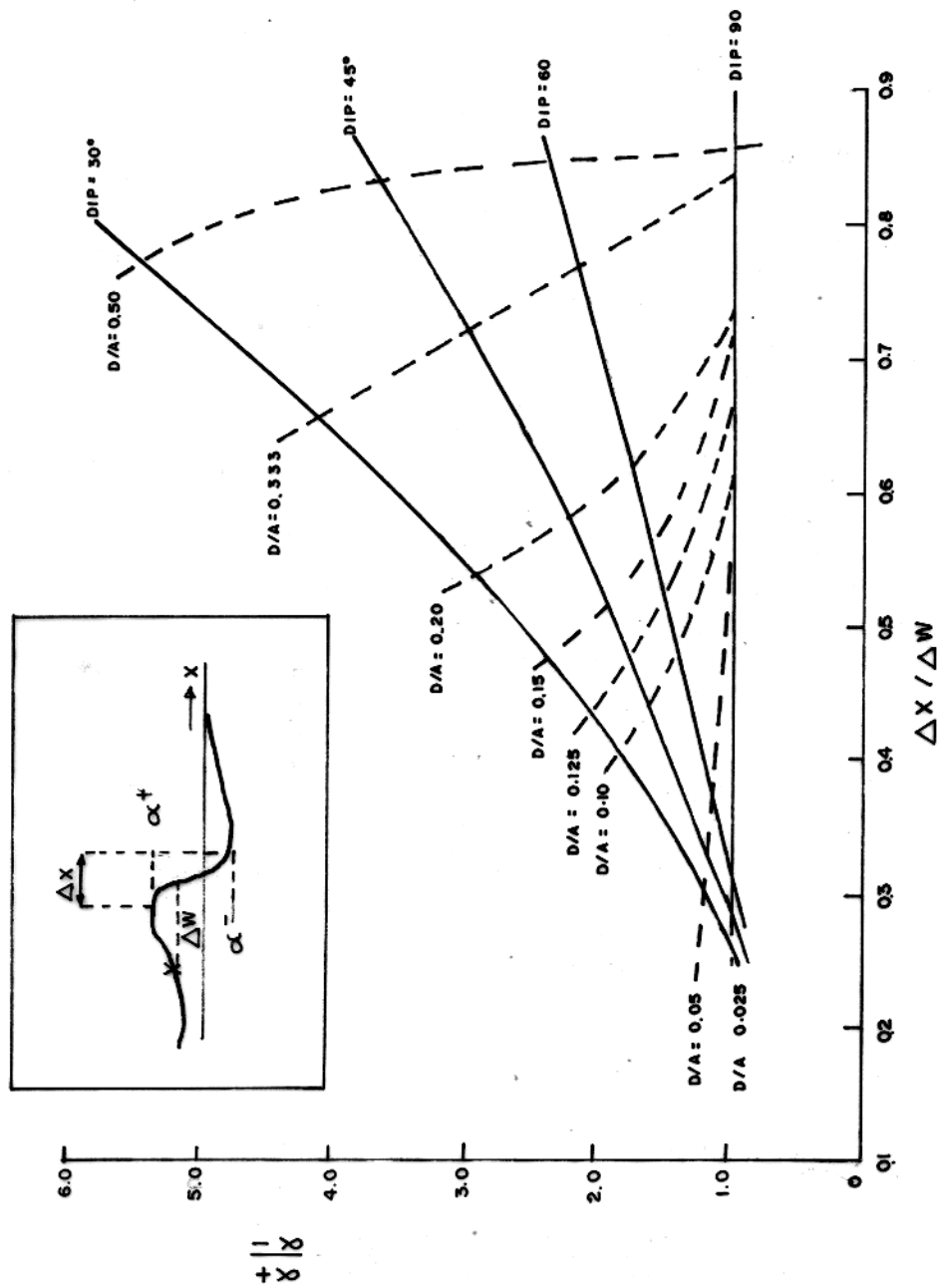
6. BIBLIOGRAFIA

- BARKER, R.D., (1975), Elementary approximations in aeromagnetic interpretation for application in low latitudes. Geophysics. 40(4):686-688.
- BEISIEGEL, V.R.; BERNARDELI, A.L.; DRUMMOND, N.F.; RUFF, A.W. e TREMAINE, J.W., (1973), Geologia e recursos minerais de Serra dos Carajás. Revista Brasileira de Geociências. 3(4):215-242.
- BEISIEGEL, V.R. e FARIAS, N.F., (1978), Ocorrência de cobre na Serra dos Carajás. In: Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, v.4. p.1419-1430.
- BRASIL D.N.P.M. PROJETO RADAM, (1974), Folha SB.22 Araguaia e Parte da Folha SC.22 Tocantins. Rio de Janeiro, v. 4, 558.1, B 823.
- DOELL, R. e COX, A., (1967), Magnetization of rock. In: Mining Geophysics. Tulsa, Oklahoma, Society of Exploration Geophysicists. v. 2, p. 446-453.
- GAY, S.P., (1963), Standard Curves for interpretation of magnetic anomalies over long tabular bodies. Geophysics. 28(2):161-200.
- GRANT, F.S. e WEST, G.F., (1965), Interpretation theory in applied Geophysics. New York, McGraw-Hill Book. 584 p.
- HALLOF, P.G. e SUTHERLAND, D.B., (1962), The vector method of plotting AFMAG results. Abstracts, Yearbook of the Society of Exploration Geophysicists.
- JACOBS, J.A., (1967), The earth's magnetic field. In: Mining Geophysics, Tulsa, Oklahoma, Society of Exploration Geophysicists. v. 2., p. 446-453.
- JEWEL, T.R. e WARD, S.R., (1963), The influence of conductivity inhomogeneities upon audio frequency magnetic fields. Geophysics. 28(2):201-202.
- KELLER, G.V. e FRISCHKNECHT, F.C., (1966), Electrical methods in Geophysical prospecting. Oxford, Pergamon Press, 517 p. (International series in electromagnetic waves, 10).

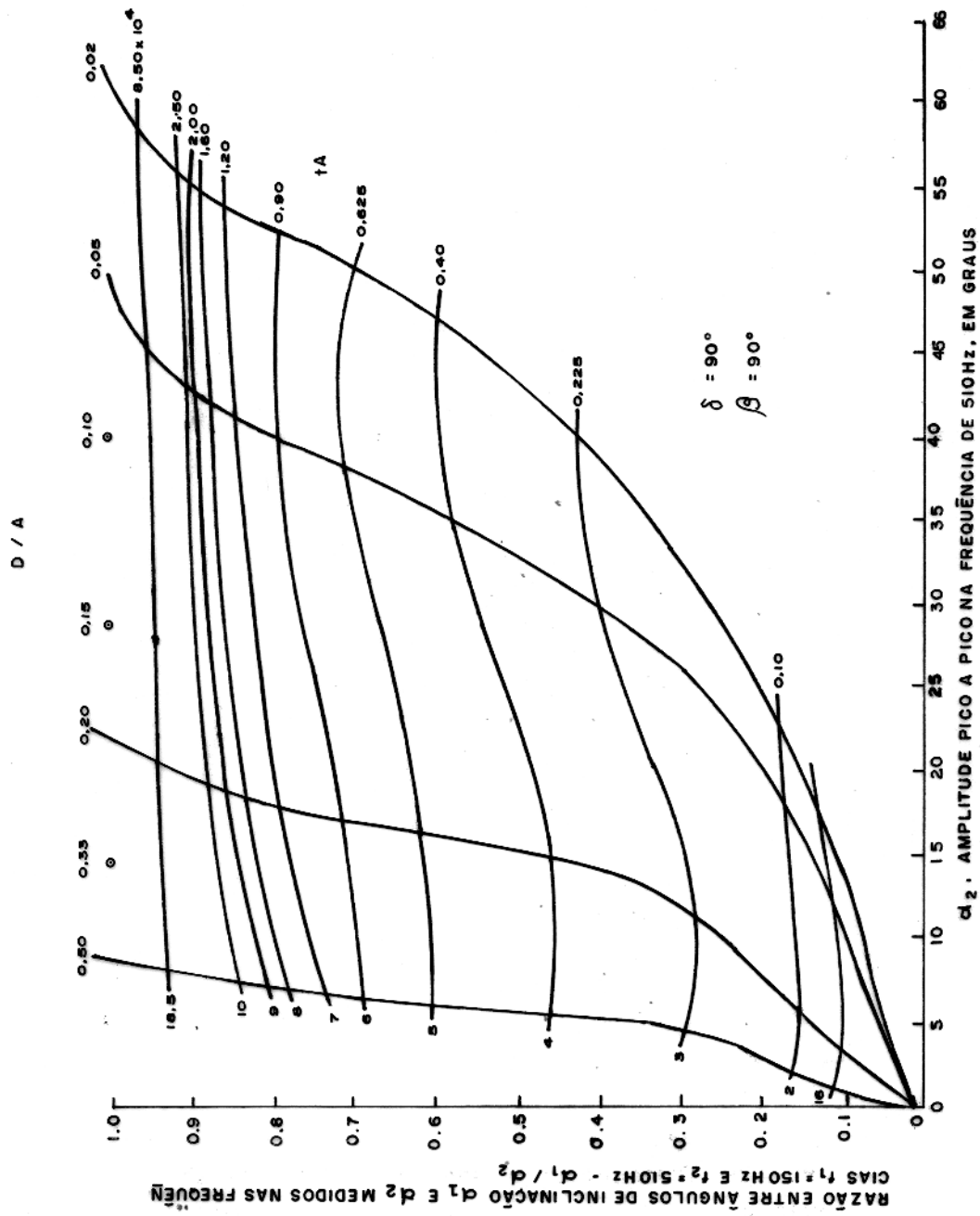
- KOULOMZINE, T.H., LAMONTAGNE, Y. e NADEAU, A., (1970), New methods for the direct interpretation of magnetic anomalies caused by inclined dikes of infinite length. Geophysics. 35(5):812-830.
- KUNETZ, O., (1966), Principles of direct current resistivity prospecting. Berlin-Nikolassee, Gebrüder Borntraeger, 103 p. (Geoexploration Monographs, Series 1, nº 1).
- MADDEN, T.R. e CANTWELL, T., (1967), Induced Polarization a Review. In: Mining Geophysics, Tulsa, Oklahoma, Society of Exploration Geophysicists, v. 2, p. 373-400.
- MARSHALL, D.J. e MADDEN, T.R., (1959), Induced polarization a study of its causes. Geophysics. 24(4):790-816.
- ORELLANA, E., (1972), Prospección geoeléctrica por campos variables. Madrid, Paraninfo, v.2.
- ROCHA, B.R., (1979), Medidas de condutividade complexa de rochas. Belém, USP. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas. Tese de Mestrado.
- SHARMA, P.V., (1976), Geophysical methods in Geology. Amsterdam, Elsevier, 428 p.
- SMILLIE, D.W., (1976), Elementary approximation in aeromagnetic interpretation. In: Mining Geophysics. Tulsa Oklahoma, Society of Exploration Geophysicists. v. 2, p. 446-453.
- STRANGWAY, D.W., (1967), Mineral magnetism. In: Mining Geophysics. Tulsa, Oklahoma, Society of Exploration Geophysicists. v.2, p., 437-445.
- SUMMER, J.S., (1976), Principles of induced polarization for geophysical exploration. Amsterdam, Elsevier, 277 p.
- SUSZCZYNSKI, E.A., (1972), A origem vulcânica do minério de ferro primário da Serra dos Carajás, Estado do Pará, região Amazônica. In: Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Geologia, Belém, v. 1, p. 103-119.

- TALWANI, N. e HEIRTZLER, J., (1964), Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional structures of arbitrary shape. Computers in the Mineral Industries, Stanford University, Press.
- TELFORD, W.N., GELDART, L.P., SHERIFF, R.E. e KEY, D.A., (1976), Applied geophysics. London, Cambridge University Press. 860 p.
- TOLBERT, G., TREMAINE, J.W., MELCHER, G.C. e GOMES, C.B., (1971), The recently discovered Serra dos Carajas iron deposit, Northern Brazil. Economic Geology. 66(7):985-994.
- WARD, S.H., CARTIER, W.D., HARVEY, H.A., McLAUGHLIN, G.H. e ROBINSON, W.A., (1958), Prospecting by use of natural alternating magnetic fields of audio and sub-audio frequencies. Canada. Min. and Metall. 61:261-268.
- WARD, S.H., (1959), AFMAG - Airbone and ground. Geophysics. 24(4): 761-789.
- WARD, S.H., O'DONNELL, J., RIVERA, R., WARE, G.H. e FRASER, C., (1966), AFMAG-Application and limitations. Geophysics. 31(3): 576-605.
- WARD, S.H., (1967), The electromagnetic method. In Mining Geophysics. Tulsa, Oklahoma, Society of Exploration Geophysicists. v. 2, p. 228-372.
- WARD, S.H., O'BRIEN, D.P., PARRY, J.R. e McKNIGHT, B.K., (1968), AFMAG-Interpretation. Geophysics. 33(4):621-644.

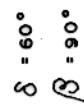
A N E X O S



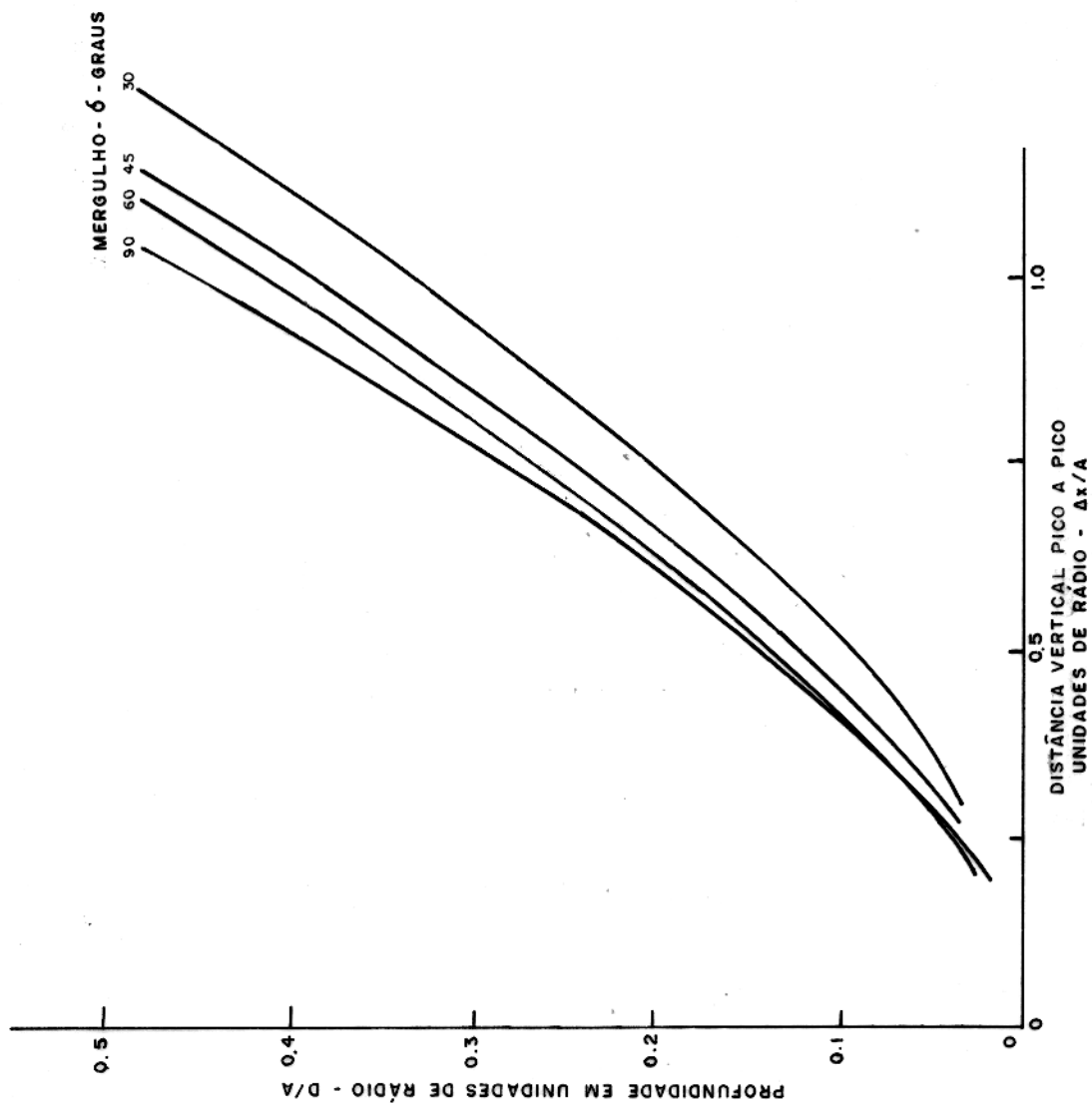
ANEXO 1 - CURVA-PADRÃO OBTIDA A PARTIR DO MODELO DISCO, USADA PARA ESTIMAR O MERGULHO (α), SEGUNDO WARD ET AL. (1968).



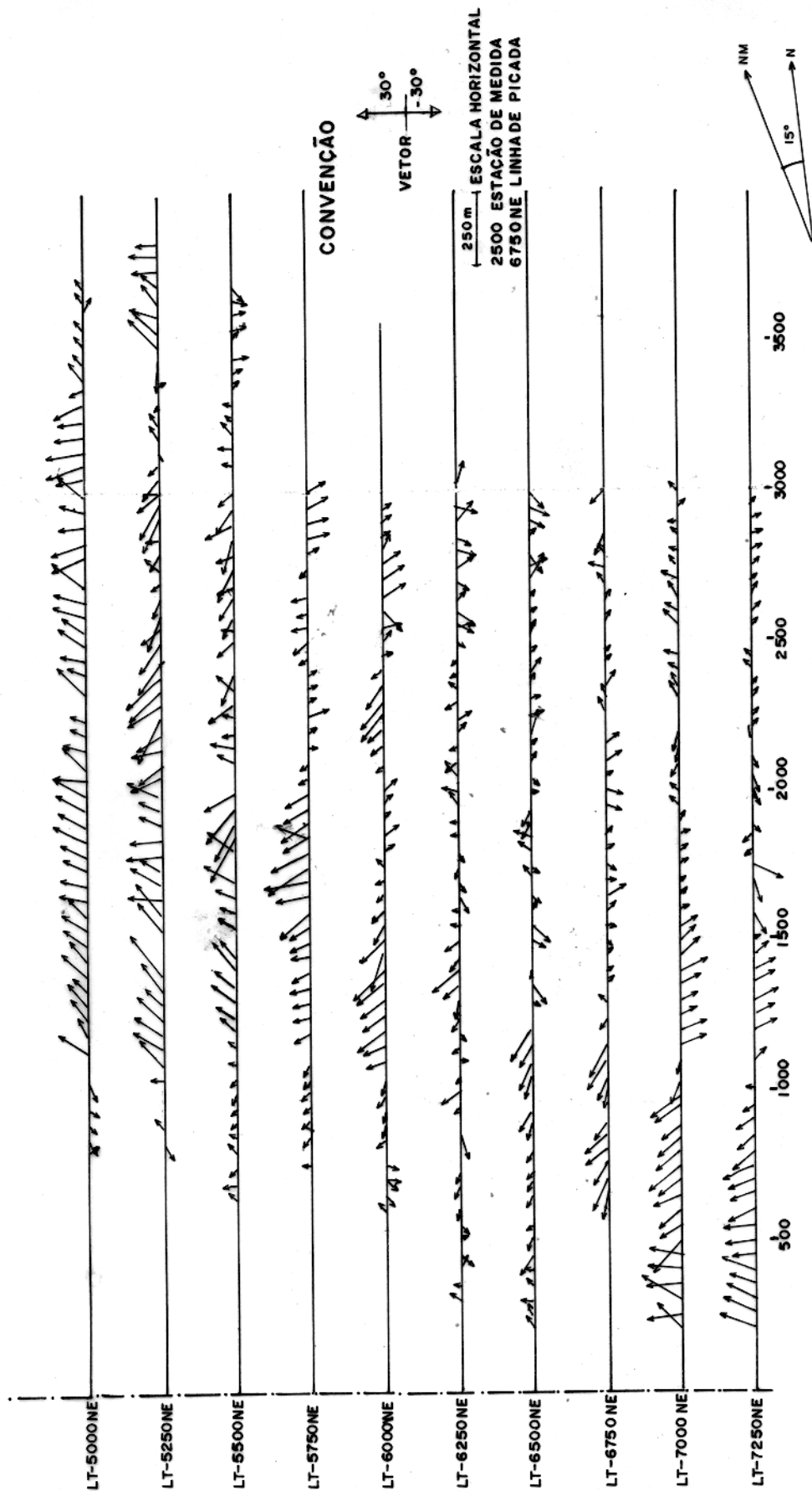
ANEXO 2 - CURVA-PADRÃO OBTIDA A PARTIR DO MODELO DISCO, USADA PARA ESTIMAR O PRODUTO σ_{1A} E A RAZÃO D/A , QUANDO O DISCO É VERTICAL SEGUNDO WARD ET AL., (1968).



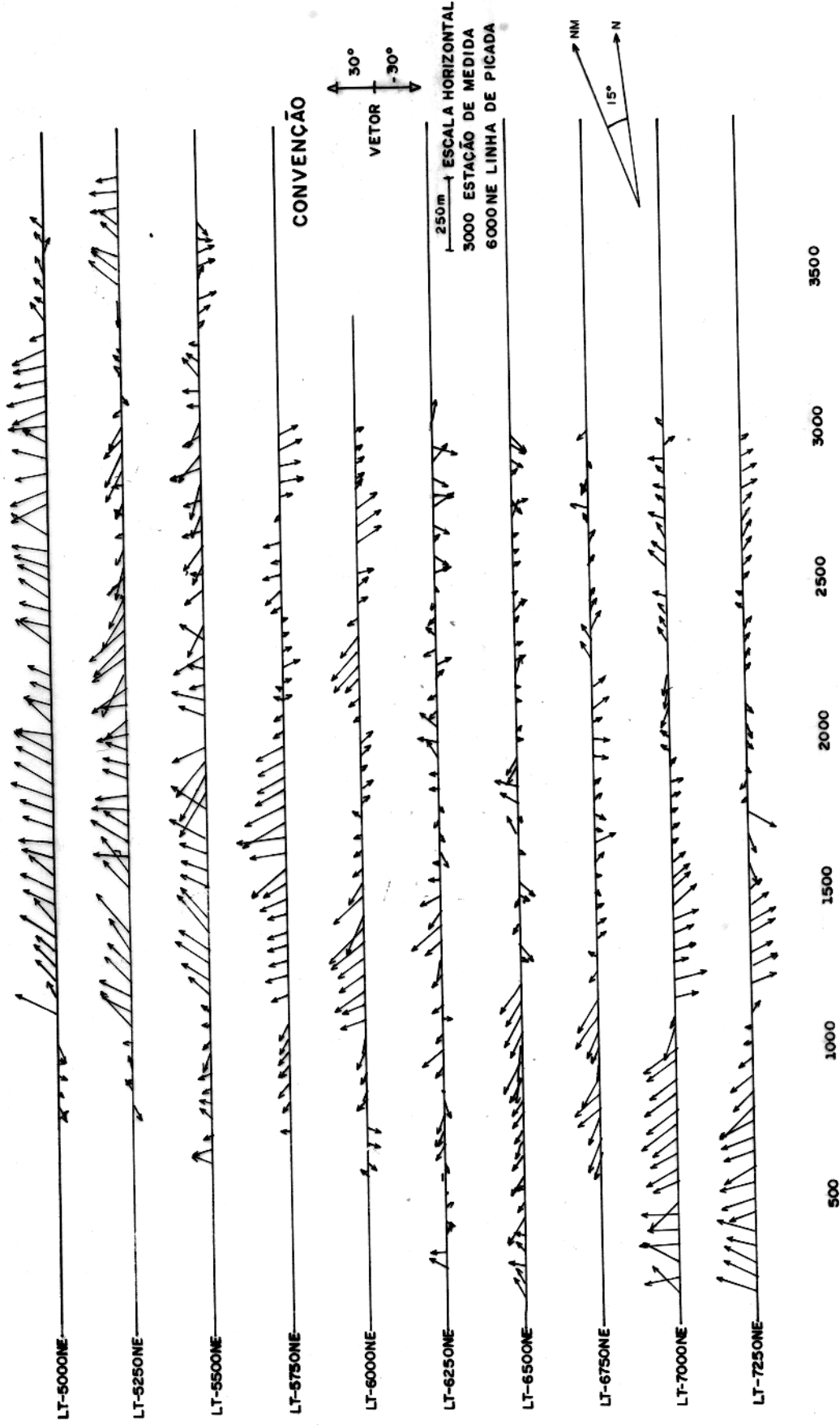
ANEXO-3 - CURVA-PADRÃO OBTIDA A PARTIR DO MODELO DISCO, USADA PARA ESTIMAR O PRODUTO $\sigma^2 t$ E A RAZÃO D/A, QUANDO O DISCO É VERTICAL SEGUNDO WARD ET AL., (1968).



ANEXO 4 - CURVA-PADRÃO OBTIDA A PARTIR DO MODELO DISCO, USADA PARA ESTIMAR $\Delta x/A$, QUANDO SE CONHECE A RAZÃO D/A , SEGUNDO WARD ET AL. , (1968).



ANEXO 5 - APRESENTAÇÃO VETORIAL DE DADOS DE AFMAG, NA FREQUÊNCIA DE 470 HZ.
ÁREA MM1 - ALVO 1



ANEXO 6 - APRESENTAÇÃO VETORIAL DE DADOS DE AFMAG, NA FREQUÊNCIA DE 140 HZ.
AREA MM 1 - ALVO 1