UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ASTRONOMIA

APLICAÇÃO DO MÉTODO ELETRO-MAGNÉTICO INDUTIVO NA PROSPECÇÃO DE MINÉRIO DE COBRE

TESE APRESENTADA AO INSTITUTO DE
GEOCIÊNCIAS E ASTRONOMIA DA UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO PARA O CONCURSO DE LIVRE-
DOCÊNCIA NA DISCIPLINA DE GEOFÍSICA APLICADA

NELSON ELLERT

DEDALUS - Acervo - IGC

30900006027

SÃO PAULO
1971

ÍNDICE

Pág.

PARTE A

A.1 - RESUMO	1
A.2 - INTRODUÇÃO	4
A.3 - EQUIPAMENTOS EMPREGADOS	7
A.4 - PROCEDIMENTOS DE CAMPO	11
A.5 - DIFICULDADES ENCONTRADAS	14
A.5.1 - Descargas elétricas	14
A.5.2 - Eletricidade estática	15
A.5.3 - Alta tensão	15
A.5.4 - Tôrres de transmissão	15
A.5.5 - Condutores artificiais	16
A.6 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	17
A.6.1 - Introdução	17
A.6.2 - Campo primário	18
A.6.3 - Correção topográfica	24
A.6.4 - Campo resultante	28
A.7 - EXPERIÊNCIAS EM MODELOS REDUZIDOS	33
A.7.1 - Introdução	33
A.7.2 - Equipamento empregado	34
A.7.3 - Resultados obtidos	37
A.7.3.1 - Dimensionamento dos modelos	37
A.7.3.2 - Exemplos de curvas obtidas	39

PARTE B

B.1 - CAMAQUÃ	43
B.1.1 - Geologia	43
	./.

	<u>Pág.</u>
B.1.1.1 - Geologica local	43
B.1.1.2 - Estratigrafia e litologia	44
B.1.1.3 - Mineralização	45
B.1.1.4 - Gênese da jazida	47
B.1.2 - Geofísica	48
B.1.2.1 - Introdução	48
B.1.2.2 - Fase preliminar	49
B.1.2.3 - Fase de prospecção	55
B.2 - CARAÍBA	60
B.2.1 - Geologia	60
B.2.1.1 - Introdução	60
B.2.1.2 - Geologia regional	61
B.2.1.3 - Geologia local	62
B.2.1.4 - Mineralização	63
B.2.2 - Geofísica	64
B.2.2.1 - Introdução	64
B.2.2.2 - Fase preliminar	64
B.2.2.3 - Fase de prospecção	81
B.2.3 - Aplicação do "trend surface analysis"	85
B.2.3.1 - Introdução	85
B.2.3.2 - Cálculo	86
B.2.3.3 - Mapa dos resíduos	86
B.3 - CONCLUSÕES	90
B.4 - BIBLIOGRAFIA	94

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
21 - Perfil geofísico X	69
22 - Mapa de isoanomalia geoquímica e posição dos perfis I e II	72
23 - Perfil geofísico I	73
24 - Perfil geofísico II	74
25 - Perfil geofísico XII	79
26 - Perfil geofísico XXX	80
27 - Mapa geoquímico regional e delimitação da área estudada em por- menor	82
28 - Posição das anomalias e suas grandezas	83
29 - Posição relativa de R e T e o corpo condutor	88
30 - Posição das anomalias geofísicas obtidas pela técnica da asso- ciação de resíduos	89

ÍNDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>	<u>Págs.</u>
1 - Localização das áreas prospectadas	12
2 - Gráfico das linhas de força	20
3 - Campo eletro-magnético de um dipolo	24
4 - Gráfico para a correção topográfica	26
5 - Campos primário e secundário	28
6 - Intensidade da componente vertical	30
7 - Representação gráfica das correntes	31
8 - Representação vetorial do movimento harmônico	32
9 - Modelo vertical em profundidades variadas	39
10 - Corpo vertical, frequências variadas	40
11 - Modelo com diferentes ângulos de inclinação	41
12 - Perfil I medido sobre o filão S. Luiz	50
13 - Perfil II medido sobre o filão S. Luiz	51
14 - Perfil I medido sobre o filão Oscarino	53
15 - Perfil II medido sobre o filão Oscarino	54
16 - Perfil geofísico através do filão Feliciano	58
17 - Perfil geofísico IV	59
18 - Mapa de isoanomalia geoquímica e a posição do perfil III	66
19 - Perfil geofísico III	67
20 - Mapa de isoanomalia geoquímica e posição do perfil X	68
	./.

A.1 - RESUMO

Um levantamento geofísico de prospecção de minério de cobre sulfetado nos distritos cupríferos da Mina de Camaquã, Rio Grande do Sul e Mina Caraiíba, Bahia, foi executado, aplicando-se o método eletro-magnético indutivo de fonte móvel.

A finalidade dos trabalhos foi a verificação da aplicabilidade do método e equipamentos na prospecção de minérios existentes em filões ou disseminados numa matriz rochosa.

O equipamento E.M.Sharpe, de construção canadense, não apresentou rendimento dada a sua baixa sensibilidade. O equipamento E M Gun da ABEM, de construção sueca, mostrou-se muito eficaz na determi

./.

nação de anomalias em ambas as áreas estudadas.

Um total de mais de 60 km de perfis foram levantados, dos quais mais de 25 km no Rio Grande do Sul e o restante na Bahia .

Os trabalhos de campo foram divididos em duas fases. A primeira, uma fase preliminar, levada a cabo em regiões de geologia e mineralogia conhecidas. Comprovada a aplicação do equipamento e da metodologia, era então desenvolvida uma campanha de prospecção geofísica.

Na Bahia, a fase preliminar foi executada não só em locais de geologia e mineralização conhecidas, mas também em áreas de anomalia geoquímica. Constatou-se a presença de anomalias geofísicas em áreas de anomalias geoquímicas. Um levantamento detalhado de uma área de algumas dezenas de hectares foi aí executado a fim de se estabelecer a faixa de anomalias geofísicas. Os dados obtidos nesta área foram tratados pela técnica do "trend surface analysis", comprovando-se a aplicabilidade deste processo na delimitação de áreas geofisicamente anômalas.

Minérios com teores em sulfetos inferiores a 1,0% , ou seja, aproximadamente 0,5% de Cu, não provocam o aparecimento de anomalias geofísicas.

Entre outros fatores, falhas e concentrações de so-

luções salinas próximas à superfície provocam o aparecimento de anomalias.

Em laboratório foi desenvolvida uma fase experimental em modelos reduzidos. Este procedimento permitiu a elaboração de curvas que facilitaram a interpretação dos dados obtidos nos trabalhos de campo.

A.2 - INTRODUÇÃO

Métodos eletro-magnéticos de prospecção geofísica , cujo desenvolvimento data de mais de meio século, têm sido usados em larga escala da prospecção mineral em diferentes partes do mundo.

Em países, principalmente da Europa Setentrional, o uso destes métodos de prospecção geofísica demonstrou grande poder de resolução e informação. Muitas jazidas, principalmente de sulfetos foram as sim encontradas.

Procuramos por meio deste trabalho apresentar uma - contribuição, divulgando os resultados obtidos na prospecção de minério de cobre, empregando-se pela primeira vez no Brasil, o método do eletro-magné

tico indutivo de fonte móvel.

O principal objetivo dêste trabalho é o de geofísica aplicada, incluindo alguns dados teóricos, a fim de permitir uma melhor visão do método e da metodologia aplicados.

São dadas também algumas informações geológicas das áreas estudadas, apenas para facilitar a compreensão dos problemas geofísicos em discussão e justificar as diretrizes aplicadas no planejamento dos trabalhos de campo.

A fim de verificar a aplicabilidade do método na prospecção de minério de cobre, os trabalhos de campo foram realizados nos distritos da Mina de Camaquã, onde o minério é do tipo filonar e da Mina Caraíba, onde predomina minério disseminado.

O presente trabalho não poderia ter sido executado caso não tivéssemos tido o apóio de diversas entidades e numerosas pessoas.

Destaca-se o auxílio proporcionado pelo GRUPO INDUSTRIAL PIGNATARI, que não só fornecendo os meios materiais, grande apóio proporcionou nos trabalhos de campo. Para tanto não podemos deixar de expressar aqui nos nossos sinceros agradecimentos ao Sr. FRANCISCO PIGNATARI,

principalmente pela autorização de apresentar êstes dados obtidos.

Ao pessoal técnico da referida empresa, nas pessoas dos Eng^{os} Neuclayr Martins Pereira, Fernando Lacourt, Dr. Sylvio de Queiroz Mattoso, aos geólogos Wilson Fontanelli, Carlos Queiróz, Moacir Francisco Moço, Juarêz Soares de Souza, Maria Antonia Dias Pimentel Cesar, os meus sinceros agradecimentos pelo apôio concedido.

Não poderão, ser esquecidos os nomes do Prof. Dr. Rudolf Kollert, velho mestre e amigo que muito apôio técnico nos forneceu, bem como o Prof. Dr. Viktor Leinz pelo incentivo para a elaboração dêste trabalho.

Ao colega Dr. Gilberto Amaral, os meus sinceros agradecimentos pela cooperação na computação dos dados aplicando a técnica do "trend surface analysis".

Ao colega Prof. Dr. Reinholt Ellert, os meus agradecimentos pelas sugestões e críticas para a boa apresentação dêste trabalho.

A.3 - EQUIPAMENTOS EMPREGADOS

Como já mencionado, para os trabalhos de campo foi aplicado o método eletro-magnético indutivo de fonte móvel. Os equipamentos utilizados neste método constam essencialmente de fonte e receptor de ondas eletro-magnéticas isoladas do solo e que são deslocadas na superfície do terreno, cobrindo a área a ser pesquisada.

Três foram os equipamentos utilizados, dois dos quais no campo e um apenas no laboratório.

O primeiro equipamento, denominado E M Gun fabricado pela ABEM da Suécia- é de fácil transporte e operado por duas pessoas. Consiste de apenas duas unidades interligadas por um cabo, chamado de ca-

bo de referência. A primeira unidade é um transmissor como bobina transmissora. A segunda unidade é um amplificador-compensador, com bobina de recepção e fones.

O transmissor consiste de um oscilador transistorizado, alimentado por baterias, acoplado à bobina transmissora que está enrolada sobre um núcleo de ferrite. O oscilador opera em duas frequências distintas, 880 c/s e 3520 c/s, com uma potência de saída de 6 W.

A fim de fornecer uma corrente de referência, quanto a amplitude e fase, existe uma segunda bobina, montada em paralelo com a bobina transmissora, que é ligada ao sistema compensador pelo cabo da referência acima mencionado. Este cabo, além de conduzir a corrente de referência, serve também para controlar o espaçamento entre os dois operadores.

O sistema amplificador-compensador, que é carregado pelo observador, consta além das partes já mencionadas, da bobina receptora, onde será induzida a corrente provocada pelo campo eletro-magnético alterado. Por razões técnicas e eletrônicas, o amplificador possui uma banda passante bastante estreita, onde somente as correntes de 880 e 3520 c/s devem ser amplificadas.

Em paralelo com o amplificador está o sistema compensador que possibilitará as medidas. Neste sistema são comparadas as

corrente vindas da bobina receptora e aquela induzida na bobina de referência, existente em paralelo com a bobina transmissora.

Considera-se executada a medida em um ponto, quando por meio de dois "diais" R e I se anula o som nos fones, som êste correspondente à corrente induzida na bobina receptora. A determinação desta "ausência de som" é dada, não sô por via auditiva (fones), como também por via visual (micro-amperímetro).

Como parâmetro de medida, o equipamento efetua a decomposição do vetor campo-eletro-magnético-resultante em suas componentes horizontal (chamada também de I = imaginária ou "out of phase") e a componente vertical (chamada também de R = real ou "in phase").

As medidas de I e R são dadas em unidades de porcento, em relação ao campo eletro-magnético normal, para um determinado espaçamento entre as bobinas.

A sensibilidade do equipamento chega a ser de 0,2%, para ambas as componentes das duas frequências.

O segundo equipamento, denominado E M Sharpe, de construção canadense, também consiste como o anterior, de uma unidade transmissora e outra receptor-amplificadora.

A diferença fundamental entre este aparelho e o E M Gun é o parâmetro medido, que é o ângulo de inclinação do vetor campo-eletro-magnético resultante.

A medida é feita, colocando-se a bobina transmissora numa posição pré-determinada (horizontal, por exemplo). A bobina receptora é movida de tal maneira a não se ouvir qualquer som nos fones. Neste instante mede-se o ângulo que esta bobina faz com o plano horizontal. Tal posição indica não haver qualquer linha de força cortando a bobina receptora, ou seja, a bobina encontra-se no mesmo plano que contém o vetor campo eletro-magnético resultante.

Neste equipamento não existe qualquer elemento físico de ligação entre as unidades transmissora e receptora. A sua sensibilidade não é superior a 10.

Em trabalhos de campo o método da medida do ângulo-de inclinação do vetor também pode ser utilizado empregando-se o equipamento E M Gun, quando o cabo de referência não é conectado.

O terceiro equipamento, E M R K Lab, construído pelo Prof. Dr. Rudolf Kollert durante a sua estadia no Brasil, é utilizado-somente em trabalhos de laboratório. Pormenores, esquema e funcionamento, serão dados em capítulo à parte.

A.4 - PROCEDIMENTOS DE CAMPO

Como se trata de um trabalho pioneiro no Brasil, de prospecção de minérios sulfetados utilizando-se o método eletro-magnético alternado indutivo de fonte móvel, não dispunha o autor de experiência - quanto a metodologia desejável.

Para isto os trabalhos de campo nas regiões das Minas de Camaquã e Caraiíba obedeceram duas fases: a primeira preliminar e em seguida a de prospecção.

Figura 1 - Localização das áreas prospectadas

A fase preliminar foi por nós primeiramente realizada na região da Mina de Camaquã, em regiões de geologia e mineralização conhecidas. Constituiu-se de levantamentos ao longo de perfis, transversais aos filões, com pontos de medida espaçados de 20 metros. Para comparação de resultados, os dois equipamentos foram utilizados, observando-se que o equipamento E M Gun possui uma sensibilidade muito maior. Anomalias que atingem 60% (pico a pico) não foram acusadas pelo equipamento E M Sharpe.

A segunda fase, ou seja, de prospecção, era iniciada após comprovada a aplicabilidade do equipamento na prospecção de minérios sulfetados.

O procedimento de campo foi o mesmo em ambas as áreas prospectadas. Os pontos de medida eram dispostos ao longo de perfis perpendiculares à estrutura geológica.

Na área da Mina Caraíba, além de serem medidos perfis sobre corpos mineralizados, durante a fase preliminar, foram também medidos perfis em áreas de anomalia geoquímica. Neste distrito foi também prospectada detalhadamente uma área de algumas dezenas de hectares, cuja finalidade foi de correlacionar as diferentes anomalias de um mesmo perfil, com as anomalias dos outros perfis, bem como testar a aplicação da técnica do "trend surface analysis" na delimitação de áreas geofisicamente anômalas.

A.5 - DIFICULDADES ENCONTRADAS NO CAMPO

Durante os trabalhos de campo foi notada uma série de fenômenos que dificultaram ou mesmo chegaram a impedir a sua execução.

A.5.1 - Descargas elétricas

Como possuem grande energia, causam o aparecimento de um forte campo eletro-magnético indutivo que se manifesta sob a forma de um impulso que induz correntes na bobina receptora. Apesar do amplificador ser de banda estreita, o sinal captado é amplificado, provocando o aparecimento de um forte ruído nos fones e uma forte deflexão no micro-amperímetro.

Como as medidas são realizadas determinando-se o som mínimo, ou mesmo ausência de som e uma deflexão mínima no micro-amperímetro, tais fenômenos muito dificultaram os trabalhos de campo.

A.5.2 - Eletricidade estática

Em regiões de clima seco, como o é da Caraíba, a intensidade da eletricidade estática é grande e a semelhança das descargas elétricas ocasiona dificuldades nas medidas. A intensidade deste fenômeno aumentava consideravelmente por volta das 10,30 horas da manhã. Não foram feitas observações para determinar o término de tais perturbações. Em dias de umidade relativa mais alta, as perturbações eram mínimas, permitindo trabalhos de campo o dia inteiro.

A.5.3 - Fios de alta tensão

Em distâncias inferiores a 200 metros, a influência da alta tensão é intensa. É causada provavelmente pela variação de carga na linha, o que dá origem a impulsos eletro-magnéticos.

A.5.4 - Tôrres de transmissão

Tôrres de rádio e televisão, a semelhança da bobina

transmissora, induzem correntes na bobina receptora gerando sinais que impedem totalmente qualquer trabalho em suas proximidades.

A.5.5 - Condutores artificiais

A presença de qualquer condutor artificial na área que está sendo prospectada deve ser cuidadosamente anotada. Tais condutores representados por tubulações de água, esgoto, gás, bem como trilhos de estrada de ferro, cercas de arame, etc., alteram os valores reais, provocando o aparecimento de uma falsa anomalia.

A.6 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A.6.1 - Introdução

A maior parte dos fundamentos teóricos descritos é baseada em um memorando inédito fornecido pelo Prof. Dr. Rudolf Kollert.

Uma corrente elétrica alternada circulando pelo enrolamento de uma bobina (bobina emissora ou transmissora), cria ao seu redor um campo eletro-magnético indutivo alternado.

Em qualquer bobina (bobina receptora), colocada neste campo, aparecerá induzida uma corrente elétrica alternada, de sentido-de circulação inverso ao da corrente primária. Esta corrente induzida terá a mesma frequência que a corrente primária e estará em fase com a mes-

ma. A intensidade desta corrente induzida dependerá dos parâmetros da bobina receptora, da intensidade do campo primário, bem como da distância - que a mesma se encontra da bobina transmissora.

Assim como são induzidas correntes secundárias numa bobina, correntes também são induzidas em corpos condutores, quando estes se encontram em um campo eletro-magnético indutivo alternado.

A indução de correntes alternadas neste corpo condutor cria ao seu redor, um campo eletro-magnético alternado.

Colocando-se uma bobina receptora em tal condição , a corrente induzida não mais será causada exclusivamente pelo campo primário, mas sim pela superposição dos dois campos eletro-magnéticos. Estes - são o campo primário, criado pela corrente primária e o campo secundário, criado pela corrente secundária induzida no corpo, que somados darão o campo resultante.

A.6.2 - Campo Primário

O campo primário é criado pela passagem de corrente elétrica alternada pelas espiras da bobina transmissora.

Como as dimensões desta bobina são pequenas, quando

comparadas com a distância que separa normalmente as bobinas em trabalhos de prospecção (60 metros em média), a forma das linhas de força e a intensidade do campo eletro-magnético podem ser calculadas por meio de fórmulas para dipolos. Assim, para a construção das linhas de força podemos usar a fórmula:-

$$r_i = r_o \sin^2 \phi \quad (\text{figura 2}) \quad (1)$$

e para o cálculo da intensidade do campo F, a expressão

$$F = \frac{M}{d^3} \sqrt{1 + \cos^2 \phi} \quad (2)$$

onde

d = distância do ponto considerado ao centro da bobina

M = momento magnético do dipolo = $I R^2$

R = raio da bobina

I = intensidade da corrente que circula pela bobina

Figura 2 - Gráfico das linhas de força

Como R é pequeno quando comparado com a distância - que separa as bobinas, poderá ser desprezado, aparecendo assim:-

$$F = \frac{I\pi}{d^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \phi} \quad (3)$$

Para se obter F em termos absolutos, é suficiente - multiplicar por 0,1, ou seja:-

$$F = 0,1 \frac{I\pi}{d^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \phi} \quad \text{Gauss/Ampere} \quad (4)$$

./.

Desta expressão (4) verifica-se que a força F_A , no ponto A, situado a uma distância $\underline{X}$ do dipolo ($\phi = 90^\circ$), é dada pela expressão:-

$$F_A = 0,1 \frac{I\pi}{X^3} \quad (5)$$

e a força F_B , no ponto B, ao longo do eixo do dipolo ($\phi = 0^\circ$), também a uma mesma distância, $\underline{X}$, é dada pela expressão

$$F_B = 0,2 \frac{I\pi}{X^3} \quad (6)$$

o que mostra que $F_B = 2 F_A$. A direção é oposta à de F_A , pois as linhas de força através de A e B são de sentidos opostos.

O campo eletro-magnético (F) é tangente às linhas de força no ponto de observação e formará um ângulo ($\phi + \epsilon$) com a direção do eixo do dipolo. Os ângulo ϕ e ϵ podem ser interrelacionados pela fórmula:-

$$\operatorname{tg} \epsilon = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \phi \quad (7)$$

Para uma bobina emissora vertical, a componente vertical do campo em qualquer ponto (N) será dado pela fórmula geral:-

$$V_N = F \cos (\phi + \epsilon) \quad (8)$$

Para a condição onde $\phi + \epsilon = 90^\circ$ teremos

$$\operatorname{tg} \phi + \varepsilon = \frac{\operatorname{tg} \phi + \operatorname{tg} \varepsilon}{1 - \operatorname{tg} \phi \cdot \operatorname{tg} \varepsilon} = \frac{\operatorname{tg} \phi + 1/2 \operatorname{tg} \phi}{1 - \operatorname{tg} \phi \cdot 1/2 \operatorname{tg} \phi} = \infty$$

$$\text{Para } 1 - 1/2 \operatorname{tg}^2 \phi = 0 \quad \phi = 54^\circ 44' \quad (9)$$

O campo eletro-magnético é horizontal (máximo de linhas de força) ao longo da linha que forma um ângulo $\phi = 54^\circ 44'$ com a horizontal.

A construção deste gráfico é feita da seguinte maneira: um ponto R (receptor) é escolhido na abscissa a uma distância T da bobina Tr (transmissora) onde o campo normal F_N é tomado como sendo igual a 100%. A distância r₀ para qualquer ponto de intensidade F_x pode ser calculado facilmente pela fórmula (5) onde:

$$F_N : F_x = 1/T^3 : 1/r_0^3$$

$$r_0 = T \sqrt[3]{\frac{F_N}{F_x}} = T \sqrt[3]{\frac{100}{F_x}} \quad (10)$$

Assim, por exemplo, para campos de intensidade $F_x = 800\%, 400\%, 200\%, 50\%$, teremos respectivamente, $r_0 = 0,5T; 0,631T; 0,794T$ e $1,26T$ (vide figura 3).

As linhas de força, passando através destes pontos, são construídas aplicando-se a fórmula (1) que nos dará as distâncias r para os diferentes ângulos.

As linhas de equi-intensidade são construídas utilizando-se a fórmula (2).

Para o ponto R, a equação será:

$$F_R = \frac{M}{T^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 90^\circ} = \frac{M}{T^3}$$

Nos demais pontos da curva de iso-intensidade que passa por R, a equação terá a forma geral:

$$F_d = \frac{M}{d^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \phi}$$

e como $F_d = F_R$, podemos escrever:

$$\frac{M}{T^3} = \frac{M}{d^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \phi} \quad (11)$$

Qualquer ponto com intensidade de campo F_x , terá como expressão:

$$F_x = \frac{M}{r_o^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \phi}$$

ou então, considerando-se a fórmula (1):

$$d_x^3 = \frac{100}{F_x} \cdot T^3 \sqrt{1 + \cos^2 \phi} \quad (12)$$

./.

Como ilustração sobre as condições do campo eletromagnético em torno de um dipolo vertical, a figura 3 mostra os vetores da intensidade total e da componente vertical nos pontos onde o ângulo $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 54^\circ 44', 60^\circ, 80^\circ$, para uma mesma distância $d_x = T = 1$ do dipolo.

bobinas se encontrem no mesmo plano. Havendo uma diferença de cota, é necessário efetuar-se uma correção na componente real R, ou seja, na componente vertical.

A figura 3 anexa, exemplifica o fenômeno, ou seja, a variação da intensidade da componente com a topografia.

Os pontos E, F, G e R, locados a uma mesma distância de Tr, mostram uma diminuição da componente com um aumento da diferença de elevação entre as duas bobinas.

Normalmente, no campo não são executados trabalhos em encostas com declives superiores a 25°, não só pela grande correção a ser efetuada, como também pelas dificuldades de deslocamento dos operadores.

O sinal da correção é sempre positivo, isto é, o valor da correção deverá ser sempre adicionado ao valor R medido, independentemente da cota absoluta da bobina receptora.

Figura 4 - Gráfico para a correção topográfica.

O valor da correção é dado por:

$$K = F_N - V_1$$

(13)

./.

onde F_N = campo normal (= 100%) no ponto R situado a uma distância I do dipolo e V_i = componente vertical teórica do campo primário no ponto de observação.

V_i pode ser calculado por meio das fórmulas (7) e (8), depois de determinado o valor ϕ pela relação:

$\cos \phi = h/T$, onde I é o espaçamento entre as bobinas e h = diferença de cota.

Quando a topografia é suave, o erro devido a topografia pode ser negligenciado, uma vez que o mesmo cai dentro da sensibilidade do equipamento.

Normalmente em trabalhos de campo, trabalha-se dentro de uma margem de erro de 1%. Observando-se a tabela para 1% de correção, a relação h/T é igual a 0,06, ou seja, para um espaçamento I de 60 metros, a diferença de cota h é igual a 3,60 metros.

Quando se requer uma interpretação acurada e as anomalias encontradas são pequenas, faz-se necessária a correção.

A.6.4 - Componente Resultante

Como há uma grande diversificação na medida de parâmetros eletro-magnéticos e por conseguinte, uma grande variação instrumental e operacional, há diferentes maneiras para se representar uma anomalia.

As anomalias aqui descritas e apresentadas, são aquelas encontradas quando se aplica um equipamento eletro-magnético indutivo de fonte móvel, tal como o E M Gun, da ABEM.

Figura 5 - Campos primário e secundário.

A figura acima permite visualizar claramente o fenômeno da indução eletro-magnética. Ela mostra o caso de um corpo condutor-vertical, de forma tabular, situado em um campo eletro-magnético alternado.

Suponhamos que em um certo instante a corrente esteja fluindo na bobina transmissora, no sentido anti-horário (quando a bobina é vista de baixo). As linhas de força, representando o campo primário, terão sentido de baixo para cima, ao longo de todos os pontos da superfície do terreno (princípio da mão direita). As correntes secundárias induzidas no corpo condutor terão sentido oposto ao da corrente primária.

Por razões geométricas, a componente vertical do campo secundário tem o mesmo sentido que o campo primário em pontos da superfície situados entre a bobina transmissora e o corpo condutor, e sentido oposto em pontos situados à direita do condutor. Consequentemente, a componente vertical observada será maior que o campo primário se ambas as bobinas estiverem do mesmo lado do corpo condutor, enquanto que será menor que o campo primário se o condutor se encontrar entre as bobinas.

O gráfico da figura 6 é obtido colocando-se em ordenadas o campo ou componente de campo medida e em abscissa o ponto médio entre as bobinas transmissora e receptora, ou seja, a estação de observação.

Figura 6 - Intensidade da componente vertical.

Um amortecimento máximo é obtido na estação 0 (verticalmente sobre o corpo condutor) onde as bobinas estão situadas nos pontos A e B respectivamente (simétricos ao corpo condutor).

Os pontos A e B são portanto de um certo interesse pois:

- quando se mede na estação A, a bobina receptora está localizada no ponto 0. Neste ponto o campo secundário é horizontal (vide figura 5) e portanto a componente vertical corresponde exatamente ao campo primário.
- quando se mede na estação B, a bobina transmissora se encontra no ponto 0. Neste ponto nenhuma corrente é induzida no corpo condutor pelo fato do campo primário ser vertical e novamente só o campo primário é registrado ($\overline{AB} = T$, onde T = espaçamento entre as bobinas).

O princípio usado para a construção da curva resultante é válido também para outras orientações mútuas das bobinas, por exemplo, horizontais, como também para condutores com outras formas e/ou orientações relativas. As curvas porém, serão diferentes daquela acima representada.

As condições de amplitude e fase de um campo eletromagnético, onde está presente, além da corrente primária, a corrente secundária e os seus respectivos campos, bem como o campo resultante, podem ser representados pelo gráfico de um movimento harmônico descrito por uma corrente alternada.

Figura 7 - Representação gráfica das correntes.

A figura 8, mostra a correlação geométrica entre as componentes I e R, a componente resultante o ângulo da diferença de fase.

$$\begin{aligned} (RC) &= F_r \cos \phi \\ (IC) &= F_r \sin \phi \end{aligned} \quad (14)$$

Esta figura é uma representação vetorial do movimento harmônico representado na figura 7.

Figura 8 - Representação vetorial do movimento harmônico.

F_r = campo resultante

F_p = campo primário

F_s = campo secundário

A.7 - EXPERIÊNCIAS EM MODELOS REDUZIDOS

A.7.1 - Introdução

Em alguns métodos geofísicos de prospecção pode-se chegar a uma interpretação quantitativa das anomalias encontradas, por meio de fórmulas matemáticas ou então por comparação com curvas teóricas calculadas matematicamente, determinando-se assim os parâmetros do corpo causador da anomalia.

Para o método eletro-magnético indutivo, gráficos para fins de interpretação são construídos facilmente de modo experimental, por meio de medidas em modelos reduzidos, onde se variam as características geométricas e elétricas do sistema.

O estudo do comportamento do campo eletro-magnético indutivo alternado em modelos reduzidos é muito importante, prático e conclusivo, pois é possível, em laboratório, simularem-se condições encontradas em trabalhos normais de prospecção.

Tais modelos devem porém, obedecer a chamada "lei da escala", que estabelece que: o campo eletro-magnético indutivo em modelos reduzidos terá a mesma distribuição que aquele de trabalhos normais de campo, se a intensidade da corrente e tôdas as dimensões, incluindo o parâmetro $\underline{L}$, forem mudados na mesma proporção.

$$L = \frac{\rho}{f \cdot d} \quad \begin{array}{l} \rho = \text{resistividade} \\ f = \text{frequência} \\ d = \text{espessura} \end{array} \quad (15)$$

Quanto a $\underline{L}$ a relação (15) estabelece que:

- se ambos $\underline{L}$ e $\underline{d}$ forem multiplicados (ou divididos) por um fator $\underline{K}$, o parâmetro ρ (resistividade) será dividido (ou multiplicado) por K^2 .

A.7.2 - Equipamento Empregado

Fonte de ondas

A fonte de ondas utilizada constou de um oscilador-
a válvulas, com 3 frequências de oscilação, a saber 130 c/s, 260 c/s e
560 c/s.

A razão da utilização de um oscilador com diferentes frequências era observar a amplitude (pico a pico) da anomalia, empregando-se diferentes frequências, em um mesmo modelo.

Esquema I - Diagrama de circuito.

Compensador

É a unidade de medida prôpriamente dita do equipamento. O compensador tem por finalidade determinar a intensidade da componente resultante e a diferença de fase existente entre as correntes primária e secundária.

Estas medidas, tais como no equipamento utilizado no campo, são feitas decompondo-se o vetor campo eletro-magnético resultante em suas componentes I e R.

A corrente de referência é obtida por meio de bobi-

nas acopladas diretamente em paralelo à instalação que alimenta a bobina-emissora.

Bobinas

Tanto a transmissora como a receptora são de pequenas dimensões ($\varnothing$ de 2 cm), fixadas numa placa de acrílico, que é deslocada sobre o modelo durante as medidas.

O espaçamento entre as bobinas podia ser alterado, variando-se de 6 a 12 cm, o que corresponderia a 60 e 120 metros, respectivamente, em trabalhos de campo.

Amplificador

A unidade amplificadora usada era um amplificador de eletrola para alta fidelidade.

Como amplificadores deste tipo possuem uma banda passante muito ampla, frequentemente eram notadas dificuldades nas determinações de R e I.

Como além da corrente do oscilador, eram também amplificadas correntes provocadas pela indução devida a rede urbana, ou seja, 60 c/s, a medida na realidade, se resumia não em uma ausência de som, mas sim de um ponto de som mínimo. O fenómeno era também parcialmente pro-
./.

vocado pela polarização elíptica, devido a alta condutividade dos modelos.

Fones

Como as medidas eram feitas exclusivamente por via auditiva, os fones tinham por finalidade transmitir o som e isolar os ruídos externos, permitindo uma acurada determinação das medidas.

A.7.3 - Resultados Obtidos

A.7.3.1 - Dimensionamento dos modelos

Como vimos anteriormente, o método eletro-magnético indutivo é repetitivo, quando são guardadas algumas relações.

O exemplo a seguir tem por finalidade demonstrar o dimensionamento de um modelo.

- suponhamos que haja o interesse de se estudar a anomalia que seria obtida em medidas no campo, realizadas com um equipamento E M Gun, com espaçamento de 40 metros entre as bobinas, através de um corpo condutor de 0,80 metros de espessura e uma resistividade de 46 Ohm.m. A experiência com modelos reduzidos seria realizada com a mesma frequência que no campo, com bobinas espaçadas de 10 cm (100 mm).

Como a relação de escala é 1/400, a espessura e a resistividade do modelo serão respectivamente:

$$d_e = 800 / 400 = 2 \text{ mm}$$

$$\rho_e = 0,46 / 400^2 = 2,88 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm.cm}$$

ou seja, um modelo representado por uma placa de alumínio

($\rho = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm.cm}$) com espessura de 2 mm.

O inverso do exemplo acima é frequentemente realizado para fins de se procurar interpretar as anomalias encontradas durante as medidas de campo.

Como decorrência da fórmula (15), observações confirmam que diferentes condutores tabulares tendo o mesmo valor $\underline{L}$, causam anomalias idênticas, se a frequência e a escala não forem mudadas. Portanto, é a relação entre a resistividade e espessura do corpo que determina a influência de um condutor no comportamento do campo eletro-magnético e não os seus valores individuais.

É possível em laboratório aumentar a espessura $\underline{d}$ e diminuir a resistividade $\underline{\rho}$, mantendo-se sempre o mesmo parâmetro $\underline{L}$. Verifica-se porém que tal relação é válida somente para placas delgadas, ou seja,

$$d \leq 30 \frac{\underline{\rho}}{\underline{f}} \text{ metros, quando } \underline{\rho} \text{ é expresso em Ohm.cm}$$

A.7.3.2 - Exemplos de curvas obtidas

1) - Corpo vertical representado por uma placa de alumínio, com espessura de 0,5 mm. O espaçamento entre as bobinas $T = 100 \text{ mm}$. A frequência utilizada era constante. A variável nestas medidas foi a profundidade, ou seja, variou-se a relação T/a , onde a = profundidade.

Figura 9 - Modelo vertical em profundidades variadas.

A figura acima mostra a variação da amplitude da anomalia com a variação da relação T/a .

Verifica-se que a amplitude da anomalia decresce fortemente com um pequeno aumento na relação T/a , para depois se tornar assintótica ao eixo das abscissas.

2) - Corpo vertical (placa de alumínio), profundidade constante, espaçamento entre as bobinas constante, sendo variada a frequência da corrente primária.

Figura 10 - Corpo vertical, frequências variadas

A figura acima mostra uma variação na amplitude da

anomalia em função da frequência empregada.

Figura 11 - Modelo com diferentes ângulos de inclinação.

Com base nas figuras apresentadas é possível uma série de conclusões quanto a correlação da forma e amplitude de uma anomalia encontrada no campo e o possível corpo causador da anomalia, bem como a sua posição geológica.

Verifica-se por meio das curvas que:-

- a) - a anomalia é máxima quando as bobinas se encontram simétricas ao corpo, ou seja, quando o corpo se encontra no centro do sistema de bobinas.

- b) - os valores de $R=100\%$ e $I=0\%$ são obtidos quando qualquer uma das bobinas se encontra sobre o corpo.
- c) - verifica-se um decréscimo na amplitude da anomalia com um aumento da profundidade do corpo condutor
- para $a/T = 0,13$ distância entre os picos = 50%
 - para $a/T = 0,25$ " " " " = 30%
 - para $a/T = 0,50$ " " " " = 8%
- d) - quanto ao mergulho, a coletânea de curvas da figura 11 mostra claramente uma variação no aspecto da curva em função do mergulho do corpo causador da anomalia. Esta experiência mostra que por meio deste método de levantamento geofísico é possível a locação geográfica do corpo causador da anomalia e o seu eventual rumo do mergulho. O valor do ângulo poderá ser inferido, mas não determinado exatamente.
- e) - até agora foram feitas apenas referências à anomalias provocadas por corpos tabulares, cuja largura é inferior ao espaçamento que separa as bobinas. Se o corpo possui uma largura superior ao espaçamento entre as bobinas, ele também provocará o aparecimento de uma anomalia como mostra na figura 11, a curva medida sobre o modelo em sua posição horizontal.
- f) - as curvas medidas com frequência variada mostram que a amplitude da anomalia depende da frequência empregada. A amplitude é maior quanto maior a frequência, pois com o aumento da frequência aumenta o fator indutivo.

B.1 - CAMAQUÃ

B.1.1 - Geologia

B.1.1.1 - Geologia local

As Minas de Camaquã, estão localizadas a sul do Município de Caçapava do Sul, Estado do Rio Grande do Sul, distando da sede do referido Município, cerca de 66 km.

Geologicamente a área é constituída por uma sequência de camadas sedimentares, que possui cerca de 4.000 metros de espessura (Robertson, 1966).

Os sedimentos são de ambiente continental, com características muito semelhantes o que dificulta o estabelecimento de uma estratigrafia segura.

A região foi submetida à ação de magmatismo andesítico, bem como a um intenso tectonismo, que provocou falhamentos e dobras.

Estruturalmente, a região das Minas é constituída-

por um anticlinal com eixo de direção N-S. Como a crista d'este anticlinal é menos resistente, a ação da erosão expõe formações mais antigas como os Membros Vargas e Mangueirão. A topografia é relativamente acidentada com diferenças de nível de até 200 metros.

B.1.1.2 - Estratigrafia e litologia

A coluna estratigráfica da região, segundo os trabalhos do DNPM, publicados em 1966, é a seguinte:

Sedimentos recentes

Grupo Camaquã	{	Membro Rodeio Velho
		Formação Santa Bárbara

discordância erosiva

Grupo Bom Jardim - Formação Arroio dos Nobres	{	Membro Vargas
		Membro Mangueirão

Os sedimentos recentes são representados por cascalhos e areias provenientes da decomposição dos sedimentos conglomerati-cos.

GRUPO CAMAQUÃ

O Membro Rodeio Velho é constituído de sedimentos arenosos intercalados com lavas andesíticas.

A Formação Santa Bárbara é exclusivamente sedimentar, onde estão presentes, além de arenitos, conglomerados ricos em seixos de riólito.

GRUPO BOM JARDIM

O Membro Vargas, à semelhança da Formação Santa Bárbara, é também formado de arenitos e conglomerados. A característica marcante é a presença de seixos de rochas ígneas e metamórficas formando o conglomerado.

O Membro Mangueirão apresenta litologia mais variada e granulação mais fina. É constituído de siltitos, argilitos, arcósios micáceos e grauvas.

B.1.1.3 - Mineralização

Na região da Mina de Camaquã verificou-se que há um controle estrutural muito bem definido, bem como um possível controle litológico.

As estruturas controladoras na formação dos veios foram falhas e fraturas. As falhas regionais, de direção NE, no geral, es tão isentas de mineralização. Esta estã associada ã falhas subordinadas, de pequeno rejeito, com direção preferencial NW e mergulhos sub-verticais.

Os veios mineralizados são de preenchimento, apresentando espessuras variadas, com mineralização disseminada nas encaixantes.

Pesquisas efetuadas pela Companhia Brasileira do Cobre sugerem que o Membro Vargas atuou como principal contrôle litologico. Não obstante, pode ocorrer também mineralização no Membro Mangueirão.

Os filões em exploração são: Filão S.Luiz, Barnabê, S.Julio, Uruguai, todos com direções que variam de N-20-W ã N-70-W. Os filões Oscarino, Feliciano, Piritas não estão sendo minerados. A espessura é variável, podendo atingir alguns metros. Atualmente a maior produção provém dos filões S.Luiz e Uruguai, onde a zona mineralizada compreendendo minério de preenchimento e disseminado pode atingir até 10 metros de espessura.

Os principais minerais de minério, descritos por Leinz e Almeida (1944), são:

a) - carbonatos: malaquita e azurita

- b) - silicato: crisocola
- c) - óxido: cuprita
- d) - sulfetos: calcosina, covelina, calcopirita ,
bornita e pirita.

Os principais minerais de ganga são: quartzo, limonita, hematita e barita.

Junto à superfície é comum uma zona completamente-lixiviada, com poucos remanescentes de minerais de minério. Na zona de oxidação encontram-se quantidades apreciáveis de calcosina, que é o sulfeto secundário mais importante. Raramente tem sido encontrado cobre nativo. Nesta zona de oxidação, que pode atingir até 20 metros de espessura, predominam carbonatos, silicato e óxido de cobre.

Abaixo da zona oxidada predominam sulfetos que são: calcopirita, bornita, pirita e calcosina. Esta não é encontrada na zona primária.

B.1.1.4 - Gênese da jazida

Diversos autores como Leinz e Almeida (1940), Leinz e Barbosa (1941), Costa Filho (1944), procuraram reconhecer quais seriam as causas da mineralização de cobre nestes sedimentos.

A proximidade de intrusões andesíticas levou a maioria dos autores a admitir que estas seriam as principais responsáveis pelo processo de mineralização hidrotermal.

Leinz e Almeida (1940) crêm numa origem hidrotermal de média temperatura associada ao magmatismo andesítico, que teria fornecido as soluções mineralizantes em sua fase final de consolidação.

Outros autores, como Melcher e Mau (1960) sugerem ser a mineralização relacionada ao granito que ocorre na área de Caçapava.

B.1.2 - Geofísica

B.1.2.1 - Introdução

Este distrito cuprífero foi o primeiro a ser por nós estudado geofisicamente.

Como já mencionado anteriormente, os trabalhos de campo foram iniciados por uma fase preliminar desenvolvida em locais de geologia e mineralização conhecidas.

Sobre os filões S.Luiz, Feliciano e Oscarino foram medidos perfis transversais, com pontos de medida espaçados de 20 metros, porque estes filões apresentam não só as melhores condições geológicas e topográficas, como também a ausência de condutores artificiais.

B.1.2.2 - Fase preliminar

Filão S. Luiz

Este filão, que se encontra na parte NE da zona mineralizada, está sendo explorado por via subterrânea.

Devido a topografia e sua localização, o filão começou a ser desmontado a partir de cotas inferiores à do seu afloramento em superfície.

Com o desmonte rumo à superfície o minério ainda não foi totalmente retirado, restando ainda algumas dezenas de metros de altura do filão, além do minério de profundidade.

A abertura de chaminés para ventilação dos trabalhos subterrâneos expôs o filão numa secção vertical, onde se pode observar que a profundidade da zona de oxidação não ultrapassa 20 metros. Sua potência atinge valores superiores à 1 metro com teor de até 2% de Cu, ou seja, no mínimo, 4% de sulfeto.

.50.

O minério sulfetado produz anomalias geofísicas, e como a profundidade de alcance do equipamento é de até 40 metros, este filão tinha todas as condições para causar anomalias.

Foram assim realizados perfis transversalmente ao filão, sendo 2 perfis com o equipamento E M Gun (figuras 12 e 13) e um terceiro perfil, com o equipamento E M Sharpe, no mesmo local do perfil I (figura 12).

Figura 12 - Perfil I medido sobre o filão S. Luiz.

./.

O perfil medido com o equipamento E M Sharpe revelou uma constância nos valores da inclinação do plano que contém o vetor campo resultante, ou seja, não indicou qualquer anomalia, nem mesmo em locais onde o primeiro equipamento revela anomalias de algumas dezenas de por cento (pico a pico).

Observando-se a posição dos picos de anomalia destes dois perfis, verifica-se que há uma perfeita concordância entre a sua posição e a posição do filão S. Luiz no terreno.

Figura 13 - Perfil II medido sobre o filão S. Luiz.

Como o fator indutivo aumenta com a frequência, as anomalias encontradas com a frequência de 3520 c/s atingem valores mais altos que aqueles com a frequência de 880 c/s.

Filão Oscarino

O filão Oscarino aflora à SE da zona mineralizada, em local de topografia ligeiramente ondulada. Destaca-se na superfície sob a forma de um pequeno espigão, devido a cimentação tanto do filão como das paredes por sílica, tornando-o mais resistente à erosão. Mineralõgicamente apresenta-se constituído de quartzo, barita, limonita e em superfície, algumas manchas de malaquita.

A espessura do filão é da ordem de alguns decímetros. Sondagens executadas pelo DNPM, revelam que em profundidade ocorre fraca mineralização, tendo sido determinados teores de apenas alguns décimos de por cento (0,2 - 0,4 % Cu).

Os perfis geofísicos medidos através deste filão, figuras 14 e 15, não mostram qualquer evidência de uma anomalia nítida.

Figura 14 - Perfil I medido sobre o filão Oscarino.

Sõmente o perfil II, na parte medida verticalmente sobre o filão apresenta alguns valores, em ambas as frequências, que sugerem a existência de uma pequena anomalia.

Figura 15 - Perfil II medido sôbre o filão Oscarino.

Filão Feliciano

Mais ã sul do filão Oscarino, existe o filão Feliciano que, devido a silicificação, também se destaca na superfície do ter-
./.

reno. A sua atitude geológica e composição mineralógica é muito semelhante ao do filão Oscarino. Sondagens rotativas executadas pelo DNPM revelaram que o teor em cobre deste filão é inferior ao do filão Oscarino.

Através deste filão foi medido somente um perfil - geofísico, que aparece representado na figura 15.

Observa-se que o "back-ground" é relativamente irregular, atingindo variações de mais de 10% das componentes, porém isento de qualquer anomalia nítida.

Com os dados obtidos nos perfis medidos através destes dois filões, observa-se que nesta região, filões com teores inferiores a 0,5% de Cu, ou seja sulfetos em quantidade inferior a 2%, não provocam o aparecimento de anomalias quando se emprega o método eletro-magnético-indutivo de fonte móvel.

B.1.2.3 - Fase de prospecção

Após as experiências executadas nos filões anteriormente mencionados, foi levada a efeito uma prospecção em uma área situada a SE das áreas anteriormente pesquisadas.

Geologicamente a região é constituída de sedimen -

tos arenosos não mostrando qualquer evidência de mineralização.

Foram medidos perfis transversais à estrutura, ou seja, perfis de direção NE-SW, com pontos de medida espaçados de 20 metros.

Dos perfis, que perfazem mais de 28 Km, representamos somente o perfil IV, figura 17, uma vez que o aspecto dos perfis restantes é praticamente o mesmo.

Neste perfil IV, aparece uma pequena anomalia, que no terreno coincide com uma sanga. Tal anomalia pode ser explicada como consequência da presença de um solo mais fino, saturado de água, cobrindo uma matriz grosseira. Como este material possui uma condutividade mais elevada que a matriz subjacente, o contraste de anomalia é suficiente para provocar o aparecimento de uma anomalia, principalmente por se tratar de um material condutor existente na superfície do terreno.

Além desta anomalia, em outros dois perfis foram encontradas anomalias que quando colocadas em planta aparecem alinhadas segundo a direção dos falhamentos, coincidindo com a direção do Ribeirão - João Dias que neste trecho corre ao longo de uma falha.

Este levantamento, exceto estas poucas anomalias ,

./.

não indicou qualquer anomalia evidente que pudesse sugerir a presença de uma mineralização.

Figura 16 - Perfil geofísico através do filão Feliciano.

Figura 17 - Perfil geofísico IV.

B.2 - CARAÍBA

B.2.1 - Geologia

B.2.1.1 - Introdução

A área da Mina da Caraíba acha-se localizada entre os paralelos 10º e 12º Sul e os meridianos 39º e 40º Oeste, em plena zona da caatinga, no Nordeste Brasileiro.

A topografia da área é plana, quebrada localmente pelo serrote de Caraíba, situado à NW da sede da fazenda.

Hidrográficamente, pertence à Bacia do São Francisco, sendo cortada pelo córrego Curaçá, que corre somente alguns dias, no período das chuvas, correspondente aos meses de outubro à abril.

O regime das chuvas é, em geral, torrencial, podendo frequentemente em um só dia, precipitar até 25% da precipitação anual total, que é da ordem de 500 mm.

Os rios possuem escoamento elevado, associado à u-

ma alta evaporação provocando a precipitação dos sais dissolvidos, o que dá caráter salobro à maior parte da água armazenada nas fendas das rochas.

A vegetação é típica de clima semi-árido e é rica em cactáceas.

O clima, com duas estações, uma seca, onde durante o dia a temperatura ultrapassa 35°C caindo à noite para abaixo de 20°C, e outra das chuvas, que ocasionalmente pode deixar de existir.

B.2.1.2 - Geologia Regional

Observando-se o mapa geológico do Brasil, DNPM-1966, a região da Caraíba localiza-se no Pré-Cambriano Gnaissico Indiviso.

As rochas da região constituem-se predominantemente de gnaisses-migmatíticos, pertencentes ao Grupo Uauá. Apresentam faixas melanocráticas com concentrações de minerais ferro-magnesianos e faixas leucocráticas constituídas de quartzo e feldspatos. Nos gnaisses são comuns lentes de anfíbolitos.

A estrutura predominante dos gnaisses é N-S, com mergulhos próximos à vertical. Concordantemente com os gnaisses afloram-

corpos de granito róseo, de granulação fina. Às vezes, mostram relações intrusivas com o gnaiss encaixante, envolvendo e absorvendo fragmentos de gnaiss. São comuns pequenos diques que partindo do corpo granítico - penetram nas encaixantes.

B.2.1.3 - Geologia local

Segundo Coutinho e Barros Gomes (1964), na região da Mina Caraíba o complexo gnaissico, é cortado por um conjunto de rochas ultrabásicas metamorfizadas, que apresentam estrutura E-W, ou seja, transversal à direção geológica regional.

Estas rochas constituem-se de um núcleo básico central, rodeado de uma zona intermediária que passa gradualmente ao gnaiss regional. Esquema semelhante já foi reconhecido por Leinz (1948).

- Complexo Básico Central.

É constituído principalmente de rochas básicas metamorfizadas de elevado grau de metamorfismo, tais como granulito norítico, piroxenito, biotitito, hornblendito e diopsidito.

O granulito norítico e piroxenito possuem distribuição mais ampla e os demais tipos litológicos ocorrem apenas em áreas restritas.

No granulito norítico predominam labradorita e hiperstênio além de biotita, diopsídio e hornblenda. No piroxenito o mineral dominante é o hiperstênio.

- Zona Intermediária

Rodeando o complexo básico central ocorre uma zona intermediária, de transição, com espessura de até 200 metros, constituída de rochas quartzo-feldspáticas representadas por gnaisses e rochas "igneas", resultantes da ação metassomática sobre os granitos róseos regionais.

A direção predominante dos falhamentos, que localmente foram intensos, é aproximadamente N-S, com variações para NW e NE e mergulhos acentuados sempre para E.

B.2.1.4 - Mineralização

Os piroxenitos do núcleo central e também as rochas ricas em biotita da zona intermediária serviram de hospedeiros ao processo mineralizador, que resultou na formação de sulfetos disseminados em vênulas e pequenos "stock-works". Os sulfetos dominantes são calcopirita, bornita, pirita e pequena quantidade de arsenopirita.

A zona dos minérios oxidados, com predominância de malaquita pode atingir até 30 metros de profundidade.

B.2.2 - Geofísica

B.2.2.1 - Introdução

Tal como em Camaquã, também na Caraíba, os trabalhos de campo foram divididos em duas fases: fase preliminar e de prospecção.

Na fase de prospecção foi executado um levantamento pormenorizado de uma área restrita, de algumas dezenas de hectares.

Foi empregado apenas o equipamento E M Gun da ABEM, mantendo-se o espaçamento de 60 metros entre as bobinas receptora e transmissora, com pontos de medida espaçados de 20 metros.

As ilustrações das anomalias geoquímicas apresentadas neste trabalho, foram confeccionadas a partir de levantamentos geoquímicos realizados pelo pessoal técnico da "Caraíba Mineração Metalurgia", bem como parte das informações geológicas aqui mencionadas foram fornecidas pelos geólogos da referida Empresa.

B.2.2.2 - Fase preliminar

Durante esta fase preliminar foram medidos perfis em áreas que apresentam uma das seguintes características:

- a) - área com anomalia geoquímica
- b) - área com corpos de minério
- c) - área sem anomalia geoquímica
- d) - área com anomalia geofísica determinada pelo método do potencial induzido.

a) - área com anomalia geoquímica

Dentre os perfis medidos em áreas de anomalia geoquímica apresentamos os perfis III e X.

No perfil III, medido em área onde foram constatadas anomalias geoquímicas que atingem até 165 ppm Cu acima da média regional, aparecem dois picos de anomalia, sendo que um aparece em L-101 e outro em L-103.

As anomalias correspondentes à frequência de 3520 c/s são mais desenvolvidas pois o fator indutivo aumenta com a frequência. Em L-101 existe no terreno a extremidade de uma lente de granito bem como uma anomalia geoquímica. Em L-103, as rochas aflorantes são básicas e a presença de anomalias geoquímica e geofísica sugerem a presença de minério sulfetado.

Figura 18 - Mapa de isoanomalia geoquímica e a posição do perfil III.

Figura 19 - Perfil geofísico III

Figura 20 - Mapa de isoanomalia geoquímica e posição do perfil X.

Figura 21 - Perfil geofísico X.

O perfil X, apresenta também anomalias geofísicas associadas à anomalias geoquímicas. Neste perfil há uma concordância entre as fraturas e a anomalia geofísica, anomalia esta bem característica em ambas as frequências.

Os valores encontrados com a frequência de 880 c/s, mostram anomalias em locais de fratura e anomalia geoquímica, enquanto que permanecem praticamente inalterados, principalmente na parte E, ou seja, entre L-60 e L-64.

Na frequência de 3520 c/s os valores são bem mais oscilantes, tomando porém a forma típica de uma anomalia em L-59,5, L-58,5 e L-56.

Se compararmos as amplitudes das anomalias geofísicas encontradas em L-56 e L-59,5 com o tipo de fratura e valor da anomalia geoquímica, verifica-se que em L-56, onde a fratura se encontra silicificada e os valores geoquímicos são inferiores aos de L-59,5, e anomalia geofísica é maior. Tal fato pode ter as seguintes causas:

- a) - a fratura contém água salobra.
- b) - existe mineralização de sulfeto em profundidade em L-56
- c) - a proximidade das duas zonas mineralizadas de L-58,5 e L-59,5 se influenciam mutuamente, diminuindo o valor individual das anomalias.

b) - área com corpos de minério

Na área da Mina Caraíba propriamente dita foram medidos, dentre outros, os perfis I e II.

O perfil I apresenta em ambas as frequências anomalias que atingem dezenas de por cento.

A parte do perfil medido sobre o minério, ou seja, entre L-116 e L-108, apresenta um afastamento entre as componentes I e R, em ambas as frequências, semelhantes ao comportamento da anomalia constatada em laboratório, quando se mede sobre uma placa horizontal, como pode ser visto na figura 11, inclusive o aumento da anomalia ao se chegar na extremidade da placa.

As anomalias presentes na parte W são devidas às lentes de granito.

Na extremidade E, próximo à L-111, onde ainda existem anomalias geoquímicas, ocorre uma fratura que provoca a anomalia geofísica.

O perfil II, medido à sul do perfil I, apresenta valores e aspectos que diferem bastante do perfil anterior.

Figura 22 - Mapa de isoanomalia geoquímica e posição dos perfis I e II.

Figura 23 - Perfil geofísico I.

Figura 24 - Perfil geofísico II.

Constante neste perfil é a anomalia em L-109, causa
da pelo granito.

Na parte correspondente ao corpo de rochas básicas,
à E de L-114, também ocorre o afastamento entre os valores das duas compo-
nentes I e R, tal como no perfil I. A fratura em L-118 provoca anomalia ,
porém sômente na frequência elevada.

c - área sem anomalia geoquímica

Para verificar o comportamento do campo eletro-mag-
nético induzido em local sem anomalia geoquímica foi medido o perfil XII.

Neste perfil, nota-se que a componente que menos so
freu oscilações foi a componente R, da frequência de 880 c/s, que se man-
teve praticamente inalterada durante todo o perfil.

Mesmo na frequência elevada, as variações de R são
reduzidas, não acompanhando as variações anômalas da componente I, exce-
to em L-105.

A componente I, em ambas as frequências, sofre os-
cilações de poucas dezenas de por cento.

Como na área não foram encontradas anomalias geo-químicas, pode-se admitir que as oscilações são devidas a:

- a) - zonas de concentração de magnetita nos granitos e gnaisses
- b) - zonas de fraturas contendo soluções salinas
- c) - zonas de concentrações salinas na superfície do terreno.
- d) - área com anomalia geofísica determinada pelo método do potencial induzido

À norte da área da Caraíba, em Surubim, foram medidos alguns perfis, dos quais apresentamos o perfil XXX.

Com base em trabalhos geofísicos já executados anteriormente, para os quais foi utilizado o método do potencial induzido, em áreas selecionadas, foram abertas trincheiras, poços e realizadas sondagens.

Os resultados obtidos foram diversos. Em alguns locais, onde havia anomalia geofísica, os trabalhos de prospecção revelaram a presença de zonas mineralizadas, como assinaladas no perfil XXX. Em outros locais porém, mesmo com anomalias geofísicas bem caracterizadas, não foi encontrado qualquer sinal de mineralização.

Na extremidade W, do perfil XXX, nas componentes I e R da frequência de 3520 c/s aparecem valores extremamente elevados, que estão ausentes na frequência de 880 c/s.

À W de FS-20, o perfil foi medido numa região coberta por aluviões trazidos pelos rios que aí correm durante a época das chuvas. Como os rios não são perenes e frequentemente formam pequenas lagoas que se secam no período da estiagem, há a precipitação dos sais dissolvidos na água.

Alguns dos sais precipitados devem ser higroscópicos, retendo uma certa umidade, que confere ao solo uma alta condutividade (baixa resistividade).

Assim sendo, este material superficial de alta condutividade situado sobre um substrato isolante, que é a rocha fresca, provoca a concentração das correntes alternadas induzidas nesta capa superficial ("skin effect"). A concentração destas correntes é diretamente proporcional à frequência utilizada. Deste modo, quanto maior a frequência da corrente, tanto menor a penetração das correntes induzidas.

O que se nota na parte W deste perfil XXX, é o resultado do "skin effect" associado ao aumento de indução ocasionando uma falsa anomalia, que porém não aparece na frequência de 880 c/s.

Os demais perfis obtidos nesta área apresentam o mesmo fenômeno quando medidos em áreas cobertas por depósitos de rios temporários.

Figura 25 - Perfil geofísico XII

Figura 26 - Perfil geofísico XXX.

B.2.2.3-Fase de prospecção

Com a experiência obtida durante os trabalhos da fase preliminar, foi executado um levantamento pormenorizado de uma área de algumas dezenas de hectares.

Nesta área ocorre uma anomalia geoquímica, onde são encontrados valores de até 250 ppm Cu acima da média regional, como pode ser observado na figura 27.

Nesta área foram executados perfis E-W, espaçados de 50 m, perpendicularmente à estrutura geológica, com pontos de medida distanciados de 20 metros.

Nos perfis foram assinaladas as anomalias, que foram arbitrariamente divididas em três grandezas, 1, 2 e 3, respectivamente, segundo a sua extensão e amplitude.

O mapa de anomalias geofísicas mostra uma série de anomalias das quais uma está presente em todos os perfis, entre L-30 e L-31, numa direção aproximadamente N-10-W.

Nos vários perfis aparecem outras anomalias, sem apresentarem a constância daquela acima referida.

Figura 27 - Mapa geoquímico regional e delimitação da área estudada em -
pormenor

Figura 28 - Posição das anomalias e suas grandezas

Observações geológicas determinaram que a atitude das rochas é aproximadamente N-S, com mergulhos acentuados para E, o que é também corroborado pelo aspecto das curvas de anomalia (vide figura 11).

Comparando-se a posição das anomalias geofísicas e a posição das anomalias geoquímicas obtidas por um levantamento pormenorizado (não apresentado no presente trabalho), verifica-se que há um deslocamento relativo entre a posição das duas anomalias, que deveriam ser coincidentes geograficamente. As anomalias geofísicas encontram-se deslocadas rumo à W.

Isto levou a supor que o corpo causador da anomalia geofísica não é o mesmo que causa a anomalia geoquímica.

A fim de procurar verificar a causa das anomalias geofísicas existentes na área, foram executadas sondagens rotativas abertas trincheiras, que revelaram a presença de uma lente contendo grafita e em profundidade, um corpo básico fracamente mineralizado.

A lente contendo grafita ocorre até a superfície - (coberta por solo residual), nos pontos onde foram encontradas as anomalias geofísicas, e possui um mergulho de cerca 70° para leste, confirmando as indicações anteriormente obtidas.

O corpo básico fracamente mineralizado, encontra-se neste local, numa profundidade maior que 40 metros.

Os testemunhos de sondagem mostram que além da calcopirita, ocorre frequentemente pirita e eventualmente arsenopirita.

O teor de cobre contido nestas rochas raramente ultrapassa 0,5% Cu, ou seja, uma quantidade de sulfetos de 2-3%, a qual é suficiente para provocar o aparecimento de anomalias geofísicas, como as observadas no restante da área.

B.2.3 - Aplicação do "Trend Surface Analysis"

B.2.3.1 - Introdução

Com a finalidade de se verificar o uso de aplicação do "trend surface analysis" como metodologia na interpretação de dados obtidos através da aplicação do método eletro-magnético, foi feito um ensaio utilizando-se os dados obtidos no levantamento pormenorizado.

Nesta área foram medidos 20 perfis, espaçados de 50 m, com pontos de leitura distantes de 20 m, obtendo-se um total de aproximadamente 900 pontos de medida. Estes pontos representam 3.600 informa-ções, uma vez que são medidas as componentes R e I das frequências de 880 e 3520 c/s, respectivamente.

B.2.3.2 - Cálculo

Como o programa era limitado na época do tratamento, foram aproveitados somente os dados obtidos em perfis espaçados de 100 m , o que representam cerca de 450 pontos de medida. A malha de pontos perfaz assim um retículo de 100 x 20 metros.

Os cálculos das superfícies apresentavam baixos fatores de correlação, que não ultrapassaram 40%, em consequência da elevada flutuação nos valores medidos no campo.

As superfícies não ultrapassaram a do 3º grau, pois a partir do cálculo da superfície do 4º grau, foi encontrada indeterminação.

O mapa do "trend surface analysis" não é muito conclusivo, pois está prejudicado pelo baixo fator de correlação. Assim sendo, procurou-se estudar e interpretar não os mapas, mas sim os resíduos, procurando, por meio de seu agrupamento e distribuição verificar a sua utilização.

B.2.3.3 - Mapa dos resíduos

Observando-se a figura 9, nota-se que os valores anô

malos são aqueles onde a componente I atinge valores inferiores a 0%, ou seja, negativos, e a componente R, valores inferiores a 100%.

Como o espaçamento entre as bobinas era de 60 m, e o espaçamento entre os pontos de medida de 20 m, há pelo menos 2 pontos-de medida entre as bobinas quando estas se deslocam. Por menor que seja um corpo, e mesmo que duas medidas R_1T_1 e R_4T_4 caíssem verticalmente sobre o corpo, há sempre duas posições R_2T_2 e R_3T_3 que estão com o corpo situado entre as bobinas T e R.

Foram assim selecionados grupos de no mínimo 2 valores negativos sucessivos de resíduos, admitidos como sendo anomalia.

Como uma anomalia é expressa por valores inferiores a 0% para I e inferiores a 100% para R, em ambas as componentes das duas frequências, pelo menos em princípio, admitiu-se primeiramente como anomalia o trecho do agrupamento dos resíduos comum a duas componentes-de uma mesma frequência, por exemplo I e R de 880 c/s.

Depois de selecionado o trecho anômalo comum a ambas as componentes de uma mesma frequência, foi o mesmo realizado para as componentes da outra frequência.

Isto feito, foram delimitados os trechos anômalos-

Figura 29 - Posição relativa de R e T e o corpo condutor.

comuns, agora, a ambas as componentes das duas frequências, resultando -
disto o mapa da figura 30.

Verifica-se que este mapa assemelha-se muito ao da figura 28, o que permite concluir que a técnica do "trend surface analysis" é aplicável quando se utiliza o resíduo, podendo-se delimitar as áreas anômalas.

Como a posição geográfica das anomalias é de grande importância, este método é de grande valia na prospecção de áreas extensas, pois é grande o volume de dados a ser tratado.

Figura 30 - Posição das anomalias geofísicas obtidas pela técnica da associação de resíduos.

B.3 - CONCLUSÕES

A - Laboratório

a) - quanto a amplitude da anomalia

1. a amplitude da anomalia aumenta com a relação a/T , ou seja, com a diminuição da profundidade para um mesmo espaçamento entre as bobinas.
2. a amplitude da anomalia aumenta com o aumento da frequência, em consequência do aumento do fator indutivo.

b) - quanto a forma da anomalia

1. a forma da anomalia depende da inclinação do corpo condutor. A forma da curva é uma indicação útil na determinação do rumo do mergulho do corpo.

c) - quanto a posição do corpo

1. a anomalia é máxima quando o corpo se encontra situado entre as bobinas. Quando qualquer uma das bobinas se encontra verticalmente sobre o corpo, principalmente quando este é vertical, os valores de I e R são respectivamente 0% e 100%.

B - Mina Camaquã

- a) - conforme mostra a figura 12, minério filonar com teor de sulfeto acima de 4% (exemplo filão S.Luiz), provoca anomalias que podem atingir até 40% (pico a pico).
- b) - filões com teor de sulfeto inferior a 2%, tendo como ganga barita, calcedônia, quartzo e limonita, não causam anomalia quando se utiliza o equipamento E M Gun.
- c) - riachos (sangas) podem provocar o aparecimento de anomalias. Para se verificar se êstes são realmente as causas das anomalias, é suficiente medir-se um segundo perfil, deslocado à montante ou a jusante do ponto anteriormente medido, não ao longo da direção geológica local, e verificar a constância da anomalia com a presença do riacho.
- d) - falhas podem provocar o aparecimento de anomalias. Perfis medidos em Camaquã confirmam a existência de uma falha, onde se encontra encaixado o Ribeirão João Dias, nas proximidades da usina de tratamento da Mina.
- e) - o funcionamento de motores elétricos perturba de muito os levantamentos nas proximidades da Mina.

C - Mina Caraíba

- a) - corpos de minério disseminado, mesmo extensos, provocam o aparecimento de anomalias geofísicas.
- b) - faixas ricas em minerais máficos em rochas gnaissicas, parecem provocar o aparecimento de anomalias geofísicas.
- c) - em zonas de anomalia geoquímica, eram encontradas anomalias geofísicas.
- d) - nas proximidades das extremidades de lentes de granito róseo de grã fina, aparecem anomalias geofísicas.
- e) - lentes contendo grafita provocam anomalias geofísicas.
- f) - mesmo em locais sem anomalia geoquímica, o "back-ground" geofísico, apresenta-se bastante irregular causado provavelmente pela concentração de minerais máficos ou de fraturas contendo água salobra.
- g) - o método mostra-se mais conclusivo que o do potencial induzido, sobretudo em locais de cobertura aluvionar de alta salinidade - (mesmo em período de seca).
- h) - na época da seca os trabalhos são fortemente dificultados pela alta intensidade da eletricidade estática.
- i) - concentrações de sulfetos acima de 3% provocam anomalias.
- j) - rochas básicas e ultrabásicas podem causar anomalias.

- l) - a técnica de "trend surface analysis" é aplicável quando se faz uso dos resíduos, sobretudo das superfícies de primeiro grau.
- m) - para facilitar a correlação entre as anomalias de diferentes perfis, é aconselhável não espaçá-los mais de 150 m.
- n) - o método demonstrou-se aplicável na região, porém as anomalias não são provocadas exclusivamente por sulfetos de cobre. É necessário haver uma perfeita correlação entre a posição das anomalias geoquímica e geofísica, para que se justifique o emprego de métodos mais caros para verificar a causa das anomalias.

B.4 - BIBLIOGRAFIA

Bentz, A. - Lehrbuch der Angewandten Geologie, v.I, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1961, 1058 pp.

Caraíba Mineração Metalurgia - Relatórios. Inéditos.

Companhia Brasileira do Cobre - Relatórios. Inéditos.

Costa Filho, J.H. - Prospecção da Mina de Cobre de Camaquã no Rio Grande do Sul, Brasil. Div. Fom. Prod. Mineral, Bol.59, parte II, - p. 13-85, Rio de Janeiro, 1944.

Coutinho, J.M.V., Barros Gomes, C. - A Jazida de Cobre da Caraíba, Ba: Alguns Aspectos Petrogenéticos. An.Acad.Bras.Ciêñ., v.36, n.3 . p. 374R-375R, Rio de Janeiro, 1964.

Cunha, A.N., Lacourt, F. - Região Cuprífera de Caraíba e Poço de Fôra (Bahia), Brasil. Div. Fom. Prod. Mineral, Bol. 41, p.85-98, Rio de Janeiro, 1940.

Grant, F.S. & West, G.F. - Interpretation Theory in Applied Geophysics. - Mc-Graw-Hill Book Company, N.York, 1965, 583 pp.

Hedström, E.J., Parasnis, D.S. - Some Model Experiments Relating to Electromagnetic Prospecting With Special Reference to Airborne Work.

Geoph. Prosp., v. VI, nº4, p.322-341, 1958.

Kollert, R - Electromagnetic Prospecting - Memorandum. Inédito, 1970, 14 pp.

Leinz, V., Barbosa, A.F. - A Jazida de Cobre do "Cerro dos Martins", Caçapava - Rio Grande do Sul - Min.Met. v.V, nº30, p.252-258 , 1941

Leinz, V., Almeida, S.C. - Gênese da Jazida de Cobre de "Camaquan", Município de Caçapava, Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, Dir. Prod. Mineral, Public. nº4, Pôrto Alegre, 1941, 47.pp.

Leinz, V., Barbosa, A.F., Teixeira, E.A. - Mapa Geológico Caçapava - Lavras. Rio Grande do Sul, Dir. Prod. Mineral, Public. nº 6, Pôrto Alegre, 1941, 39 pp.

Leinz, V. - Gênese da Jazida de Cobre da Caraíba, Baía. Min. Met. v.XII , nº 72, p. 629. Rio de Janeiro , 1948.

Leonardos, O.H. - Cobre no Estado do Rio Grande do Sul - Div. Fom. Prod.-Mineral, Bol. 59, parte IV, p. 97-117, Rio de Janeiro, 1944.

Lewis Jr., R.W. - Geologia e Geoquímica da Jazida de Cobre de Caraíba, Bahia, Brasil. Div. Fom. Prod. Mineral, Bol. 119, p. 57-58, Rio de Janeiro, 1964.

Melcher, G.C., Mau, H. - Novas Observações Geológicas na Região de Caçapava do Sul. An. Acad. Bras. Ciên. v.32, nº 1, p.43-50, Rio de Janeiro, 1960.

- Mello Jr., J.L., Pouchain, E.B. - Cobre no Estado da Bahia, Brasil. Div. Fom. Prod. Mineral, Bol.79, p. 77-78, Rio de Janeiro, 1946.
- Ribeiro, M., Bocchi, P.R., Figueiredo Fº, P.M., Tessari, H. - Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul - Rio Grande do Sul, Brasil. Div. Fom. Prod. Mineral, Bol. 127, 1966, 232 pp.
- Robertson, J.F. - Revision of the Stratigraphy and Nomenclature of Rock Units in the Caçapava - Lavras Region, State of Rio Grande do Sul. Notas e Estudos, v.I, nº2, Escola de Geologia da UFRGS, Pôrto Alegre, 1966.
- Schneider, A. - Piroxenitos Cupríferos de Caraíba, Bahia. Min. Met. v. XV, nº 90, p. 271,276, Rio de Janeiro, 1944.
- Teixeira, E.A. - A Mina de Cobre de Camaquã. Div. Fom. Prod. Mineral, Bol. 49, 1941, 47 pp.
- Törnqvist, G. - Some Practical Results of Airborne Electromagnetic Prospecting in Sweden. Geoph. Prosp. v. VI, nº 2, p. 112-126, 1958.