UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA,
CIÊNCIAS E LÊTRAS

ESTUDO SÔBRE A PROSPECÇÃO GEOFÍSICA DAS JAZIDAS DE FERRO DA FAIXA NOVA ERA - ITAMARANDIBA ESTADO DE MINAS GERAIS

**Tese apresentada ao
Concurso de Livre-Docência.
Cadeira de Geologia Estrutural
e Geofísica Aplicada**

por

ANDRÉ DAVINO

SÃO PAULO
1969

ÍNDICE

RESUMO

Página

I - INTRODUÇÃO

. A Faixa Nova Era - Itamarandiba	1.03
. Posição Estratigráfica dos Gnaisses e Micaxistos	1.05
. Finalidades do Presente Trabalho	1.07
. Agradecimentos	1.07

II - MAGNETOMETRIA

1 - Introdução	II.01
a. Padrões das Anomalias Magnéticas	II.01
. Intensidade das Anomalias	II.03
. Teor de Magnetita das Rochas	II.03
. Relação entre Susceptibilidade Magnética e Teor de Magnetita	II.05
. Forma das Anomalias	II.06
2 - Levantamentos Magnetométricos de Algumas Jazidas	II.07
a. Jazida Boa Esperança	II.07
. Dados Genéricos	II.07
. Perfis Magnetométricos	II.08
. Resultados	II.10
b. Jazidas da Liberdade, Cuité e Curriola	II.10
c. Estudos sobre Modelos em Escala Reduzida	II.12

(continua)

ÍNDICE

(conclusão)

	<u>Página</u>
3 - Levantamento Aeromagnetométrico	II.15
. Dados Técnicos	II.15
. Resultados	II.16
4 - Conclusões	II.16
 <u>III - ELETORRESISTIVIDADE</u>	
1 - Introdução	III.01
2 - Estudos Preliminares	III.02
. Perfilagens Elétricas	III.02
. Resistividade das Águas	III.05
. Resultados	III.10
3 - Perfis e Cartas de Resistividade Aparente	III.11
. Interpretação	III.14
. Estudos sobre Modelos em Escala Reduzida	III.15
4 - Sondagens Elétricas	III.17
. Generalidades	III.17
. As Curvas de Resistividade	III.17
. Interpretação	III.19
. Método da Superposição	III.21
. Método do Ponto Auxiliar	III.23
. Anisotropia	III.26
5 - Conclusões	III.27
 <u>IV - CONCLUSÕES GERAIS</u>	 IV.01
 <u>V - BIBLIOGRAFIA</u>	 V.01

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados dos estudos sobre a prospecção geofísica das ocorrências de ferro situadas na faixa Nova Era - Itamarandiba, no centro-leste do Estado de Minas Gerais.

O trabalho mais recente sobre a geologia dessa área se deve a Pflug (1965). Esse Autor considera que as rochas gnáissicas que constituem a faixa Nova Era - Itamarandiba pertencem em parte à Série Minas, ou mais particularmente, à fácies Guanhães dessa Série e, em parte, à Série pré-Minas. Há, no entanto, diversos indícios de que se trata de uma única unidade estratigráfica, possivelmente a fácies Guanhães da Série Minas, definida por Pflug.

Os estudos geofísicos foram efetuados em algumas áreas da parte sul da faixa Nova Era - Itamarandiba, mas, as conclusões tiradas são válidas para toda a região, pois que os corpos de itabirito magnetítico existentes nessa faixa apresentam características litológicas, estruturais e comportamento magnético semelhantes.

O presente trabalho teve por objetivo caracterizar os métodos geofísicos mais adequados à prospecção das ocorrências de ferro daquela faixa.

Magnetometria

De acordo com seu padrão, as anomalias magnéticas foram classificadas em três categorias: (1) tipo-Cauê, (2) tipo-Boa Esperança e (3) tipo-canga. Essa classificação tem grande importância do ponto de vista da aplicabilidade do método magnetométrico na pesquisa daquelas jazidas de ferro.

Foram realizados levantamentos magnetométricos em 4 locais da parte sul da faixa Nova Era - Itamarandiba: Boa Esperança, Liberdade, Cuité e Curriola. Os resultados desses levantamentos são discutidos no presente trabalho. Sua principal contribuição foi permitir traçar os contornos das ocorrências de ferro em tempo muito mais curto do que seria necessário se fosse usado qualquer outro método de pesquisa.

O levantamento aeromagnetométrico executado pela Companhia Vale do Rio Doce na faixa compreendida entre Nova Era e Guanhães detectou cerca de 20 anomalias magnéticas, quase todas correspondentes a corpos de itabirito magnetítico. Além disso, auxiliou no traçado das grandes linhas estruturais da área sobrevoada.

Eletorresistividade

Do ponto de vista do método de eletorresistividade, podem ser distinguidos 4 estratos principais nas áreas das ocorrências de ferro da faixa Nova Era - Itamarandiba:

- . solo (condutor)
- . formação ferrífera (resistente)
- . gnaiss decomposto (condutor)
- . gnaiss são (resistente)

O gnaiss decomposto é o estrato mais espesso e o que apresenta as menores variações de resistividade. Graças a essas características do terceiro estrato que se tornou possível a aplicação do método de eletorresistividade, pois ele funciona como um substrato condutor de espessura "infinita" para as duas primeiras camadas.

Os dois procedimentos principais do método de eletorresistividade foram empregados: Sondagem Elétrica e Carta de Resistividade.

A eletorresistividade complementa o método magnetométrico fornecendo novos dados para o traçado dos contornos das jazidas e acrescenta um outro elemento importante à prospecção daquelas jazidas: a espessura do solo e da formação ferrífera.

O estudo em conjunto dos dados de magnetometria e de eletorresistividade, aliado ao conhecimento geológico da região, permitem reduzir consideravelmente o tempo, os esforços, os custos operacionais e os riscos financeiros das pesquisas.

INTRODUÇÃO

Embora conhecidas desde longa data, até recentemente pouco interesse despertaram para os mineradores as numerosas ocorrências de minério de ferro localizadas ao longo da faixa Nova Era - Itamarandiba, no centro-leste do Estado de Minas Gerais (fig. 1), em face das enormes reservas do Quadrilátero Ferrífero.

Nos últimos anos, porém, a Companhia Vale do Rio Doce (C.V.R.D.) teve sua atenção voltada para aquelas ocorrências, por diversos motivos:

- a) a excepcional qualidade do minério existente na Jazida Boa Esperança, de grande aceitação no Exterior;
- b) a necessidade de aumentar suas reservas de minério de ferro em face do ritmo crescente das exportações;
- c) a possibilidade de aproveitamento de seu pessoal técnico e de seus próprios equipamentos e meios de transporte para o desenvolvimento das novas áreas de mineração.

De fato, algumas ocorrências de ferro da faixa Nova Era - Itamarandiba - como, por exemplo, as de Boa Esperança, Liberdade, Cuité e Curriola - se localizam a menos de 30 quilômetros do tronco principal da Estrada de Ferro Vitória-Minas, de propriedade da CVRD, que serve de escoadouro para o minério produzido no Distrito de Itabira, onde a CVRD tem suas maiores jazidas.

A fim de avaliar, no mais curto prazo possível, os recursos em minério de ferro daquela faixa, a CVRD decidiu-se por um levantamento aeromagnetométrico. O planejamento de voo e as previsões dos resultados dependiam, no entanto, do conhecimento das características magnéticas dos minérios de ferro.

O autor teve a oportunidade de realizar os primeiros ensaios de magnetometria naquela região, em dezembro de 1967. Segundo consta, nenhuma outra tentativa de aplicação dos métodos geofísicos fora anteriormente empreendida na área.

Para testar a aplicabilidade do método e prever os resultados do levantamento aerotransportado foram realizados estudos na área da Jazida Boa Esperança que é a ocorrência de ferro mais conhecida da faixa Nova Era - Itamarandiba. Além disso, me

dições magnetométricas foram efetuadas nas áreas das jazidas Cavê e Conceição, ambas situadas no Distrito mineiro de Itabira.

Fig. 1 - A faixa Nova Era - Itamarandiba. Geologia seg. Pflug (1965), modificada.

Os resultados desses ensaios indicaram vários problemas para a prospecção geofísica, os quais mereciam um estudo mais acurado não só de interesse acadêmico, mas pelas implicações econômicas que tais estudos teriam na orientação das futuras pesquisas a serem feitas na área.

Graças a auxílio recebido da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo o autor pôde ampliar os estudos empreendidos. Além do método magnetométrico, empregou-se gravimetria e eletrorresistividade. Este último mostrou-se excepcionalmente útil como método de prospecção das jazidas tipo-Boa Esperança.

Um perfil gravimétrico levantado na parte norte da jazida do Cauê acusou um alto gravimétrico de +10 mgal. Ainda que o método gravimétrico possa ser de grande utilidade para a prospecção das jazidas de ferro, preferiu-se preterir-lo aos outros dois - magnetometria e eletrorresistividade - porque a aplicação da gravimetria exige um levantamento topográfico de alta precisão, o que onera e torna muito moroso o levantamento. O relevo acidentado das áreas das jazidas e arredores constitui também um fator contrário ao emprego de gravimetria.

. A Faixa Nova Era - Itamarandiba

A faixa Nova Era - Itamarandiba se localiza a leste da parte meridional da Cordilheira do Espinhaço, no centro-leste do Estado de Minas Gerais, aproximadamente entre os meridianos de $43^{\circ}15'$ e $42^{\circ}45'$ e os paralelos $17^{\circ}50'$ e $19^{\circ}50'$ (figura 1). Ao sul, situa-se a cidade de Nova Era e ao norte, Itamarandiba, enquanto Guanhães ocupa posição central dentro da faixa considerada. O distrito ferrífero de Itabira, a noroeste de Nova Era, é considerado parte do Quadrilátero Ferrífero (Dorr e Barbosa, 1963).

A área apresenta relevo acidentado, montanhoso, e é drenada pelos tributários do Rio Doce que deságua no Oceano Atlântico.

Do ponto de vista geológico, a faixa Nova Era - Itamarandiba é pouco conhecida. A maioria das referências, algumas das quais datam do século passado, limita-se a descrições locais. Foram ensaiadas, no entanto, algumas tentativas de correlação estratigráfica regional.

A publicação mais atual e mais completa sobre a geologia da região se deve a Pflug (1965). Neste excelente trabalho, Pflug, aplicando os conceitos de mudança de fácies e de zonas metamórficas, pôde provar que a Série Minas (Dorr et al, 1957, p.22) tem uma extensão muito maior do que foi geralmente suposto.

Fig. 2 - Distribuição das fácies na Série Minas, seg. Pflug (1965, pp. 32 e 33), modificado.

Para Pflug, a região fornecedora de sedimentos, durante a deposição da Série Minas, estaria situada na atual bacia do Rio São Francisco (fig. 2). Ao redor desse núcleo continental ter-se-iam desenvolvido três zonas de fácies:

- . fácies Diamantina
- . fácies Itabira
- . fácies Guanhães

Estas zonas de fácies indicariam uma evolução de sedimentos de plataforma continental para sedimentos de geossinclinal.

A fácies Diamantina, caracterizada por areias bem classificadas, com estratificação cruzada e pelos conglomerados, atinge até 100 km de largura.

A fácies Itabira, com potentes itabiritos, tem de 10 a 15 km de largura.

A fácies Guanhães, com sedimentos eugeossinclinais, hoje representados pelos gnaisses e micaxistos, possui mais de 100 km de largura.

. Posição Estratigráfica dos Gnaisses e Micaxistos

Em seu mapa geológico, Pflug (1965, prancha) distingue os gnaisses e micaxistos pertencentes à Série Minas dos gnaisses e micaxistos da Série pré-Minas (fig. 1). Há vários indícios, no entanto, de que se trata de uma mesma unidade estratigráfica:

- 1º) Pflug (1965, p.19) afirma textualmente: "é difícil distinguir no campo, com certeza, a Série pré-Minas da Série Minas quando esta última também é gnaissificada". Em outro trecho, Pflug (1965, p.30) escreve: "os gnaisses e micaxistos (referindo-se à Série Minas) não foram pesquisados e as amostras ainda não foram estudadas".
- 2º) As grandes linhas estruturais mapeadas por Pflug não sofrem, na área dos gnaisses e micaxistos, solução de continuidade ao passar de uma unidade estratigráfica pa

ra outra. No entanto, é conhecida a discordância entre a Série Minas e a Série pré-Minas (Dorr et al, 1957, p. 15).

Por outro lado, como a Série Minas apresenta mais de 10.000 metros de espessura na região de Guanhões, ainda segundo Pflug (1965, p. 31), é difícil explicar a presença, lado a lado, dessas duas Séries, sem evocar falhamentos verticais de grande rejeito.

- 3º) Os itabiritos, rochas características da Série Minas, ocorrem em vários locais na parte sul da faixa Nova Era - Itamarandiba. No presente trabalho, são relatados estudos feitos nas jazidas de Boa Esperança, Liberdade, Cuité e Curriola (fig. 1) todas encaixadas em rochas gnáissicas, as quais foram mapeadas por Pflug como pertencentes à Série pré-Minas.

O levantamento aeromagnetométrico realizado na faixa compreendida entre Nova Era e Guanhões e relatado no Capítulo II.3 do presente trabalho, indicou a existência de duas dezenas de anomalias magnéticas (a maioria delas correspondem a corpos de itabiritos) cujas características são tão uniformes que permitem supor serem todas causadas por corpos formados em condições idênticas. Difícilmente, rochas ferríferas que, por hipótese, se originassem durante a deposição da Série pré-Minas, teriam características magnéticas semelhantes aos itabiritos da Série Minas.

- 4º) Os gnaisses e micaxistos de toda faixa Nova Era - Itamarandiba apresentam a mesma idade radiométrica: 500 milhões de anos. Cordani et al (1968) incluem aquela área na chamada faixa orogênica do Paraíba, usando a denominação dada por Ebert (1962).

Uma outra determinação radiométrica da idade de gnaisses proveniente da Jazida Boa Esperança confirmou plenamente aquela idade. A determinação foi realizada no Laboratório de Geocronologia da Universidade de São Paulo.

Em vista dos argumentos acima enumerados, o autor do presente trabalho prefere considerar que os gnaisses e micaxistos constituem uma só unidade estratigráfica, possivelmente, a fácies Guanhões definida por Pflug (1965, p. 33).

. Finalidades do Presente Trabalho

As finalidades do presente trabalho foram:

- 1.º) Investigar e caracterizar os métodos geofísicos mais adequados à prospecção das ocorrências de ferro da faixa Nova Era - Itamarandiba.
- 2.º) Relacionar as vantagens proporcionadas pelo emprego desses métodos na prospecção daquelas ocorrências.

. Agradecimentos

A elaboração desta tese só foi possível graças à cooperação de numerosas pessoas e entidades.

Ao Professor Pierre René Taltasse, devemos o estímulo durante a elaboração do presente trabalho e sua colaboração direta na coleta e interpretação dos dados de resistividade, temperatura e pH das águas que circulam na área da Jazida Boa Esperança e em Itabira.

Os geólogos e engenheiros da Companhia Vale do Rio Doce demonstraram invulgar espírito de colaboração, pondo à nossa disposição todos os documentos necessários para elaboração deste trabalho. Os Geólogos José Eduardo Machado e Wanderlei de Rui Beisegel acompanharam e orientaram o autor nos trabalhos de campo diversas vezes. Temos oportunidade de conhecer diversos problemas relacionados com a geologia da área estudada em discussões com os Geólogos Domingos Drummond Tôres, José Aluísio Vasconcellos, Amílcar Souto Jorge e Ricardo A. C. Figueiredo. O Engenheiro de Minas Guilherme Gasolla forneceu-nos dados concernentes ao trabalho de prospecção da Jazida Boa Esperança. Recebemos valiosas informações e dados sobre análises químicas e teor de magnetita das rochas por parte do Engenheiro-Químico Edson Ribeiro Teixeira.

O colega Umberto G. Cordani, diretor científico do Laboratório de Geocronologia da FFCL da USP, gentilmente determinou a idade radiométrica de um gnaisse da área da Jazida Boa Esperança.

Os senhores Kiyoshi Kadekaru e Oswaldo R. Obata, alunos do Curso de Geologia da USP, realizaram as experiências de eletrorresistividade em escala reduzida.

De alta valia foi o auxílio financeiro prestado pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo na elaboração da presente tese.

A tôdas as pessoas e entidades mencionadas, apresentamos sinceros agradecimentos.

II

MAGNETOMETRIA

11.1 - Introdução

É clássica a aplicação do método magnetométrico na pesquisa de jazidas de ferro e considera-se uma fase necessária antes da programação dos furos de sondagens e dos outros meios tradicionais de prospecção.

Neste capítulo são fornecidos todos os elementos que caracterizam a aplicabilidade da magnetometria como método para a prospecção das ocorrências de ferro da faixa Nova Era - Itamarandiba. Mais explicitamente, estuda-se as vantagens, as limitações e os custos operacionais da prospecção magnetométrica em comparação com a prospecção convencional.

Alguns estudos foram efetuados nas jazidas de ferro do distrito de Itabira. Referências são feitas também a outras jazidas do Quadrilátero Ferrífero.

11.1.a - Padrões das Anomalias Magnéticas

Uma das primeiras preocupações foi a de classificar as ocorrências de minério de ferro da região estudada, não do ponto de vista petrográfico, mineralógico ou genético, mas, do ponto de vista da prospecção magnetométrica.

O critério escolhido para a classificação foi o padrão das anomalias magnéticas. Esse padrão é definido pela intensidade e pela forma das anomalias, as quais, por sua vez, dependem do contraste de susceptibilidade magnética, das estruturas, distribuição e profundidade das rochas envolvidas.

Existem três tipos bem distintos de padrões de anomalias (fig. 3) na região em estudo:

- 1º) Anomalias tipo-Cavê, produzidas pelos corpos de itabiritos e hematitas das jazidas situadas no Distrito de Itabira.

- 2º) Anomalias tipo-Boa Esperança, produzidas pelos corpos de hematita e itabiritos magnetíticos da faixa Nova Era - Itamarandiba.
- 3º) Anomalias tipo-canga, produzidas pelos depósitos superficiais de minério de ferro, canga, principalmente. Os "rolados" (vide definição, por exemplo, em Dorr e Barbosa, 1963, p. 76) também podem ser incluídos nessa categoria.

Fig. 3 - Padrões de anomalias magnéticas: (1) tipo-Cauê, (2) tipo-Boa Esperança e (3) tipo-canga.

Há muitos outros tipos intermediários de padrões de anomalias, mas seria inconseqüente para a compreensão da prospecção e para a interpretação dos resultados uma classificação mais elaborada.

. Intensidade das Anomalias

As anomalias tipo-Cauê são menos intensas que as anomalias tipo-Boa Esperança e tipo-canga. A componente vertical das anomalias tipo-Cauê raramente ultrapassa 3.000 gamas, enquanto que essa componente comumente atinge mais de 20.000 gamas nas anomalias tipo-Boa Esperança e tipo-canga.

Essas intensidades podem ser facilmente explicadas em função do teor médio de magnetita das rochas consideradas (tabela 1).

Uma das características das ocorrências de ferro da faixa Nova Era - Itamarandiba é o alto teor médio em magnetita, da ordem de 10 a 30%. As jazidas de hematita do Quadrilátero Ferrífero raramente contêm mais de 5% em média de magnetita.

O que despertou, no entanto, maior interesse, foi o fato de certas cangas - as chamadas cangas ricas (vide definição, por exemplo, em Dorr e Barbosa, 1963, p.77) - serem altamente magnéticas, com teores em magnetita da ordem de 10% a 20%. Este fato não parece ter sido mencionado antes por nenhum pesquisador. Nem se conhece ainda o mecanismo pelo qual se dá a concentração de magnetita nas cangas.

. Teor de Magnetita das Rochas

O cômputo da porcentagem de magnetita em minério de ferro é uma operação delicada.

A separação magnética a partir da amostra previamente moída ou a contagem dos cristais de magnetita em estudos microscópicos com luz refletida, além de trabalhosos, acarretam erros além do esperado.

TABELA 1

II.4

TEOR DE MAGNETITA CALCULADO A PARTIR DA ANÁLISE QUÍMICA DE FeO
EM AMOSTRAS DE MINÉRIO DE FERRO DE VÁRIAS LOCALIDADES
DO CENTRO DE MINAS GERAIS

Local	Nº de Ordem	Rocha	% em Peso de Magnetita
Mina Casa da Pedra Distrito de Congonhas	1	Hematita	1,6 (a)
Quadrângulo Nova Lima	2	Itabirito	4 (b)
	3	Itabirito	<1 (b)
	4	Itabirito	1 (b)
Quadrângulo D. Bosco	5	Itabirito	7 (c)
	6	Itabirito	traços (c)
	7	Itabirito	traços (c)
	8	Itabirito	4 (c)
Quadrângulos Monlevade e Piracicaba	9	Itabirito	24 (d)
	10	Itabirito	6 (d)
	11	Itabirito	10 (d)
	12	Hematita	0 (d)
	13	Hematita	0 (d)
	14	Hematita	0 (d)
	15	Hematita	0 (d)
	16	Hematita	0 (d)
Jazida Boa Esperança	17	Hematita	24
	18	Hematita	24
	19	Hematita	15
Cuité	20	Hematita	13
	21	Hematita	16
	22	Hematita	23
	23	Hematita	17
	24	Hematita	14
	25	Hematita	19
Curriola	26	Hematita	16
	27	Hematita	16
	28	Hematita	17
	29	Hematita	41
Jazida do Caue Itabira	30	Canga rica	20
	31	Canga rica	19

Exceto (a), (b), (c) e (d), as análises foram feitas no Laboratório de Química da C.V.R.D.

(a) seg. GUILD (1966) p. 124
(b) seg. GAIR (1962) p. 37

(c) seg. JOHNSON (1962) p. 31
(d) seg. REEVES (1966) p. 29,33

Na Tabela 1 são fornecidos os teores, em peso, de magnetita nas hematitas, itabiritos e cangas de diversas localidades. Os teores de magnetita foram calculados a partir do conteúdo em FeO das rochas, usando-se a relação:

$$(\text{FeO}) \times 3,2 = (\text{Fe}_3\text{O}_4)$$

Esse método de calcular o teor em magnetita, no entanto, não é o mais correto em vista das dificuldades para se determinar quimicamente o teor de FeO.

Para contornar essas dificuldades, foi desenvolvido um instrumento (o "Satmagan") no Laboratório de Pesquisas Outokumpu Oy de Helsinque, Finlândia, capaz de fornecer em apenas 1 minuto o conteúdo de magnetita de uma amostra de minério de ferro. O princípio desse instrumento baseia-se no fato da força que atua numa amostra colocada num campo magnético, em certas circunstâncias, ser proporcional à porcentagem de material magnético na amostra. Detalhes são fornecidos em Laurila (1964).

Relação entre Susceptibilidade Magnética e Teor de Magnetita

Sendo a magnetita o mais importante constituinte a afetar a susceptibilidade magnética das rochas, foram sugeridas muitas relações quantitativas entre a susceptibilidade magnética K de uma rocha e seu teor em magnetita. Existem apenas dados experimentais. Jahren (1963) encontrou a seguinte relação (fig. 4):

$$K = 0,00116 V^{1,39} \text{ unidades C.G.S.}$$

onde V é a porcentagem, em volume, de magnetita.

Dessa relação pode-se tirar as seguintes conclusões:

- 1ª) Como as anomalias magnéticas crescem rapidamente com o aumento no conteúdo de magnetita, nesse particular, as ocorrências de ferro da faixa No

Fig. 4, - Relação entre susceptibilidade magnética e conteúdo de magnetita, seg. Jahren (1963).

va Era - Itamarandiba são mais favoráveis à pesquisa por magnetometria que as jazidas do Quadrilátero Ferrífero.

- 2.^a) A hematita, que é o mineral mais comum das formações ferríferas estudadas, afeta muito pouco a intensidade de magnetização total das rochas, pois sua ação cor responde apenas àquela de um corpo com menos de 1%, em volume, de magnetita conforme pode-se observar na fig. 4. Conseqüentemente, as hematitas isentas de magnetita apresentam anomalias magnéticas relativamente pequenas e podem ser completamente mascaradas pelo efeito magnético das cangas que as recobrem.

. Forma das Anomalias

As anomalias tipo-Cauê são suaves e amplas e se distinguem facilmente das anomalias tipo-Boa Esperança e tipo-canga.

As cangas, por causa da distribuição caótica dos blocos de hematita e itabirito que as constituem, cada qual funcionando como pequenos ímãs permanentes, apresentam um re lêvo magnético completamente irregular, em "dente-de-serra".

Fig. 5 - Teste expedito para verificar anomalias magnéticas de pequena profundidade (depósitos superficiais).

Um procedimento rápido e capaz de indicar se uma anomalia magnética provém de de pósitos superficiais ou de corpos magnéticos mais profundos, consiste em obter dois va

lôres da anomalia em cada estação, em alturas diferentes na mesma vertical. Como a anomalia é inversamente proporcional ao cubo de uma distância (isto decorre do fato do momento magnético ter a dimensão do produto volume x campo), se o corpo causador da anomalia estiver próximo à superfície do terreno, uma pequena diferença de altura causará grande diferença no valor da anomalia lida. Na fig. 5 é fornecido um exemplo desse procedimento. Os pares de medidas em cada estação foram efetuados estando o magnetômetro a 70 cm e 100 cm de altura. Obtém-se duas curvas ao longo do mesmo perfil. O afastamento das curvas é um índice da profundidade das fontes de anomalias.

11.2 - Levantamentos Magnetométricos de Algumas Jazidas

11.2.a - Jazida Boa Esperança

. Dados Genéricos

A jazida Boa Esperança, adquirida recentemente pela C.V.R.D., é a única ocorrência de ferro bem conhecida da faixa Nova Era - Itamarandiba. Está sendo prospectada por meio de furos de sondagens e de poços.

A jazida situa-se no município de Nova Era, cerca de 20 km a leste da cidade de Itabira.

O minério, constituído por hematita granular contendo cerca de 10 a 30% de magnetita, apresenta-se sob a forma de lentes delgadas de alguns a algumas dezenas de metros de comprimento, dentro de uma seqüência muito distorcida de itabirito e gnaisses e micaxistos. Sua posição estratigráfica não está ainda definitivamente assente. Conforme discussão no Capítulo I, preferimos incluir a jazida Boa Esperança e as demais que serão tratadas a seguir dentro da Série Minas. Enquanto não for esclarecida sua verdadeira posição estratigráfica, sugerimos utilizar para essa unidade litológica a denominação Itabirito Boa Esperança.

O procedimento de campo consistiu no estabelecimento de uma linha-base ao longo do eixo maior da jazida, a partir da qual foram levantadas linhas perpendiculares e, sempre que possível, paralelas entre si.

A fig. 6 mostra a posição das direções dos perfis magnetométricos levantados na parte norte do corpo principal da Jazida Boa Esperança e a fig.7 fornece detalhes de um dos perfis.

Fig. 6 - Parte norte do corpo principal da Jazida Boa Esperança

As anomalias correspondentes ao Itabirito Boa Esperança são bem nítidas em relação às anomalias quase nulas correspondentes às rochas encaixantes. Isto facilita enormemente a delimitação da área de ocorrência da formação ferrífera.

Fig. 7 - Perfil magnetométrico ao longo da direção "e". O corte geológico foi obtido a partir dos dados de sondagens.

O relevo magnético, acidentado e irregular, com diversos picos positivos seguidos de picos negativos, evidenciam a complexidade estrutural da área. Os corpos causadores das anomalias não têm formas geométricas simples. De fato, constata-se total impossibilidade de correlação litológica dos dados dos furos de sondagens mesmo quando estes estão distantes apenas 50 metros.

No perfil geológico da fig. 7 denominou-se Itabirito Boa Esperança a unidade heterogênea formada pelo conjunto de rochas ferríferas (itabirito e hematita magnetíticas) no meio das quais ainda ocorrem lentes delgadas de gnaisses, veios pegmatíticos e de quartzo. Na realidade, a complexidade estrutural é muito maior do que sugere o corte geológico.

As cangas, embora raras, e os "rolados" contribuem para aumentar as irregularidades das anomalias magnéticas. O campo magnético criado pelos depósitos superficiais se superpõe às anomalias provenientes dos corpos in situ.

No perfil da fig. 7 pode-se notar também que o nível zero correspondente às rochas encaixantes não apresenta o mesmo padrão numa extremidade e na outra. A leste há pequenas ondulações nas anomalias que indicam a presença de material magnético, pequenas lentes de itabirito e/ou hematita da ordem de 1 metro de comprimento, muito esparsas e de material "rolado" em pequena quantidade. A oeste, todavia, os valores permanecem próximo do zero, indicando a ausência de qualquer perturbação magnética nesse lado e, conseqüentemente, uma descontinuidade lateral da formação ferrífera, provavelmente, uma falha.

. Resultados

Os levantamentos magnetométricos permitem delimitar facilmente os contornos das ocorrências de minério de ferro, mas, num estudo mais elaborado, poderiam indicar também as zonas onde os corpos magnéticos são maiores e mais espessos.

Dada a complexidade estrutural, é praticamente impossível pretender separar os itabiritos das hematitas, a partir dos resultados da magnetometria.

A fig. 6 mostra o contorno da área magneticamente anômala, traçado a partir dos perfis magnetométricos. Esse contorno coincide praticamente com aquele traçado pela C.V.R.D. com base nos dados dos furos de sondagem.

II.2.b - Jazidas da Liberdade, Cuité e Curriola

Estas jazidas são litológica e estruturalmente semelhantes à jazida Boa Esperança. São constituídas por lentes ou camadas de itabiritos e hematita magnetíticas encaixadas em gnaisses e micaxistos e apresentam mergulho de 15° a 20°.

Os levantamentos magnetométricos executados sobre essas ocorrências (fig.8) serviram para reforçar e generalizar as conclusões tiradas anteriormente.

Fig. 8 - Resultados da prospecção magnetométrica das áreas de Liberdade, Curriola e Cuite

Em média, foram necessários apenas 5 dias para a execução do levantamento de cada ocorrência, utilizando-se um variômetro vertical ABEM e uma equipe de 2 pessoas. Isto define a eficiência do método.

II.2.c - Estudos sobre Modelos em Escala Reduzida

Dois dispositivos foram construídos nas oficinas da C.V.R.D. para servirem aos estudos sobre modelos em escala reduzida (fig. 9). As partes essenciais desses dispositivos são descritas a seguir.

Fig. 9 - Dispositivos para medição com modelos em escala reduzida:
(A) para obtenção de mapas isogamas; (B) para obtenção de perfis magnetométricos

Uma placa de vidro, sob a qual é colocada a amostra representativa do corpo de minério, servia como superfície topográfica (fig. 9-A). Como instrumento de medida foi utilizado um magnetômetro de pequenas dimensões - o "Minimag" da Craelius Geophysical Instruments, pertencente à C.V.R.D.

Na fig. 10 reproduz-se os resultados de um desses estudos que pode ser feito no laboratório, em cerca de 1 hora. É a carta das isoanomalias da componente vertical causada por um corpo tabular horizontal; a superfície do terreno (placa de vidro) é plana e horizontal. Os pólos, positivo e negativo, da "camada de minério de ferro" (amostra) são remanentes e não induzidos, e portanto pouco afetados pelo campo magnético da Terra.

Fig. 10 - Carta de isoanomalias obtida sobre modelo em escala reduzida. O retângulo no centro da figura representa a posição da amostra.

O outro dispositivo utilizado (fig. 9-B) é mais apropriado para obter perfis magnetométricos. Consiste em princípio num suporte móvel que pode deslizar horizontalmente sobre trilhos. Como instrumento de medida foi utilizado um variômetro ABEM que, nessa experiência, é mantido fixo.

A amostra de minério é talhada em dimensões proporcionais àquelas da jazida e colocada sobre o suporte móvel com a mesma orientação com que é encontrada no afloramento. O modelo é deslocado no sentido horizontal e as leituras, no magnetômetro, são feitas para cada posição relativa modelo-instrumento.

A fig. 11-a reproduz um perfil magnetométrico obtido sobre um modelo em escala reduzida e, a título de comparação, a fig. 11-b, um perfil real obtido na ocorrência de Curriola. Deve-se observar a importância dos efeitos magnéticos locais sobre o perfil. O estudo em modelos reduzidos permite visualizar esse fato e orientar a interpretação.

Fig. 11 - Comparação entre o perfil magnetométrico obtido sobre modelo (a) e o obtido no campo (b). O corte geológico e uma seção N-S da Jazida de Curriola.

II.3 - Levantamento Aeromagnetométrico

A C.V.R.D entregou à LASA* a execução de um levantamento aeromagnetométrico cobrindo a faixa Nova Era-Guanhães. O trabalho de interpretação dos resultados coube à Cie. Générale de Géophysique, de Paris (Lacomblez, 1968).

Os objetivos desse levantamento foram definir as extensões das ocorrências conhecidas e detectar todos os indícios desconhecidos a fim de orientar os levantamentos em terra, possibilitando a avaliação completa dos recursos em ferro da zona estudada.

. Dados Técnicos

O levantamento restringiu-se à faixa Nova Era - Guanhães (fig. 1), cobrindo uma zona retangular de orientação N-S com 40 km de largura por 135 km de comprimento. Os vôos se realizaram no período de 17 de maio a 12 de junho de 1968.

Utilizou-se para os vôos um avião DC-3 no qual foram instalados:

- um magnetômetro fluxgate "Gulf Mark III", montado no prolongamento da cauda;
- um registrador "Gulf" que possibilita o registro contínuo do campo magnético total;
- duas câmaras fotográficas, 35 mm, uma, para tomada contínua de fotos e outra, para tomada de fotos comandadas;
- um altímetro e
- um conjunto de rádio-navegação "Doppler Bendix" com dispositivo para fornecer com precisão a cada milha náutica (1852 m) um sinal ("fiducial") enviado a todos os aparelhos possibilitando a sincronização de todos os filmes e registros.

Uma estação terrestre com registro foi instalada no campo de pouso de Belo Horizonte.

(*) LASA - Levantamento Aerofotogramétrico S/A.

Resultados

- 1º) Foram detectadas mais de 20 anomalias magnéticas na área pesquisada por aeromagnetometria, entre as quais estão aquelas correspondentes às jazidas Boa Esperança, Liberdade, Cuité e Curriola.
- 2º) Pôde-se traçar, com auxílio das fotografias aéreas, as grandes linhas estruturais da área em estudo: as direções de gnaissificação e xistosidade, os eixos dos dobramentos e as direções dos falhamentos.
- 3º) O trabalho de campo foi feito em 25 dias; o de compilação e interpretação dos resultados, aproximadamente, em 1 mês. A aeromagnetometria era o único método capaz de fornecer um inventário completo dos recursos em ferro da área estudada em tão curto prazo.

11.4 - Conclusões

- 1ª) O método magnetométrico é o mais conveniente em praticamente todas as fases da avaliação dos recursos em ferro da faixa Nova Era - Itamarandiba, desde o reconhecimento (método aeromagnetométrico) até a fase de detalhe (método magnetométrico terrestre). Os Itabiritos Boa Esperança, ricos em magnetita, são particularmente apropriados para esse tipo de prospecção.
- 2ª) O levantamento aéreo permitiu não apenas a localização de todas as ocorrências de ferro, como também, contribuiu grandemente para o traçado das grandes linhas estruturais da região levantada.
- 3ª) Nos levantamentos magnetométricos terrestres os resultados indicaram ser possível obter com certa precisão o contorno das áreas das jazidas.

É possível distinguir as anomalias que provêm de corpos magnéticos superficiais daquelas que resultam de corpos profundos.

- 4.^a) O levantamento magnetométrico possibilita enorme economia de tempo, esforços e gastos ao eliminar áreas que de outra forma seriam eliminadas por métodos mais caros.

Na Jazida Boa Esperança, por exemplo, constata-se que cerca de 30% dos furos de sondagem foram locados sobre as rochas encaixantes. Se a locação dos furos tivesse sido programada com base em um levantamento magnetométrico prévio, aquelas sondagens teriam sido melhor aproveitadas.

III

ELETRORRESISTIVIDADE

III.1 - Introdução

O emprego do método magnetométrico permite delimitar grosso modo as áreas de ocorrência das jazidas de ferro da faixa Nova Era-Itamarandiba, bem como avaliar sua atitude e continuidade. Os depósitos de cangas e "rolados" que cobrem em parte as jazidas e áreas arredores e a complexidade das estruturas geológicas prejudicam parcialmente a eficiência desse método, conduzindo a certas indeterminações.

A combinação de dois ou mais métodos é comum em prospecção geofísica para desfazer indeterminações provenientes de cada método empregado. A única restrição é que o uso de mais um método não contribua para onerar a prospecção a ponto de torná-la antieconômica.

O método de eletrorresistividade, rápido e pouco oneroso, foi empregado para obter novos dados com a finalidade de precisar melhor os limites e as espessuras dos corpos que constituem as jazidas de ferro, complementando as informações fornecidas pela pesquisa magnetométrica.

Poder-se-ia pensar no emprego de gravimetria ou mesmo, sísmica de refração, contudo, além de serem métodos muito mais dispendiosos e de execução mais lenta, eles equivaleriam em eficiência à magnetometria e à eletrorresistividade.

Convém lembrar que a eletrorresistividade não é a priori um método comumente empregado em tais tipos de jazidas. Não se trata de uma aplicação clássica, consagrada pelo uso. Por isso, várias pesquisas preliminares tiveram de ser feitas para, através delas, encontrar-se as condições e os parâmetros que justificassem a aplicação do método.

III.2 - Estudos Preliminares

Um trabalho minucioso foi realizado na Jazida Boa Esperança com a finalidade de demonstrar a aplicabilidade e as limitações do método de eletrorresistividade na prospecção das jazidas de ferro da faixa Nova Era-Itamarandiba.

Os conhecimentos sobre a litologia e as estruturas da jazida mencionada, graças aos trabalhos de prospecção feitos pela Cia. Vale do Rio Doce, são largamente suficientes para comparação com os resultados das aplicações geofísicas.

. Perfilagens Elétricas

Perfilagens elétricas foram executadas ao longo dos poços de pesquisas abertos na área da Jazida Boa Esperança.

Esses poços, de secção quadrada de 1,2 m de lado e uma vintena de metros de profundidade atravessam em geral o solo e os corpos de minério de ferro.

Nas medições, foi utilizado o arranjo de eletrodos Wenner com espaçamento $a = 1$ m e com um eletrodo de corrente no "infinito". Esse arranjo, também denominado arranjo lateral em diagrafia elétrica, era deslocado verticalmente na parte central de uma das paredes do poço.

A resistividade aparente para cada estação é dada pela relação $\rho_{ap} = 4\pi aR$, onde R é a resistência elétrica.

Não foi levada em conta a influência das paredes do poço, não só por ser pequena essa influência como também por ter sempre o mesmo sentido.

A fig. 12 apresenta os resultados das perfilagens. Para se proceder a uma análise cuidadosa das perfilagens elétricas, é preciso lembrar que a resposta obtida com o arranjo utilizado é assimétrica.

Fig. 12 - Perfilagens Elétricas obtidas na Jazida Boa Esperança

No exemplo da fig. 13, uma camada de alta resistividade (correspondente à formação ferrífera) está contida entre duas outras relativamente mais condutoras (na parte superior, o solo e na parte inferior, o gnaíse decomposto). Quando o eletrodo de corrente A está dentro do solo e os eletrodos de potencial, M e N, estão na camada constituída pelas rochas ferríferas (itabirito, principalmente), pequena diferença de potencial, e conseqüentemente, pequena resistência elétrica R, será lida entre NM, pois, grande parte da corrente elétrica se concentra no solo (condutor), refletindo-se na interface da camada mais resistente. É preciso que A esteja inteiramente dentro da camada de alta resistividade para que um valor bem próximo da resistividade verdadeira seja alcançado. Quando M e N saem da camada de alta resistividade, o potencial elétrico cai bruscamente a um valor que se aproxima muito do valor da resistividade verdadeira do gnaíse decomposto. Na figura representou-se em traço forte a resposta hipotética que seria obtida no caso ideal; em traço leve, a perfilagem elétrica real.

As heterogeneidades existentes dentro das camadas (por exemplo, pequenas lentes mais condutoras, constituídas de hematita contendo grande porcentagem de magnetita) impõem um ziguezagueado à perfilagem elétrica medida, às vezes, impossível de ser interpretado.

É preciso deixar claro que na resposta de um arranjo lateral as camadas mais condutoras têm suas espessuras acentuadas, enquanto as mais resistentes, diminuídas.

Fig. 13 - Exemplo de interpretação de uma perfilagem elétrica. OA é a distância entre o eletrodo de corrente A e a metade de MN

As seguintes conclusões podem ser tiradas do exame das perfilagens elétricas:

- 1.ª) A resistividade do solo na área da Jazida Boa Esperança varia entre 300 e 2.000 ohm.m, excetuando-se os primeiros metros, que dependem das variações de tem

peratura, da evaporação, da presença e tipo de vegetação, da ação do homem, etc. Com maior frequência, porém, a resistividade do solo é de 500 a 1.000 ohm.m.

- 2ª) As rochas ferríferas apresentam uma larga faixa de variação de resistividade, por causa de sua estrutura em lentes de pequena espessura, muito dobradas, fraturadas e com acentuadas variações litológicas.

As hematitas que contêm grande porcentagem de magnetita (às vezes mais de 30%) são mais condutoras que os itabiritos. Observa-se, em quase todas as perfilações elétricas, picos negativos correspondentes à passagem sobre as lentes de hematita magnetíticas. A magnetita é um mineral condutor, sendo sua resistividade de 6 a 10 ohm.m. Atribui-se a baixa resistividade das hematitas (da ordem de 1.000 ohm.m) ao seu alto conteúdo de magnetita.

Os itabiritos, por outro lado, apresentam valores de resistividade que ultrapassam 10.000 ohm.m. São as rochas de maior resistividade na área da Jazida Boa Esperança.

- 3ª) Os gnaisses intercalados nas rochas ferríferas apresentam valores de resistividade de 500 a 1.000 ohm.m, porém, os gnaisses que estão na base da formação ferrífera, até uma profundidade de uns 50 a 100 metros, apresentam valores muito mais baixos de resistividade. Um estudo detalhado dessa camada condutora é feito no item seguinte.

. Resistividade das Águas

A resistividade de uma rocha depende da resistividade, da quantidade e distribuição da água em seus poros e fissuras. De um modo geral, as rochas secas são bons isolantes. Fazem exceção os sulfetos metálicos, a grafita e outros poucos minerais.

A resistividade de ρ_r de uma rocha, de porosidade p , saturada com água de resistividade ρ_a , é dada pela relação que traduz a Lei de Archie (1942):

$$\rho_r = \rho_a \frac{a}{p^m}$$

onde a é um coeficiente que varia de 0,81, para os arenitos, até 1, para as rochas compactas fissuradas; m , denominado fator de cimentação, é sensivelmente constante para uma rocha dada; pode-se adotar um valor médio $m = 1,5$.

O fator $\frac{a}{p^m}$ é denominado fator de formação pois depende apenas das características físicas das rochas e independe do fluido contido nas mesmas.

A resistividade de uma rocha é diretamente proporcional à resistividade do fluido nela contido, sendo o fator de proporcionalidade o fator de formação.

Com o objetivo de estudar e comparar a resistividade das águas contidas nas rochas da área da Jazida Boa Esperança e arredores, uma série de medições foi levada a efeito sob orientação do Prof. Pierre R. Taltasse, Regente da Cadeira de Geologia Estrutural e Geofísica Aplicada da F.F.C.L. da Universidade de São Paulo.

Além das amostras de superfície, foram colhidas amostras nos fundos dos poços de sondagem. Esses poços têm uns 20 metros de profundidade.

Para cada amostra de água, anotou-se a temperatura e o pH na fonte (vide tabela 2). A resistividade foi medida com o resistivímetro "Chauvin Arnoux".

Os valores de pH variam de 5,6 a 6,1 o que parece indicar (*) que rochas de caráter básico, como anfibolitos e diabásios, além dos gnaisses e micaxistos, existem na área estudada. As águas provenientes de gnaisses dificilmente apresentam pH mais elevado que 5,6.

As variações de temperatura das águas parecem (*) não estar ligadas tão — somente ao grau geotérmico, mas também a fenômenos locais de oxidação das rochas ferríferas, pois, as águas dos fundos dos poços, a apenas 20 metros de profundidade, apresentam em geral 4° a 5° C a mais que as águas superficiais.

Embora as águas superficiais apresentem larga gama de valores de resistividade, que vão desde 217 ohm.m até 1138 ohm.m (vide tabela 2), os valores da resistividade das águas coletadas no fundo dos poços são nitidamente inferiores e menos esparsos (de 109 a 175 ohm.m). Esse fato tem uma importância fundamental para a prospecção por eletorresistividade, conforme vai ser esclarecido mais adiante.

(*) Informações verbais do Professor P. Taltasse

TABELA 2

pH, TEMPERATURA E RESISTIVIDADE DAS ÁGUAS NA ÁREA
DA JAZIDA BOA ESPERANÇA

Discriminação	Amostra n°	pH	t°C	$\rho_{(t)}$ ohm.m
Águas Superficiais	1	5,8	17,0	460
	2	6,0	15,5	364
	3	6,0	15,0	247
	4	6,0	16,0	252
	5	5,9	18,3	403
	6	5,8	15,5	682
	7	5,6	17,0	527
	8	5,6	20,0	552
	9	6,0	15,5	882
	10	6,0	17,0	452
	11	6,1	16,5	625
	12	5,7	20,0	1.138
	13	6,0	17,0	780
	14	5,6	17,0	440
	15	5,8	16,5	586
	16	5,6	20,0	741
	17	5,6	17,0	1.118
	18	5,8	16,0	476
	19	5,6	18,5	673
	20	5,8	20,0	217
Águas dos poços de pesquisa	1	5,6	21,0	137
	2	5,6	21,0	109
	3	5,6	21,0	175

A diminuição da resistividade das águas com a profundidade deve-se à lenta circulação das mesmas e seu conseqüente enriquecimento em sais, dissolvidos das rochas. Pela quase ausência de circulação, esses sais se acumulam nas fissuras e poros das rochas. Esse fenômeno é bem explicado no trabalho de Cruz e Melo (1968, p. 112).

Extrapolando-se os valores de resistividade para uma profundidade da ordem de uns 50 metros (fig. 14) observa-se que aí eles devem atingir de 5 a 20 ohm.m, valores estes muito baixos em relação à resistividade das águas superficiais. Essa ordem de valores, no entanto, é perfeitamente possível, pois as sondagens elétricas, como será visto mais adiante, indicam que os gnaisses subjacentes às rochas da formação ferrífera são relativamente bons condutores, com resistividade de 300 a 500 ohm.m, o que, de acordo com a Lei de Archie, só pode ser explicado se a água de impregnação ou melhor ainda, o eletrólito, tiver baixa resistividade ou a rocha, alta porosidade. Esta última hipótese é impossível, pois em geral, os gnaisses, mesmo muito fissurados e fraturados, dificilmente possuem porosidade acima de 5%. Os testemunhos de sondagens examinados comprovam este fato.

Fig. 14 - Progressiva diminuição da resistividade das águas com a profundidade. (A) resistividades das águas superficiais. (B) resistividade das águas dos poços de pesquisa. (C) resistividade extrapolada para 50 m de profundidade

A fig. 15 é a representação gráfica da relação de Archie. Em abscissa colocou-se o fator de formação p^{-m} e em ordenada, os valores de porosidade (eficaz) da rocha em %. Tem-se uma curva para cada valor atribuído ao fator de cimentação m .

Supondo, para fixar ordens de grandeza que a porosidade do gnaiss seja 5% e que m esteja compreendido entre 1,4 e 2,0, obtêm-se, respectivamente, os fatores de formação 65 e 370. Se a rocha apresenta resistividade de 400 ohm.m, isto quer dizer que o líquido que a satura possui de 6,1 a 1,1 ohm.m, correspondentemente.

Em resumo, as águas superficiais apresentam resistividade da ordem, em média, de 500 ohm.m; a 20 m de profundidade, esse valor cai para a ordem de 130 ohm.m e a 50 m, para a ordem de 5 ohm.m. Essas observações serão utilizadas na prospecção elétrica propriamente.

. Resultados

Ficam, a partir dos estudos preliminares, definidos 4 estratos do ponto de vista da eletrorresistividade:

- 1) Solo de resistividade média mais freqüente entre 500 a 1.000 ohm.m.
- 2) Formação ferrífera, em conjunto, de resistividade mais freqüente entre 5.000 a 12.000 ohm.m. A porosidade dessas rochas é praticamente nula.
- 3) Gnaiss parcialmente decomposto com fissuras preenchidas por sais dissolvidos das rochas; a resistividade é da ordem de 400 ohm.m. Uma discussão sobre a origem e a natureza dessas dissoluções foge ao escopo deste trabalho.

Fig. 15 - Representação gráfica da relação de Archie: variação de p (porosidade eficaz da rocha) em função do "fator de formação" a/p^m para $a = 1$

4) Gnaisse são, sem fissuras abertas, de resistividade elevada, mas não avaliada.

Essa sequência 1, 2, 3 e 4 costuma ser abreviadamente escrita $CRC\infty$ onde C = condutor, R = resistente e ∞ corresponde ao substrato "infinitamente" resistente e espesso.

A sequência $CRC\infty$ fornece sondagens elétricas classificadas pelos geofísicos franceses como "sino-fundo de navio", pois as curvas de resistividade apresentam a forma de uma elevação (sino) seguida de uma depressão, semelhante ao perfil transversal de um casco de navio.

O grande contraste de valores de resistividade, das rochas da formação ferrífera em relação ao estrato subjacente (gnaisse decomposto) e suprajacente (solo), permite prever o emprego do método de eletrorresistividade na prospecção da jazida de ferro Boa Esperança.

III.3 - Perfis e Carta de Resistividade Aparente

Na parte norte do corpo principal da Jazida Boa Esperança foram feitos doze caminhamentos elétricos, 6 de direção E-W, distanciados 200 m uns dos outros e 6, na direção N-S distanciados entre si de 100 e 200 metros. (fig. 16). Os caminhamentos elétricos de direção E-W foram executados ao longo das direções dos perfis magnetométricos.

Utilizou-se um tripolo AMN, com um eletrodo B no "infinito". Entre o eletrodo de corrente A e o de potencial M a distância escolhida foi de 15 metros; entre os dois polos de potencial, M e N, foram escolhidas duas distâncias: $MN = 15$ m e $MN = 30$ m. A escolha dessas distâncias baseou-se nos dados sobre as espessuras do solo e da forma

ção ferrífera. O campo elétrico aplicado deve penetrar a maior parte da unidade litológica que se pretende prospectar. Medições com dois intervalos para MN serviram para melhor interpretar os perfis de resistividade.

Fig. 16 - Carta (simplificada) de resistividade aparente no corpo principal da Jazida Boa Esperança

A fig. 17 apresenta os perfis de resistividade aparente para $MN=15$ m e para $MN = 30$ m, obtidos ao longo da direção $\underline{e}$ (vide localização na fig. 16); em tracejado, representou-se o perfil correspondente à menor profundidade de investigação e, em traço contínuo, o perfil correspondente ao arranjo de eletrodos que permite maior profundidade de investigação. A boa coincidência dos dois perfis demonstra que os intervalos escolhidos para A, M e N são os mais convenientes para o caso particular da área estudada.

Fig. 17 - Perfis de resistividade aparente

Se os valores da linha contínua são menores que os valores da linha tracejada, uma parte da corrente elétrica passa pelo gnaíse alterado condutor, o que dá a idéia da extensão em profundidade do corpo da formação ferrífera. O corte geológico ao longo da direção do perfil elétrico e foi traçado com base nas informações obtidas nos furos de sondagens executadas pela C.V.R.D.

A partir dos perfis de resistividade aparente foi traçada a carta (simplificada) de resistividade aparente para uma profundidade de investigação da ordem de 30 metros (figura 16).

. Interpretação

Os perfis e a carta de resistividade aparente podem ser interpretados conforme os seguintes critérios:

- a) O solo apresenta em geral menos de 1.000 ohm.m conforme conclusões dos estudos preliminares. Conseqüentemente, os valores de resistividade aparente menores que 1.000 ohm.m devem corresponder à ausência de materiais de alta resistividade até pelo menos 30 m de profundidade, aproximadamente.
- b) Sabe-se que as rochas da formação ferrífera apresentam até mais de 10.000 ohm.m. Assim sendo, levando-se em conta o que foi dito em (a), valores de resistividade aparente maiores que 3.000 ohm.m podem ser considerados como correspondentes a uma faixa do subsolo que contém aquela formação. A faixa dos 1.000 a 2.000 ohm.m seria, deste modo, considerada duvidosa; pode ou não corresponder a uma pequena quantidade de rochas ferríferas. Acima dos 5.000 ohm.m pode-se ter certeza da presença dessas rochas.

Na carta de resistividade aparente adotou-se esses intervalos para o traçado das linhas de isorresistividade. Observa-se boa concordância entre o traçado do perímetro da jazida indicado pela carta de resistividade aparente e o traçado resultante

da prospecção por furos de sondagens. Nota-se também ótima coincidência com o contorno traçado com auxílio da magnetometria (vide fig. 6).

- c) As irregularidades dos perfis de resistividade aparente confirmam o caráter estrutural complexo da jazida Boa Esperança.
- d) A carta de resistividade permite visualizar as zonas onde são esperadas maiores es pessuras da formação ferrífera.

. Estudo sobre Modelos em Escala Reduzida

Alguns ensaios sobre modelos em escala reduzida foram realizados no laboratório de Geofísica Aplicada da Cadeira de Geologia Estrutural e Geofísica Aplicada do Departamento de Geologia da USP, tentando reproduzir as condições estruturais da jazida Boa Esperança.

Para representar os estratos mais condutores, ou seja, o solo e o gnaiss decomposto, utilizou-se uma solução fraca de sulfato de cobre. A formação ferrífera foi represen tada por uma placa de madeira de dimensões apropriadas. O gnaiss são, por não a apresentar interêsse para o estudo, não foi representado.

O modêlo de madeira é colocado dentro da solução de sulfato de cobre contida num tanque de 500 litros de capacidade. A espessura da lâmina de solução que se deixa acima do modêlo de madeira representa a espessura do solo e a quantidade de solução que resta sob a placa de madeira simula o gnaiss decomposto.

Destacamos duas das experiências efetuadas. Na primeira (fig. 18a) utilizou-se como modelo da formação ferrífera uma placa de madeira contínua para simular uma camada em posição horizontal. Na segunda (fig. 18b) empregou-se uma placa de madeira descontínua, isto é, contendo frestas a intervalos regulares para representar descontinuidades laterais no corpo considerado, ou seja, díaclases, falhas e variações litológicas.

Fig. 18 - Esquema das experiências sobre modelos em escala reduzida. (a) o modelo representa uma camada contínua, (b) o modelo apresenta descontinuidades

Os perfis de resistividade aparente esquematizados na fig. 18 foram obtidos com um arranjo de 4 eletrodos segundo o dispositivo simétrico de Wenner.

Observa-se que o perfil de resistividade aparente da fig. 18b apresenta resultados muito mais próximos daqueles obtidos realmente no campo.

Êsses ensaios tiveram por objetivo não apenas possibilitar a visualização das relações entre o modelo e sua resposta ao método utilizado, como também, resolver, na prática, as limitações à aplicação do método.

Generalidades

Os estudos preliminares justificam o emprêgo das sondagens elétricas como método de prospecção da jazida Boa Esperança.

Os quatro estratos existentes - solo, formação ferrífera, gnaiss decomposto e gnaiss são - apresentam as condições necessárias exigidas para a aplicabilidade das sondagens elétricas, ou seja, contrastes nítidos de resistividade, pequenas espessuras (comparadas com a extensão lateral) crescentes com a profundidade. Deve ser salientado, no entanto, desde já, que não fora o gnaiss decomposto e altamente condutor na base da formação ferrífera, não teria sido possível o emprêgo dessa técnica de prospecção; esse estrato tem mais de 50 m de espessura e resistividade relativamente constante, da ordem de 400 ohm.m funcionando, por isso, como um substrato condutor "infinito" para as duas camadas sobrejacentes, o que torna possível determinar com relativa facilidade a interface base da formação ferrífera - tópo do gnaiss decomposto.

Algumas restrições quanto ao emprêgo das sondagens elétricas como método de prospecção da jazida Boa Esperança podem ser formuladas a priori. Toda a teoria das sondagens elétricas se fundamenta na existência de estratos homogêneos, isotropos e horizontais, o que não acontece na jazida Boa Esperança. Há variações laterais muito acentuadas tanto nas espessuras como nos valores da resistividade dos estratos por causa da complexidade das estruturas geológicas da jazida (lentes muito distorcidas e fraturadas, com variações litológicas muito acentuadas). Estas condições se refletem na precisão das interpretações quantitativas das curvas de resistividade.

. As Curvas de Resistividade

Na área da jazida Boa Esperança foram executadas 11 sondagens elétricas utilizando-se o dispositivo de eletrodos Schlumberger com comprimento de linha de corrente de 400 a 1.000 m.

Em se tratando de uma área geologicamente bem conhecida, pode-se, como primeiro passo para a interpretação, agrupar as curvas de resistividade em 2 categorias (fig. 19)

segundo a S.E. tivesse sido executada fora da área da jazida (fig.19-A) ou sobre a mesma (fig.19-B). Essa separação das sondagens elétricas é muito importante, pois, a interpretação se fundamenta muito mais na deformação progressiva das curvas de resistividade vizinhas do que no estudo detalhado das curvas individuais.

Fig. 19 - Sondagens elétricas típicas obtidas na área da Jazida Boa Esperança

Nas curvas da categoria (A) se destaca a forma de "fundo de navio", correspondente a um estrato bom condutor (o gnaiss decomposto), enquanto a característica principal das curvas (B) é a forma pronunciada de "sino" correspondente à presença de um estrato de alta resistividade (a formação ferrífera). As curvas, tanto da categoria (A) como (B) têm em comum um ramo terminal ascendente a 45° , correspondente ao gnaiss são, não condutor. As partes iniciais das curvas não são uniformes, pois correspondem aos primeiros metros de solo, cujas resistividades, como já foi dito, variam entre largos limites.

Os valores máximos das resistividades aparentes das curvas da fig.19-A se situam entre 300 e 2.000 ohm.m e nas curvas (B) entre 2.000 e 5.000 ohm.m. Baseando-se apenas nessas observações, poderia haver dificuldades para classificar algumas curvas, ou na categoria (A) ou (B). No entanto, as formas das curvas não são idênticas. Os máximos das curvas (A) ficam mais à direita do que os máximos de (B) ou, em outras palavras, os arcos das curvas correspondentes ao gnaiss decomposto apresentam declive mais suave em (A) e mais abrupto em (B).

Considerando-se o solo como um só estrato (na realidade, ele se desdobra em dois ou mais estratos), pode-se considerar grosso modo que 3 estratos formam as curvas da categoria (A) e 4, as da categoria (B).

. Interpretação

Na interpretação das curvas de resistividade obtidas na área da jazida Boa Esperança foram utilizados principalmente o método da superposição combinado com o método do "ponto auxiliar".

Para exemplificar o procedimento, dá-se a seguir, detalhes sobre a interpretação de uma curva do grupo (B). Trata-se, portanto, de uma curva de 4 camadas (fig.20).

Fig.20 - Exemplo de interpretação de uma curva de resistividade,
(a) pelo uso de curvas-padrão, (b) pelo método de Ebert

. Método da Superposição

Esse método que consiste em comparar os dados de campo com curvas previamente calculadas é o único de uso geral e baseado em sólida teoria física.

Várias coleções de curvas-padrão foram preparadas nesses últimos 40 anos. São conhecidas as seguintes coleções para o arranjo Schlumberger:

- 1º) de 720 curvas de 3 camadas editada em 1941 pelo Instituto de Investigações da Indústria de Petróleo da URSS;
- 2º) de 480 curvas de 3 camadas, calculada pela Compagnie Générale de Géophysique, Paris, e publicada (1955 e 1963) pela European Association of Exploration Geophysicists;
- 3º) de 72 curvas de 5 camadas, devida a Flathe (1963);
- 4º) de 1417 curvas de 3 e 4 camadas publicadas por Orellana e Mooney (1966).

As únicas coleções disponíveis são as da Compagnie Générale de Géophysique e as de Orellana e Mooney. A teoria do cálculo das curvas-padrão pode ser vista em Mooney, Orellana, Pickett e Tornheim (1966).

A curva de resistividade (fig.20-a) a ser interpretada pelo método da superposição apresenta forma de "sino" seguida de um "fundo de navio". Na coleção de Orellana-Mooney (1966), elas são abreviadamente denominadas KH (da nomenclatura russa).

Examinando-se as várias possibilidades chega-se a que a curva-padrão que mais se aproxima daquela obtida no campo é a curva "L" da folha KH-4, para a qual as relações de espessuras dos estratos são: $E_2/E_1 = 5$ e $E_3/E_1 = 5$ e os valores relativos das resistividades verdadeiras na ordem $\rho_1: \rho_2: \rho_3: \rho_4$ são $1:20:0,1:\infty$. Basta, portanto, determinar os valores de E_1 e ρ_1 para se ter os demais. Esses valores são dados pela posição da "1.ª cruz":

$$E_1 = 4,2 \text{ m}$$

$$\rho_1 = 850 \text{ ohm.m}$$

A partir desses valores e das relações anteriores, encontra-se:

$$E_2 = 21 \text{ m} \quad E_3 = 21 \text{ m} \quad E_4 = \infty$$

$$\rho_2 = 17.000 \text{ ohm.m} \quad \rho_3 = 85 \text{ ohm.m} \quad \rho_4 = \infty$$

Embora haja boa coincidência da curva de campo com a curva-padrão escolhida, os parâmetros fornecidos não constituem senão uma das muitas soluções. Isto quer dizer que a estrutura deduzida a partir da curva de campo pode não representar exatamente a realidade, embora a interpretação seja formalmente correta.

Assim, as ordens de grandeza das resistividades das duas primeiras camadas estão de acordo com os resultados dos estudos preliminares, mas, o valor da resistividade da 3.^a camada ($\rho_3 = 85 \text{ ohm.m}$) é muito inferior àquêle que se conhece dos estudos preliminares (da ordem de 400 ohm.m).

O princípio da equivalência (vide definição em Kunetz, 1966, p.58) se aplica à 3.^a camada, que é condutora e se encontra entre duas resistentes. Segundo esse princípio, uma camada condutora se manifesta nas curvas de resistividade essencialmente por sua condutância horizontal, ou pelo produto de sua condutividade (σ) por sua espessura (E), ou, o que é a mesma coisa, por sua espessura dividida pela resistividade (ρ):

$$C_3 = \sigma_3 E_3 = \frac{E_3}{\rho_3}$$

Usando-se os valores encontrados acima, tem-se:

$$C_3 = \frac{21}{85} = 0,247$$

Sendo o valor da resistividade da 3.^a camada da ordem de 400 ohm.m, conforme os estudos preliminares, então:

$$E_3 = C_3 \cdot \rho_3 = 0,247 \times 400 = 98,8 \text{ m}$$

Tem-se, portanto, o seguinte corte geoeletrico:

$$E_1 = 4,2 \text{ m} \quad \rho_1 = 850 \text{ ohm.m}$$

$$E_2 = 21 \quad \rho_2 = 17.000$$

$$E_3 = 100 \quad \rho_3 = 400$$

$$E_4 = \infty \quad \rho_4 = \infty$$

. Método do Ponto Auxiliar

O método de superposição pode ser utilizado em combinação com o chamado método do ponto auxiliar. A vantagem desse método é de conseguir uma importante redução do número necessário de curvas-padrão.

Vários métodos foram propostos para reduzir o número de curvas-padrão e desse modo tornar mais rápidas as interpretações das curvas de resistividade.

O problema consiste em saber onde colocar a origem (também denominada cruz) $\rho_{ap} = 1$, $AB/2 = 1$ das curvas de duas (e às vezes, três) camadas a fim de obter a melhor assíntota para a curva experimental.

Mais precisamente, esses métodos consistem em determinar qual a camada única imaginária que melhor substitua as anteriores, de modo a reduzir o problema a um caso de duas (às vezes, três) camadas.

O método do ponto auxiliar foi proposto por Ebert (1943). Kalenov (1957) acrescentou tabelas e gráficos para facilitar o cálculo. Instruções detalhadas sobre o uso do método de Ebert encontra-se em Orellana e Mooney (1966).

O método do ponto auxiliar permite o emprego de curvas-padrão de 3 camadas para a interpretação das curvas de campo de 4 camadas, e inclusive de 5, porém com menor precisão.

Na fig. 20-b apresenta-se um exemplo de interpretação segundo esse método.

Em primeiro lugar, procura-se ajustar a parte esquerda da curva de campo a uma curva-padrão de 3 camadas para obter, com uma estimativa de ρ_3 , uma solução para as duas primeiras camadas. A melhor coincidência foi obtida com a curva K-19 da coleção Orellana-Mooney (1966) para a qual a relação de espessura do segundo estrato para o primeiro é $E_2/E_1 = 6$. Essa curva indica a posição da "1.^a cruz", cujas coordenadas fornecem as unidades de comparação para as espessuras e resistividades verdadeiras de cada camada do terreno:

$$E_1 = 3 \text{ m}$$

$$\rho_1 = 750 \text{ ohm.m}$$

Sendo $E_2/E_1 = 6$, $\rho_2/\rho_1 = 20$ e $\rho_3/\rho_1 = 1$, tem-se ainda:

$$E_2 = 18 \text{ m}$$

$$\rho_2 = 15.000 \text{ ohm.m}$$

$$\rho_3 = 750 \text{ ohm.m (este valor é apenas uma primeira aproximação)}$$

A segunda operação consiste em utilizar o gráfico auxiliar de Ebert correspondente às curvas em forma de "sino". Calca-se sobre o papel a curva auxiliar $\rho_2/\rho_1 = 20$, com origem na "1.^a cruz".

O terceiro passo consiste em procurar a curva-padrão de 3 camadas que melhor se ajuste à parte direita ("fundo de navio") da curva de resistividade. A "cruz", nesse caso, deve situar-se sobre a curva auxiliar traçada de acordo com a última operação. No exemplo que está sendo analisado, a curva escolhida foi a H-21, da coleção Orellana-Mooney (1966) para $E_3/E'_2 = 1,5$, onde E'_2 é o valor da abscissa da "2.^a cruz".

Sendo $E'_2 = 67 \text{ m}$, obtém-se

$$E_3 = 67 \times 1,5 = 100,5 \text{ m}$$

O gráfico auxiliar de Ebert fornece ainda para a "2ª cruz", a relação: $\frac{E_2}{E_1} = 7,5$ do que resulta $E_2 = 22,5$ m (êste valor não deve se afastar muito daquele obtido na 1ª operação).

Tem-se para essa terceira operação, novo valor para a resistividade da 3ª camada: $\rho_3 = 400$ ohm.m, valor êsse que também não deve afastar-se muito daquele obtido na 1ª operação.

Em resumo, tem-se o seguinte corte geoeletrico:

$$E_1 = 3 \text{ m} \quad \rho_1 = 750 \text{ ohm.m}$$

$$E_2 = 20 \quad \rho_2 = 15.000$$

$$E_3 = 100 \quad \rho_3 = 400$$

$$E_4 = \infty \quad \rho_4 = \infty$$

$E_2 = 20$ m é a média dos valores obtidos em cada operação;

$E_3 = 400$ ohm.m é um valor mais próximo do real, conhecido dos estudos preliminares.

Os resultados obtidos tanto pelo uso das curvas-padrão como pelo método do ponto auxiliar parecem coerentes, no entanto, deve-se frisar que êsses não constituem senão uma das soluções possíveis.

Da mesma forma que para a 3ª camada, o princípio da equivalência também se aplica à 2ª camada. Obtém-se diagramas praticamente idênticos para camadas resistentes de resistividade (ρ) e espessura (E) diferentes, desde que a resistência transversal $T = \rho \cdot E$ permaneça sensivelmente a mesma. Não se conhecendo nem ρ nem E, há por conseguinte uma indeterminação.

Supondo-se corretos os valores $E_2 = 20$ m

$$\rho_2 = 15.000 \text{ ohm.m}$$

tem-se $T_2 = 300.000 \text{ ohm.m}^2$. Se ρ_2 variar entre 10.000 e 20.000 ohm.m, ter-se-ia para E_2 respectivamente 30 e 15 m.

Desde que se conheça ou E ou ρ fica desfeita a ambigüidade explicada pelo princípio da equivalência. Os estudos preliminares tiveram por finalidade encontrar ou E ou ρ . Por outro lado, o alto valor da resistência transversal T_2 é uma característica indicadora da existência da formação ferrífera..

. Anisotropia

As curvas-padrão de resistividade foram calculadas na hipótese de meio homogêneo e isotrópico. Essa hipótese, todavia, nem sempre é verificada nas curvas reais.

Os tipos de rochas existentes na área da jazida Boa Esperança fazem pressupor a ocorrência do fenômeno de anisotropia, pois as rochas gnáissicas, via de regra, apresentam resistividade mais elevada na direção normal à gnaissificação do que paralela a mesma.

O coeficiente de anisotropia (λ) definido pela relação $\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}}$ onde ρ_t e ρ_l são, respectivamente, as resistividades transversal e longitudinal à gnaissificação, apresentou tendência a valores maiores que 1,5 nos itabiritos e gnaisses da área da jazida Boa Esperança. Comparando-se os resultados da interpretação das sondagens elétricas com as calibrações feitas nos poços de sondagens, chega-se à conclusão de que as espessuras calculadas são sempre maiores do que as espessuras reais. Isto é uma demonstração de que λ é maior que 1.

Estudos efetuados pela Escola Schlumberger (seg. Lasfargues, 1957 p. 114) demonstram que uma camada de espessura E , de resistividade ρ e anisotropia λ dão, na superfície do terreno, um mesmo potencial elétrico que uma camada isotrópica de espessura $\lambda \cdot E$ e de resistividade ρ . Por conseguinte, para se corrigir a influência da anisotropia nos resultados obtidos na interpretação da sondagem elétrica, basta dividir as espessuras obtidas por λ .

Nas interpretações anteriores, fazendo-se $\lambda = 1,5$, ter-se-ia as seguintes espessuras, respectivamente para interpretações (a) por curvas-padrão e (b) pelo método do ponto auxiliar:

(a)	(b)
$E_1 = 4,2$	$E_1 = 3$
$E_2 = 14$	$E_2 = 13$
$E_3 = 67$	$E_3 = 67$
$E_4 = \infty$	$E_4 = \infty$

Para o solo não foi aplicada a correção da influência da anisotropia.

Os resultados acima parecem estar mais de acordo com os dados dos furos de sondagens realizados nas proximidades da sondagem elétrica analisada. Assim, as 4 sondagens mecânicas ao redor daquela sondagem elétrica revelaram as seguintes espessuras:

para o solo: de 3 a 10 m

para a formação ferrífera: de 10 a 20 m

III.5 - Conclusões

- A eletrorresistividade é, depois do método magnetométrico, o método mais adequado e conveniente para a prospecção das jazidas de ferro tipo-Boa Esperança.
- As cartas de resistividade fornecem dados qualitativos quanto à presença da formação ferrífera e permite, juntamente com os resultados da magnetometria, delimitar com mais precisão as áreas das jazidas.
- As sondagens elétricas fornecem ordens de grandeza das espessuras dos corpos da formação ferrífera e do solo de recobrimento.

- d) Dependendo das condições do terreno e das facilidades de acesso, em média, poderão ser efetuadas de 5 a 10 sondagens elétricas com $AB = 500$ m e 500 a 1.000 m de perfis de resistividade por dia. Esses dados dão idéia da economia em tempo e em gastos que poderá proporcionar o emprego dos métodos geoeletricos na prospecção daqueles tipos de jazidas.

IV

CONCLUSÕES GERAIS

- 1) Os gnaisses e micaxistos da faixa Nova Era-Itamarandiba parecem constituir uma única unidade estratigráfica, provavelmente a fácies Guanhães da Série Minas, definida por Pflug (1965). As dezenas de corpos de itabirito magnético existentes nessa faixa apresentam características litológicas, estruturais e comportamento magnético semelhantes.
- 2) Além do método magnetométrico, já consagrado na pesquisa de jazidas de ferro, o método de eletrorresistividade revelou-se excepcionalmente adequado para a prospecção daqueles tipos de jazidas.
- 3) Os estudos realizados permitem estabelecer a seguinte seqüência para uma exploração racional dos recursos em ferro da faixa Nova Era-Itamarandiba:

1ª fase - Reconhecimento

- a) Geologia regional e fotogeologia
- b) Aeromagnetometria
- c) Interpretação e escolha das áreas promissoras

2ª fase - Detalhes

- d) Geologia de detalhe e levantamento topográfico de cada área escolhida
- e) Magnetometria terrestre
- f) Eletrorresistividade
  - perfil e/ou carta de resistividade aparente
  - sondagem elétrica
- g) Interpretação dos dados geológicos e geofísicos. Aceitação ou rejeição preliminar da área pesquisada.
- h) Programação dos trabalhos de prospecção propriamente: furos de sondagem, abertura de poços, trincheiras, etc.

- 4) O emprêgo dos métodos geofísicos, tanto na fase de reconhecimento(aeromagnético) como na fase de detalhes (magnetometria terrestre e eletrorresistividade) proporciona uma redução considerável do tempo, dos custos e dos esforços dispendidos na prospecção das jazidas da região considerada.É difícil citar um valor dessa redução. No caso particular da Jazida Boa Esperança, um índice de 30% é uma cifra ainda conservadora.

V

BIBLIOGRAFIA

- ARCHIE, G.E. (1942) - The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Petroleum Technology, Tech. Publ. 1422, vol. 5.
- COMPAGNIE GÉNÉRALE DE GÉOPHYSIQUE (1955 e 1963) - Abaques de Sondage électrique.
Geophysical Prospecting vol. 3 supl. 3, 51 pp Haia.
- CORDANI, U.G., MELCHER, G.C. e ALMEIDA, F.F.M. (1968) - Outline of the Precambrian geochronology of South America. Canadian Journal of Earth Sciences, 5, 629.
- CRUZ, W.B. e MELO, F.A.F. (1968) - Estudo geoquímico preliminar das águas subterrâneas do Nordeste do Brasil.
SUDENE, Divisão de Hidrogeologia, Recife.
- DORR, J.V.N.2d. (1958) - The Cauê Itabirite. Bol. Soc. Bras. Geol. vol. 7, nº 2, p. 61-62. São Paulo.
- DORR, J.V.N.2d. e BARBOSA, A.L.M. (1963) - Geology and ore deposits of the Itabira district, Minas Gerais, Brazil.
USGS, Prof. Paper 341-C, 110 p. Washington.
- DORR, J.V.N.2d., GAIR, J.E., POMERENE, J.B. e RYNEARSON, G.A (1957)-Revisão da Estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero. DNPM, avulso 81. Rio de Janeiro.
- EBERT, A. (1943) - Grundlagen zur Auswertung Geodektrischer Tiefenmessungen. Bei träge Ang. Geoph. vol. 10, p. 1-17.

- EBERT, H. (1962) - Baustil und Regionalmetamorphose in Prakambrischen Grundgerbige Brasiliens. Mineral. Petrol. Mitt., 8, pp. 49-81.
- FLATHE, H. (1963) - Five Layer master curves for the hidrogeological interpretation of geoelectrical resistivity measurements above a two-stoney aquifer. Geophysical Prospecting, vol. 11, pp. 471-490, Haia.
- GAIR, J.E. (1962) - Geology and Ore deposits of the Nova Lima and Rio Acima Quad rangles Minas Gerais, Brazil. USGS Prof. Paper 341-A, Washington.
- GUILD, P.W. (1960) - Geologia e Recursos Minerais do Distrito de Congonhas, Esta do de Minas Gerais. Memória nº 1, DNPM, Rio de Janeiro.
- JAHREN, Ch.E. (1963) - Magnetic susceptibility of bedded iron-formations. Geophys ics.
- JOHNSON, R.F. (1962) - Geology and Ore Deposits of the Cachoeira do Campo, Dom Bosco and Ouro Branco Quadrangles, Minas Gerais, Brazil. USGS Prof. Paper 341-B, Washington.
- KALENOV, E.N. (1957) - Interpretasiya Krivikh vertigalnogo elektricheskogo zondi rovaniya (472 pp). Gosgeoltekhizdat, Moscou.
- KUNETZ, G. (1966) - Principles of Direct Current Resistivity Prospecting. 103 pp Geh rüder Borntraeger, Berlim.
- LACOMBLEZ, P. (1968) - Airmagnetic survey. Companhia Vale do Rio Doce. Relató rio Inédito. Belo Horizonte.

- LASFARGUES, P. (1957) - Prospection életriques par courants continus. Masson & Cie. Paris.
- LASFARGUES, P. (1966) - Magnetisme en géologie et prospection magnétique au sol. Masson & Cie. Paris.
- LAURILA, E. (1964) - A new instrument for determination of magnetite content of powdered samples.
Act Polytechnica Scandinavica, ch. 30.
- MOONEY, H.M., ORELLANA, E., PICKETT, H. e TORNHEIM, L. (1966) - A resistivity computing procedure for layered earth models. Geophysics vol. 31, pp. 192-203.
- ORELLANA, E. e MOONEY, H.M. (1966) - Master tables and curves for vertical electrical sounding over layered structures. Interciencia. Madri.
- PARASNIS, D.S. (1966) - Mining Geophysics. Elsevier Publisching Company, Amsterdã.
- PFLUG, R. (1965) - A geologia da parte meridional da Serra do Espinhaço e zonas adjacentes, Minas Gerais. Bol. 226 da Div. Geol. e Min. do DNPM, Rio de Janeiro.
- REEVES, R.G. (1966) - Geology and Mineral Resources of the Monlevade and Rio Piracicaba Quadrangles, Minas Gerais, Brazil. USGS Prof. Paper 341-E, Washington.