

# FUNDAMENTOS DE GEOFISICA APLICADA A PESQUISA MINERAL

APOSTILA DA DISCIPLINA ENQ-519 - PESQUISA MINERAL III,  
DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS DA  
UFMG

VOL. 2

- Métodos eletromagnéticos
- Perfilagem de furo de sonda com métodos elétricos e eletro-magnético
- Métodos radiométricos
- Perfilagem de furo de sonda com métodos radiométricos

E. F. GAVRONSKI - Prof. adjunto  
1988

Capítulo	Matéria	Página
4.6	Métodos eletromagnéticos (métodos EM) ou métodos de indução. Essência dos métodos, suas aplicações e resumo histórico de seus desenvolvimentos .....	221
4.6.2	Geometria do campo eletromagnético e campo elípticamente polarizado .....	226
4.6.3	Parâmetros medidos nos métodos EM.....	230
4.6.3.1	Inclinação do campo $\vec{H}_R$ e método respectivo, ou método de medida do "TILT" .....	231
4.6.3.2	Parâmetros defasagem e amplitude do campo resultante, em relação ao campo primário excitador (componentes reais e imaginárias dos campos, resultante e secundário).....	238
4.6.3.3	Parâmetro "Por medidas no domínio do tempo".	242
4.6.4	Penetração e alcance útil em profundidade, dos métodos EM.....	245
4.6.5	Diversificação e classificação dos métodos eletromagnéticos .....	246
4.6.6	Métodos eletromagnéticos convencionais; métodos EM convencionais de fonte fixa - Método "TURAM" e método "TURAIR".....	247
4.6.6.2	Métodos EM convencionais de fonte móvel; Método do "SLIGRAM", e variantes (Método "BEAM-SLIGRAM" e outros).....	252
4.6.6.3	Métodos EM aerotransportados. Generalidades....	260
4.6.6.3.2	Sistemas EM aerotransportados .....	263
4.6.6.3.3	Método EM de fonte móvel, aerotransportado em helicóptero (Método HEM).....	267
4.6.7	Métodos EM de radio frequências. Método "VLF". Generalidades .....	271
4.6.7.2	Parâmetros medidos no método "VLF".....	274
4.6.7.3	Equipamento "VLF", e operação em campo.....	277
4.6.7.4	Método "VLF" - noções de interpretação.....	281
4.6.8	Método "AFMAG" (de "audio frequency magnetic").	286
4.7	Custos, rendimento e utilização combinada com outros métodos de prospecção, dos métodos elétricos e eletromagnéticos .....	290
4.8	Perfilagem geofísica de furo de sonda, com métodos elétricos e eletromagnéticos. Perfilagem geofísica e sua finalidade,.....	293
4.8.2	Principais diversificações da perfilagem com métodos elétricos e eletromagnéticos.....	294

Capítulo	Matéria	Página
4.8.3	Distribuição dos fluidos e das resistividades num leito permeável invadido pelo filtrado da lama de sondagem, em torno do furo.....	295
4.8.4	Perfilagem do potencial espontâneo (curva SP, também referida por curva AP, de autopotencial) - Essência da perfilagem SP.....	297
4.8.4.2	Origem das diferenças de potencial registradas na curva SP.....	299
4.8.4.3	Potencial estático da curva SP e resistividade da água da formação.....	303
4.8.4.4	Fatores que influenciam na forma e na amplitude da curva SP.....	305
4.8.4.5	Forma de curva SP numa seqüência de rochas "duras" (calcário, diabasio, etc.), com intercalações de leitos arenosos permeáveis e folhelho.....	308
4.8.4.6	Influência na forma e na amplitude da curva SP, das relações das resistividades da lama, dos leitos argilosos vizinhos, e do leito arenoso intercalado.....	310
4.8.5	Perfilagem de resistividade, e perfil de resistividade com sonda mono-eletródica - Perfil resistência.....	312
4.8.5.2	Perfilagem de resistividade com dispositivos convencionais. Generalidades e conceituação dos dispositivos convencionais (dispositivos normal e dispositivo lateral)	314
4.8.5.3	Fundamentos de interpretação das curvas de resistividade, perfiladas com dispositivos convencionais.....	321
4.8.5.4	Dispositivos e curvas especiais de resistividade. Dispositivo para calcário ("Limestonec device")...	330
4.8.5.4.2	Laterolog .....	332
4.8.5.4.3	Microdispositivos: Microlog (curvas micronormal e microinversa); Microlaterolog; Microcalibre.....	334
4.8.5.4.4	Perfilagem das atitudes dos extratos - Inclínometro ("dip meter").....	340
4.8.6	Pefilagem com método de indução ou perfil IL (de inductionlog"), ou ainda método de condutividade. Equipamento..	344
4.8.6.2	Registros da curva IL .....	345
4.8.6.3	Utilização da pefilagem IL.....	348

VOLUME 2

Capítulo	Matéria	Página
4.8.7	Determinação de porosidade efetiva e saturação das formações, a partir dos perfis de resistividade. Princípios de interpretação.....	350
- Bibliografia -	Referências bibliográficas do capítulo 4 Métodos elétricos (no volume 1); métodos eletromagnéticos e Perfilagem com métodos elétricos e eletromagnéticos (no volume 2).....	358
5	Métodos radiométricos ou métodos de radioatividade. Essência, aplicação e história dos métodos radiométricos.....	361
5.2	Radioatividade - Princípios físicos. Natureza das radiações .....	365
5.2.2	Processos de desintegração radioativa. Constante de desintegração. Equilíbrio radioativo....	369
5.2.3	Poder absorvente das substâncias aos raios gama.....	371
5.2.4	Processos de interação dos raios gama, e de outras radiações eletromagnéticas, com a matéria	372
5.2.4.1	Efeito fotoelétrico .....	372
5.2.4.2	Efeito Compton .....	373
5.2.4.3	Efeito de produção de pares .....	374
5.2.5	Unidades de medida da radioatividade.....	375
5.2.5.1	Curie .....	375
5.2.5.2	Roentgen .....	375
5.2.5.3	Impulso por minuto ou impulso por segundo; Impulso por segundo padronizado, e unidade API..	375
5.2.5.4	Grama - rádio - equivalente por grama de rocha, e submúltiplos utilizados em prospecção geofísica .....	375
5.2.5.5	Mache .....	376
5.3	Elementos naturais, radioativos - Generalidades.....	377
5.3.2	Família do Urânio 238, e isótopos desse elemento.....	377
5.3.3	Família do Tório 232 e isótopos desse elemento	379
5.3.4	Potássio 40 (K40), isótopo do Potássio natural (K39).....	379

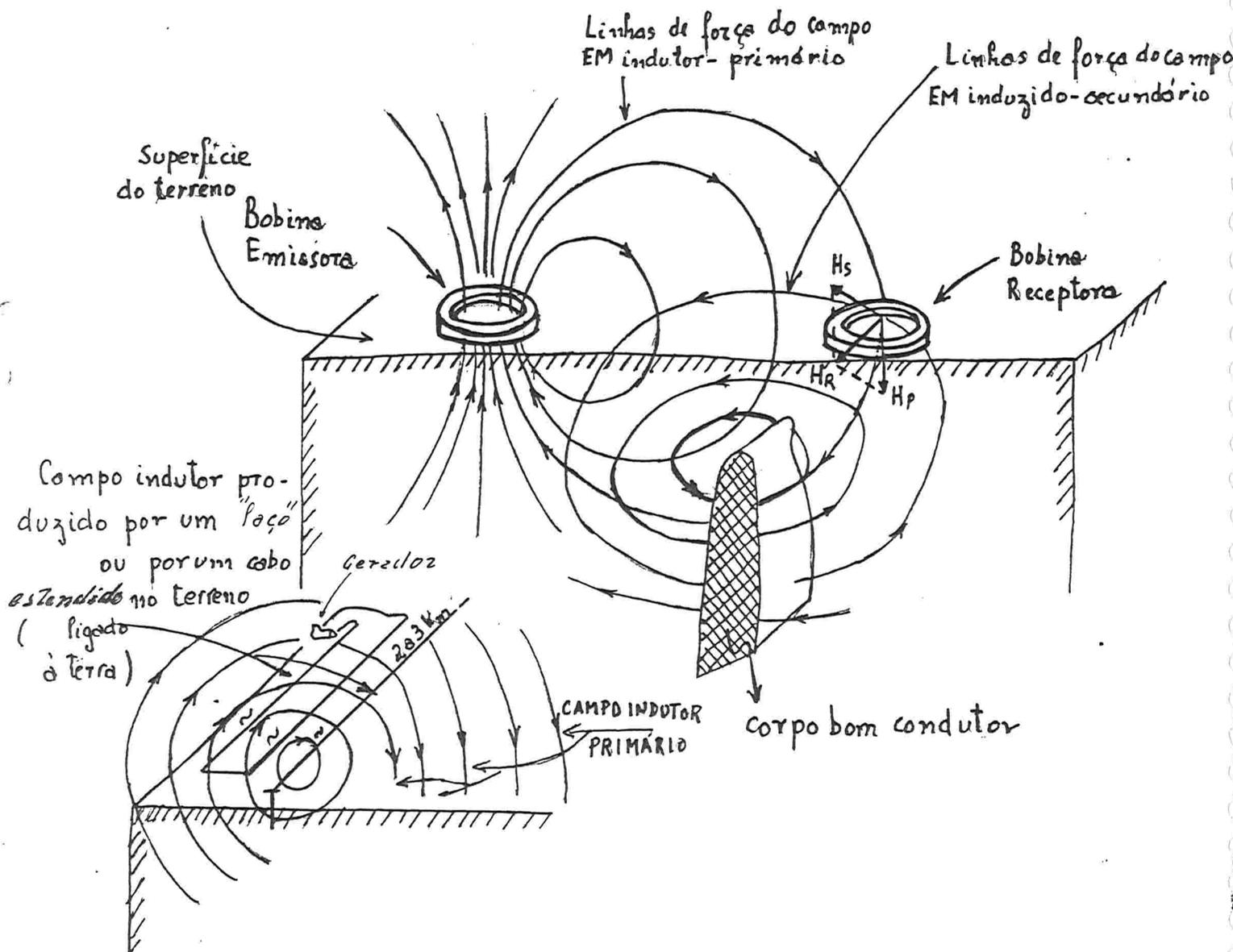
Capítulo	Matéria	Página
5.4	Urânio, Tório e Potássio 40 nos minerais e nas rochas - Radioatividade das rochas.....	380
5.4.1	Radioatividade na crosta terrestre.....	380
5.4.2	Urânio e Tório nas rochas ígneas (ambientes redutores).....	380
5.4.3	Urânio e Tório durante, e após o intemperismo (em ambientes oxidantes).....	382
5.4.4	Potássio 40 nas rochas ígneas e sedimentares...	384
5.4.5	Radioatividade das rochas.....	384
5.4.6	Origem da radioatividade medida e do background (radiações de fundo).....	385
5.5	Medidas da radioatividade.....	387
5.5.1	Instrumentos - antecedentes .....	387
5.5.2	Contador Geiger - Müller .....	388
5.5.3	Cintilômetro .....	390
5.5.4	Espectrômetros e espectrografia (ou espectroscopia) de radiações gama .....	392
5.5.5	Emanômetro .....	396
5.5.6	Flutuações estatísticas e constante tempo nas medidas de radioatividade.....	397
5.5.7	Outros parâmetros que influenciam nas medidas..	398
5.5.7.1	Área "Vista" pelo sensor .....	399
5.5.7.2	Características da fonte de radiações.....	400
5.5.8	Operação com métodos radiométricos, e utilização.....	403
5.6	Perfilagem de furo de sonda com métodos radiométricos.....	405
5.6.1	Perfilagem gama.....	405
5.6.1.1	Operação e equipamento.....	405
5.6.1.2	Fundamentos de interpretação dos perfis gama ("gama-log").....	406
5.6.1.3	Utilização do perfil gama .....	407
5.6.1.4	Estimativas do teor de Urânio, através dos resultados de um perfil gama.....	410
5.6.1.5	Unidade API (American Petroleum Institute) para medir radioatividade, e impulso por segundo padronizado.....	412
5.6.2	Perfilagem gama-gama ou "gama-gama log", ou perfilagem de densidade - Essência e aplicações.....	413
5.6.2.2	Equipamento e operação de perfilagem gama-gama..	413
5.6.2.3	Fundamentos da perfilagem gama-gama, e da estimação das densidades das formações perfiladas.....	415

VOLUME 2

Capítulo	Matéria	Página
5.6.2.4	Determinações de porosidade a partir do perfil gamma-gama.....	418
5.6.2.5	Estimativas do teor em cinza de carvões, a partir do perfil densidade.....	419
5.6.3	Perfilagem neutron-gama ou perfil "neutron-gama "log", ou ainda perfil porosidade. Variante perfil neutron-neutron. Essência do método e aplicações.	420
5.6.3.2	Equipamento e operação.....	421
5.6.3.3	Fundamentos da perfilagem neutron-gama.....	422
5.6.3.4	Princípios da interpretação do perfil neutron-gama.....	423
5.6.3.5	Unidade neutron API (American Petroleum Institute)	426
5.6.4	"METALOG" - Análises de minério "in situ" com técnica nuclear. Essência do método e aplicações....	427
5.6.4.2	Fundamento do método e equipamento.....	428
-	Bibliografia - Referências bibliográficas do capítulo 5..	431

## 4 - 6 Métodos Eletro-Magnéticos (métodos E-M) ou Métodos de Indução

## 4-6-1 Essência do método, suas aplicações e resumo histórico do seu desenvolvimento.



Uma corrente elétrica alternada passando numa bobina ou num cabo isolado, produz um campo eletro-magnético. Esse campo ao propagar-se na terra induz correntes elétricas em qualquer corpo bom condutor (dito simplesmente "um condutor"), que for encontrado no seu caminho,

dutores) .

A diferenciação da intensidade do sinal, relacionada a condutividade do alvo, fornece o recurso, mediante o qual, os métodos E-M aero-transportados permitem o mapeamento das formações superficiais com diferentes resistividades. Essa mesma característica fundamenta a aplicação em técnicas de perfilagem de furo de sonda, como método alternativo para perfilar resistividades ao longo do comprimento do furo (log de indução). Além disso, métodos E-M aplicados no interior de furos de sonda, podem detectar mineralizações condutivas afastadas 100 metros do furo.

O desenvolvimento dos métodos E-M deu-se predominantemente na Suécia, e também em outros países principalmente Canadá, EEUU, URSS. Entre 1919 e 1932 Lundberg e Sundberg desenvolveram na Suécia o método E-M "de duas antenas" (de fonte fixa), seguindo-se o desenvolvimento de métodos semelhantes nos EEUU. Métodos esses, atualmente obsoletos. Em 1931 Sundberg idealizou o compensador, permitindo a medida das componentes reais e imaginárias do campo induzido, as quais são parâmetros dos mais importantes, no estágio atual de desenvolvimento dos métodos E-M.

Também na Suécia, a partir do fim da década de 1930 e na década de 1940, foram desenvolvidos os atuais métodos, TURAN(de fonte fixa), e outros métodos de fonte e receptor móveis. O passo seguinte foi o desenvolvimento dos métodos E-M aerotransportados, em avião e em helicóptero, com muitas variantes. Esses métodos iniciaram-se na Suécia, Finlândia e Canadá, desenvolvendo-se posteriormente na França e em outros países.

Os métodos E-M de radio-onda (utilizando como fonte excitadora, emissores de ondas hertzianas), originaram-se de trabalhos teóricos e experimentais realizados predominantemente nos EEUU e URSS, no início da década de 1950. Tarkhov liderando equipe da Universidade de Moscou, idealizou e colocou em operação nos anos que se seguiram (1950-60), o novo método Radio-Kip, tendo publicado as bases teóricas do mesmo. Independentemente, estudos teóricos também se desenvolveram no ocidente. A versão moderna ocidental do método (denominado método VLF), foi idealizado pelo finlandês Vanio Ronka e fabricado pela Geonics de Toronto, no Canadá em 1965.

como mostra a figura esquemática acima.

A bobina emissora do campo E-M primário, pode estar fixada ou móvel sobre o terreno. Pode ser aero-transportada, também.

Quando a fonte emissora do campo E-M primário é um cabo isolado, o mesmo permanece estendido sobre o terreno, podendo estar isolado do solo, ou conectado mediante eletrodos por suas extremidades.

A corrente elétrica alternada que passa na bobina ou no cabo emissor, é produzida por um conjunto bobina-oscilador, ou por um gerador de corrente alternada.

Por sua vez, a corrente elétrica secundária induzida no condutor do terreno, dá origem a um campo E-M secundário, o qual se opõe ao campo primário indutor. Assim, se um fluxo primário está penetrando num ponto da superfície do condutor, o fluxo do campo secundário estará emergindo do mesmo ponto. Reciprocamente se o fluxo estiver saindo, o fluxo secundário estará entrando.

A intensidade da corrente induzida entre outros fatores, dependerá da condutividade do condutor.

A corrente induzida será da mesma frequência que o campo indutor. De modo geral ela será de maior intensidade (de maior amplitude), quanto maior for a intensidade do campo indutor ao atingir o condutor, e quanto menor for, a resistividade deste último.

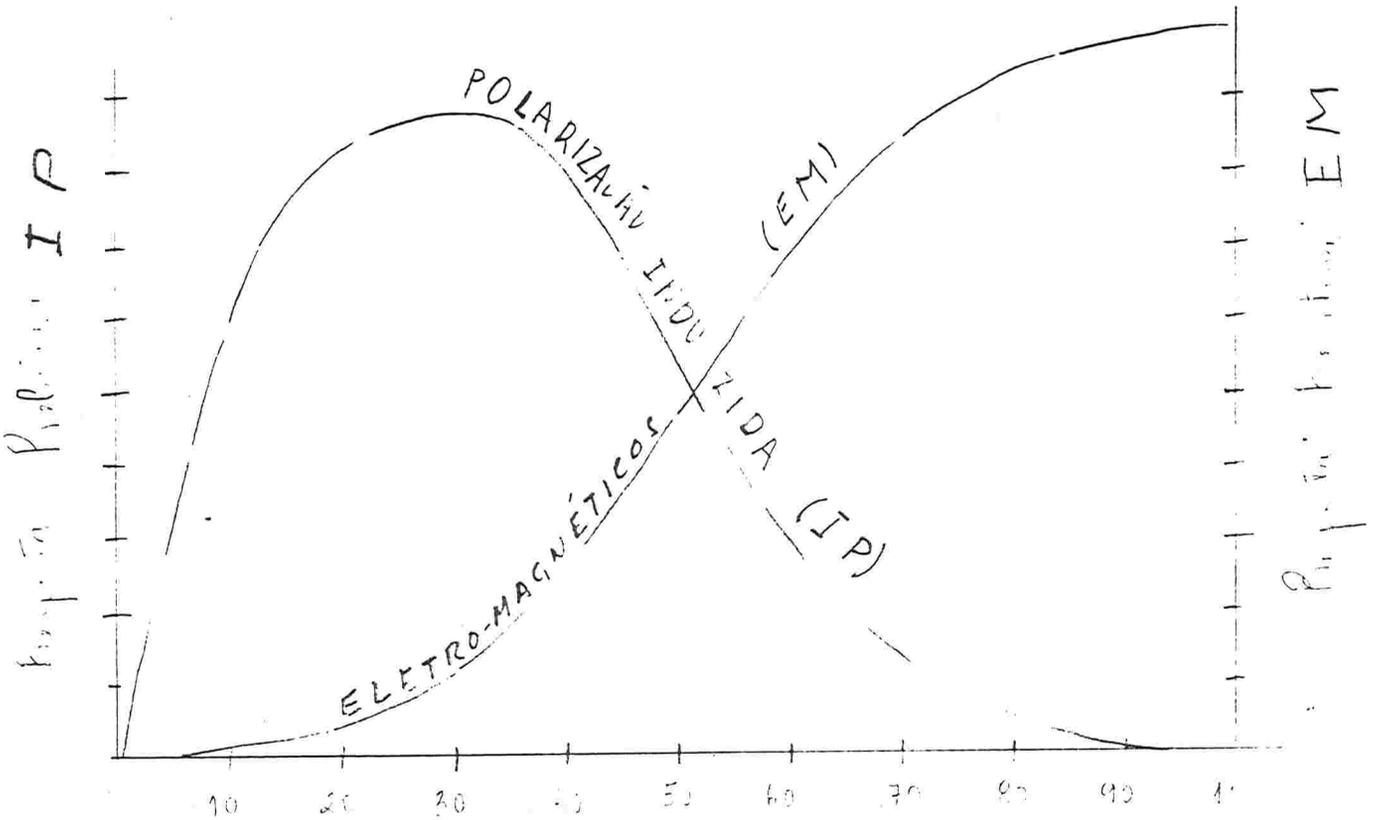
Por efeito da propagação do campo secundário originado, o campo total (ou o campo resultante) medido no ar sobre o terreno (junto à superfície ou a algumas dezenas de metros acima), será diferente do campo primário originalmente emitido. Comparando-se o campo total em um ponto da superfície com o campo primário, se poderá detectar a presença de um corpo condutor existente em subsuperfície, através do distúrbio produzido sobre o campo primário.

Corpos de condutividade contínua, de sulfetos metálicos condutivos (como por ex. pirita, pirrotita, calcopirita, molibdenita, galena, etc.), de óxidos como magnetita, e ainda grafito são bons alvos para os métodos E-M.

Corpos de minérios metálicos como esfalerita, hematita ou outros minerais maus condutores, geralmente são bons alvos, graças à minerais bons condutores associados. Índícios interessantes para a prospecção como fa-

lhas, fraturas e zonas brechadas, poderão ser detectados por efeito de água contida com soluções salinas, ou mesmo por conterem vênulas de mineralização metálica condutiva. A presença de grafito também é assinalada, e do mesmo modo como acontece com os métodos elétricos em geral, mascara os indícios de mineralização interessante, desfavorecendo a eficiência do método.

Comparando com o método de resistividade, os métodos E-M são menos sensíveis. Um condutor somente será detectado se houver contraste de condutividade relativamente grande, com a condutividade das rochas encaixantes.



% sulfetos Metálicos no Volume  
 Resposta de métodos eletromagnéticos e polarização induzida em função da percentagem dos sulfetos metálicos nas rochas

Essa figura mostra a distribuição da resposta ao impulso E-M, e ao efeito de polarização induzida, variando com a percentagem em volume dos minerais bons condutores na rocha. (no arivo)... Pela mesma verifica-se, que os dois métodos E-M e IP, além de serem complementares,

têm uma faixa de recobrimento de utilização eficiente.

Os métodos E-M em geral, são muito sensíveis aos efeitos do relevo, os quais podem mascarar as anomalias. Linhas de alta tensão e telefônicas, ferrovias, cercas, armaduras metálicas de pontes, etc., produzem anomalias E-M. Essas entretanto, são fáceis de distinguir devido suas uniformidades geométricas e intensidades relativamente grandes, quando comparadas as devidas à causas geológicas.

A pesquisa lateral em perfís, ou os mapeamentos com métodos E-M, são interpretados predominantemente de forma qualitativa.

Os equipamentos são pouco mais caros que os usados nos métodos elétricos, porém o rendimento da operação com métodos E-M é bem maior. Desse modo os métodos E-M são de custo menor do que os métodos elétricos, com a vantagem adicional de poderem ser aero-transportados. Neste último caso, adaptam-se muito bem para serem aplicados simultaneamente com o método magnético.

O alcance em profundidade é modesto: - Na pesquisa no terreno, utilizando frequências excitadoras de 100 Hz à 5000 Hz ( métodos E-M convencionais) o alcance poderá atingir em condições excepcionalmente favoráveis, 300 metros de profundidade. Na prática, entretanto, costuma-se considerar os alcances máximos em torno de 150 m ou 200m. Métodos E-M com fonte excitadora radio-frequências (como por ex. o método VLF com frequências entre 15 à 25 x 10<sup>3</sup> Hz) tem profundidades de investigação restritas à 60 metros.

De modo geral o alcance em profundidade é tanto menor, quanto maior fôr, a frequência do campo primário excitadôr, porque efeitos de indução nas rochas encaixantes, ocasionam maior dissipação da energia excitadora.

Por esse mesmo motivo, a maior resistividade elétrica das rochas da cobertura e encaixantes, favorece o alcance em profundidade dos métodos E-M. Formações muito condutivas superficiais, como por exemplo terrenos pantanosos, atuam como blindagem, prejudicando ou impedindo a penetração dos métodos E-M.

De outro lado o sinal recebido na operação dos métodos E-M, é tanto maior, quanto maior for a intensidade do campo excitador ao atingir o alvo, e quanto maior fôr a condutividade elétrica do mesmo alvo ( o con-

O método AFMAG ("audio frequency magnetic"), de fonte natural foi idealizado pelo canadense Mclaghlin e colaboradores, sendo de 1959 a primeira publicação à respeito.

Na década de 1970 foram desenvolvidos os chamados métodos E-M por medidas no domínio do tempo( exemplo o método aerotransportado INPUT da Geoterrex Ltda. do Canadá-Subsidiária da Compagnie Générale de Géophysique-Schlumberger). Nesses a fonte excitadora é uma corrente alternada pulsante, assim como o campo indutôr primário. As medidas do campo secundário são da intensidades dos mesmos, em intervalos de tempo, entre os impulsos do campo primário.

#### 4-6-2- Geometria do Campo Eletro-Magnético e Campo Elipticamente Polarizado.

Em qualquer ponto do espaço onde existe um campo eletro-magnético, coexistem uma intensidade magnética e uma intensidade elétrica.

Na prática de geofísica, mede-se somente o campo magnético, motivo pelo qual deixamos de nos preocupar com a intensidade elétrica coexistente.

Não havendo distúrbio, isto é, não tendo havido efeitos de indução secundária, que perturbem o campo primário:

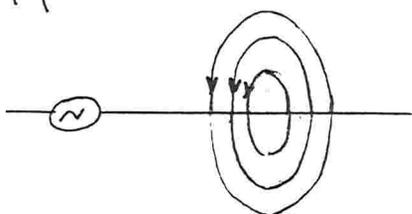
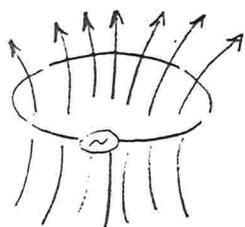
- A intensidade do campo magnético  $\vec{H}_p$  oscila, mantendo-se numa direção determinada, isto é numa linha reta. Seu sentido sofre inversão em cada semi-período da oscilação. O campo num determinado ponto pode ser representado por um vetor. Seu módulo representa a amplitude máxima da oscilação, o que significa a intensidade máxima de  $\vec{H}_p$  ou sua grandeza no ponto considerado. O sentido é o sentido do campo num instante arbitrariamente considerado.

A direção do vetôr ( ou do campo) dependerá:

- Da posição do ponto onde o mesmo está sendo observado( ou medido), relativamente a posição da fonte causadora do campo.
- Da posição e da natureza da fonte ( isto é, de sua forma, como seja uma bobina, um cabo, etc.).
- O sentido será o do instante considerado, dependendo também, das po-

sições relativas do ponto e da fonte, e da natureza da mesma.

As linhas de força do campo E-M originado por uma bobina, são semelhantes às linhas de força de um imã que estivesse colocado ao longo do eixo da bobina.



As linhas de força em torno de um cabo, serão circulares e em planos perpendiculares ao cabo.

Nos dois casos, o sentido dependerá em cada instante, do sentido da corrente alternada (c.a.) na bobina ou no cabo, no instante considerado.

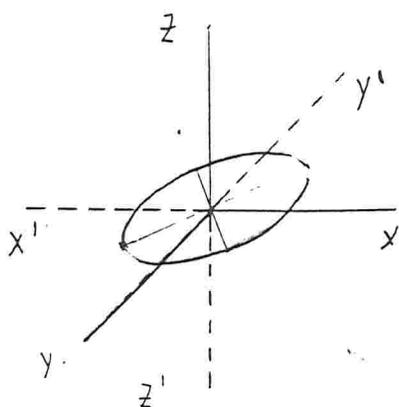
• Havendo distúrbio no campo  $\vec{H}_p$ , causado por um campo secundário induzido  $\vec{H}_s$  (devido indução num condutor sob a ação do campo  $\vec{H}_p$ ), haverá em cada ponto um campo resultante  $\vec{H}_R$ , dito também campo total.

Num determinado ponto, o campo  $\vec{H}_R$  é a resultante da composição em cada instante dos campos componentes naquele ponto  $\vec{H}_p$  e  $\vec{H}_s$ . Estes últimos ( $\vec{H}_p$  e  $\vec{H}_s$ ), além de terem diferentes direções, estarão oscilando com a mesma frequência angular, porém defasados no tempo. Por esses motivos  $\vec{H}_R$  não oscila com direção invariável. A direção de  $\vec{H}_R$  é diferente em cada instante. Pode ser demonstrado que o vetor  $\vec{H}_R$ , varia periodicamente em direção, grandeza e sentido elipticamente.

Isto significa que em cada período, o vetor  $\vec{H}_R$  assume todos os valores (direção, comprimento e sentido) dos semi-eixos de uma elipse, varrendo a superfície da mesma. Ao mesmo tempo  $\vec{H}_R$  mantém-se sempre num mesmo plano, o qual é o plano da elipse, que por sua vez situa-se no plano que contém as direções dos vetores  $\vec{H}_p$  e  $\vec{H}_s$  no ponto considerado.

Diz-se então que  $\vec{H}_R$  é elipticamente polarizado. Não cabe aqui a demonstração analítica desse fenômeno, a qual pode ser encontrada em tratados como Orellana 1974.

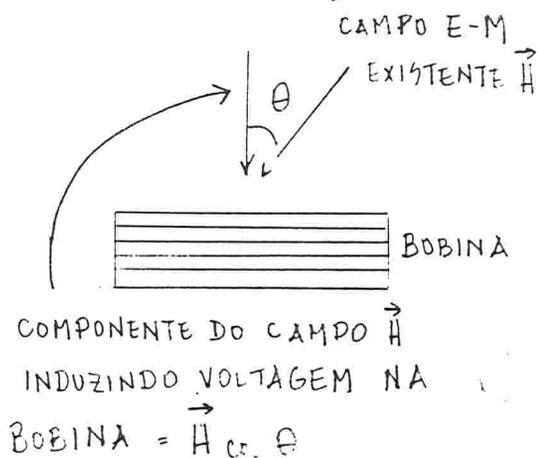
De outro lado um campo elipticamente polarizado como  $\vec{H}_R$ , será equivalente a dois outros campos, constituídos por dois vetores oscilando perpendicularmente entre si, um ao longo do eixo maior da elipse, e outro ao longo do eixo menor da elipse.



Desse modo, o campo  $\vec{H}_R$  assim polarizado, poderá ser representado por sua elipse de polarização, e sua posição espacial referida a um sistema de eixos cartesianos, como mostra a figura.

No caso em que o campo  $\vec{H}_s$  seja muito menor do que o campo  $\vec{H}_p$  ( $\vec{H}_s \ll \vec{H}_p$ ), a componente coincidente com o eixo maior da elipse, estará praticamente em fase com o campo primário  $\vec{H}_p$ , e por isso é denominada a componente em fase. Conseqüentemente, a componente coincidente com o eixo menor da elipse, será denominada a componente fora de fase ou em quadratura, ou simplesmente a quadratura. O plano de polarização (o plano da elipse) será definido pela sua direção e pelo seu mergulho. A inclinação do eixo maior da elipse em relação à horizontal, isto é a inclinação da componente em fase, é o parâmetro denominado inclinação do campo eletro-magnético polarizado, ou o "tilt" do campo E-M.

Poder-se-à mapear um campo E-M com um equipamento consistindo de uma bobina com 50 à 100 cm de diâmetro (ou quadro retangular), com dimensões semelhantes, com enrolamento de fio de cobre com várias centenas de voltas. As extremidades do fio da bobina (ou do quadro), são conectadas através de um amplificador à um par de fones ou outro dispositivo capaz de acusar existência de c.a. na bobina. Em cada instante a voltagem da c.a. induzida na bobina, será proporcional a componente do vetor campo E-M excitador, perpendicular ao plano da bobina.



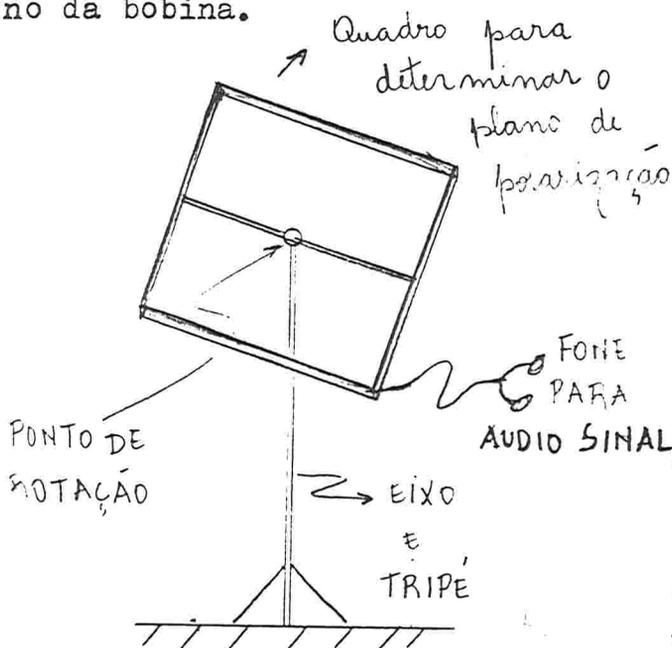
No caso de que o campo E-M pesquisado seja o campo primário (não perturbado), haverá um sinal máximo da existência de c.a. na bobina, quando o plano da mesma estiver perpendicular ao vetor  $\vec{H}_p$ ; Quando o plano da bobina (o plano das espiras da bobina), estiver paralelo ao vetor  $\vec{H}_p$  o sinal se extinguirá (haverá silêncio, por não haver corrente induzida).

Assim haverá um número infinito de posições de silêncio,

pois estando o plano da bobina coincidente com qualquer plano capaz de conter o vetor campo, não haverá corrente induzida na mesma.

Havendo distúrbio, isto é na presença de um campo induzido secundário, o campo total resultante estará polarizado.

Nessas novas condições, haverá somente uma posição de silêncio, quando o plano da bobina coincidir com o plano da elipse de polarização. Em outro qualquer plano, ( mesmo que contenha um dos eixos da elipse) haverá indução de corrente, porque o vetor campo não permanece no plano da bobina.



Utilizando-se uma bobina ( ou quadro) receptor como o da figura, se poderá determinar o plano de polarização, e a inclinação do eixo maior da elipse ( o tilt) .

Primeiramente gira-se a bobina em torno do eixo do tripé ( vertical), até obter-se o audio sinal mínimo; após gira-se em torno de um horizontal, até uma outra posição de sinal mínimo seja atingida. Em seguida gira-se a bobina em torno de um terceiro eixo

perpendicular aos dois anteriores, até reduzir o sinal à zero; quando então o plano da bobina coincidirá com o plano da elipse de polarização.

- Para determinar a inclinação do eixo maior da elipse, mantém-se a bobina perpendicular ao plano da posição de silêncio, girando-a até obter-se o audio sinal máximo. Nesta última posição, a normal à bobina, será a direção do eixo maior da elipse.

Esse é o parâmetro mais simples utilizado na pesquisa em métodos E-M. Outros parâmetros mais sofisticados, os quais serão estudados a seguir, são também utilizados.

#### 4-6-3 - Parâmetros medidos nos métodos eletro-magnéticos.

- Como foi visto, alguns equipamentos para os métodos E-M, medem a inclinação do campo total  $\vec{H}_R$  ( ou seja a inclinação do eixo maior da elipse de polarização).

Esse parâmetro entretanto é pouco sensível, podendo passar despercebido se o distúrbio for pequeno. É também de pequeno poder de resolução, fornecendo imprecisamente a posição do condutôr.

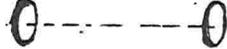
Por esses motivos foram desenvolvidos equipamentos capazes de medirem outros parâmetros mais sensíveis, e com melhor poder de resolução.

Assim os diversificados equipamentos utilizados em prospecção com métodos E-M, são capazes de medir um ou mais dos parâmetros seguintes:

- a) Inclinação do vetor total ou resultante  $\vec{H}_R$ , no ponto medido (parâmetro já definido, significando a medida da inclinação do eixo maior da elipse de polarização).
- b) Defasagem do campo  $\vec{H}_R$  no ponto medido, em relação ao campo primário  $\vec{H}_p$ . Ou ainda, a defasagem do campo  $\vec{H}_R$  entre cada dois pontos equidistantes entre si, ao longo de perfis.
- c) A relação ( quociente ou "ratio") da amplitude ( ou seja da intensidade) do campo  $\vec{H}_R$  num ponto medido, para a amplitude ( ou intensidade) do campo  $\vec{H}_p$ . Ou ainda, a relação ( quociente ou "ratio") entre as amplitudes do campo  $\vec{H}_R$  entre cada dois pontos equidistantes entre si, ao longo de perfis.
- d) As amplitudes ( ou intensidades) das componentes em fase e em quadratura do campo  $\vec{H}_R$  ou  $\vec{H}_s$  expressas em percentagem, ou em p.p.m., em relação a amplitude do campo  $\vec{H}_p$ .

Nos casos dos grupos a , b , e c de parâmetros citados, os aparelhos fornecem as medidas, referidas às respectivas componentes verticais ou horizontais, conforme a orientação adotada para as bobinas ( ou quadros) receptores.

As bobinas emisoras e receptoras podem, conforme o equipamento, serem :

- verticais coplanares 
- coaxiais 
- horizontais coplanares 
- perpendiculares entre si 

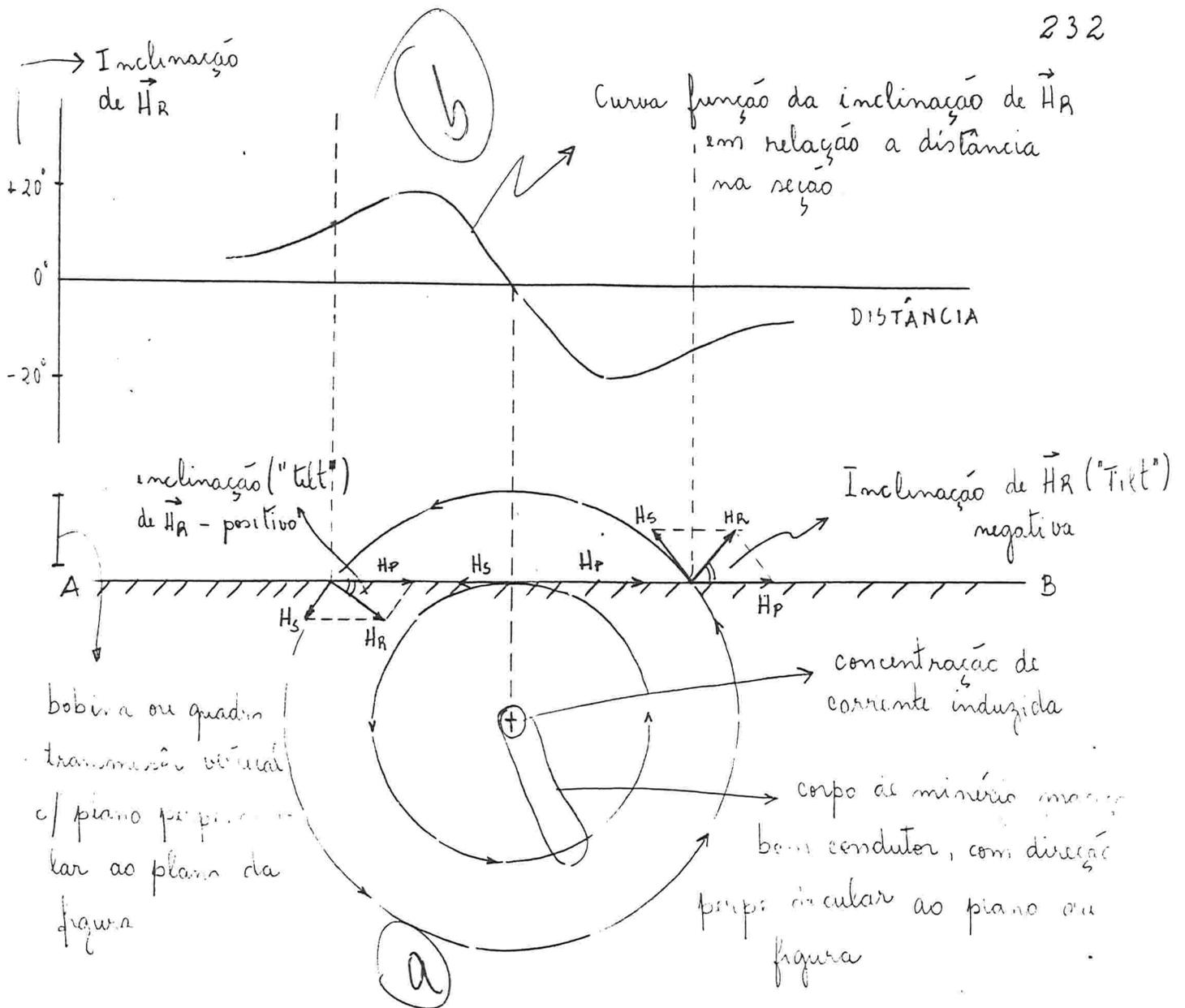
Cabe ainda acrescentar o parâmetro - medidas das intensidades do campo secundário em intervalos de microsegundos, nos intervalos de ausência de um campo primário pulsante ( parâmetro dos métodos E-M por medidas no domínio do tempo) .

Alguns equipamentos permitem o uso de várias frequências , permitindo assim, levantar perfis ou mapear valores de um mesmo parâmetro, obtidos com diferentes frequências. Desse modo pode-se tirar conclusão com respeito a diferentes profundidades de investigação, uma vez que a profundidade diminui com o aumento da frequência, como foi visto.

A seguir explicaremos o significado de cada um dos parâmetros acima relacionados, seu uso em prospecção, com exemplos de equipamentos e técnicas de operação respectivas.

4-6-3-1 Inclinação do Campo  $\vec{H}_R$  e método respectivo, ou método de medida do "Tilt" .

O significado desse parâmetro foi explicado no item 4-5-2, geometria do campo E-M polarizado, cabendo aqui objetivar como esse parâmetro é utilizado na prospecção.



Inclinação do campo  $\vec{H}_R$  resultante do distúrbio causado pelo campo  $\vec{H}_s$  no campo excitador  $\vec{H}_p$

A figura representa uma situação particular simples:

- Um campo primário  $\vec{H}_p$  horizontal, produzido por uma bobina emissora vertical colocada perpendicularmente ao plano da figura, está induzindo corrente num condutor em subsuperfície. Esse <sup>condutor</sup> por sua vez está colocado normalmente à direção do campo  $\vec{H}_p$  (sua maior dimensão é aproximadamente perpendicular ao plano da figura).

Admitindo-se que o campo secundário induzido  $\vec{H}_s$  seja pequeno em relação ao campo  $\vec{H}_p$  (como acontece usualmente), o vetor resultante  $\vec{H}_R$  (obtido pelo paralelogramo dos vetores  $\vec{H}_p$  e  $\vec{H}_s$  em cada ponto), coincidirá com o eixo maior da elipse de polarização. A elipse de polarização está no plano da figura. A horizontal desse plano, é a direção da secção AB.

Pesquisa-se lateralmente ao longo da secção AB, com uma bobina receptora, de modo que em cada ponto obtenha-se o sinal audível mínimo na bobina, mediante a operação de inclinar a bobina. Isto é, em cada ponto, a bobina receptora é mantida vertical ao plano da figura, e basculada em torno de um eixo horizontal perpendicular ao mesmo plano.

Em cada posição de sinal audível mínimo, o plano das espiras da bobina conterá o vetor  $\vec{H}_R$  no ponto pesquisado, e a inclinação da bobina, será à inclinação do eixo maior da elipse ( ou seja do vetor  $\vec{H}_R$  ). Quando o ponto de medida situar-se verticalmente sobre a linha ao longo da direção de concentração da corrente induzida no condutor, a posição de sinal mínimo na bobina será a horizontal, conforme se verifica na figura.

A parte superior da figura, mostra a curva que se obteria, locando-se em ordenadas as inclinações da bobina medidas em graus, e em abscissas, as distâncias das respectivos pontos de medida ao longo da secção AB.

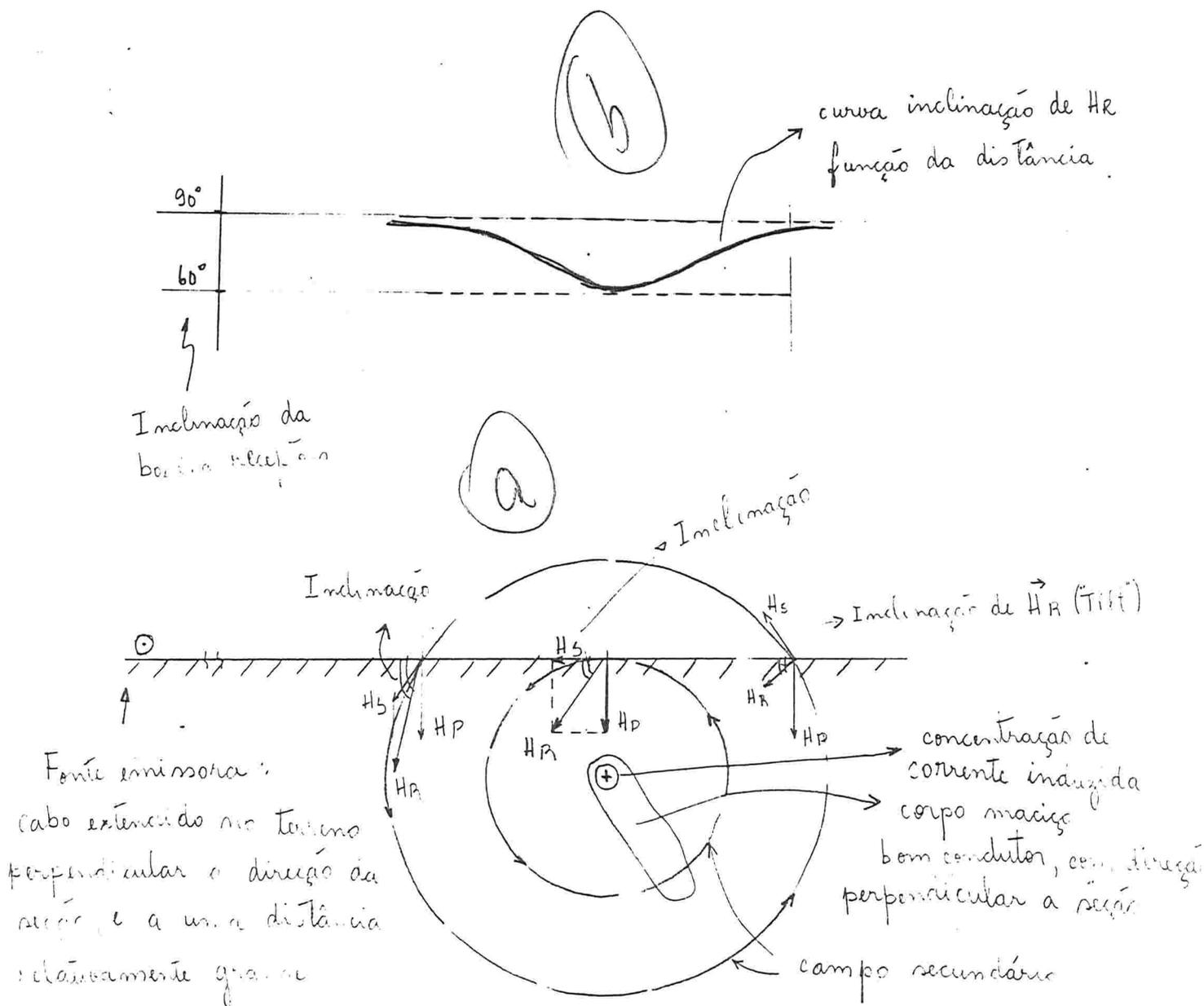
É evidente que a inflexão da curva ( no ponto de inclinação 0 ) , indicará a posição do condutor em subsuperfície. Essa é uma das mais antigas técnicas de pesquisa com métodos E-M, e a mais popular, sendo referida na literatura, por VLEM ( de "Vertical Loop EM" ). É um método simples e rápido adaptado para terreno plano, e que pode determinar acuradamente direções em situações de geologia complexa. Suas limitações são a que dizem respeito à levantamentos em terrenos acidentados, à determinações de profundidades, mergulhos, e relações condutividade-espessuras.

A figura seguinte mostra outra situação simples, no qual o vetor  $\vec{H}_p$  sendo o campo primário, fosse obtido por um cabo isolado estendido sobre o terreno perpendicularmente ao plano da figura, e à uma distância suficientemente grande, para que  $H_p$  fosse sempre vertical ao longo da secção AB .

Nessa nova situação a elipse de polarização seria também vertical, e com o plano coincidente com o plano da figura.

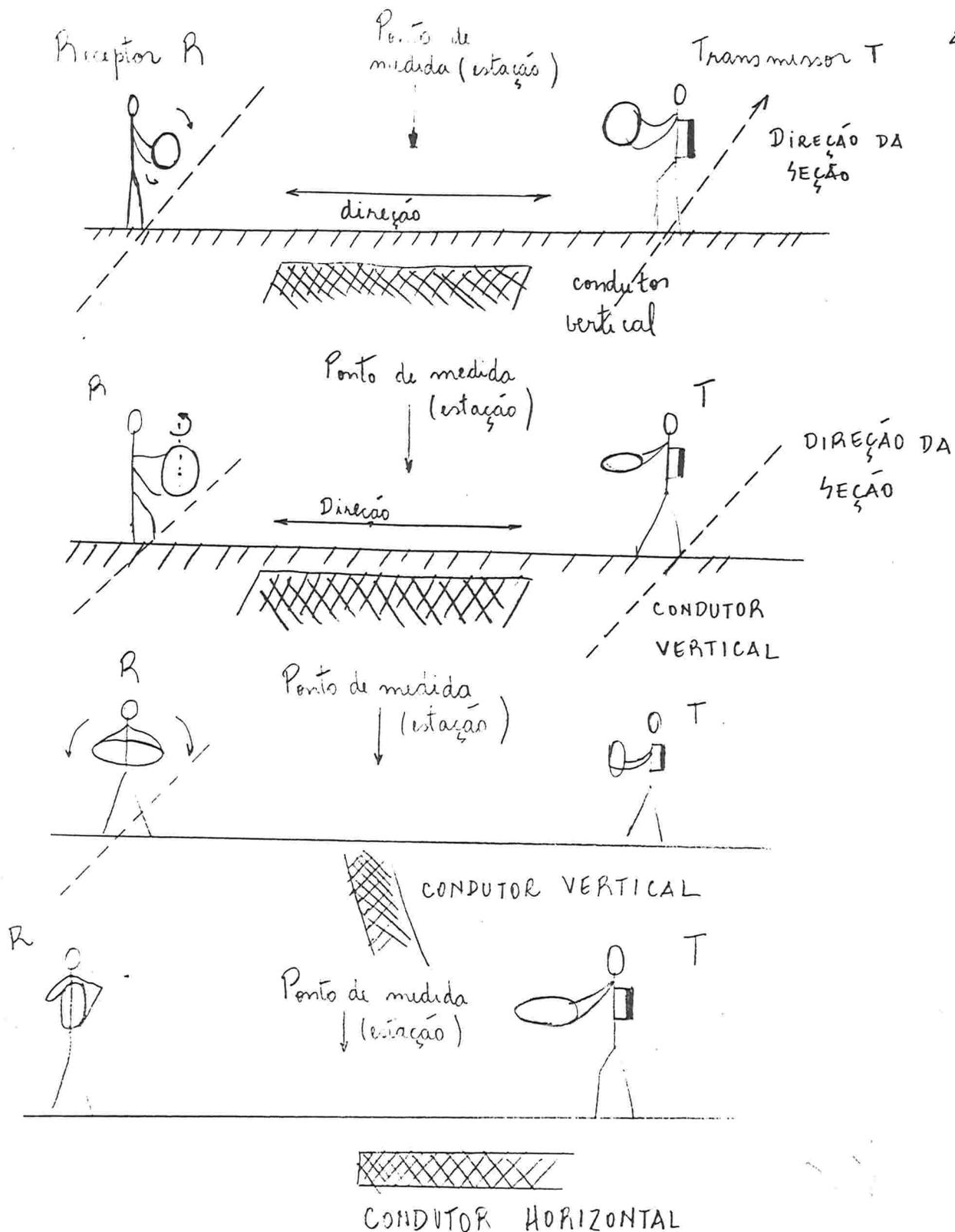
O mínimo da curva ( inclinação da bobina receptora função

da distância) , indicaria a posição do condutor.



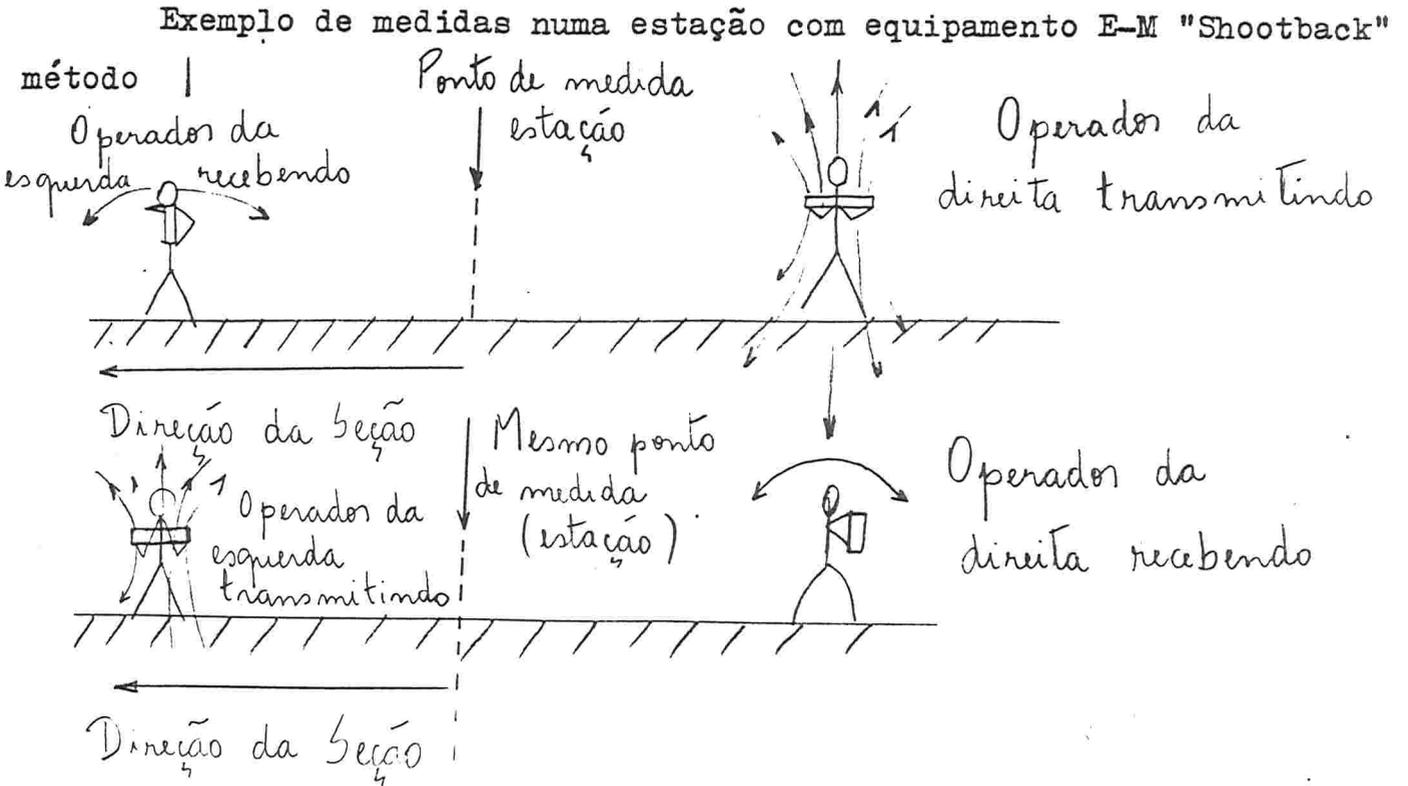
Exemplos de equipamentos para medida da inclinação do campo resultante, utilizados para trabalhos de reconhecimento :

- Equipamento Sharpe ( do Canadá) - De fonte e receptor móveis  
( figura outra folha)



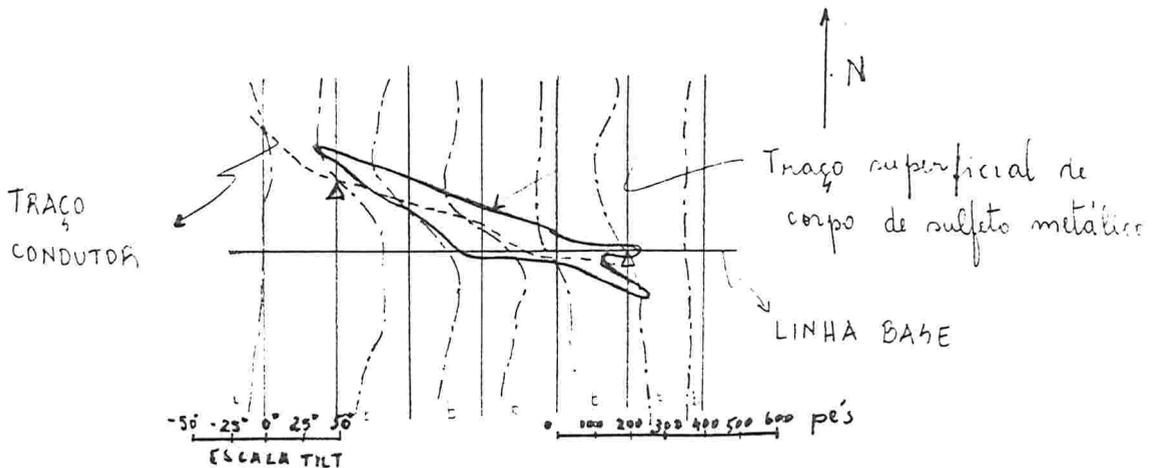
Operação em campo com equipamento E-M para medida da inclinação do campo  $\vec{H}_R$  - figura do catálogo da E.S. Sharpe Instruments Ltda.

- Equipamento "Shootback" é uma variante do método de medida da inclinação do campo, no qual ambos os operadores são sucessivamente à seu turno, transmissores e receptores. É também, um método de fonte e receptor móveis.

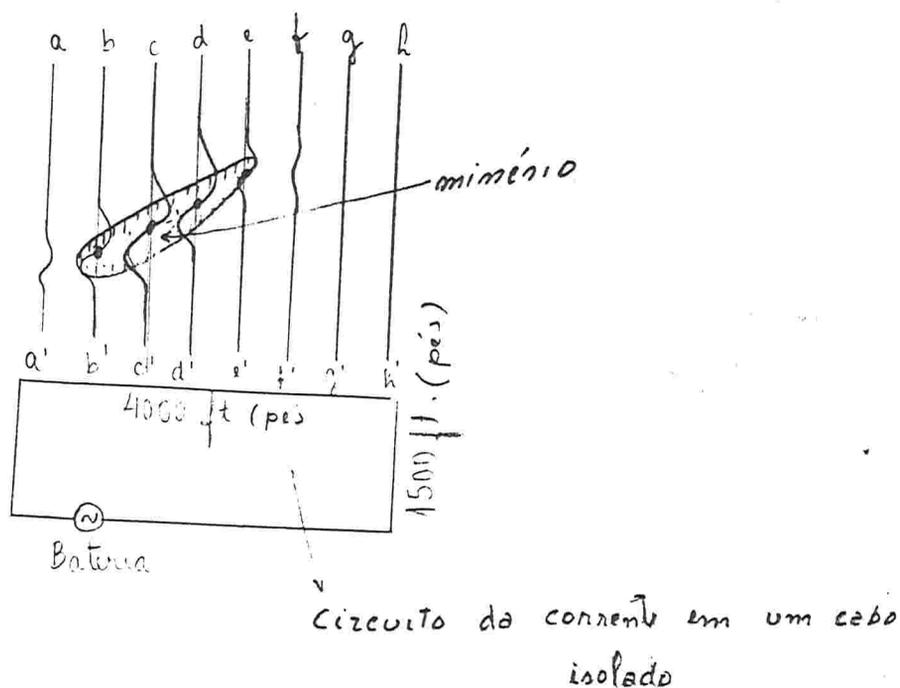


Com qualquer um desses equipamentos, são adotadas varias formas racionais de operar, adequadas às atitudes previstas do condutor. Ou melhor, adequadas as atitudes das estruturas controladoras da mineralização. Sugestões para racionalizar a operação nos levantamentos, encontram-se em instruções fornecidas pelos fabricantes de equipamentos.

Exemplo de um levantamento com método de medida <sup>DE TILT</sup> com equipamento E.S. Sharpe, reproduzido em Parasnis 1966 .



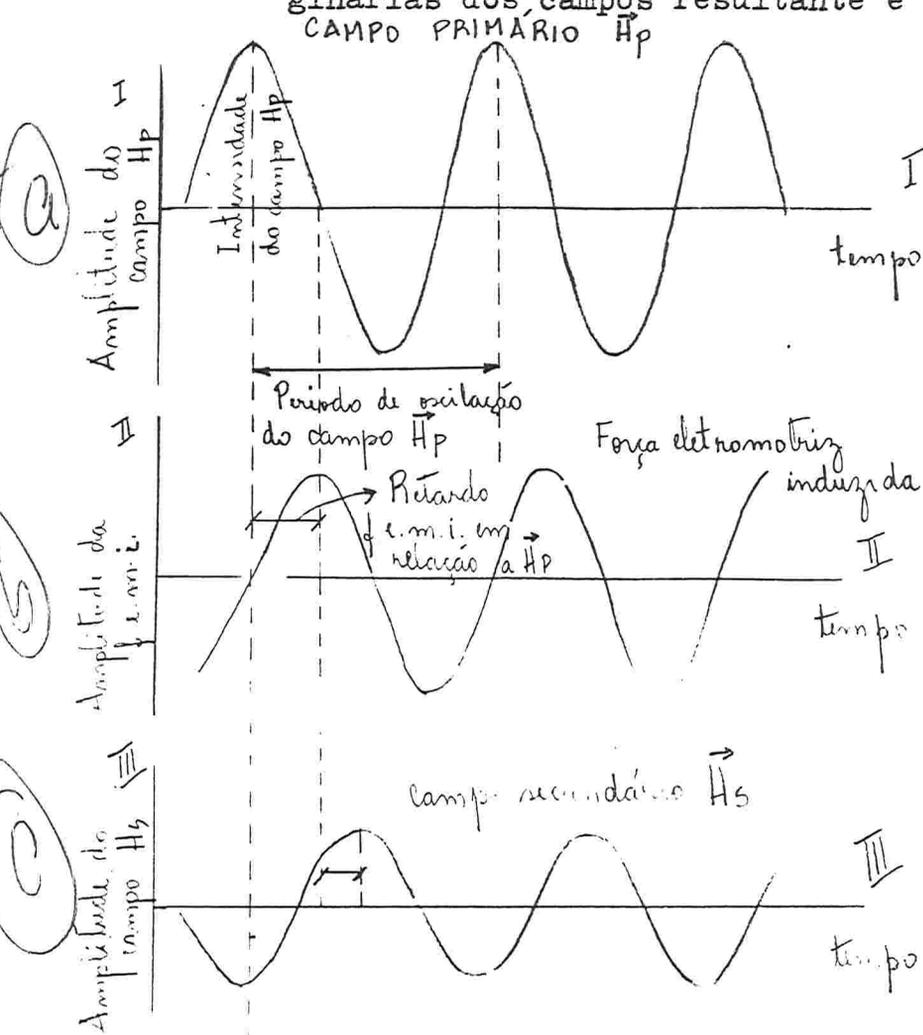
Exemplo de um layout de prospecção com método E-M do ângulo de inclinação do campo resultante, com um equipamento de fonte fixa e receptor móvel. Fonte excitadora, constituída por um cabo estendido no terreno - ( figura de Dobrin 1952)



Devido a simplicidade e pequenos custos dos equipamentos; da operação e da interpretação; os métodos E-M por medida da inclinação do campo resultante, de fonte e receptor móveis, são ainda muito utilizados, principalmente os de origem canadense da E.S. Sharpe Instrumentes Ltd. Entretanto são métodos de sensibilidade, penetração e resolução muito pequenas, sendo indicados para reconhecimentos preliminares.

O desenvolvimento dos métodos E-M, introduziu no uso comum, equipamentos também relativamente simples, porém utilizando outros parâmetros de medida mais sofisticadas, mais sensíveis, e com melhor poder de resolução. Esses foram mencionados anteriormente, e serão estudados com maior detalhe a seguir.

4-5-3- 2 - Parâmetros defasagem e amplitude do campo resultante, em relação ao campo primário excitadôr. (Componentes reais e imaginárias dos campos resultante e secundário).

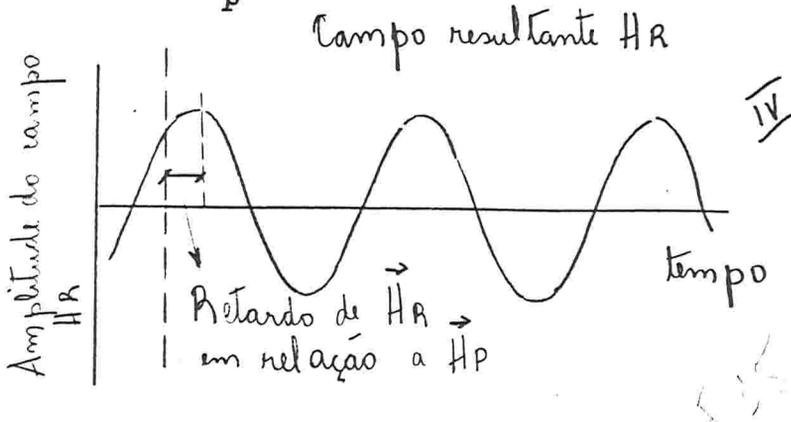


Na figura ao lado a Senoide I, representa o campo primário excitadôr, com sua amplitude (intensidade) e período.

Em II, está representada, a força eletro-motriz induzida no condutor (f.e.m.i.) isto é, a voltagem da corrente induzida. Como mostra a figura, a f.e.m.i., tem a mesma frequência que o campo indutôr, porém é defasada do mesmo, com um retardo de  $1/4$  de período.

Em III está representado o campo secundário induzido  $\vec{H}_s$ , o qual tem a mesma frequência que o campo indutôr e a f.e.m.i. Porém sua amplitude é menor do que a amplitude do campo  $\vec{H}_p$ . Tem um retardo em relação a f.e.m.i., e conseqüentemente em relação ao campo  $\vec{H}_p$ . O campo  $\vec{H}_s$  por efeito do retardo em relação a  $\vec{H}_p$  tende a opor-se ao mesmo. Sua amplitude depende da f.e.m.i. no condutôr, a qual por sua vez depende de sua condutividade e da amplitude ou intensidade do campo  $\vec{H}_p$  ao atingir o condutôr. A amplitude do campo  $\vec{H}_s$  é tanto maior quanto maior for, a amplitude da f.e.m.i., e conseqüentemente, quanto maior for a condutividade do condutôr e a intensidade (ou amplitude) do campo

$\vec{H}_p$  ao atingir o condutor. Quanto maior for a condutividade do condutor, maior será o retardo entre  $\vec{H}_s$  e  $\vec{H}_p$ , portanto maior a tendência de  $\vec{H}_s$  opor-se à  $\vec{H}_p$ .

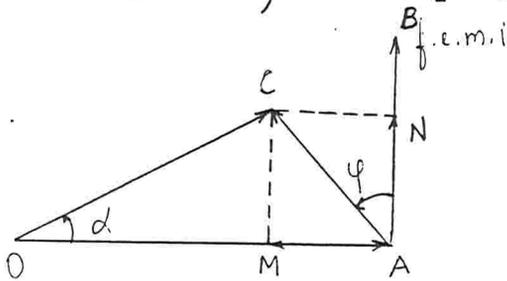


O campo  $H_R$  representado em IV, será o resultado da composição (ou soma vetorial) em cada instante, de  $\vec{H}_p$  e  $\vec{H}_s$  no ponto considerado. Na figura, a senoide resultante da soma das senoides de I e III. Evidentemente  $\vec{H}_R$  tem a

mesma frequência que  $\vec{H}_p$ , tanto mais retardado em relação a este último, quanto maior for a condutividade do condutor.

Essas mesmas relações podem ser representadas num diagrama convencional - vetorial, de amplitudes e fases.

Por convenção essa representação vetorial expressa as intensidades pelos módulos dos vetores, e as defasagens entre os mesmos, pelos ângulos entre as <sup>direções e</sup> sentidos dos vetores. Os retardos entre um e outro vetor, são representados em graus no sentido anti-horário. Desse modo, o retardo de um período, seria representado por deflexão de  $360^\circ$  ou  $2\pi$ .



Assim a amplitude do campo primário  $\vec{H}_p$  é representada sobre uma reta horizontal pelo vetor OA cujo sentido é considerado positivo, da esquerda para direita.

A f.e.m.i. no condutor, a qual é defasada de  $1/4$  de período em relação ao campo primário, é representada pelo vetor AB, sobre a vertical partindo da extremidade A do vetor OA, portanto formando um ângulo de  $90^\circ$  com este último vetor.

O vetor AC representa a amplitude do campo secundário induzido  $\vec{H}_s$ ; a defasagem (isto é o retardo) entre o campo secundário e a f.e.m.i., fica representada pelo ângulo  $\varphi$ . A amplitude do campo resultante  $\vec{H}_R$ , é representada pelo vetor OC e a defasagem (o retardo) do campo  $\vec{H}_R$  em relação a  $\vec{H}_p$  é representada pelo ângulo  $\alpha$ .

A amplitude do campo resultante  $\vec{H}_R$ , pode ser considerada como o resultado da soma vetorial da amplitude de um vetor OM o qual está em fase com o campo primário, e a amplitude de um vetor MC=AN defasado do campo primário de  $90^\circ$ .  $AN=OC.\text{sen } \alpha$ , é denominada a amplitude da componente imaginária, ou da componente fora de fase, do campo resultante.  $OM = OC.\text{cos } \alpha$ , por sua vez é denominada a amplitude da componente real (ou da componente em fase) do campo resultante.

De forma semelhante, a amplitude do campo secundário. AC, pode ser considerada como a composição de duas componentes  $AM=AC.\text{sen } \varphi$ , dita a componente real da amplitude do campo secundário, e  $AN=AC.\text{cos } \varphi$  dita a amplitude da componente imaginária do campo secundário.

A componente real do campo secundário, opõe-se ao campo primário; é defasada do mesmo de  $180^\circ$ , tendo sentido negativo no diagrama de vetores.

A componente imaginária do campo secundário é defasada de  $1/4$  de período, ou  $90^\circ$  do campo primário, sendo por isso denominada também a componente fora de fase.

Observe-se que em todos os casos, os conceitos de componentes reais e imaginárias, não correspondem as qualidades dos adjetivos real e imaginário da linguagem, como consta no dicionário.

$\frac{AM}{MN} = \text{Tg } \varphi$ , expressa a condutividade do condutor. Se  $\varphi$  fosse igual a  $90^\circ$ ,  $\text{tg } \varphi = \infty$ , indicaria condutância infinita do condutor, e o campo secundário se oporia totalmente ao campo primário. Sendo  $\varphi$  próximo à  $90^\circ$ , indica corpo muito bom condutor, e contrariamente,  $\varphi \approx$  zero graus, indica corpo mau condutor.

Arbitrariamente, considera-se que quando a relação,

Intensidade(ou amplitude) da componente real  $\approx \text{tg } \varphi = 1$ , (correspondendo a um retardo  $\varphi \approx 45^\circ$ ), o corpo causador do distúrbio, será um condutor de características médias.

Observe-se que o fenômeno é mais complexo, pois a relação  $\left( \frac{\text{intensidade da componente real}}{\text{int. da componente imaginária}} \right)$ , depende também da posição do ponto de

observação em relação a posição do condutor, e da frequência do campo primário. *Por esse motivo*, avaliações da condutividade do condutor com base somente nessa relação, significam apenas, aplicação de regra para estimativa de aproximação.

É muito importante compreender-se que um diagrama de vetores é uma representação convencional de relações de amplitudes e fases, não tendo nenhum significado espacial. Ainda mais, que as defasagens ou retardos, significando tempos, são avaliadas em unidades angulares, somente por comodidade convencional.

Deve ficar esclarecido que a representação <sup>do campo primário</sup> na posição horizontal, não significa que esse campo esteja espacialmente nessa posição. Da mesma forma, a representação das componentes imaginárias em posições <sup>OSCILEM</sup> verticais, não significa que essas componentes oscilem em direções verticais.

Campos resultantes ou campos secundários, comportam componentes espaciais horizontais e verticais, sem relação com defasagens.

Componentes horizontais e verticais, de campos resultantes ou secundários, terão também por sua vez, componentes reais e componentes imaginárias, no sentido temporal de fase.

A medida seletiva de uma componente espacial, horizontal ou vertical, é obtida pela posição adequada da bobina receptora.

As medidas seletivas de uma componente real ou imaginária, são obtidas mediante equipamentos denominados compensadores, ou pontes de corrente alternada. Nessas as medidas são feitas por comparação com dois padrões de voltagens, ajustáveis com diferenças de fases de  $90^\circ$ .

Os compensadores podem ser ajustados para fornecer, mediante leituras <sup>diretas</sup>, as grandezas das componentes real e imaginária do campo E-M recebido na bobina receptora, ou a amplitude e a fase desse mesmo campo. Se a bobina receptora estiver em posição horizontal, as componentes real e imaginária lidas, serão às da componente vertical do campo; se a bobina receptora estiver na posição vertical, as componentes real e imaginária serão componentes da componente espacial horizontal.

#### 4-6-3-3 Parâmetro " Por medidas no domínio do tempo"

Modernamente foram desenvolvidos equipamentos para levantamentos com método E-M , nos quais o campo primário é um campo pulsante repetitivo, gerado por uma corrente alternada pulsante, cuja amplitude troca de sinal a cada pulso.

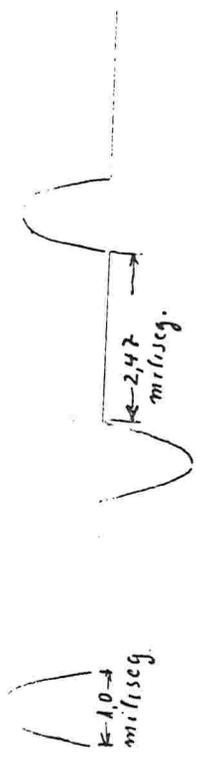
As amplitudes do campo secundário induzido, são medidas ( ou amostradas) em cada 200 microsegundos ( ou menores tempos) , durante os intervalos de ausência do campo primário, os quais ocorrem entre os pulsos deste último ( do campo primário).

As medidas de amplitude são registradas continuamente num sistema de multicanais ( com seis, dez ou mais canais ).

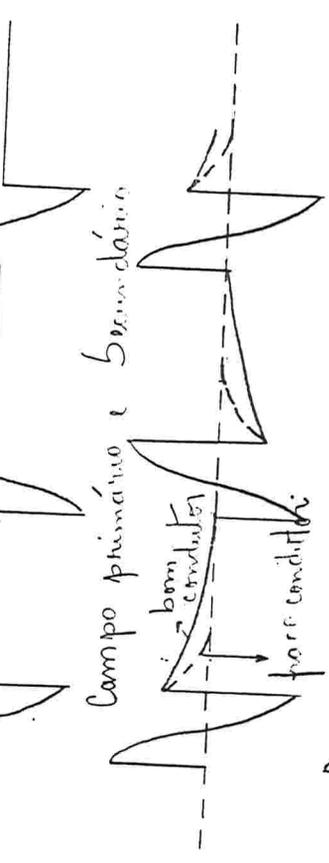
Esse sistema é utilizado principalmente em levantamentos aéreos . , sendo o método ( de Induced Pulse Transient), INPUT da Geoterrex Ltd do Canadá , é representativo desse sistema.

Há notícia de últimos desenvolvimentos consistindo na aplicação de equipamentos desse sistema, para levantamentos no terreno ( Referência E & M.J. agosto 1982 ) .

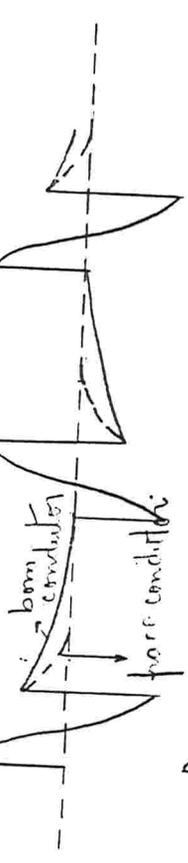
IMPULSO PRIMÁRIO



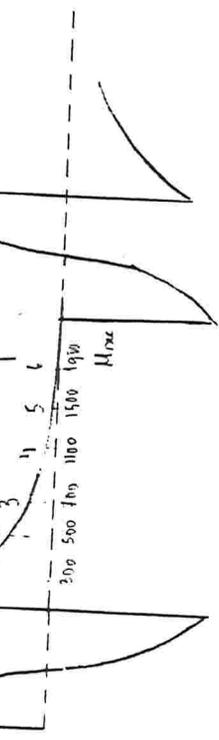
CAMPO PRIMÁRIO DETECTADO NO BIRD (Após compensação)



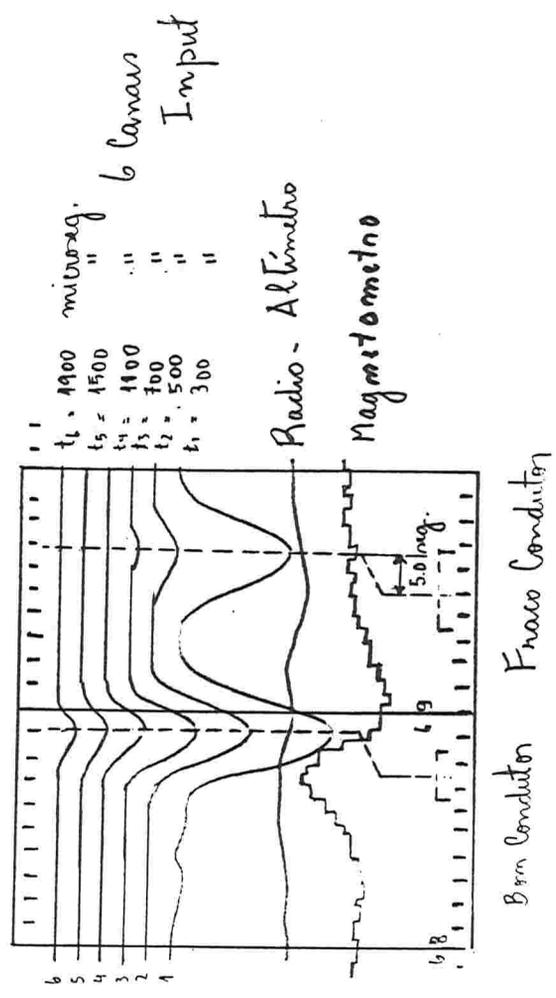
Campo primário e secundário



Amostragem do sinal input



SINAL INPUT



FE 10

Os pulsos do campo primário, induzem correntes nos condutores, as quais vão se extinguindo (decaindo) exponencialmente, gradualmente, a partir do instante em que o pulso indutor cessou, e durante o intervalo entre dois pulsos. A curva exponencial do decaimento, obtida pelas medidas das amplitudes do campo secundário induzido, em diversos canais, pode ser analisada, sendo a taxa de decaimento com o tempo, e sua amplitude inicial, as principais características.

Um bom condutor terá amplitudes de corrente relativamente baixas no início, e decairá vagarosamente. Um condutor mais fraco, terá amplitudes de corrente relativamente altas no início, mas decaindo rapidamente. Um mau condutor, não registrará campo secundário, por não haver corrente induzida.

O fato de que as medidas do campo secundário serem feitas nos intervalos de ausência do campo primário, favorece a sensibilidade, podendo registrar sinais extremamente pequenos. Interpretações qualitativas das curvas de decaimentos, juntamente com a geometria e correlação de anomalias, permitem estimativas da constituição mineralógica do condutor, profundidade do topo do mesmo, sua atitude e <sup>seu</sup> comprimento segundo a direção.

Desse modo, além dos alcances em profundidade serem relativamente maiores, esse sistema favorece a resolução e a discriminação entre os condutores, embora seus custos de operação sejam maiores que outros sistemas.

Contrapondo a denominação desse sistema como "por medida no domínio do tempo", os sistemas que utilizam parâmetros mais relacionados com defasagem (por exemplo medidas de componentes reais e imaginárias, relações de amplitude e defasagem observada em dois pontos medidos), são em conjunto designadas na literatura, por medidas no domínio da frequência - Ref. E&J.M. - agosto 1982.

As tendências de desenvolvimento dos métodos de medida no domínio da frequência, também são no sentido da utilização de sistemas com multicanais, e com frequências múltiplas. ~~O objetivo~~ <sup>O objetivo</sup> é ampliar suas características de alcance em profundidade, de sensibilidade e de poder de resolução e discriminação.

#### 4-6-4. Penetração e alcance útil em profundidade dos métodos E-M.

Se as rochas não tivessem condutividade elétrica, isto é se fossem isolantes perfeitos, as ondas eletro-magnéticas penetrariam à qualquer profundidade na terra. Porém devido a condutividade das formações superficiais e das rochas encaixantes, a energia da onda E-M, é absorvida ao atravessá-las, e a amplitude decresce exponencialmente.

A profundidade de penetração  $d$  é dada em metros por :

$$d = 503,8 \sqrt{\frac{\rho}{F}} \quad (\text{para condutores não magnéticos})$$

Essa relação mostra que a penetração cresce com a resistividade do meio atravessado, e decresce com a frequência  $F$  do impulso eletromagnético. Se  $\rho = 2000 \text{ ohm.m}$  ( p.ex. para arenitos, calcários, etc.), a penetração seria de 700 m com  $F = 1000 \text{ Hz}$ , ou 225 m com  $F = 10\,000 \text{ Hz}$ .

Entretanto se as resistividades forem baixas, da ordem de  $10 \text{ ohm.m}$ , como acontece no caso de folhelhos, seria necessário que a frequência fosse  $F = 10 \text{ Hz}$ , para que se obtivesse uma penetração de 150 metros apenas.

Como é comum, coexistem condutores rasos ( em geral de condutividade fraca, isto é condutores pobres), e condutores mais profundos no bed-rock ( em geral relativamente mais condutivos, isto é bons condutores). Assim, não elevar-se a frequência :

- a grandeza relativa do sinal ( da resposta) devida aos condutores superficiais aumenta, enquanto que a grandeza relativa do sinal devido ao condutor profundo diminui. O contrário acontece, diminuindo-se a frequência emitida.

Assim para aumentar-se a profundidade útil da pesquisa, se deverá utilizar baixa frequência. Porém o uso de frequências muito baixas é limitado pelo fato de que a grandeza absoluta do sinal decresce proporcionalmente a frequência.

O máximo de profundidade no qual um condutor deve estar para que produza um sinal reconhecível ( isto é, produza uma anomalia E-M

sensível), se denomina sua profundidade prática útil .

Essa profundidade depende :

- a) da grandeza da intensidade do sinal, causado pelas variações de condutividade das formações superficiais( dita das grandezas do "ruído") ;
- b) da geometria e da condutividade do condutô<sup>o</sup>r profundo ;
- c) da sensibilidade do equipamento, e da grandeza do impulso inicial ou seja da potência da fonte emissora ;
- d) da distância que separa a fonte emissora da bobina receptora.

Os efeitos seletivos, do aumento ou diminuição da frequência emitida, fundamentam as vantagens do uso de frequências múltiplas nos equipamentos E-M. Recursos de uso de várias frequências, juntamente com uso de várias separações fonte-emissora, fornecem recursos de interpretação. Principalmente para distinguir anomalias devidas a condutores profundos interessantes, de efeitos superficiais desinteressantes.

#### 4-5-5 - Diversificação e classificação dos métodos eletro-magnéticos.

De todos os métodos geofísicos , são os mais diversificados. São tantas as combinações de características que individualizam as diversas variantes do método E-M presentemente utilizadas, que torna-se impossível classificá-los, segundo critério uniforme.

De modo geral cada tipo de equipamento é conhecido por nomes próprios. Algumas vezes o nome indica alguma característica marcante; outras são nomes que originaram-se do protótipo fabricado.

Na literatura dos métodos E-M, são adotadas muitas classificações mais ou menos abrangentes, como :

- a) métodos de fonte fixa e métodos de fonte móvel, significando no primeiro caso, que na operação, a fonte excitadora permanece fixa movendo-se somente o receptor; e no segundo caso, que a fonte e o receptô<sup>o</sup>r movem-se juntos.

- b) Métodos E-M convencionais, métodos de radio-frequências e métodos de fonte natural, conforme foram definidos no item 4-1, pelas faixas de frequências dos que utilizam campos primários *utilizados*
- c) Métodos E-M aplicados em levantamento no terreno, métodos E-M aerotransportados e métodos E-M aplicados em furos de sonda. Os últimos com finalidade para detectar concentrações de mineralizações metálicas, ou com a finalidade de perfilagem estratiográfica.

A seguir passamos a abordar as principais variantes de métodos E-M, atualmente utilizados, procurando apresentá-las, segundo as classificações referidas.

#### 4-6-6 - Métodos eletro-magnéticos convencionais.

Nesse grupo classificam-se os métodos E-M que utilizam como campo primário excitador, campos provocados com frequências de  $1 \times 10^2$  ciclos/segundo à  $5 \times 10^3$  ciclos/segundo ( ou 100 Hz à 5000 Hz).

##### 4-6-6.1 - Métodos E-M convencionais de fonte fixa.

Desses o mais representativo e o mais utilizado, é o método TURAM.

##### Método TURAM -

Concebido na década de 1930 na Suécia. O nome vem da aglutinação do equivalente sueco de " Two Frame" ( significando de dois quadros-bobina). "Two frame", designava outro método de concepção anterior, de cujo desenvolvimento originou-se o método TURAM atual.

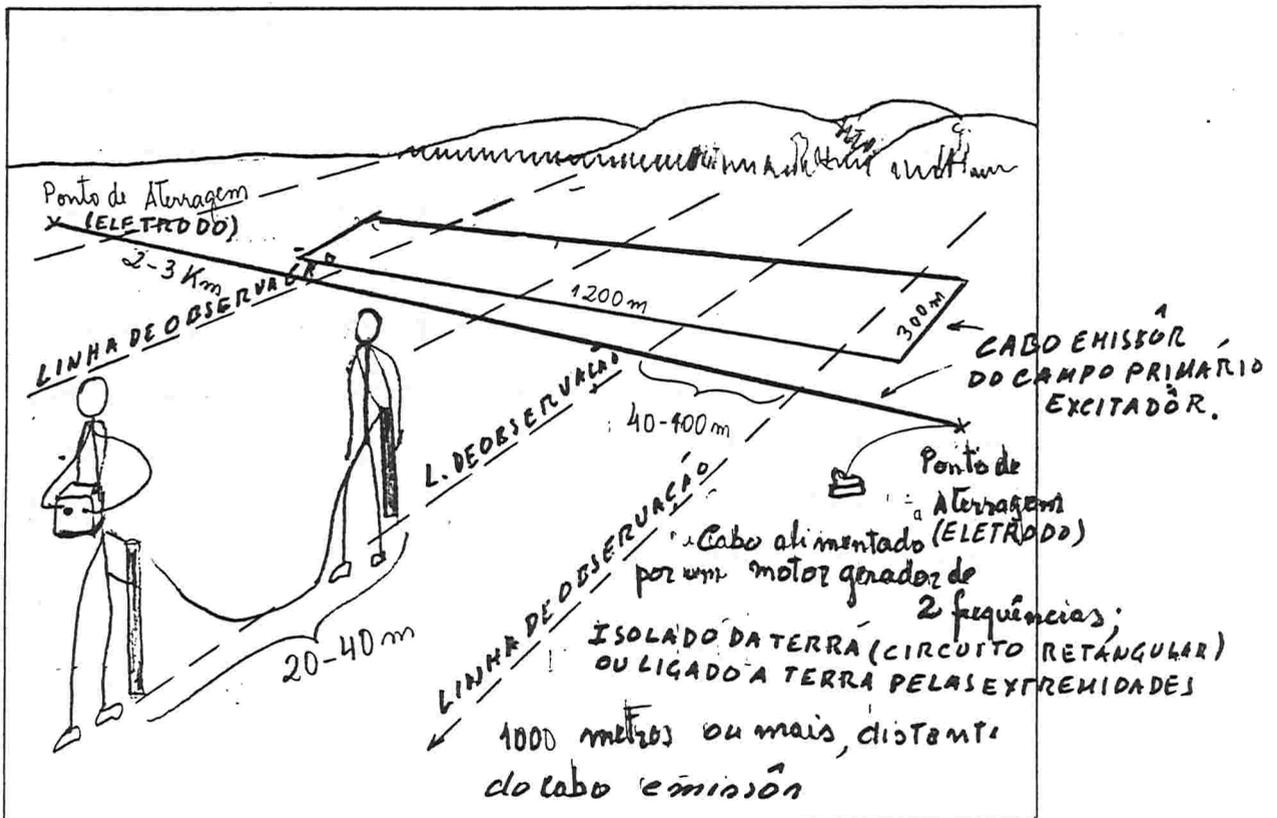
O campo primário é produzido por uma corrente alternada num circuito constituído por um cabo isolado estendido sobre o terreno, alimentado por um gerador semi-portátil de cerca de 500 Watts de potência.

Normalmente o cabo é estendido ao longo de um retangulo de 1200 m x 300 m .

Comporta uma variante, no qual o cabo é retilíneo conectado com

o terreno, por intermédio de eletrodos nas suas extremidades, distantes 2 à 3 Km. Opera com uma, duas ou mais frequências de 100 Hz à 3000 Hz, com variações segundo os modelos comercializados.

Nos equipamentos mais comuns, duas bobinas receptoras (bobinas exploratórias), são interligadas com um compensador, e conduzidas por dois operadores, que se deslocam ao longo de perfis normais à maior dimensão do cabo emissor, distantes entre si de 40 à 100 metros, e mantendo distância constante entre as bobinas (distâncias da ordem de 20 m ou 40 m).



Layout da operação com equipamento TURAN - FIG. REPRODUZIDA DE CAT. ABEN

O "Layout" de operação é disposto de modo que os perfis de pesquisa sejam perpendiculares a uma linha base, a qual é estabelecida paralelamente a direção predominante das estruturas controladoras da mineralização.

As bobinas de pesquisa (ou exploratórias) usualmente são mantidas na posição horizontal, de modo à comparar as componentes verticais do campo E-M, entre os pontos onde estão situados os operadores.

Considera-se o ponto estação ( isto é, o ponto ao qual se refere a medida) o meio da distância entre as bobinas ( entre os operadores).

Os parâmetros medidos são:

- 1º- Diferença de fase em graus, da componente vertical do campo E-M, nos dois pontos onde estão situadas as bobinas( onde estão os operadores) ;
- 2º- Relação por quociente ( dito "ratio") entre as amplitudes das componentes verticais do campo E-M, naqueles dois pontos;
- Correção de redução aos valores normais do campo.

As relações de amplitude entre os dois pontos, estarão afetadas por um fator geométrico, o qual depende das distâncias das bobinas receptoras ao cabo emissôr. Desse modo deve-se fazer correção de modo que as relações medidas, na ausência de campo causador de distúrbio iguale-se a 1. Relações ( "ratio") diferentes da unidade serão anomalias.

O cálculo dessa correção é feito de modo racional e relativamente simples, com emprego de tabelas, não cabendo aqui explicá-lo , podendo ser motivo de consulta em Parasnis 1966 ou em Orellana 1974.

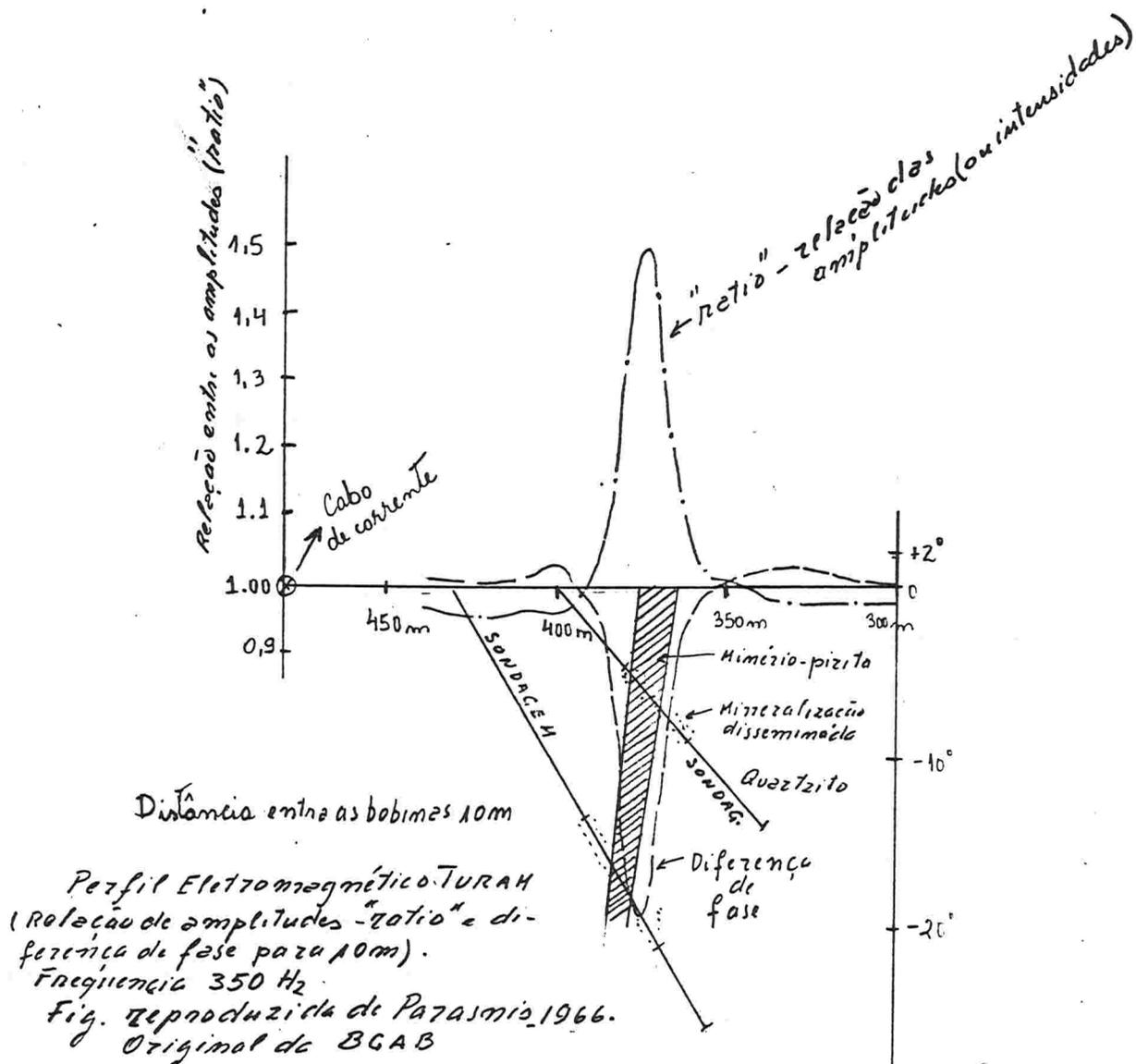
O método TURAM é adequado para detectár e localizar condutores relativamente pouco profundos, com forte mergulho.

Sobre um condutôr a anomalia é caracterizada por um máximo na relação de amplitudes, ("ratio"), ao mesmo tempo que a diferença de fases atinge o mínimo, como mostra a figura seguinte :

figura na  
(outra página )

Menór distância entre as bobinas exploratórias, favorece a precisão na localização do condutôr; a penetração em profundidade pôde ser incrementada aumentando-se essa distância.

Também a ligação das extremidades do cabo emissôr ao solo mediante eletrodos, pode favorecer a penetração em profundidade, porque os condutores em subsuperfície serão excitados também galvanicamen-



te (além de indutivamente). Nesse caso, na passagem de corrente pela terra, ela tende a concentrar-se preferencialmente nos corpos bons condutores, em lugar de distribuir-se uniformemente no terreno.

Esse fato favorece a sensibilidade, e conseqüentemente à uma maior penetração em profundidade do método, porque os sinais obtidos serão mais fortes. De outro lado distorções são produzidas, de modo à prejudicar ou dificultar a interpretação dos resultados.

O método TURAM penetra mais fundo que os métodos de bobina horizontal de fonte móvel (HLEM), mas as informações obtidas não se prestam para interpretação de mergulhos e espessuras.

Outra restrição decorre da necessidade de compensar *distorções*, devido à grandes distâncias entre o cabo emissor e as bobinas receptoras, o que nem sempre é possível de modo perfeito. Também não é adequado para terreno acidentado.

- Método Turair - ( da Scintrex-Canadá)



Figura reproduzida de  
ESM7. Agosto, 1982

É uma variante do método TURAM, no qual as bobinas receptoras (bobinas exploratórias) são aerotransportadas, suspensas num "bird" de um helicóptero.

Suas medidas e interpretação são idênticas ao do TURAM, com diferença no que diz respeito a correção da redução aos valores normais do campo. Sendo as medidas contínuas, essa correção é feita suavizando graficamente as curvas de contorno das medidas na área levantada. Assim é eliminado o gradiente regional, devido o aumento das distâncias das medidas, ao cabo emissor.

4-6-6-2 Métodos E-M convencionais de fonte móvel.

São agrupados nesse item :

- a) Métodos de medida da inclinação do campo ( de medida do "tilt" ) , com equipamentos Sharpe da E.J. Sharpe Instruments Ltd - Canada ~~da~~ Shootback method ( ou também referido por Shootback meth).

SHOOTBACK

Esses métodos já foram abordados no item 4-6-3-1 Inclinação do campo  $\vec{H}_R$  e método respectivo, ou método de medida do "tilt".

Comportam variante com fonte fixa, vista também no item

4-6-3-1 .

- b) Método Sligram e variantes ( método Beam-Sligram e outros)

- Método Sligram ( E.M. Gun)

Concebido no fim da década de 1930 pelo serviço geológico da Suécia, designado originalmente por Sligram, atualmente referido na literatura por método de fonte-receptor móvel , método de bobinas horizontais, método HLEM ( sigla de horizontal-loop EM ).

Atualmente fabricado pela ABEN-Suécia, E.J. Sharpe Canadá, Scintrex-Canadá e outras.

O equipamento Sligram, de procedência da ABEM-Suécia, denominado EM-GUN é muito difundido no Brasil, motivo pelo qual é também conhecido por esse nome.

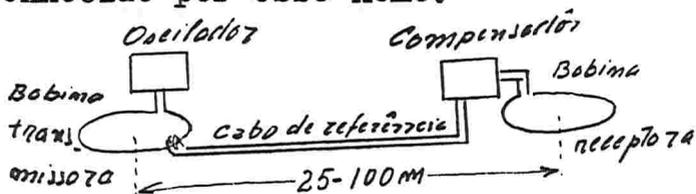
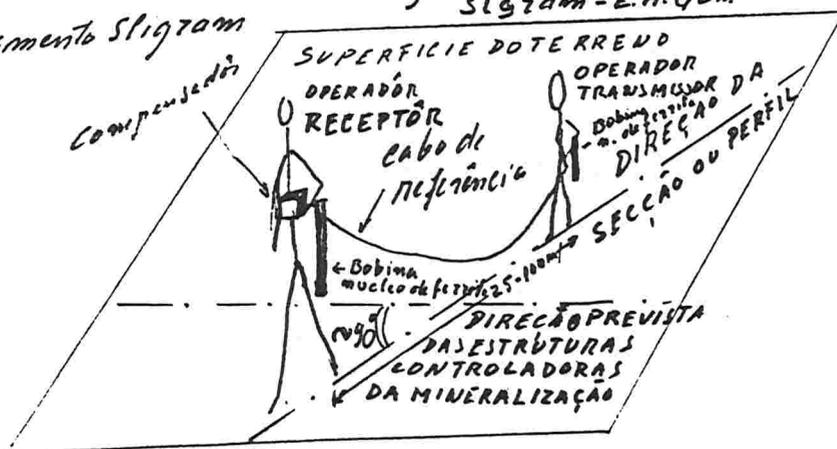


Diagrama do equipamento Sligram

LAYOUT DA OPERAÇÃO COM O MÉTODO SLIGRAM - E.M. GUN



F22

Como mostra a figura, <sup>← do circuito do equipamento,</sup> a bobina transmissora ( fonte), é alimentada por uma corrente alternada vinda de um oscilador de 1 a 2 W .

Os equipamentos EM-GUN , operam opcionalmente em duas frequências (de 880 Hz e 3520 Hz.)

Uma voltagem fixa de referência tirada da bobina transmissora, alimenta um compensador.

A voltagem gerada na bobina receptora, por efeito do campo E-M resultante, é decomposta em duas componentes defasadas de  $90^\circ$ . Uma das componentes é em fase com a voltagem de referência no compensador. As intensidades das duas componentes são determinadas no compensador , comparando-as com a voltagem de referência captada da bobina emissora.

Tendo sido selecionada a distancia transmissôr-receptôr a ser utilizada na operação, o sistema é colocado num local do terreno, onde não haja distúrbio do campo primário, e Nessas condições, o equipamento é ajustado de modo a dar um sinal zero na bobina receptora.

Nessas condições o aparelho fica ajustado, de modo a compensar o efeito do campo primário na bobina receptora. Mantendo-se o mesmo ajustamento, qualquer medida nas mesmas condições em outro local, que der uma leitura diferente de zero, estará medindo parâmetros relacionados a um campo secundário, que tenha perturbado o campo primário.

As bobinas sendo mantidas na posição horizontal, a componente espacial do campo secundário medido, será a sua componente vertical. Também o campo primário compensado (neutralizado) no ajuste, foi sua componente vertical.

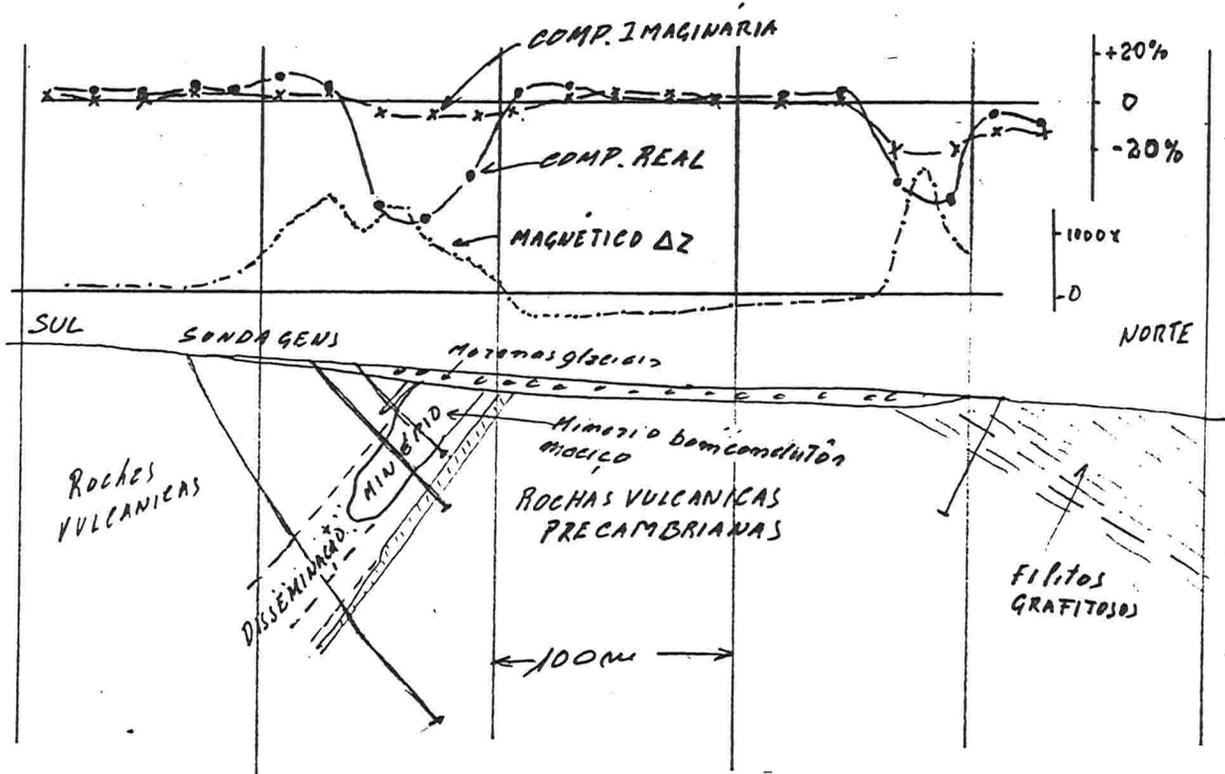
Tendo sido a voltagem recebida da bobina transmissora decomposta em duas componentes defasadas de  $90^\circ$  ( ou  $1/4$  de período); estando uma delas em fase com a referência da bobina receptora( isto é com o campo primário); e ainda, tendo sido neutralizado o efeito do campo primário(mediante ajuste); os parâmetros medidos por comparação são :

- 1°- Componente real, da componente vertical do campo secundário causadôr do distúrbio.
- 2°- Componente imaginária da componente vertical do mesmo campo secundário.

Na maioria dos equipamentos, nas medidas no terreno, as intensidades das componentes real e imaginária, são avaliadas em percentagem em relação as intensidades do campo primário.

Na operação, cada um dos dois operadores conduz uma bobina, estendendo-se entre ambos o cabo que conduz a voltagem de referência. Em cada medida os operadores mantem-se a distâncias fixas de 25 à 100 m , e deslocam-se no terreno ao longo de perfis, fazendo medidas equidistantes.

Os pontos estação ( onde considera-se referir as medidas), são sempre o meio da distância entre os dois operadores ( ou seja a meia distância entre as bobinas). Os perfis são executados perpendicularmente às direções predominantes das estruturas controladoras da mineralização.



Perfil 5197007 - Bobinas coplanares horizontais e distância de 60m. Frequência 3600 Hz

Fig. reproduzida de Parassio 1966 - Original da BGAB Suécia

A figura apresenta um exemplo típico de anomalias sobre um corpo condutor tabular.

Afastando-se do condutor, as componentes reais e imaginárias tendem para zero.

Aproximando-se do condutor, ambas as componentes apresentam anomalias, primeiramente aumentando para valores acima de zero; atingindo valores máximos; e após decrescem. Quando o sistema abrange o condutor, as componentes tornam-se negativas, com mínimos diretamente sobre o condutor.

A assimetria das curvas, indica mergulho do corpo de minério. A relação (  $p$ / quociente) entre os valores mínimos da anomalia da componente real e da componente imaginária sendo grande indica, que o corpo é um bom condutor (indicações com as restrições apontadas no item 4.5.3.2)

Observe-se no lado norte do mesmo perfil, uma forte anomalia E-M por efeito de grafito.

Uma anomalia magnética de  $\Delta Z$ , sobre o corpo de minério, ilustra a prática usual de combinar-se aplicação dos métodos E-M com o método magnético.

#### - Variante Beam- Sligram

Nos equipamentos Sligram, a distância entre as bobinas na operação, é controlada pela distensão do cabo de referência ( que conecta as mesmas).

Como o campo magnético varia inversamente com o cubo da distância entre as bobinas, uma diferença de 1% nessa distância, produz erro de 3% na medida da componente real captada na bobina receptora.

Para melhor precisão a Boliden Mining Company da Suécia, desenvolveu uma variante do método, no qual a fonte e o receptor são montados solidariamente nas extremidades de uma barra cilíndrica oca de alumínio, à distância fixa de 8 metros. As bobinas são também horizontais coplanares.

Com esse dispositivo as componentes real e imaginárias, podem ser avaliadas em parte por milhão ( ppm) do campo primário, permitindo leitura confiável de 20 ppm.

#### - Outras variantes do método de fonte móvel

Três sistemas são utilizados:

- Bobinas verticais coplanares
- Bobinas horizontais coplanares- O método típico Sligram descrito, e referido na literatura também como HLEM .
- Bobinas verticais coaxiais

Desses o segundo ( HLEM), é o mais utilizado nos levantamentos no terreno. Sua técnica é a mais refinada e detalhada, comportando interpretação quantitativas com base em curvas padrão, calculadas a partir de modelos matemáticos.

Os equipamentos mais desenvolvidos atuais operam com cinco frequências, e a Scintrex do Canadá desenvolveu um equipamento que dispensa o cabo de referência ligando as duas bobinas.

Os dois outros sistemas de bobinas verticais coplanares e coaxiais, são de maior interesse para os levantamentos aéreos, os quais na maioria são variantes dos métodos de fonte móvel. Bobinas transmissoras verticais dão a vantagem de minimizar efeitos de condutores superficiais, menos interessantes em geral, acentuando os efeitos dos condutores mais profundos (mais interessantes). Esses sistemas, eventualmente são utilizados nos levantamentos no terreno, com essa finalidade.

- Quando as bobinas são coplanares verticais, as direções dos perfis no terreno devem ser paralelas às das estruturas condicionantes ( para que o campo primário seja transversal às mineralizações-condutores).

Nos levantamentos aéreos as bobinas são fixadas nas extremidades da asa do avião, com seus eixos na direção de vôo. Esta última direção deve ser perpendicular a direção das estruturas. *Por tanto as linhas de vôo devem ser transversais às direções das estruturas.*

- Quando as bobinas são coaxiais, as direções dos perfis devem ser transversais às estruturas.

Nos levantamentos aéreos, as bobinas são instaladas coaxialmente nas extremidades de um cilindro oco de alumínio, distanciadas de 6 metros. O conjunto é suspenso horizontalmente, abaixo da aeronave, com o eixo na direção de vôo; sendo essa, transversal às estruturas. Anomalias com sistema coaxial são mais complicadas e difíceis de interpretar.

- Alcances úteis em profundidade para métodos E-M de fonte móvel

Para equipamentos com leitura das componentes reais e imaginárias em percentagem do campo primário, <sup>(com bobinas complementares horizontais)</sup> alguns autores admitem:

- a) para detectar corpos tabulares subverticais, o limitado alcance útil, é da ordem de metade à  $2/3$  da distância entre as duas bobinas ;
- b) para detectar condutores horizontais, o limite <sup>é</sup> da ordem de 2 vezes a distância entre as bobinas.

- Uso de frequências múltiplas

Nas condições normais, de provável existência de condutores fracos superficiais, produzindo "ruídos"; e bons condutores no bedrock, constituídos pelos corpos de minério interessantes :

- A relação  $\frac{Re}{Im}$ , das componentes, real e imaginária do campo secundário, sempre cresce com a frequência emitida.
- A relação  $Re/Im$  das componentes do campo resultante, cresce com a frequência, quando não ocorre um condutor forte mais profundo, e pelo contrário, decresce com a frequência, quando existe um bom condutor no bedrock .

Para calcular essas relações, lembramos que as componentes imaginárias  $Im$ , dos campos resultante e secundário são as mesmas. Seu valor é fornecido diretamente pela leitura. <sup>Ocorre com</sup> a componente  $Re$  do campo secundário. A componente  $Re$  do campo resultante, é obtida, <sup>subtraindo</sup> a  $Re$  do campo secundário lida, do valor do campo primário emitido <sup>Essa</sup> (considerado ser 100% nos equipamentos Sligram). Essa técnica de operação e interpretação muitas vezes, permite dirimir indefinições. <sup>Isso é</sup> no caso de um condutor (relativamente fraco) superficial desinteressante, poder ser confundido com um bom condutor interessante existindo no bedrock.

- Uso de múltipla separação entre as bobinas transmissora e receptora

Em casos como o da existência de um condutor relativamente bom, porém desinteressante e superficial, constituído por folhelhos por exemplo; e no bed-rock um, relativamente pobre, condutor interessante, como por exemplo em corpo mineralizado com galena. A dúvida poderia ser dirimida mediante medidas com diferentes separação das bobinas.

- Efeito do relevo e correção topográfica

Nas condições de relevo acentuado, o sistema de bobinas horizontais coplanares, ficará prejudicado porque as bobinas estarão em diferentes planos.

Isso pode ser corrigido na operação, mantendo as bobinas relativamente elevadas ou abaixadas durante a medida, de modo a compensar o desnível do terreno.

Se  $h$  é o desnível entre as bobinas, e  $r$  a distância entre as mesmas, o erro ( dado em percentagem) devido a elevação, é de

$( - 300 \times \frac{h^2}{r^2} ) \%$  na componente real. <sup>Assim</sup> Poderá ser também corrigido

mediante cálculo ( onerando entretanto o custo do levantamento).

Com bobinas verticais coaxiais, o erro seria reduzido para metade; e com bobinas verticais coplanares, não haveria erro.

Observe-se que, em nenhum caso, o efeito do relevo afeta a componente imaginária. Essa representa somente um fenômeno relacionado a diferença de tempos, entre o campo resultante e o campo primário, não sendo afetada por irregularidades, nas intensidades deste último.

### 4-6-6.3 Métodos E-M aerotransportados

#### 4-6-6-3.1 Generalidades

Embora com muito mais sofisticação, no essencial, os princípios físicos dos levantamentos aéreos, são os mesmos dos levantamentos no terreno.

Da mesma forma como o que acontece com respeito a estes últimos, a principal ajuda que os levantamentos aéreos E-M prestam a prospecção sistematizada, é no sentido da eleição de áreas promissoras nas primeiras fases ainda de reconhecimento. <sup>Sezuidb</sup> ~~consequentemente~~, para eliminação de áreas consideradas estéreis ou desinteressantes.

Porém os levantamentos aéreos tem a vantagem de permitir cobrir grandes áreas em curto espaço de tempo, e com custos unitários comparativamente muito menores (principalmente quando trata-se de regiões ínvias).

Além disso, grande acervo de <sup>INFORMAÇÕES</sup> informações regionais estruturais, resultam desses levantamentos, as quais são de valor inestimável para a prospecção. Também os levantamentos aéreos E-M são adequados, sem ônus sensível, para levantamento simultâneo aero-magnético, ampliando o acervo de informações, e conseqüente aumento dos recursos de interpretação.

Por outro lado os levantamentos aéreos tem limitações. Não prescindem de complementação com trabalhos de prospecção geoquímica, geofísica e de geologia de detalhe no terreno, constituindo subseqüentes fase, conhecidas como "de prosseguimento" (de "follow up"). De modo nenhum, se deverá passar diretamente dos resultados de um levantamento aéreo, para trabalhos com métodos diretos de prospecção (como sejam sondagens, trincheiras, etc), sem aqueles trabalhos "de prosseguimento", <sup>esses</sup> ~~esses~~ <sup>de</sup> preliminarmente executados, nos alvos selecionados pelo levantamento aéreo.

metodos A penetração dos levantamentos aéreos E-M, é menor que as dos E-M no terreno ( de modo geral considera-se penetrações efetivas da ordem de 50 m , com excessão do sistema INPUT, com penetração maior até 150 m ). Nesse particular os métodos aero-magnéticos são favorecidos, pela sua penetração praticamente ilimitada.

A resolução, dependerá da velocidade e da altura de vôo; de condições locais ( de natureza geológica ou não); De modo geral, é menor que os dos levantamentos no terreno, (para os métodos E-M.)

A resolução dos métodos E-M é muito melhor do que as dos levantamentos magnéticos.

Para uma primeira noção, com respeito as condições de penetração e resolução dos levantamentos E-M aéreos, considere-se os seguintes fatores :

- Primeiramente, não é possível medir isoladamente sobre um determinado ponto, constituindo-se as medidas, de registros contínuos, de respostas instantâneas com relação aos sinais emitidos, ao longo de uma linha de vôo. Desse modo há à considerar um novo parâmetro, qual seja a constante tempo. Constante tempo, significa o intervalo de tempo cuja integração dos efeitos, a resposta registrada representa. Assim esse parâmetro, juntamente com a velocidade e a altura de vôo, é o primeiro condicionante da resolução.

Em segundo lugar há necessidade de que os equipamentos tenham grande sensibilidade e seletividade. O sinal do campo primário, atenua-se aproximadamente, na razão inversa do cubo da distância à partir da bobina emissora. Além da diminuição da intensidade do campo primário ao atingir o condutor em subsuperfície, há a considerar adicionalmente, as atenuações do campo secundário, no trajeto do condutor até a bobina receptora. Esses efeitos somados, fazem com que a grandeza do sinal recebido ( na bobina receptora), seja de ordem de grandeza, inversamente às potências 3 à 6 da distâncias vertical, entre o condutor em subsuperfície, e o sistema emissor-receptor suspenso no ar (acima do terreno).

Pequenas variações na altura de vôo, ou de separação bobina emissora-receptora, produzirão variações no sinal recebido, que podem

ser confundidas com anomalias interessantes. Por isso, os equipamentos são providos com precisos e sensíveis sistemas automatizados de compensação, ou correção.

Os principais fatores que governam a penetração desses métodos são :

- Distância entre as bobinas transmissora e receptora, assim como suas configurações espaciais. Da mesma forma como nos métodos E-M em geral.
- Frequências utilizadas, dentro de intervalos críticos de frequências, de modo a que os sinais produzidos, sejam sensíveis
- Constantes tempo do sistema.
- Velocidade e altura de vôo.
- Sensibilidade para registrar o sinal recebido, e para distinguir dos sinais de background denominados ruídos. Isto é, de sensibilidade acima do background de ruído.
- Condutância e geometria do alvo, principalmente condutividade versus espessura do condutor; Condutância e geometria das rochas encaixantes, e da cobertura superficial ( do manto de intemperismo)

Quanto à resolução, a menor separação transmissor-receptor, e a menor velocidade de vôo, favorece a capacidade de detectar variações locais. Dessa forma condicionam outro parâmetro crítico, qual seja, o menor condutor que poderá ser detectado.

A menor altura de vôo, favorece também a resolução, por favorecer a diferenciação de efeitos devidos a causas superficiais, de causas mais profundas.

## 4-6-6-3.2 Sistemas E-M aerotransportados.

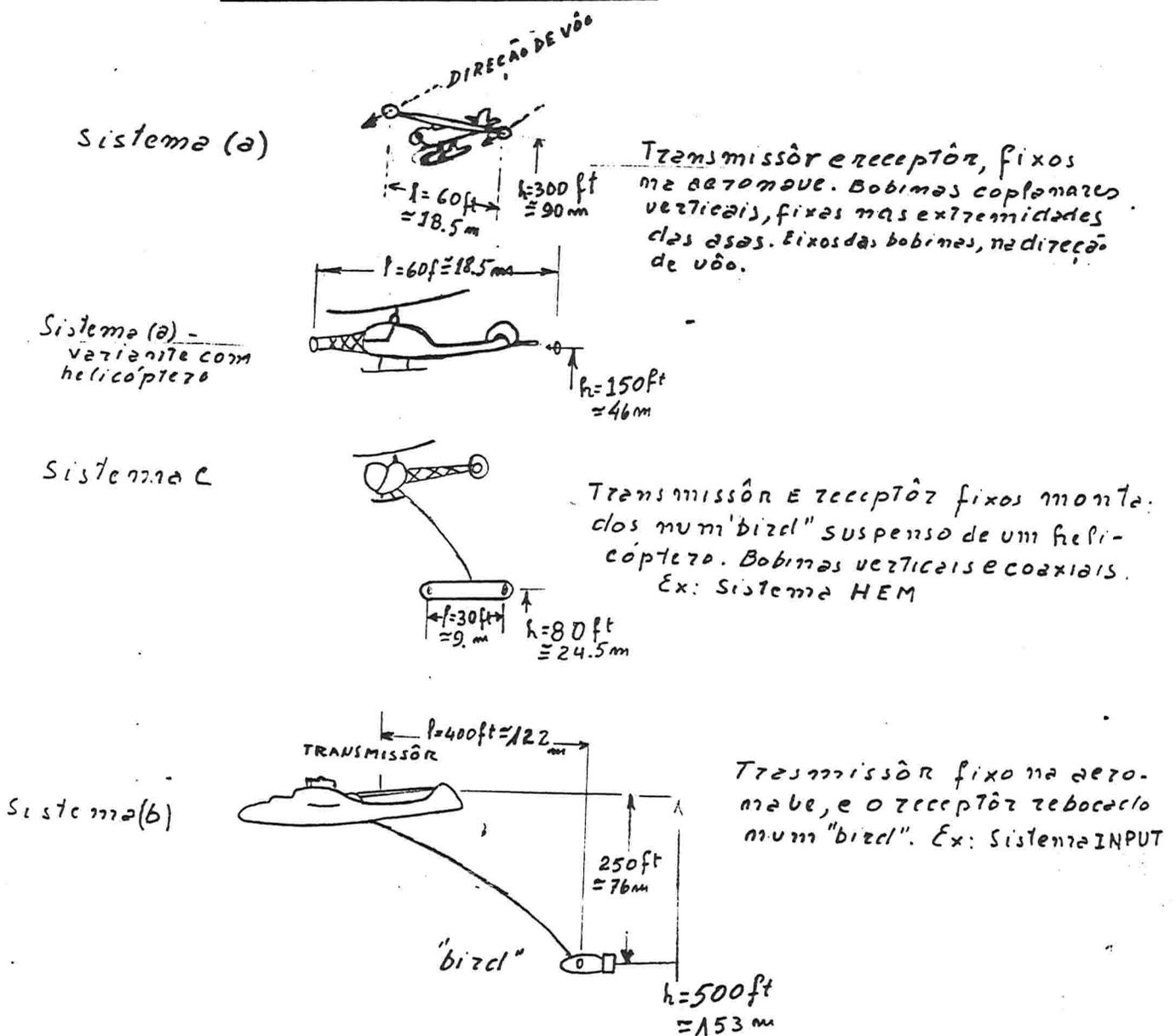


Fig. Reproduzida com modificações, de E. S. M., agosto 1982

 $h$  - altura de voo $l$  - espaçamento Transmissor - receptor.

a) Sistemas com o transmissor e receptor fixos na aeronave.

O sistema com as bobinas fixas nas extremidades da asa de um avião, são os preferíveis para levantamentos em regiões planas e próximas de aeroporto, e para os trabalhos de reconhecimento em grande escala. Os custos dos levantamentos com esse sistema é cer-

ca de 60% do custo com levantamento HEM, para cada quilometro de linha de vôo. Separação das linhas de vôo de 400 m à 800 m ou pouco mais.

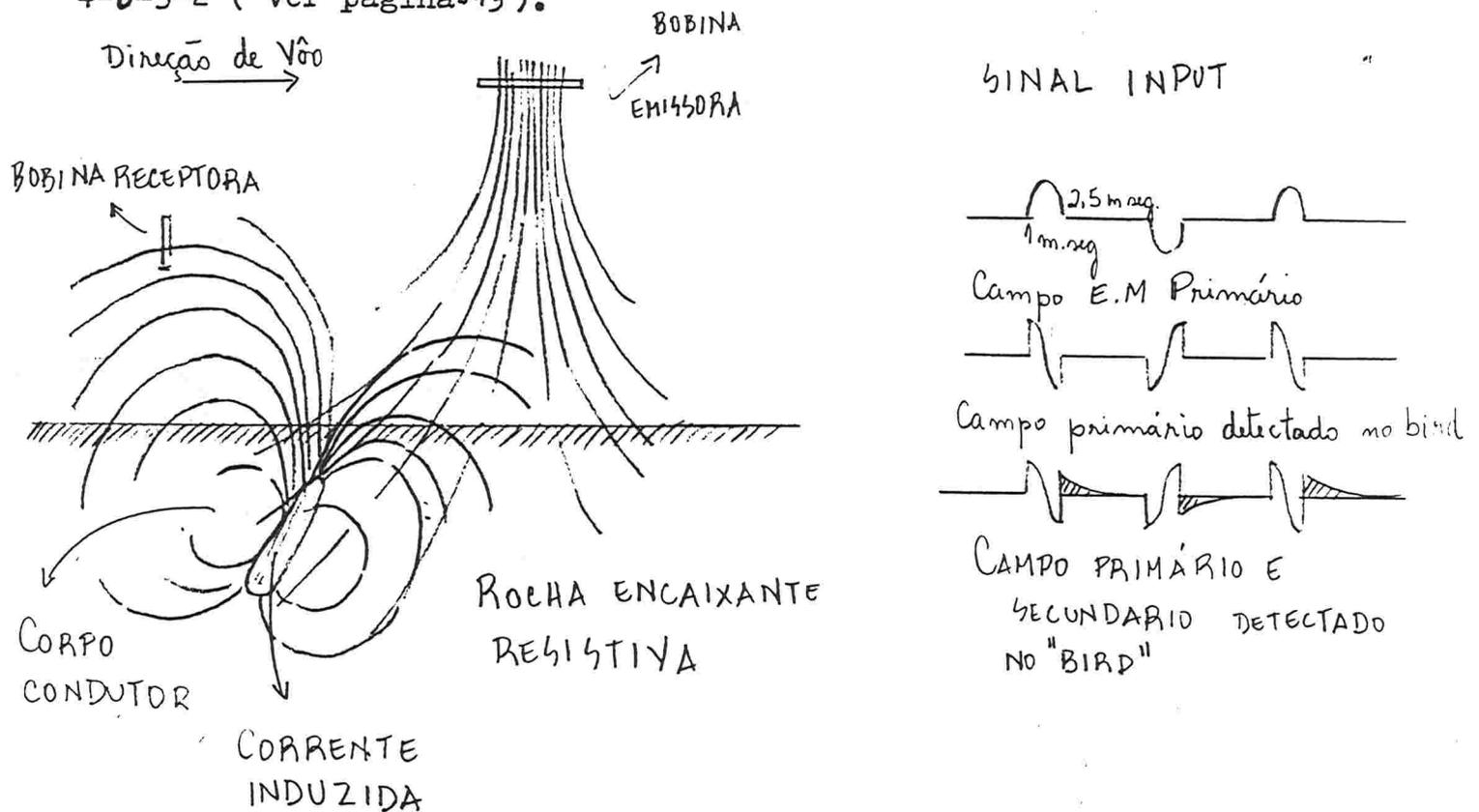
O princípio físico é de um sistema de fonte e receptor móveis (equidistantes), com medidas do campo secundário em ppm do campo primário.

b) Sistema com transmissor fixo na aeronave, e o receptor rebocado atrás e pouco abaixo.

Esse sistema permite que seja utilizada uma distância transmissor-receptor considerada adequada às condições da região levantada, e pela comparativamente maior, separação transmissor-receptor, é favorecida à penetração.

Porém tem a desvantagem de não ser adequado para medidas relativas da componente em fase com o campo primário, porque a turbulência do ar, provoca inclinações e desvios na direção do sistema receptor rebocado (o bird).

O tipo mais representativo desse sistema é o sistema Barringer INPUT (de "induced pulse transient"), da Geotrex Ltd-Canadá, o qual aplica o princípio da medida no domínio do tempo, como foi visto no item 4-6-3-2 (ver página 243).



O sistema favorece a sensibilidade, pelo fato de medir o campo secundário na ausência do campo primário, e por todos os motivos, tem maior alcance em profundidade.

Essa, segundo os fabricantes do equipamento, em condições ideais poderia atingir 300 m .

Presentemente é o mais utilizado sistema aerotransportado, embora seu custo por quilometro de linha levantada, seja o maior ( da ordem de 5 à 7% superior ao custo com equipamento HEM).

c) Sistema com transmissor e receptor solidários e rigidamente instalados, comportando variantes:

- 1º - Conjunto transmissor-receptor fixos montados em um "bird", o qual é suspenso de um helicóptero;
- 2º - Conjunto transmissor-receptor fixos e montados na asa, ou na fuselagem de um avião;

Quanto ao primeiro, o sistema mais representativo e utilizado presentemente, é o equipamento da Geoterrex Ltda- Canadá, denominado sistema HEM ( de helicóptero eletro-magnetic method).

É o sistema preferível para regiões ínvias e regiões montanhosas. Devido à menor altitude e velocidade de vôo, possibilitadas pelo uso de helicóptero, é o método E-M aerotransportado que fornece a melhor resolução espacial. Sua penetração é menor que a do sistema INPUT. Conforme especificação do fabricante e fornecedor de serviços, em condições ideais atingiria 150 m.

Seus custos por quilometro de linha levantada, sendo considerado ser 40% superior ao custo do sistema com transmissor e receptor fixo na asa de um avião, e cerca de 7% inferior ao do sistema INPUT. Era estimado em 1982 U\$ 44,00 à 75,00 por quilometro de linha levantada. Levantamentos com espaçamentos das linhas de vôo de 125m à 250 m.

O princípio de suas medidas são os dos métodos E-M de fonte e receptor móveis (equidistantes). Com medidas das componentes real e imaginária do campo secundário, avaliadas em ppm em relação ao campo primário.

Por ser um método muito utilizado atualmente e bem representativo dos métodos E-M aerotransportados, será abordado com mais detalhe no item 4-6-6-3.3 .

d) Sistema com a fonte excitadora fixa em terra, e as bobinas receptoras solidárias e montadas num "bird" suspenso de um helicóptero.

Esse sistema é conhecido como TURAIR da Scintrex-Canadá significando TURAN do ar. É uma variante do método TURAN, no qual as bobinas receptoras em vez de serem conduzidas por dois operadores no terreno, são aerotransportadas por intermédio de um helicóptero, rigidamente solidárias e separadas por 10 pés (  $\sim 3,0$  m ). Esse sistema foi visto no item 4-6-6-1, juntamente com o método TURAN ( ver pág. 251 ).

O cabo energizado que constitui a fonte do campo primário, é estendido ao longo de um grande retângulo no terreno, com cerca de 3 Km x 6,5 Km , sendo alimentado por um gerador de 15 KW. Os parâmetros medidos, são os mesmos do método TURAN. A velocidade de vôo ( do Helicóptero ) é de 50 Km/h.

Esse sistema é raramente utilizado, e somente para situações muito especiais. Foi idealizado com objetivo de aumentar a penetração dos métodos E-M, podendo atingir em condições ideais 250 m. Porém seu alcance nominal efetivo é restrito a 150 m. O custo por quilometro de linha levantada é 30% a 50% superior ao custo com método HEM.

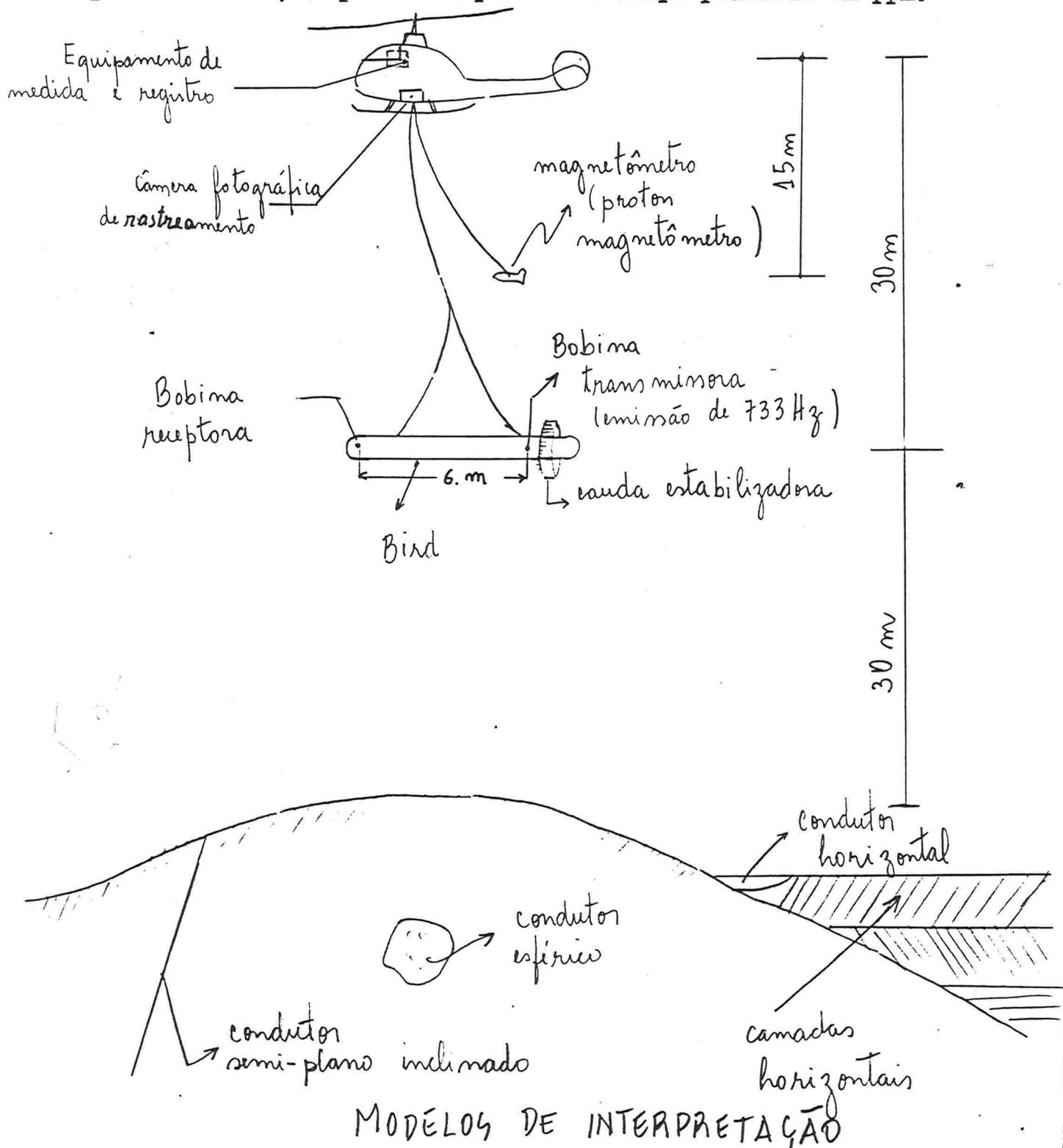
e) Outros sistemas E-M aerotransportados

Atualmente são disponíveis no mercado, sistemas aplicando métodos VLF e AFMAG, em versões diversificadas de receptor fixado ou rebocado da aeronave ( Ref. E & M.J. agosto 1982 ).

4-6-6-3.3 Método HEM ou método E-M de fonte móvel aerotransportado em helicóptero.

Esse sistema, referido no ítem anteriôr ~~em~~ c, será abordado a seguir com mais detalhe por ser um dos sistemas mais utilizado e representativo dos métodos E-M aerotransportados (ver pág. ).

Essencialmente é um método E-M de fonte e receptor móveis e solidários, sendo as bobinas coaxiais. Mede através do campo resultante recebido na bobina receptora, as componentes real e imaginária do campo secundário, o qual é comparado ao campo primário em ppm.



Além do equipamento E-M, o sistema inclui um magnetômetro de campo total (proton magnetometro). O levantamento magnetométrico feito simultaneamente, auxilia na interpretação das anomalias E-M, indicando se elas estão ou não associadas às formações ferríferas, e também fornece outras informações de interesse para prospecção geofísica.

- Registro dos dados.

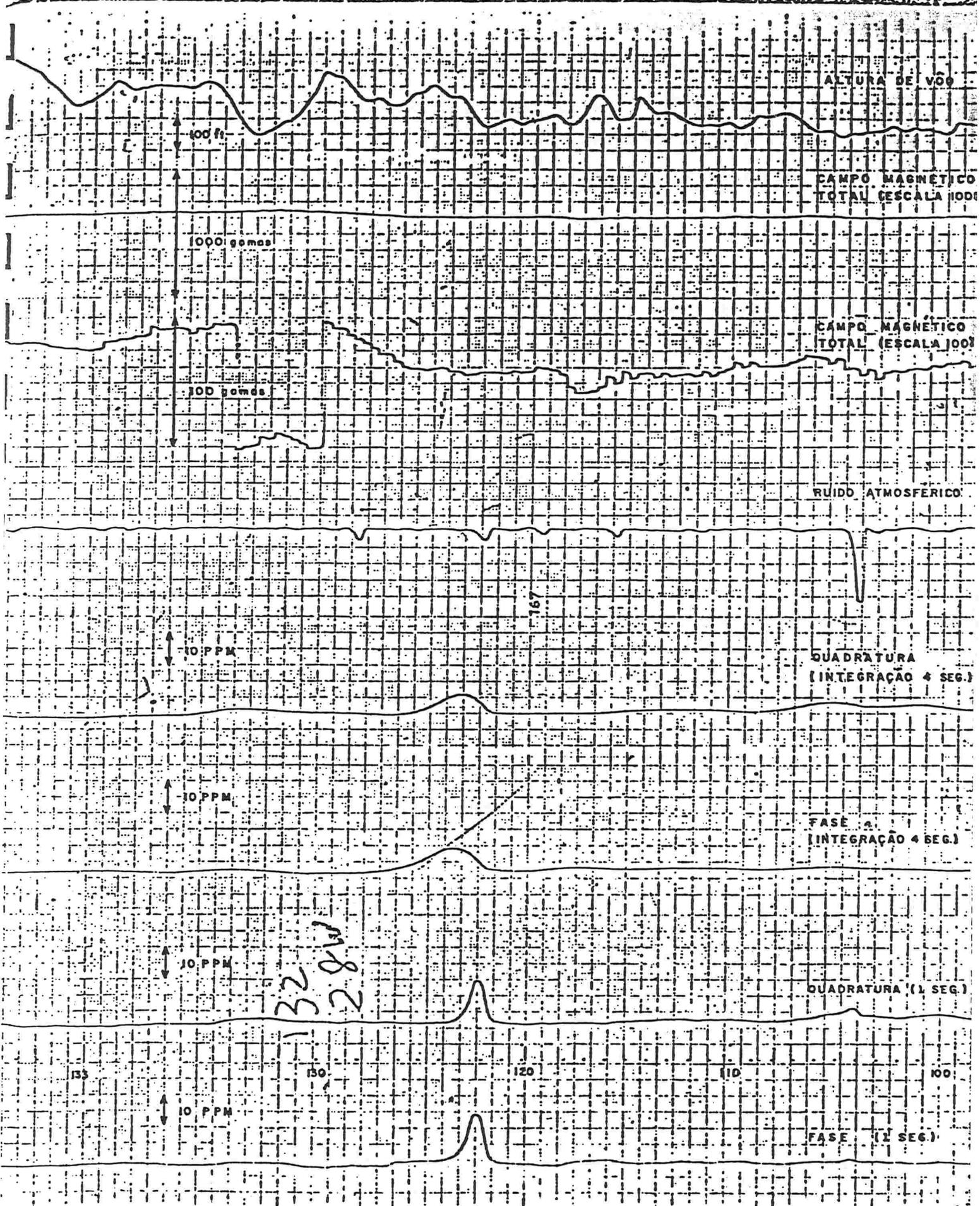
Os dados levantados são registrados em 8 canais analógicos. Além desses existem mais 3 canais para marcas fiduciais.

O percurso do helicóptero (e do sensô) sobre o terreno, é localizado por intermédio de uma câmera de rastreamento, a qual imprime em cada foto, um número idêntico a marca fiducial do registrador analógico.

Para exemplo, anexamos uma cópia de registro típico HEM, detectando uma anomalia devido a um dique condutivo ou filão vertical.

Esses registros, relacionados de baixo para cima, são :

- Canal 1 - Campo secundário E-M em fase com o campo primário, de resposta rápida ( com a constante tempo de 1 segundo)  
Entre canais 1 e 2, marcas fiduciais de posição.
- Canal 2 - Campo secundário EM em quadratura, ou seja a componente imaginária de resposta rápida.
- Canal 3 e Canal 4 - Campo secundário EM idem, respectivamente, dos canais 1 e 2, porém de resposta lenta ( com constantes tempos de 4 segundos).
- Canal 5 - Monitô de "ruído" atmosférico
- Canal 6 e Canal 7 - Campo magnético total, registrado respectivamente, nas escalas de 100 gamas e 1000 gamas por graduação do registro.
- Canal 8 - Altura de vôo; medida com radio-altímetro



REGISTRO HEM  
ANOMALIA DE DIQUE VERTICAL

420

As respostas lentas ( de constante tempo 4 segundos), destinam-se à filtrar anomalias superficiais, que poderiam mascarar anomalias devido a corpos interessantes mais profundos.

O monitor de "ruído" atmosférico permite eliminar pseudo-anomalias devidas tempestades elétricas na atmosfera.

Entre os canais 7 e 8 existem marcas fiduciais de 50 Hz , para indicar se a anomalia é relacionada ou não, com linhas elétricas de alta tensão.

Da mesma forma, como nos métodos EM de fonte móvel terrestres, é possível interpretar-se anomalias com sistema HEM , quantitativamente, utilizando modelos matemáticos.

#### 4.6.7 - Métodos E-M de radio-frequências - Método VLF

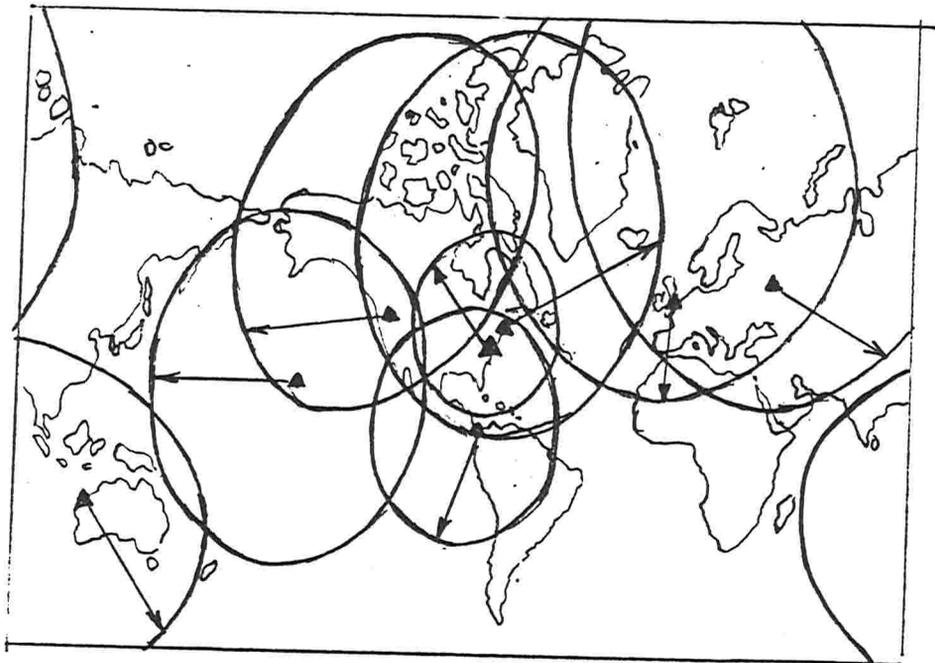
##### 4.6.7-1 Generalidades

Nessa classificação estão compreendidos os métodos que utilizam ondas hertzianas como campo primário, sendo representativa a versão denominada método VLF ( de "Very Low Frequency") da Geonics Ltda. do Canadá.

No método VLF o campo primário utilizado é produzido por emisoras de grande potência que emitem sinais em código Morse, com frequências muito baixas, para fins militares de comunicação com submarinos.

As frequências emitidas por essas estações estão compreendidas entre  $15 \times 10^3$  Hz e  $25 \times 10^3$  Hz.

No mundo existem várias emisoras desses sinais, cujas ondas podem ser utilizadas em prospecção mediante equipamentos receptores de VLF, fabricados para esse fim.



Situação de algumas emisoras de frequência VLF, e zonas de recepção das mesmas. Atualmente as zonas são mais amplas, graças à aumentos de potencia das emisoras, e à maiores sensibilidades dos receptores. Fig original de Geonics Ltda reproduzida de Ozellama Ltda

Observe-se que as radio-emissoras normais de broadcast emitem com frequências aproximadamente dez vezes maiores que as de VLF (isto é  $150 \times 10^3$  Hz e  $250 \times 10^3$  Hz), daí o nome de frequências muito baixas para as últimas.

De outro lado as frequências de VLF, são na realidade muito altas, quando comparadas com as frequências utilizadas nos métodos E-M ditos convencionais (100 à 5000 Hz).

Por esse motivo os métodos VLF tem penetrações muito pequenas, quando comparadas às dos métodos E-M convencionais (da ordem de 60 metros em condições favoráveis).

Por outro lado, os custos dos equipamentos e da operação são muito menores no caso do método VLF, aliando ainda, grande velocidade de operação (podem ser executadas cerca de 500 estações/dia com esse método). Isso porque, ao aproveitar-se um campo primário existente, o equipamento e a operação limita-se à recepção, com radio receptor transistorizado de construção relativamente simples.

A principal utilização do método VLF é para reconhecimento no terreno na prospecção para minérios metálicos sulfetados.

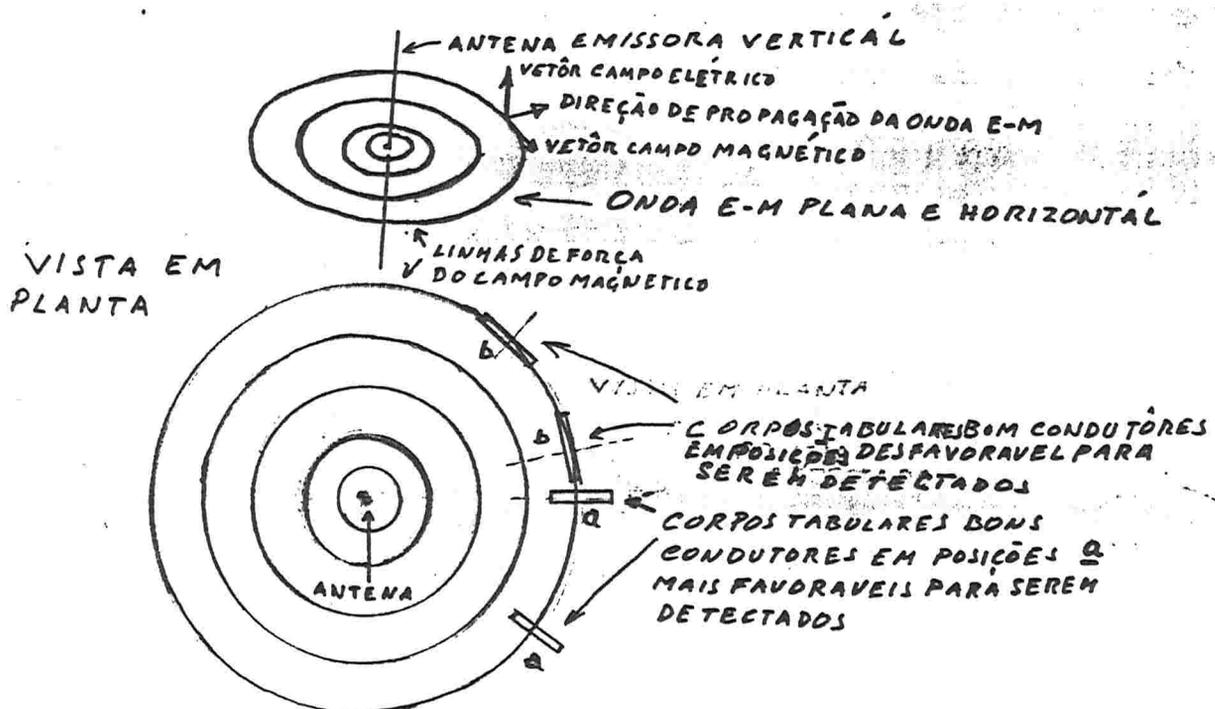
Também, é muito utilizado na operação de prosseguimento (follow up) no terreno, para identificar os alvos detectados nos levantamentos aéreos.

Modernamente existem equipamentos VLF para levantamentos aerotransportados.

As emissoras VLF possuem antenas verticais, de modo que as ondas eletro-magnéticas propagam-se horizontalmente a partir da antena, em círculos horizontais concêntricos à mesma.

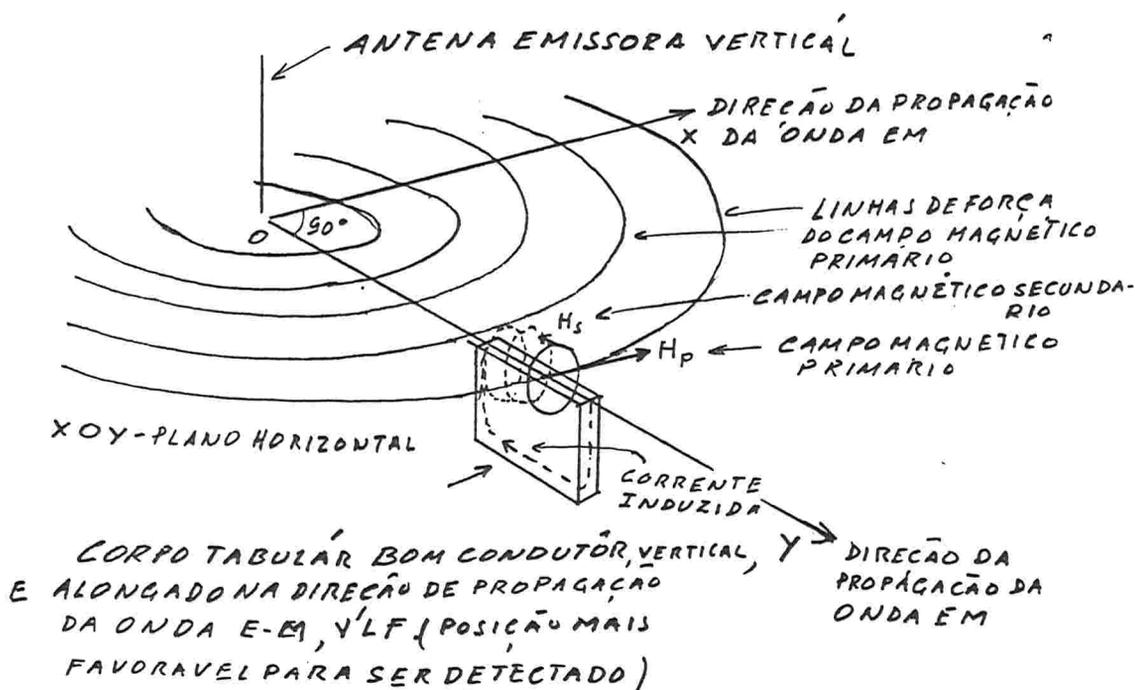
(Ver figura outra página)

Numa distância muito grande da estação, e numa área relativamente muito pequena onde a pesquisa é feita, as frentes de onda serão praticamente planas e verticais, sendo o campo primário



ANTENA EMISSORA VLF, E PROPAGAÇÃO DA ONDA E POSIÇÕES MAIS FAVORÁVEIS E DESFAVORÁVEIS DE CORPOS TABULARES BONS CONDUTORES PARA SEREM DETECTADOS

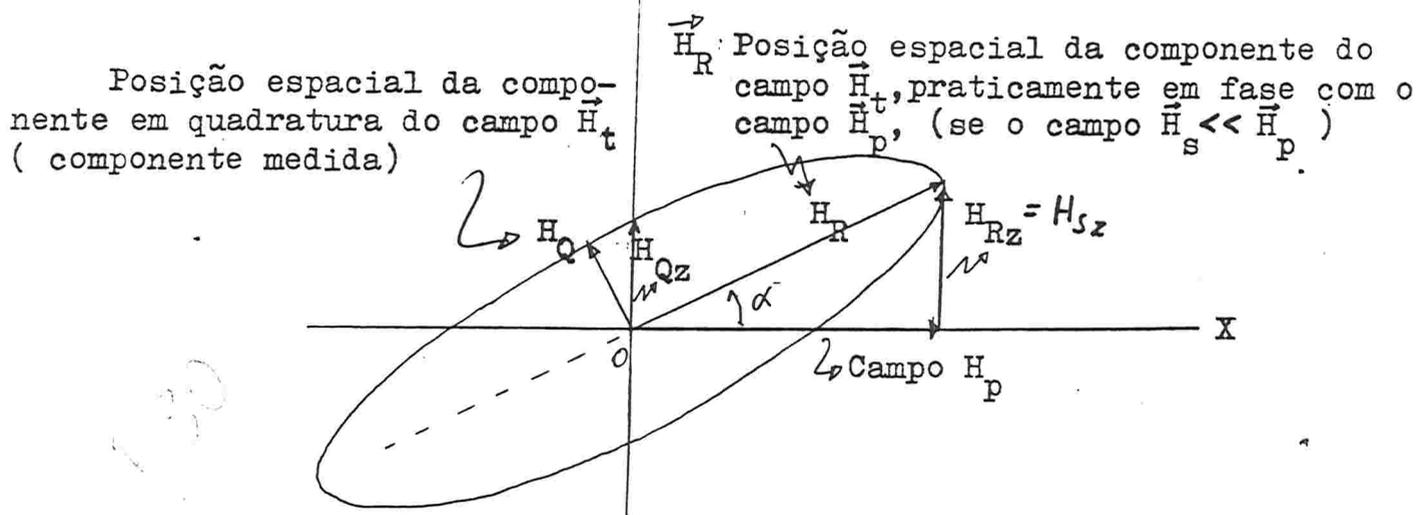
não perturbado, horizontal, perpendicular a direção de propagação da onda, e com fluxo uniforme.



A figura ( página anterior) mostra o efeito da indução sobre um condutor tabular plano ~~vertical~~, situado com sua direção coincidente com a direção de propagação da onda VLF. É evidente que para o caso dos condutores tabulares representados em plantas na figura anterior aqueles nas posições a; serão as de melhores condições para serem detectados, e aqueles nas posições b, as de piores condições.

#### 4-6-7.2 Parâmetros medidos no método VLF

Elipse de polarização do campo total  $\vec{H}_t = \vec{H}_p + \vec{H}_s$ , no plano Vertical que contém o vetor campo primário  $\vec{H}_p$  ( o mesmo plano em que opera o equipamento VLF)



$\vec{H}_{Rz}$  - componente espacial vertical da componente  $\vec{H}_t$ , em fase com o campo  $\vec{H}_p$  (componente medida através da medida da  $\tan \alpha$ ); sendo  $\alpha$  pequeno,  $\alpha \approx \tan \alpha$

$\vec{H}_{Qz}$  - Componente vertical do campo  $\vec{H}_t$  em quadratura com o campo  $\vec{H}_p$

$\vec{H}_Q \approx \vec{H}_{Qz}$ , para  $\alpha$  pequeno

Como será visto, mede-se com equipamento VLF numa estação:

a) O declive, ou a tangente da inclinação do eixo maior da elipse de polarização do campo total (resultante). Esse parâmetro angular equivale a intensidade da componente espacial vertical  $H_{Rz}$ , da componente  $H_R$  (que oscila segundo o diâmetro maior da elipse).

Por sua vez essa mesma componente será :

$\vec{H}_{Sz}$  = Componente vertical (espacial), da componente em fase com o campo primário, do campo secundário.

Isso porque:

- Sendo o campo primário horizontal, a componente vertical do campo total será igual a componente vertical do campo secundário; Também sendo o campo secundário  $\vec{H}_s$  pequeno em relação ao campo primário  $\vec{H}_p$ , a componente que oscila segundo o eixo maior da elipse de polarização de  $\vec{H}_t$ , está praticamente em fase com o campo primário  $\vec{H}_p$ .

b) O outro parâmetro medido é o campo  $\vec{H}_Q$  que oscila segundo o eixo menor da elipse de polarização de  $\vec{H}_t$  (que oscila segundo o eixo maior da elipse). A medida é feita mediante um potenciômetro, e é expressa em percentagem desta última componente  $\vec{H}_R$ .

- Como  $\alpha$  é pequeno,  $H_Q \cong H_{Qz}$ , estando portanto (temporalmente) em quadratura com o campo primário  $\vec{H}_p$ .

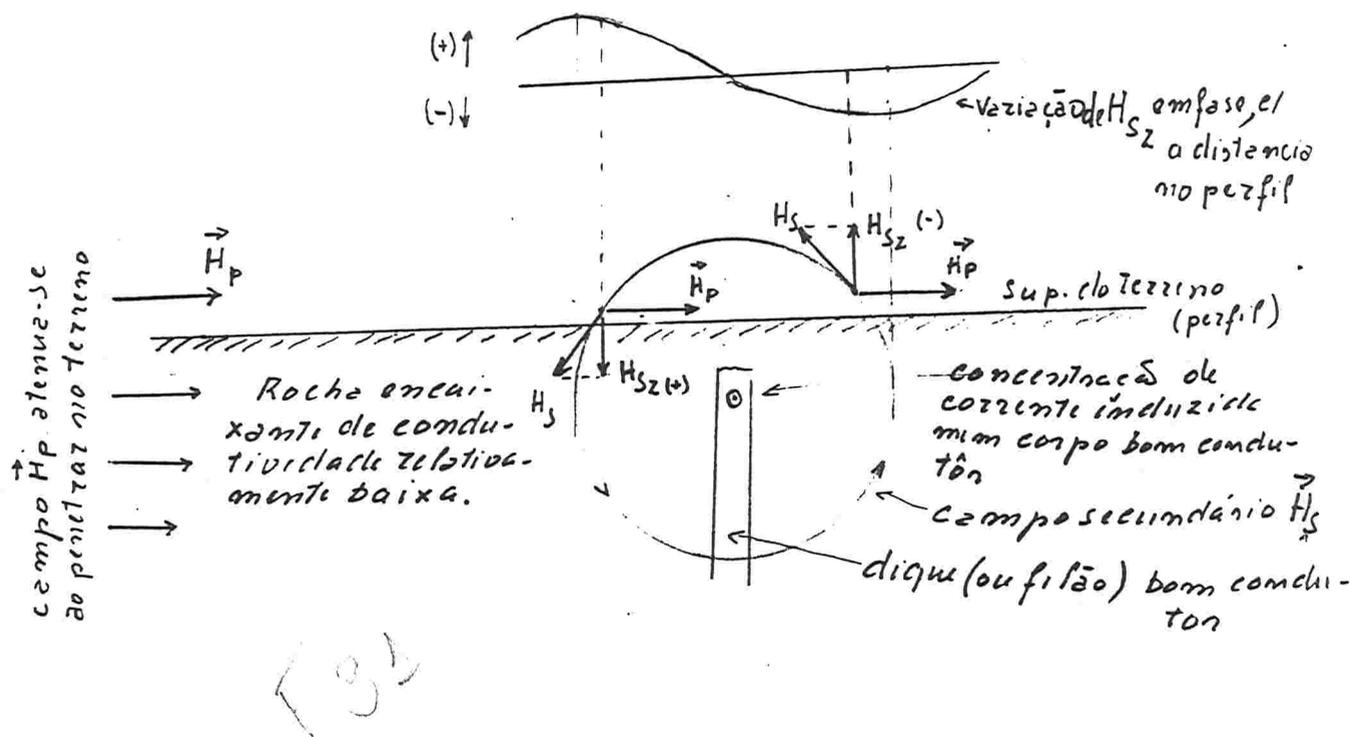
Sendo a medida de intensidade de  $\vec{H}_Q$  avaliada em percentagem com relação a  $\vec{H}_t$ , por intermédio da anulação do sinal audível na estação, ela independe de  $\vec{H}_p$ , e representará, na realidade, a intensidade da componente em quadratura do campo secundário. Essa por sua vez, é praticamente igual a  $\vec{H}_{Qz}$ . Assim :

$\vec{H}_{Qz}$  = Componente vertical (espacial) da quadratura do campo secundário em relação ao campo primário.

Resumindo, os parâmetros medidos com o método VLF são :

- a)  $\vec{H}_{Sz}$  = Componente vertical do campo secundário em fase com o campo primário; dita simplesmente, componente em fase.
- b)  $H_{Qz}$  = Componente vertical do campo secundário em quadratura com o campo primário; dita simplesmente, quadratura. Este último parâmetro pode ser visualizado pela excentricidade da elipse de polarização de  $\vec{H}_t$ .

O primeiro parâmetro  $\vec{H}_{Sz}$ , em fase com o campo primário, variando ao longo de um perfil por efeito de um dique vertical condutor, pode ser visualizado na seguinte figura :



Como mostra a figura seguinte, o campo  $H_P$  antes de encontrar o corpo condutor atenua-se em amplitude, defasando-se gradualmente ao atravessar rochas condutoras da cobertura e encaixantes, permanecendo entretanto sempre horizontal. O campo secundário gerado no corpo condutor adicionalmente sofre processo de atenuação e defasagem até chegar a superfície do terreno

VER FIGURA NA PAGINA SEGUINTE

4-6-7.3 Equipamento VLF , e operação em campo.

EQUIPAMENTO GEONICS EM-16

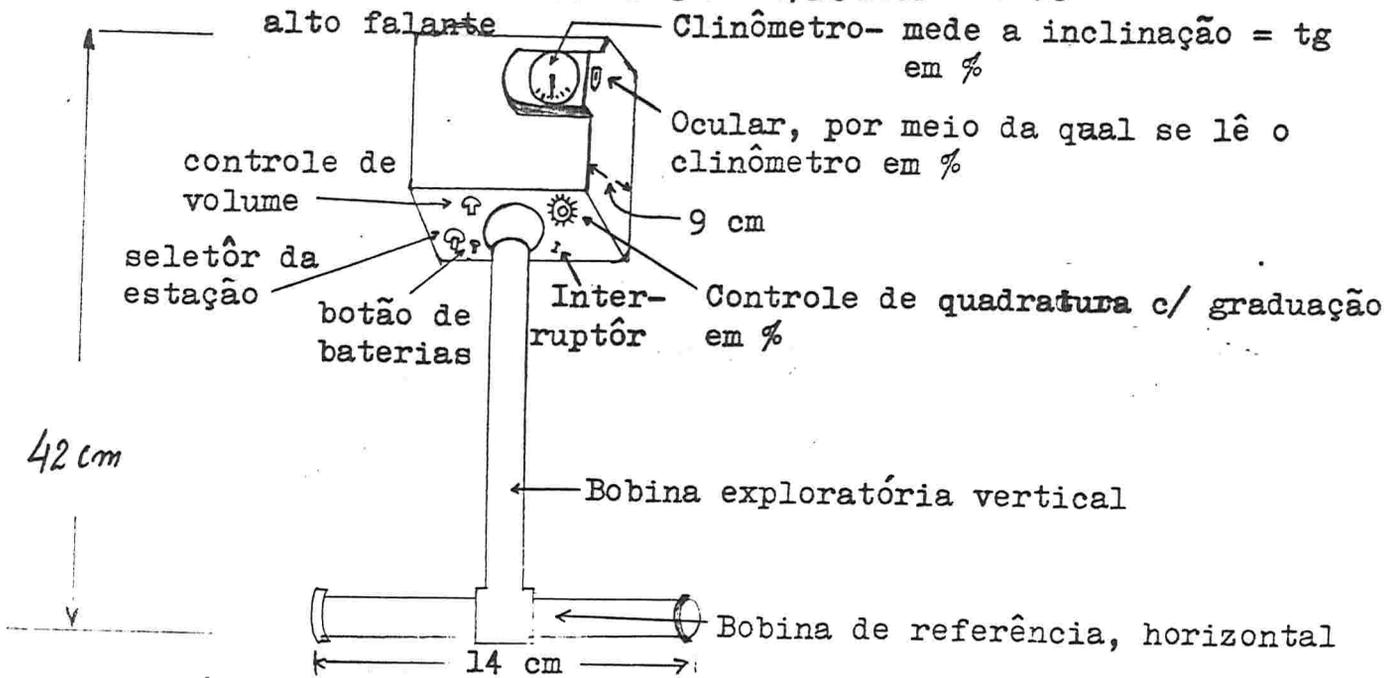
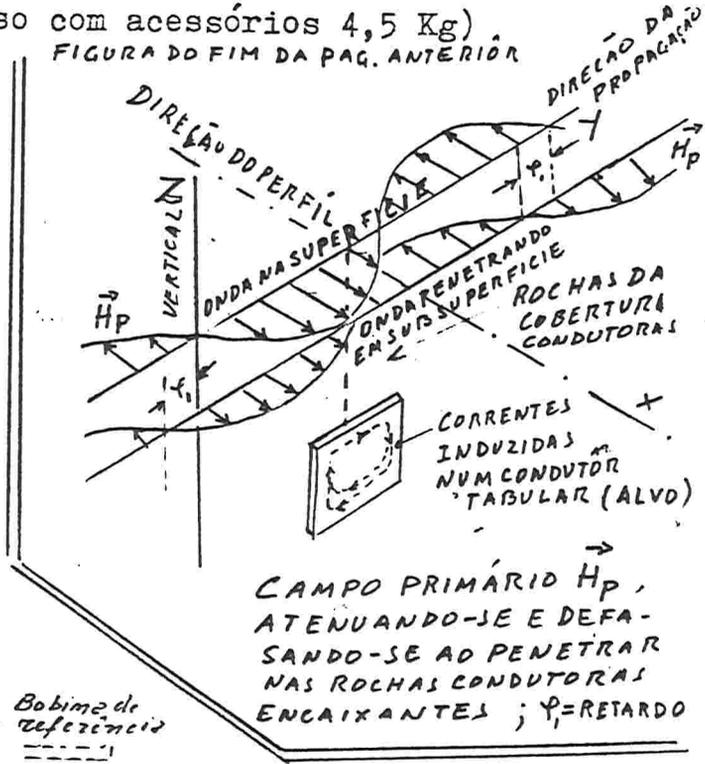
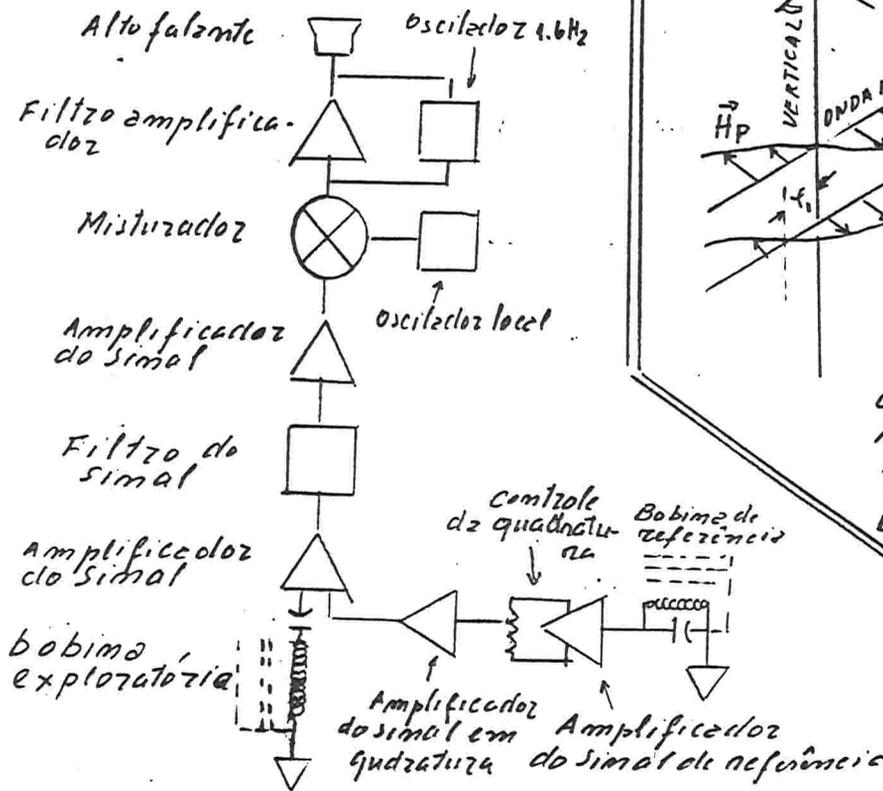


Figura esquemática do aparelho ( peso com acessórios 4,5 Kg)

GEONICS EM-16

FIGURA DO FIM DA PAG. ANTERIOR



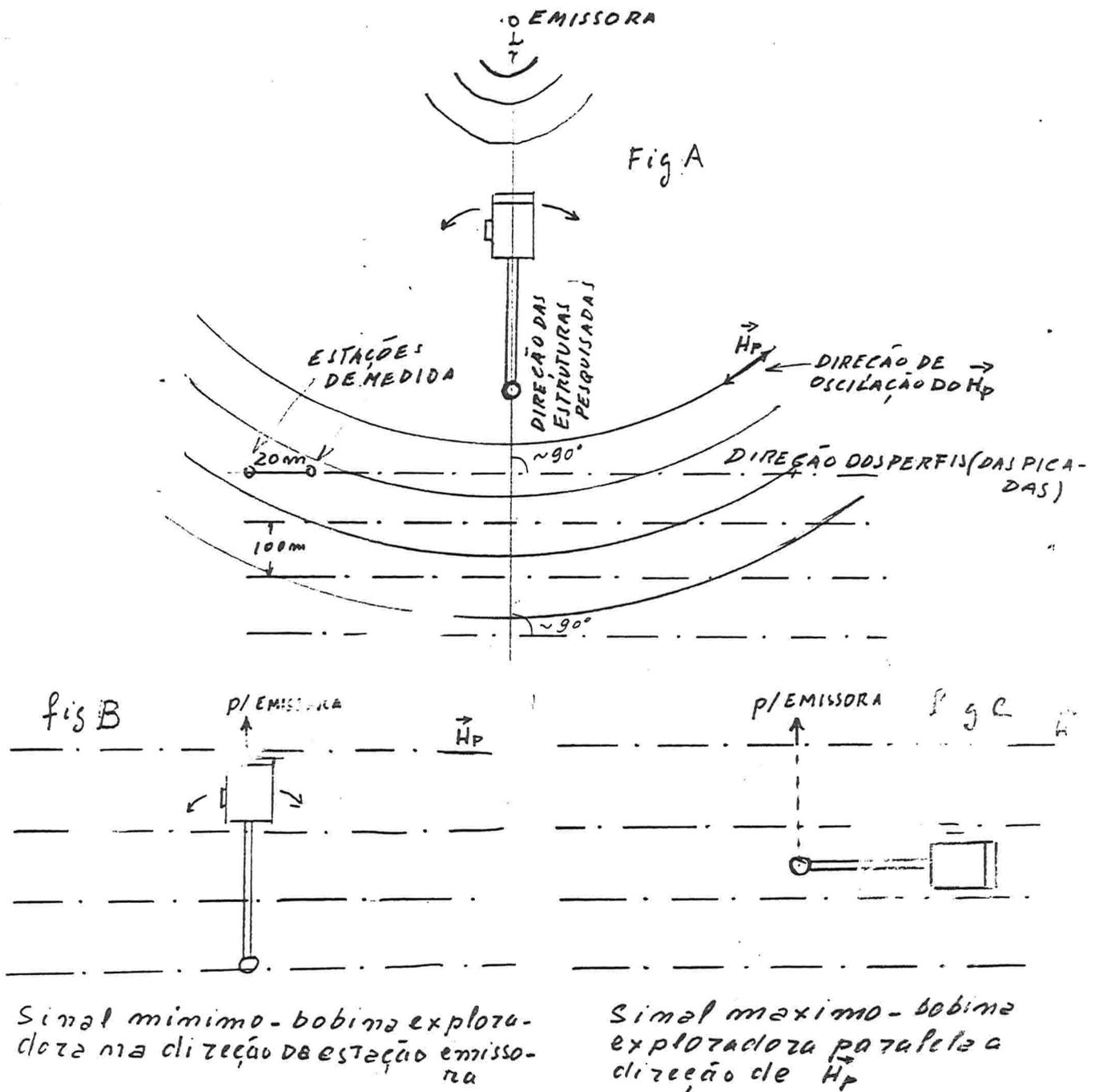
BLOCO DIAGRAMA DO APARELHO VLF  
(VER LEGENDA NA PAG. SEQUINTE)

## Legenda-

Bloco diagramado equipamento VLF

- O plano da figura é o plano vertical que contém o campo  $H_p$ , na operação de campo.
- Figura do Manual do VLFGEONICS EMIG do DNPM-3º Distrito-Centro de geofísica aplicada- 1976.

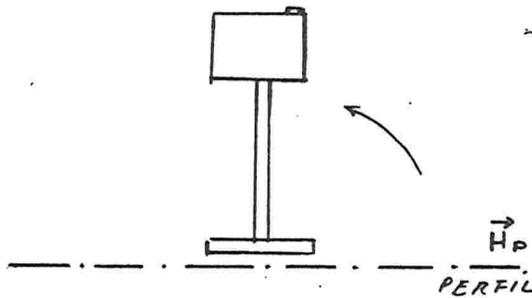
- Layout da operação em campo, e marcha das operações para executar as medidas em uma estação: (FIGS REPRODUZIDAS DO MANUAL DO VLF GEONICS DNPM-3º DISTR. - 1976)



Figuras A, B, e C representando em planta

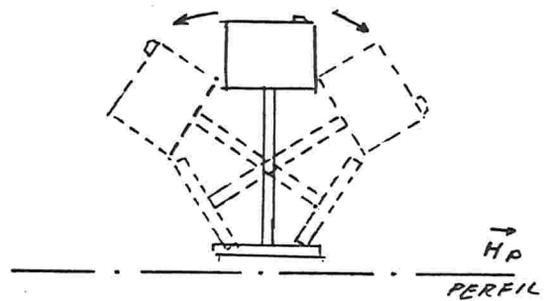
Fig<sup>s</sup> D e E: Vistas no plano vertical sobre um perfil

fig D



Girando o aparelho  $90^\circ$ , a partir da posição anterior (da posição de fig c). Aparelho posicionado verticalmente sobre o perfil. Bobina de referência na direção do perfil.

fig E



Basculando o aparelho no plano vertical até obter o sinal audível mínimo, da bobina exploradora

- Primeiramente deve-se escolher uma emissora VLF que por sua situação geográfica seja favorável para o plano de pesquisa. De modo geral, a direção de propagação das ondas (o azimute para a localização da emissora, à partir do local onde será realizada a pesquisa), deverá ser tanto quanto possível normal à direção dos perfis a serem pesquisados, e esses deverão ser transversais às presumidas direções estruturais controladoras da mineralização. (Ver figura A)

O espaçamento dos perfis, é da ordem de 100 metros, e o espaçamento das estações de medida ao longo dos perfis de 15 m à 20 metros.

- Figura B - Orientação preliminar do aparelho - Bobina exploradora na posição horizontal; girando a bobina exploradora horizontalmente, até obter o som audível mínimo no alto falante. A bobina exploradora estará então apontando para a emissora. ( $H_p$  estará paralelo ao plano das espiras da bobina exploradora).
- Figura C - Bobina exploradora horizontal; - girando a  $90^\circ$  em relação a posição da figura A. O som audível será máximo, e a bobina exploradora estará na direção do  $H_p$  ( $H_p$  é normal ao plano de suas espiras).

- Figura D - A partir da posição obtida anteriormente ( da figura B ), girando  $90^\circ$  o aparelho no plano vertical que contém a bobina exploradora.

- Figura E - Basculando a bobina nesse mesmo plano vertical, de modo a obter o sinal audível mínimo novamente. As espiras da bobina exploradora estarão no plano que contém  $\vec{H}_R$  (ver elipse de polarização de  $\vec{H}_T$ ).

Medir a inclinação =  $\text{tg } \alpha$  em % mediante a leitura do clinometro através da ocular; o que significa a medida da componente em fase  $H_{Sz}$  (ver elipse de polarização).

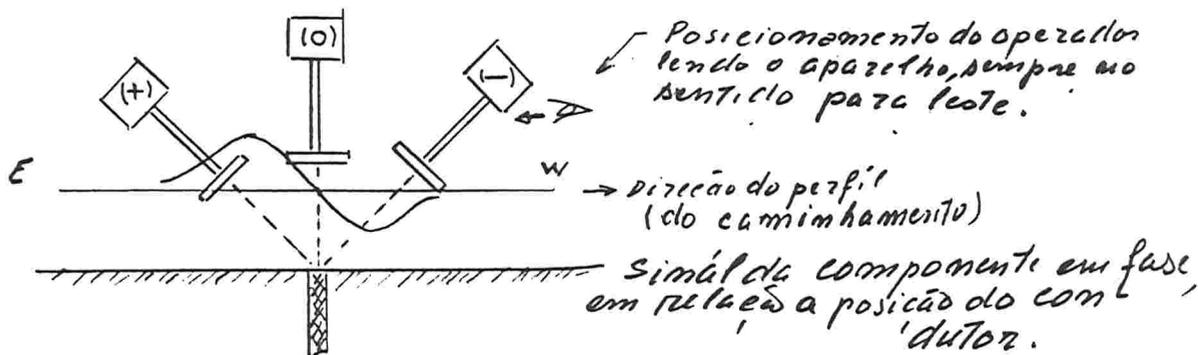
Após, ajustando o botão controle da quadratura, obter extinção do sinal audível; e ler o valor da quadratura  $\vec{H}_{Qz}$ , o qual é dado em % do campo  $\vec{H}_P$ .

Nesta última operação, obteve-se por artifício eletrônico do aparelho, que o sinal da bobina *exploratória* (que é coincidente com a direção da quadratura) na última posição, fosse compensado com o campo  $\vec{H}_R \cong \vec{H}_P$  (ver elipse de polarização), *coincidente com a direção da bobina de referência.*

Na prática a operação é simplificada:

Após procurar a posição de silêncio com aparelho horizontal e com a bobina de referência também horizontal, verticalizar o mesmo; mantendo a bobina de referência horizontal, para finalmente basculá-lo para extinção do sinal, e fazer as leituras.

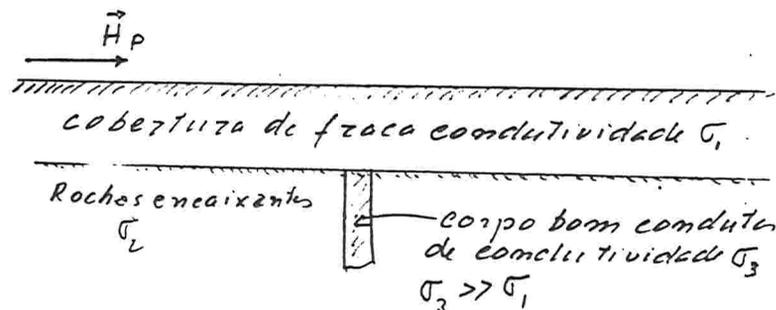
Para obter critério uniforme, quanto ao sinal das leituras ( que podem ser + ou - ), as leituras devem ser sempre com o operador voltado num mesmo sentido. Por exemplo, num perfil E-W, o operador volta-se para leste sempre, mesmo que percorra o perfil no sentido W.



## 4.6.7.4 - Método VLF - noções de interpretação.

No caso de condutor tabular vertical, com perfil transversal a sua direção, a extremidade inferior da bobina exploradora apontará para o condutor. Por construção do aparelho, ao se aproximar de um condutor, o sinal da componente em fase é positivo; ao se afastar do mesmo, o sinal da componente em fase torna-se negativo.

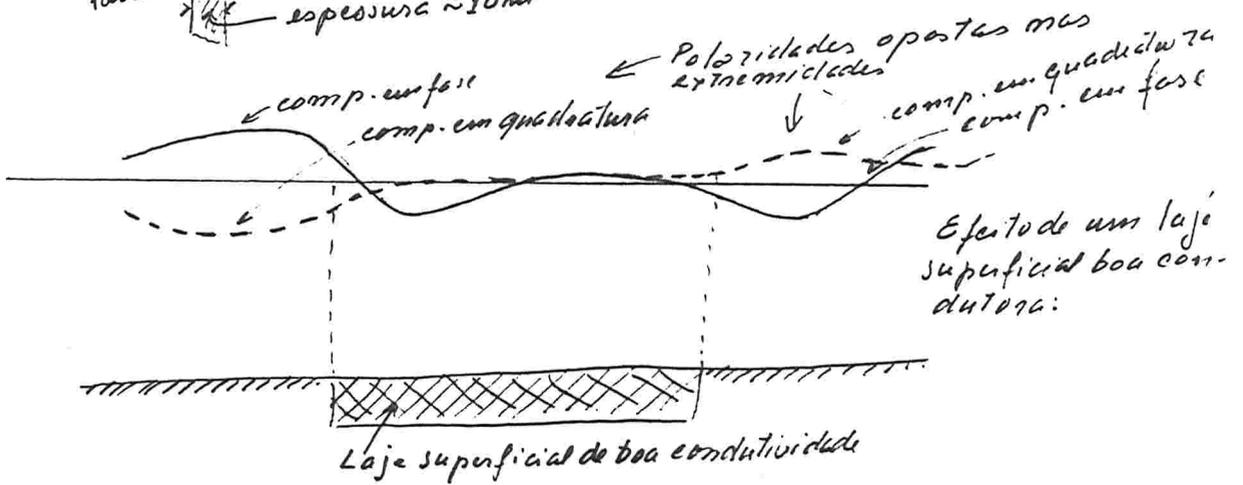
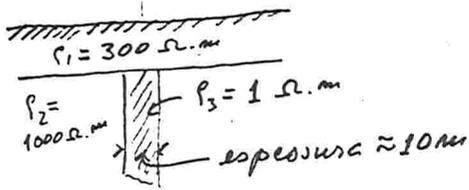
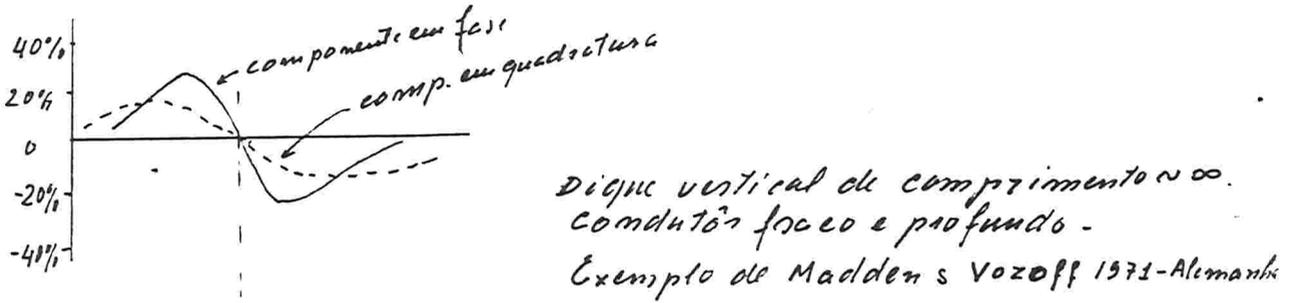
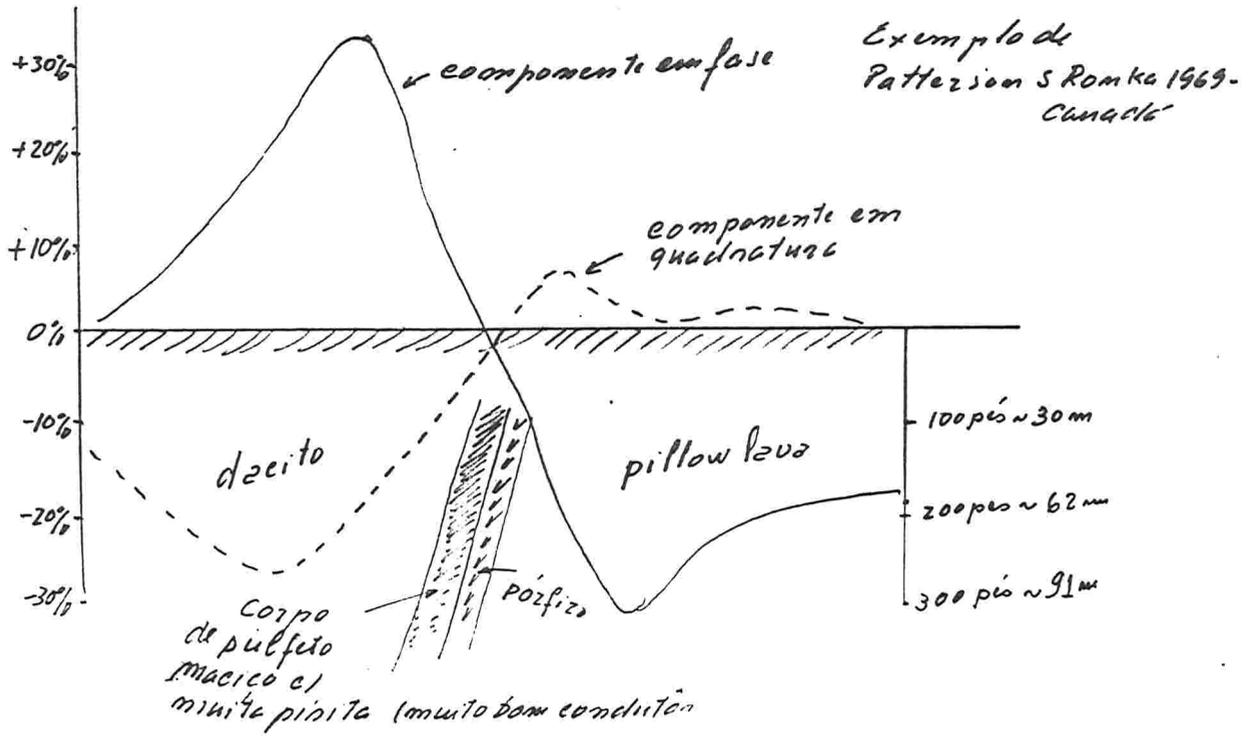
Numa situação como à figurada ( $\sigma$  = condutividade)



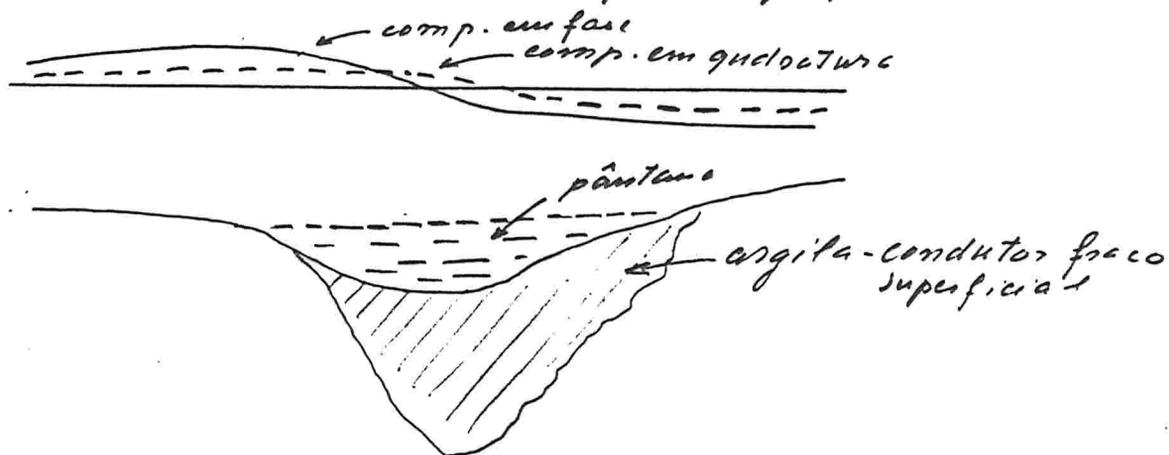
É possível demonstrar-se analiticamente (Ref. Manual VLF do DNPM 1976), que :

- A componente em quadratura negativa ( de sinal contrário ao da componente em fase), é sempre indicação de bom condutor profundo; condutor raso e fraco nessa posição, nunca tem quadratura negativa.
- Bom condutor ainda que raso, encaixado em rocha não condutiva, produz componentes com polaridades reversas. A parte mais negativa do perfil da quadratura fica do lado do mergulho do condutor. (Ref. Manual do VLF do DNPM 1976).

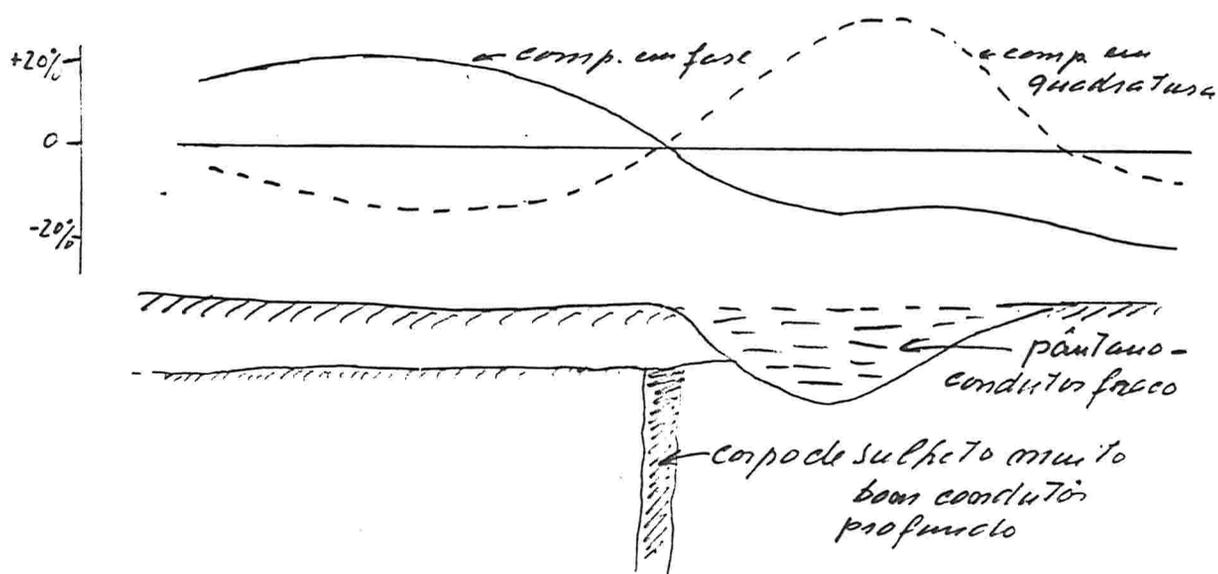
Exemplos :



### Efeito de um condutor fraco superficial:

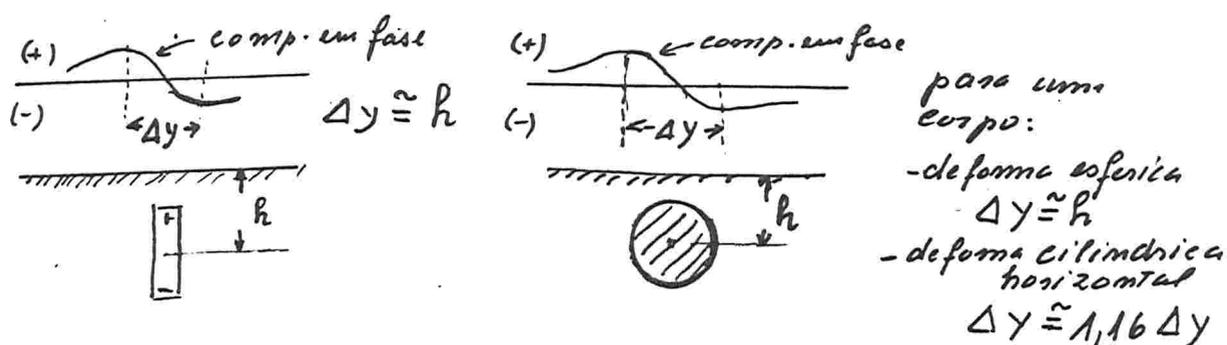


- Identificação de um bom condutor profundo, coexistente com um fraco condutor superficial, por intermédio das empontantes em fase e em quadratura



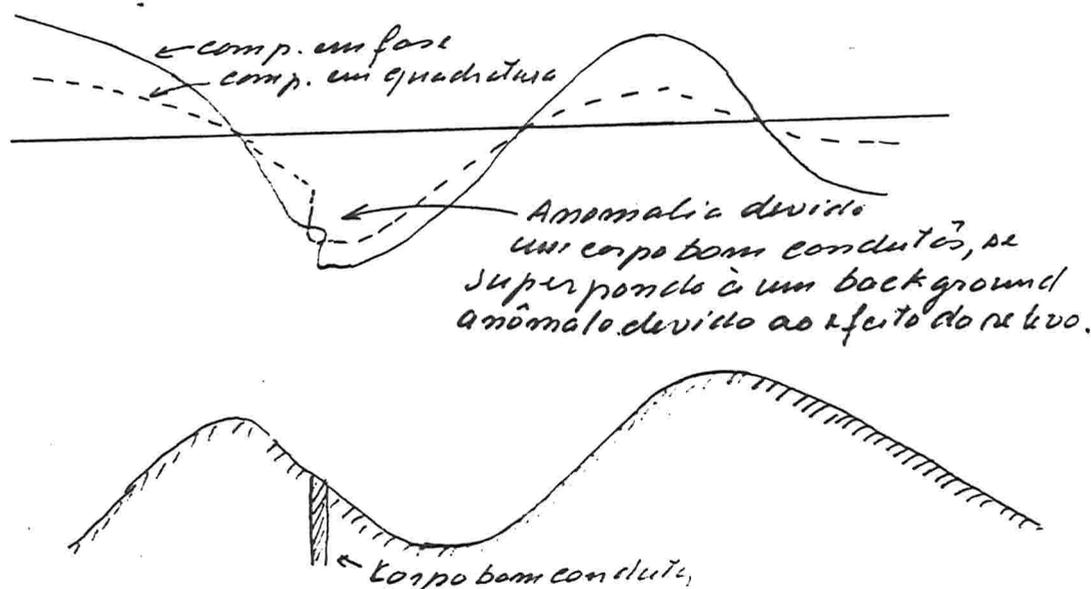
O método VLF comporta interpretações mais ou menos sofisticadas, baseadas em modelos matemáticos. (Referência para consulta: Paterson S. Ronka-1969 ; Madden S Vozoff 1971, publicações Canadense e Alemã).

Existem também regras simples para estimar-se profundidades. Exemplos : Manual VLF do DNPM 3º Distrito 1976.



### - Efeito do relevo sobre as curvas VLF

Como mostra a figura seguinte, de modo geral o relevo acentuado, principalmente quando as rochas superficiais são condutoras, afeta muito o método VLF. Nessas condições o background do efeito VLF é ondulado, tornando-se mais difícil a distinção de anomalias devidas a bons condutores (com contraste de condutividade com as rochas encaixantes).

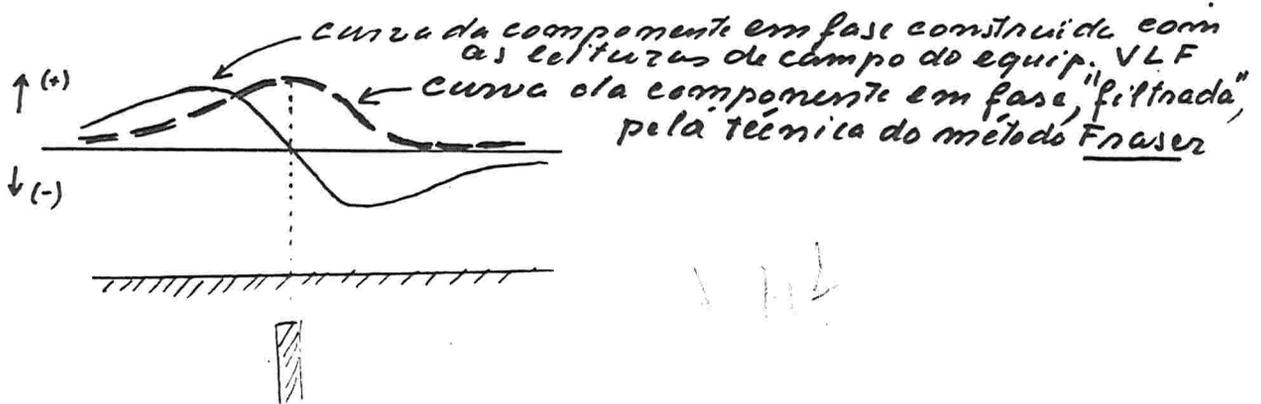


### - Processo de interpretação mediante perfis e curvas de contorno Fraser.

Essa é uma técnica muito utilizada para elaborar os dados dos

levantamentos VLF, a qual significa "suavização" e "filtragem" por processos analíticos. Com os dados assim elaborados torna-se possível desenhar-se curvas de contorno de isoanômalas da componente em fase.

Como mostra a figura, o efeito de um condutor apresenta-se como um único pico, quando filtrado pelo processo Fraser, facilitando sua identificação em perfil. Consequentemente as curvas de contorno correspondentes em planta, serão altas anômalas.



Essa técnica consiste :-Listar as medidas de inclinação nas estações sucessivas como foram obtidas em campo. Somar os valores de cada duas estações consecutivas, e subtrair essa soma, da soma dos valores das duas estações alternativamente subsequentes. Exemplo (perfil no sentido Sul com estações separadas de 50 m ).

Localção no perfil	Medida da Comp. em fase	"Filtragem"	Valor filtrado da componente em fase
3 + 00 Sul	← -6°		
3 + 50 Sul	← -7°	$(-6) + (-7) = -13$	
4 + 00 Sul	← -8°	$(-7) + (-8) = -15$	
4 + 50 Sul	← -15°	$(-8) + (-15) = -23$	$(-23) - (-13) = -10°$ valor "filtrado"
5 + 00 Sul	← -24°	$(-15) + (-24) = -39$	$(-39) - (-15) = -24°$ valor "filtrado"

, e assim por diante.

Não cabe aqui abordar os fundamentos técnicos dessa técnica, indicando para consulta: Fraser D.C.-Contouring of VLF-EM data (Toronto-Canadá), Rev. Geophysics Vol. 34 nº 6 - dezembro 1969.

Perfis e mapas de contorno com os dados assim filtrados, além de melhorar a visualização das anomalias, apresentam a vantagem de suavização, atenuando os efeitos do relevo.

#### 4.6.8 - Método AFMAG( de "audio frequency magnetics").

É um método EM que utiliza campos EM naturais muito variáveis, sendo portanto um método de força <sup>NATURAL</sup> natural.

As frequências utilizadas variam com os diversos tipos de procedência dos equipamentos, estando compreendidas entre 1 Hz até pouco mais do que 500 Hz.

Isto é, frequências extremamente baixas até frequências relativamente baixas em relação às utilizadas nos métodos EM convencionais, que utilizam frequências de 100 Hz à 5000 Hz.

O método foi idealizado objetivando principalmente obter grandes algarces em profundidade. Devido a possibilidade de utilizar frequências extremamente baixas; e porque a separação entre a fonte dos impulsos EM e do receptor, é de dimensão infinita, (praticamente).

Foi obtido algum sucesso nesse sentido, tendo sido anunciadas capacidades de penetração de varias centenas de metros. Porém as anomalias significam efeitos generalizados de grandes áreas, uma vez que pequenas contrastes de condutividade distribuidos, produzem no método AFMAG amplas anomalias.

Melhores resultados foram obtidos, no sentido de detectar com esse método, as mais marcantes direções de falhas e de zonas fraturadas na área pesquisada.

O campo E-M utilizado, é constituído por audio frequências de 1 Hz até 10 000 Hz que estão constantemente atingindo qualquer ponto da superfície da terra. Sua origem é muito diversificada, com faixas

características no espectro total de frequências.

São devidas em primeiro lugar, a fenômenos elétricos que acompanham as tempestades meteorológicas. Raios são impulsos com duração de poucos milisegundos que se propagam, no espaço compreendido entre a superfície da terra e a ionosfera, e atingem distâncias que cobrem todo o planeta. Existem regiões de máxima incidência de tormentas (América do Sul, Central, África Central e Extremo Oriente). As frequências devidas a essas origens, são as principalmente utilizadas no método AFMAG.

Outras são de origem natural no espaço exterior, nas camadas mais externas da atmosfera. <sup>Outras são</sup> ~~As~~ devidas a fenômenos relacionados ao campo geomagnético. <sup>São</sup> Outras, ainda, devidas à explosão nucleares e às instalações elétricas em geral.

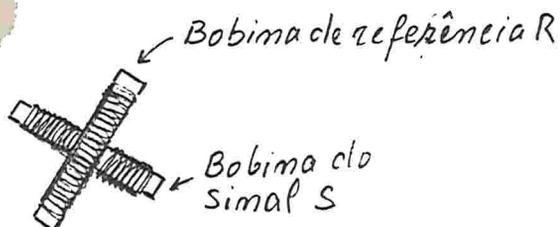
O campo EM natural junto ao solo varia regionalmente, sendo máximo junto ao equador e mínimo junto aos polos. Varia no tempo (em cada instante, diurnamente e sazonalmente) em intensidade e direção, de forma em grande parte aleatória.

Cada impulso costuma ser elipticamente polarizado, devido a efeitos de correntes induzidas no subsolo. Se as medidas num determinado ponto são feitas durante um grande intervalo de tempo, obtém-se um elipsoide de integração, o qual é o resultado da polarização em dois planos perpendiculares entre si.

Quando o terreno é homogêneo, o elipsoide torna-se uma elipse horizontal com pequena excentricidade. Havendo a presença de corpos bons condutores (contrastando com as rochas encaixantes), aparecem componentes verticais, e a polarização é segundo um elipsoide tridimensional.

O eixo maior do elipsoide, tende a orientar-se normalmente ao eixo do corpo condutor.

Assim o azimute do vetor maior, é difusamente perpendicular às estruturas geológicas.



O equipamento é constituído essencialmente por duas bobinas com enrolamento em torno de núcleos de ferrita, e dis-

postas com eixos perpendiculares entre si. Uma com menor número de espiras, é a bobina de referência; a outra com maior número, é a do sinal.

Ambas estão conectadas a um circuito comparador, de modo a comparar os impulsos filtrados recebido na bobina do sinal, com o impulso captado na bobina de referência. Quando o conjunto gira num plano, o sinal de saída será nulo, quando o eixo da bobina de referência coincide com o eixo maior da elipse de polarização nesse plano.

Os parâmetros medidos são:

- a) O azimute do eixo maior do elipsoide de polarização
- b) A inclinação do eixo maior do elipsoide de polarização

Nessas condições, o método AFMAG é um método de medida da inclinação do campo resultante (método do "tilt"), no qual a fonte primária é o campo natural E-M, numa determinada faixa de frequências escolhida.

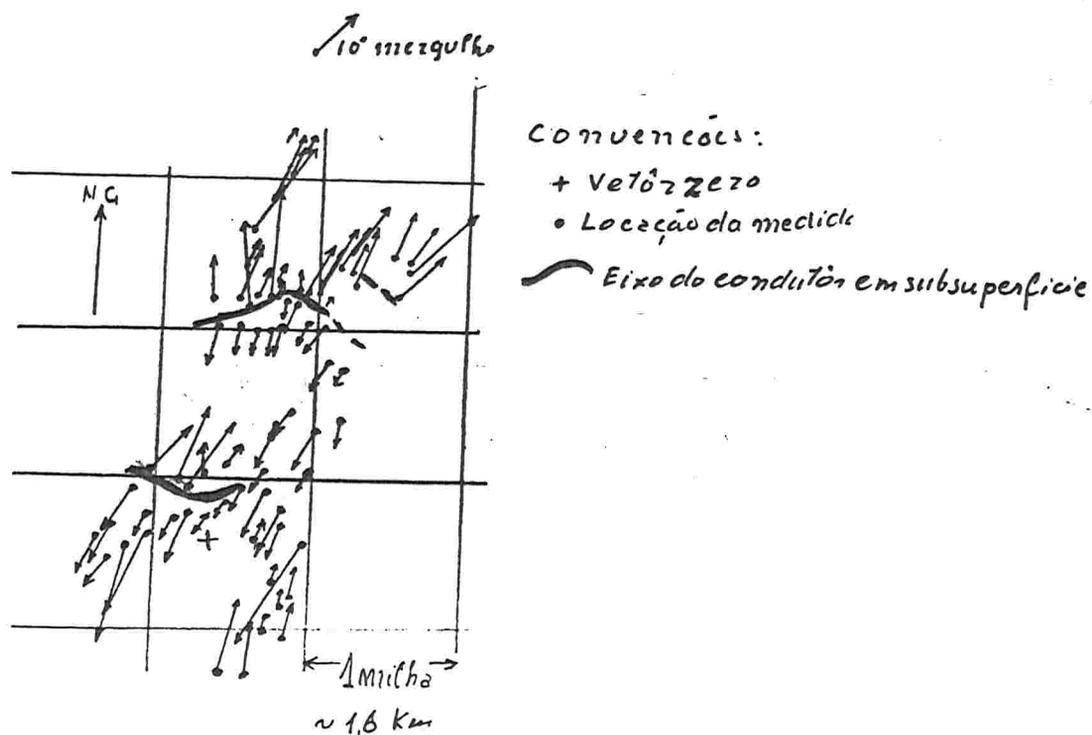
Numa determinada estação, gira-se o conjunto das bobinas num plano horizontal, até obter o mínimo sinal de saída. O azimute da direção do eixo da bobina de referência nessa posição, será a medida do primeiro parâmetro (a).

Após, girando-se as bobinas num plano vertical que contenha esse azimute, procede-se do mesmo modo, e a inclinação do eixo da bobina de referência, será a medida do segundo parâmetro (b).

As medidas são feitas ao longo de perfis, dispostos de maneira a serem normais, às direções presumidas das estruturas pesquisadas, sendo as estações separadas de 25 metros.

Uma forma de apresentar-se os resultados, pode ser a mesma do método da inclinação (método "tilt"), construindo-se perfis da inclinação do campo, como foi visto ao ser abordado aquele método.

Porém a maneira mais comum, consiste em apresentar os dados do método AFMAG, em planta, por intermédio de vetores convencionais. A locação da estação em planta é representada pela origem do vetor. Direção e sentido da inclinação da medida, (parâmetro (a)), pelo azimute do vetor. Mediante escala adequada, o módulo do vetor representará a inclinação do campo (parâmetro (b)).



*Exemplo de vetores AFMAG - Fig. reproduzida de  
Parasnis 1966*

Unindo-se pontos onde se observa inversão dos sentidos dos vetores, tem-se em planta a locação dos eixos de contrastes de condutividade observados. A distribuição das direções dos vetores, tenderá a ser normal aos eixos referidos.

Tais contrastes podem ser associados a contatos geológicos subverticais (ou muito inclinados), a falhas, a zonas brechadas ou fissuradas. Também cursos d'água (riachos, etc.), linhas de cristas do relevo, causam eixos fortemente anômalos.

Admite-se que o alcance em profundidade, e a resolução do método, sejam muito prejudicados por esses fortes "ruídos" (ou background) inerentes ao método.

Publicações atuais (Ref. E&M.J. agosto 1982) anunciam versão aerotransportada do método AFMAG.

#### 4.7 - Custos, rendimento e utilização combinada com outros métodos de prospecção, dos métodos elétricos e eletro-magnéticos.

No caso de levantamentos no terreno, em pesquisa lateral, comparando-se custos dos métodos E-M (convencionais e VLF), resistividade, polarização espontânea e polarização induzida, este último é o mais caro e de menor rendimento.

Observa-se entretanto que para o método de polarização induzida, em geral estão incluídos os custos e os rendimentos do método de resistividade aplicado simultaneamente (sendo aplicado o dispositivo bipolo-bipolo), e muitas vezes também o de polarização espontânea.

Assim, nos contratos para prestação de serviços com método IP, são incluídos também mais um ou dois métodos simultâneos (resistividade geralmente, menos comum SP).

Admite-se que com o método IP (combinado com resistividade), podem ser executados de 40 à 70 estações de medidas num dia útil, (dependendo do espaçamento das estações e condições do terreno).

Para o método VLF, o de menor custo e maior rendimento, admite-se a execução de 500 estações, espaçadas de 20 m, por dia útil.

Combinando parâmetros fornecidos por J. Bertin 1969 e (da Compagnie Générale de Géophysique) e Vieira, A.B 1976 (do DNPM 1º Distrito-Centro de Geofísica Aplicada), pode-se construir o seguinte quadro comparativo, para custos e rendimentos em pesquisa lateral:

Métodos	Polarização Induzida. (mais resistividade)	<i>Potencial espontâneo</i>	Resistividade	Eletro magnético (convencional de fonte móvel.	Eletro-magnético. VLF
Custo/mês	p	0,6p	0,7p	0,8p	0,5p
Rendimento: nº de estações/mês	r	3r	2r	4r	11r

Onde:

- Polarização induzida, significa a aplicação simultânea do método IP mais resistividade.
- p = custo/mês com método IP combinado com resistividade
- r = custo/mês com método IP combinado com resistividade
- mês contendo 22 à 23 dias efetivos de trabalho
- rendimento, significando execução do levantamento geofísico, nas picadas ou perfis, previamente levantados e piquetados pela topografia.

Na moderna prospecção sistematizada, para minerais metálicos, de modo geral são aplicados em sequência e em fases sucessivas, os métodos seguintes:

- 1ª fase - Reconhecimento regional.
  - Métodos Geoquímicos
  - Métodos Geofísicos aerotransportados:
    - método magnético
    - método eletro-magnético (sistema INPUT, sistema HEM)
    - método radiométrico
- 2ª fase - Prosseguimento no terreno (operações de "follow up")
  - Método Magnético e eletro-magnético
  - Método Radiométrico
  - Método Geoquímico
  - Método Resistividade
  - Método de polarização induzida
  - Método de polarização espontânea
  - Método gravimétrico (raramente)
  - Método Sísmico (mais raramente)

Essa sucessão e prioridades, comporta variações dependendo do contexto geológico, da natureza das anomalias aéreas detectadas.

Conforme os objetivos, a sucessão e prioridades sofrem profundas inversões.

- Por exemplo, na prospecção de petróleo avultam as prioridades dos métodos magnético, gravimétrico e sísmicos, sendo insignificante a contri-

buição da maioria de métodos elétricos e eletromagnéticos. Eventualmente eletroresistividade é utilizada, e também método geoquímico.

Na pesquisa de minérios metálicos, sem exceção, a primeira fase será com método magnético, eletro-magnético e geoquímico. Numa segunda fase serão aplicados métodos elétricos.

O método de polarização induzida, somente será empregado quando tiver sido detectado indícios superficiais de mineralização. Método gravimétrico raramente é aplicado na pesquisa de minérios metálicos.

Nas fases subsequentes, do detalhamento e avaliação serão indispensáveis os métodos diretos de sondagem e mineiros convencionais. Perfilagem de furo de sonda, é utilizada quando da execução das sondagens.

#### 4.8 - Perfilagem geofísica de furo de sonda, com métodos elétricos e eletro-magnéticos.

##### 4.8-1 Perfilagem geofísica e sua finalidade

Perfilagem, correspondendo a "Well Log" (inglês), "diagraphie" (francês), "testificacion" (espanhol), significa anotar os dados das formações atravessadas numa sondagem mecânica, em relação as suas profundidades.

Pode ser simplesmente uma tabulação gráfica-descritiva dos testemunhos colhidos e/ou de detritos colhidos no retorno do fluido de sondagem (amostras de lama, da peneira) etc. Pode incluir análises das amostras do material colhido na perfuração.

Pode ser também registros de medidas geofísicas, denominando-se então perfilagem geofísica. Esses podem ser registros gráficos de propriedades elétricas, radiométricas, elásticas, térmicas, magnéticas, etc; pode consistir de registros das atitudes dos estratos atravessados; das atitudes, desvios, diâmetros do furo e de outras características da operação de sondagem. As medidas são obtidas mediante sensoramento de propriedades físicas, através de dispositivos eletro-mecânicos, ou eletrônicos.

A perfilagem geofísica é obtida por intermédio de sensores descidos no furo, e em geral, elevados gradativamente do fundo para a boca do mesmo. Os sinais são transmitidos sob a forma de energia elétrica para equipamentos de medida-registradores, instalados na superfície. Alguns registros são originalmente gráficos. Outros impressos em filmes ou gravados em fita magnética, para depois serem transformados em registros gráficos.

A perfilagem geofísica amplia a faixa de informações, suplementando os dados colhidos diretamente, além de fornecer melhores recursos para correlações. Os registros geofísicos tem as vantagens de serem, em geral contínuos ao longo do comprimento do furo, e de representarem propriedades de um volume de material em torno do furo, bem maiores do que representam os dados da observação direta nas amostras colhidas (testemunhos, etc.).

A primeira perfilagem geofísica foi praticada em 1927 na França, com método elétrico, pelos irmãos Schlumberger, para pesquisa de petróleo.

Atualmente essa técnica é considerada indispensável nas sondagens profundas em geral, como acontece na pesquisa e produção de petróleo, tendo-se tornado muito sofisticada. É indispensável na pesquisa de minérios radioativos.

Tende a ser cada vez mais utilizada na pesquisa de água subterrânea, carvão, minérios metálicos e não metálicos. Atualmente é parte integrante da tecnologia de sondagem mecânica, constituindo um importante ramo da geofísica aplicada.

Cada método geofísico comporta aplicações mais ou menos diversificadas ou desenvolvidas no campo da perfilagem. Os métodos elétricos e eletro-magnéticos são os que mais contribuem para a tecnologia de perfilagem, seguindo-se em importância sob esse enfoque, os métodos radio-métricos, seguindo-se outros métodos.

#### 4.8-2 Principais diversificações da perfilagem com métodos elétricos e eletro-magnéticos.

Com objetivo de orientar a exposição que se seguirá serão apresentados de início, as principais diversificações a serem abordadas neste capítulo.

- a) método de perfilagem do potencial espontâneo (perfilagem da curva SP).
- b) métodos de perfilagem da resistividade
  - Perfilagem de resistividade com um único eletrodo
  - Perfilagem com dispositivos convencionais
    - Perfilagem da curva de resistividade normal (curta e longa)
    - Perfilagem da curva de resistividade lateral (curta e longa)
  - Perfilagem com dispositivos especiais:
    - Perfilagem de resistividade com dispositivo para calcário
    - Perfilagem de resistividade com laterolog
    - Perfilagem de resistividade com microdispositivos (junta-

mente com microcalibre):

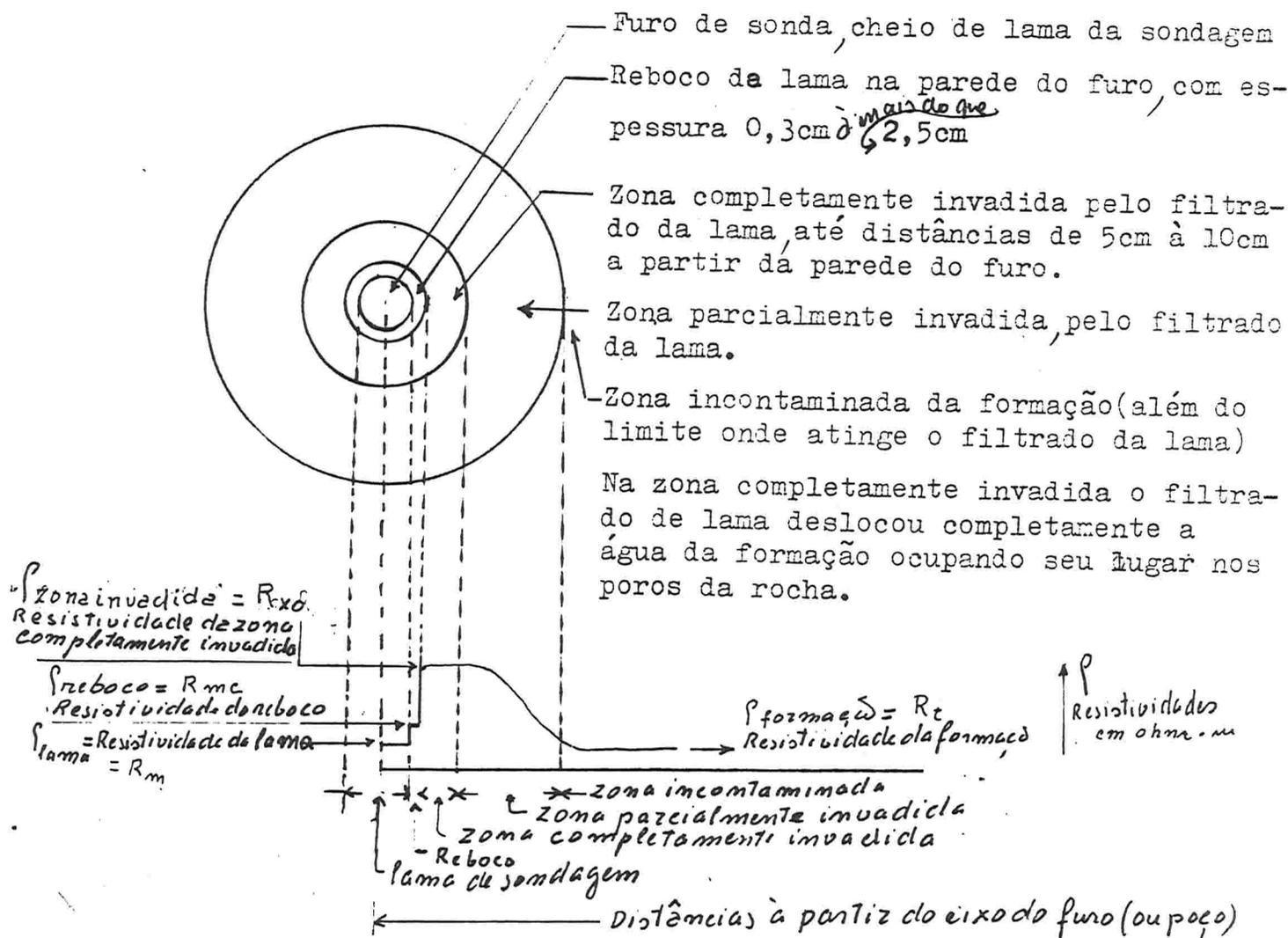
- \* ← Perfilagem da curva micronormal
  - \* ← Perfilagem da curva microinversa
  - \* ← Perfilagem da curva microlaterolog
- \* Perfilagem do rumo <sup>e</sup> inclinação do furo, juntamente com as atitudes dos estratos atravessados (dispositivos "dipmeter" e de "direction survey").

2) Método de perfilagem da condutividade (ou da resistividade) através da indução, ou seja com método E-M, ou perfilagem da curva IL (iniciais de "induction log").

Observe-se que nessa classificação estão compreendidas somente diversificações de perfilagem geofísica com métodos elétricos e eletro-magnéticos. Não estão incluídas perfilagens com métodos radiométricos, e outros métodos igualmente importantes.

4.8.3- Distribuição dos fluidos e das resistividades num leito permeável invadido pelo filtrado da lama de sondagem, em torno do furo.

A compreensão dessas distribuições é necessária para entender-se os fundamentos dos métodos de perfilagem. A figura a seguir mostra seus aspectos essenciais:



A parte superior da figura representa uma secção horizontal numa sondagem vertical, na altura de um leito permeável, e nas seguintes condições:

- Furo cheio com lama de sondagem à base de água doce mais argila bentonítica, com resistividade muito maior que a água contida na formação ( $\rho_{\text{lama}} > \rho_{\text{água da formação}}$ )
- Formação com água de resistividade  $\rho_{\text{água da formação}}$ , e contendo somente água (não contém óleo).
- A lama, por efeito da pressão, formando reboco nas paredes do furo, e seu filtrado invadindo a formação.

Na parte inferior da figura está representada a distribuição das resistividades (concentricamente distribuídas), segundo distâncias afastando-se lateralmente do eixo do furo, para o interior da formação permeável.  $R_{xo}, R_{mf}, R_m, R_t$  são notações padronizadas, adotadas na literatura especializada

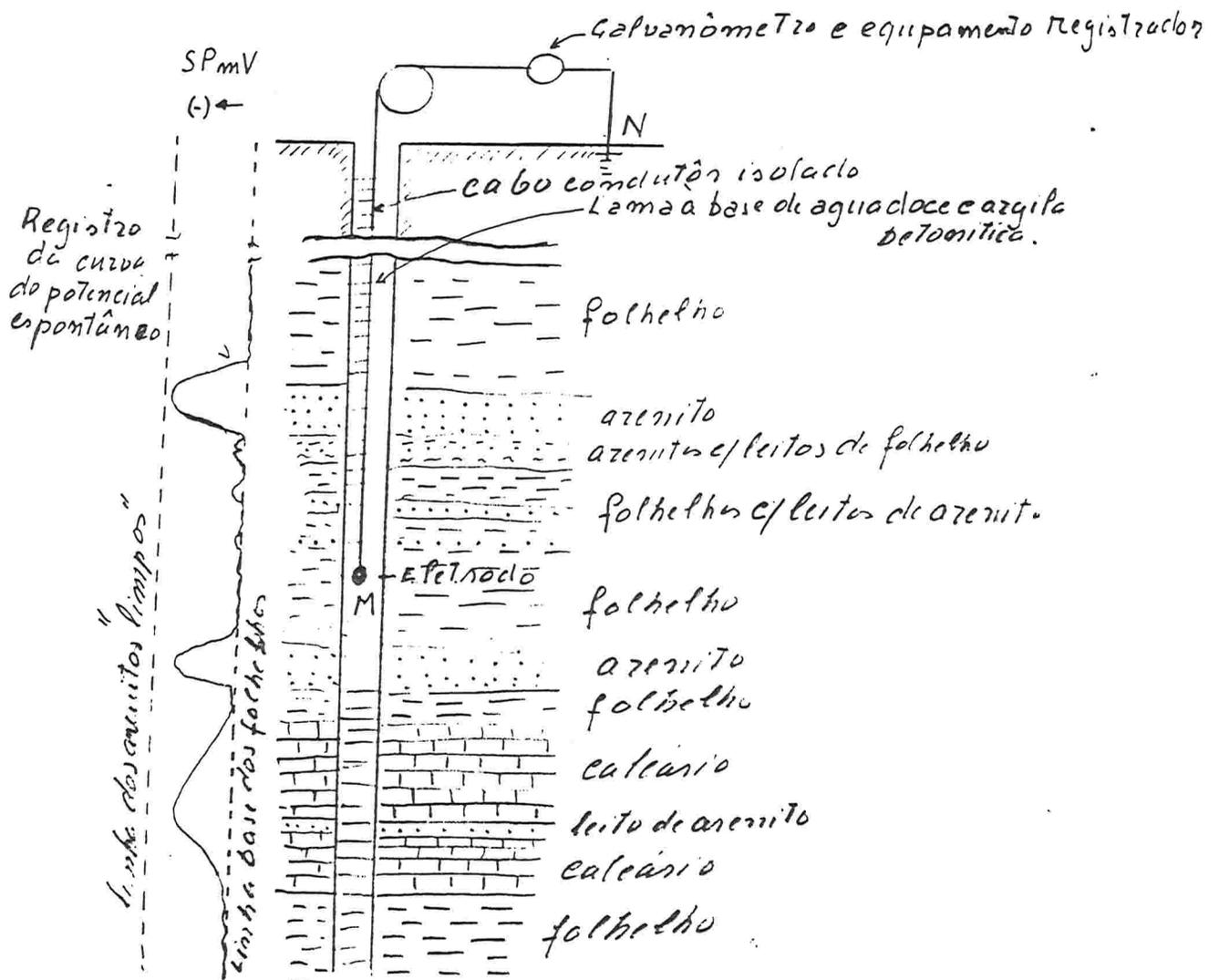
Os valores das resistividades estão representados em ordenadas, na direção vertical, de forma aproximada.

Observa-se que nessas condições a resistividade do reboco é aproximadamente o dobro da resistividade da lama ( $\rho_{\text{reboco}} \approx 2 \rho_{\text{lama}}$ ). A resistividade da zona completamente invadida é muito maior, decrescendo gradativamente na zona incompletamente invadida, até atingir a resistividade da formação (além dos limites da invasão da lama).

- Quando o leito permeável contém óleo além de água, essas distribuições tornam-se mais complexas, não cabendo aqui descrevê-las (indicando-se para consulta Schlumberger Doc. nº 8 -1958 ; Itenberg 1971).

4.8.4 - Perfilagem do potencial espontâneo (curva SP, também referida por curva AP, de Auto-Potencial, por alguns autores brasileiros).

4.8.4-1 Essência da perfilagem SP



Dispositivo para perfilagem do potencial espontâneo (da curva SP) e registro típico

Com esse dispositivo são registrados continuamente ao longo do comprimento do furo de sonda, as diferenças de potencial entre cada ponto, no interior do furo, e um ponto colocado na superfície do terreno. Estando o furo cheio de lama, as medidas são entre pontos na coluna de lama e a superfície do terreno.

Quando o eletrodo M (de chumbo), vai sendo elevado do fundo para a boca do furo, o equipamento vai medindo ( e registrando continuamente) as diferenças de potencial entre o eletrodo M, e o eletrodo N. Este último está fixado na superfície. Como o potencial no eletrodo N permanece constante, as diferenças de potencial medidas entre os pontos ao longo do furo ( no interior da lama), serão as quedas ohmicas entre esses pontos. As quedas ohmicas ocorrem, por efeito de fluxos de corrente que, espontaneamente, fluem no interior do furo.

Um potenciômetro intercalado no circuito, permite ajustar o equipamento, de modo a compensar anulando, as diferenças de potencial devidas exclusivamente ao circuito.

Os registros são feitos, de modo que as diferenças de potencial medidas, são lidas no gráfico em milivolt, negativamente da direita para esquerda.

Ao longo de formações argilosas (folhelhos, margas, argilitos, argila), e num determinado furo e mesmo condicionamento da lama, a curva de registro do SP, geralmente mantém-se verticalizada e uniforme (sem inflexões). Em frente às formações arenosas (como arenitos permeáveis e porosos), a curva geralmente inflete para esquerda (negativamente). Em frente às formações duras (como calcários, diabasio, etc.), a curva tende a apresentar-se como segmentos de reta inclinados ( para direita ou para esquerda), infletindo em frente à leitos arenosos ou argilosos intercalados.

Inflexões para esquerda (negativamente), geralmente indicam leitos permeáveis tais como arenitos, porém a grandeza da inflexão somente é relacionada à porosidade ou a permeabilidade do leito, através de outros fatores, de maneira indireta.

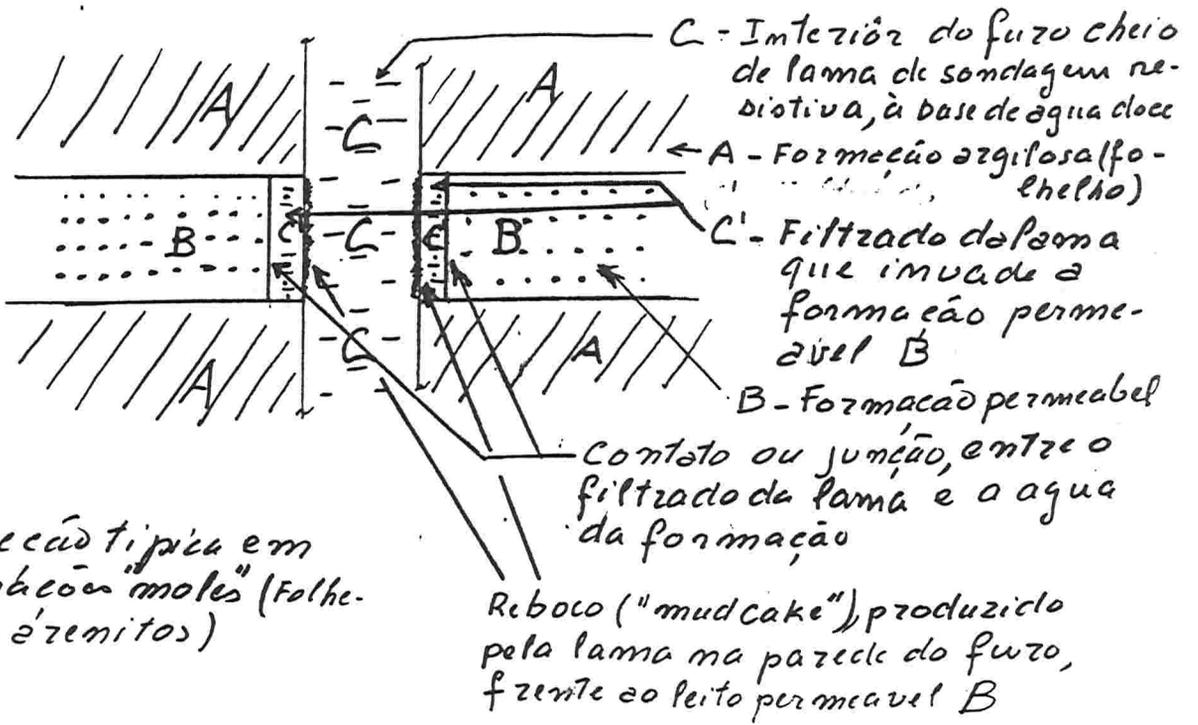
A curva SP depende em primeiro lugar das qualidades (características) da lama da sondagem, e adicionalmente, das características das formações, assim como dos fluidos contidos junto às paredes do furo.

Um registro da curva SP com lama a base de água doce (resistiva), permite em condições favoráveis:

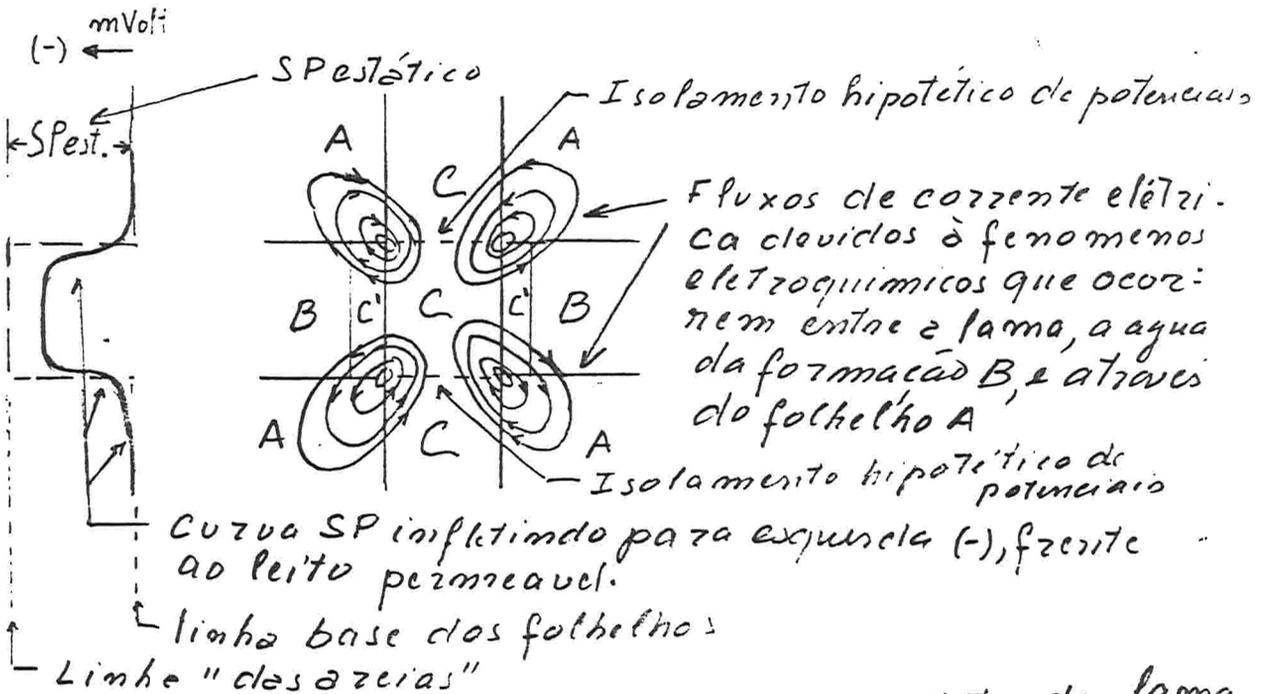
- determinar leitões permeáveis
- localizar seus contatos
- obter valores de  $\int_{af}$  (resistividade da água contida na formação). =  $R_w$  (notação padronizada)
- A curva SP não fornecerá informações úteis quando a lama de sondagem for à base de água salgada ou à base de óleo.
- A curva SP não delinêia com nitidez, secções geológicas contendo formações duras com intercalações arenosas e argilosas.

4.8.4-2 Origem das diferenças de potencial registradas pela curva SP.

Ver figura na página seguinte

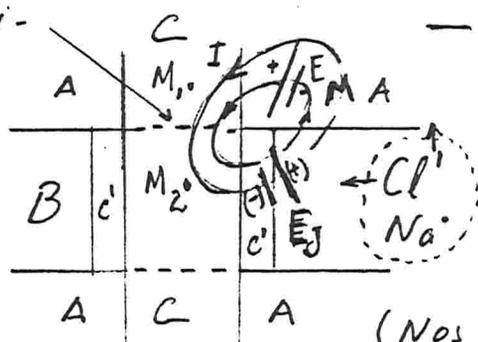


- Secção típica em formação "moles" (folhelhos e arenitos)



- Fluxos de corrente que ocorrem nos contatos da lama com as formações A e B, registrada curva SP (à esquerda)

Isolamento hipotético de potenciais



- Forças eletromotrizas  $E_M$  e  $E_J$ , devidas à fenômenos eletroquímicos entre a lama do furo (ou seu filtrado), e a água da formação. (Nos poros de um leito permeável e através do folhelho adjacente)

Fluxos de corrente são em torno das interseções: coluna de lama e contato leito permeável-folhelho.

Vários fenômenos contribuem para os potenciais espontâneos observados no interior do furo, entre eles a eletrofiltração. Isto é, por efeito do filtrado da lama introduzida sob pressão nas formações permeáveis, através de seus poros (ver item 4.2.2.2 - Potenciais SP de background). Porém experiências tem demonstrado que a contribuição devida a eletrofiltração é inexpressiva, sendo mais importantes os efeitos de argila (potencial de membrana), e os devido aos contatos de eletrólitos com diferentes concentrações (fenômenos vistos no item 4.2.2.2 referido). A figura representa uma situação típica, da coluna de lama do furo, frente a um leito permeável, o qual está intercalado entre leitos impermeáveis (leitos de folhelho).

A lama do furo à base de água doce mais betonita. O leito permeável, contendo eletrólito natural, por exemplo solução de NaCl.

Os fenômenos eletroquímicos que ocorrem nessas condições são explicados da seguinte forma:

- Fluxos da corrente elétrica devido forças eletro-motrizes (f.e.m.) espontaneamente originadas, fluem através da sequência: - lama no furo → filtrado da lama → água da formação → folhelho → lama no furo (ver parte média da figura).

- Não havendo diferenças de composição química entre a lama e o filtrado da lama (embora sejam diferentes suas resistividades), não haverá f.e.m. nesse trecho da sequência.

- No trecho da sequência filtrado da lama → água da formação, existem f.e.ms representadas por  $E_j$  (ver parte inferior da figura).  $E_j$  são devidas ao contato ou junção dos dois fluidos: - filtrado da lama e água da formação, que são eletrólitos com diferentes concentrações. Admitindo-se (como é comum em sondagem profunda), que a água da formação contenha NaCl dissolvido na forma de íons  $Na^+$  e  $Cl^-$ , esses íons tenderão a se difundirem.

Desse modo atravessam o contato entre os dois fluidos, no sentido do filtrado da lama. Porém  $Na^+$  é grande,

↳ com forte afinidade pela água, enquanto  $Cl^-$  é pequeno, com fraca afinidade. Conseqüentemente o íon  $Cl^-$  desloca-se com maior velocidade do que o íon  $Na^+$ , tornando o filtrado da lama carregado negativamente em

relação a água de formação. Essa por sua vez, torna-se positivamente carregada (relativamente ao filtrado da lama). Dessa forma originam-se as f.e.ms  $E_j$  nesse trecho da sequência.

- No trecho água da formação  $\rightarrow$  folhelho  $\rightarrow$  lama, os dois fluidos (água da formação e a lama) estão separados por folhelho. O folhelho devido a estrutura de constituição própria das argilas, contém camadas de oxigênio incompletamente neutralizadas, portanto carregadas negativamente. Assim partículas de folhelho favorecem a passagem dos íons  $Na^+$ , impedindo ou retardando a passagem dos íons  $Cl^-$ . Consequentemente originam-se as f.e.ms representadas por  $E_m$  nessa parte da sequência (ver parte inferior da figura).

O circuito é resultante das f.e.ms  $E_j + E_m$ , sendo fechado através da lama, no furo. Os volumes das soluções envolvidas nesses fenômenos são muito grande e as correntes devidas às migrações dos íons são de pequena grandeza (poucos miliampéres). Por isso as concentrações permanecerão praticamente inalteradas, e as f.e.ms constantes.

Desse modo o potencial medido pelo eletrodo M colocado na posição  $M_2$  será menor que o potencial medido na posição  $M_1$  (ver parte inferior da figura). A diferença será a queda ohmica do fluxo de corrente, ao longo da distância entre os pontos  $M_1$  e  $M_2$  na coluna de lama. A curva do registro do potencial SP, infletirá para esquerda (ver a parte média da figura, no seu lado esquerdo).

O deslocamento para esquerda da curva SP será gradual, tendendo a igualar a soma  $E_j + E_m = SP$  estático

Se imaginarmos isolamentos (idealizados), de modo a separar os potenciais positivos e negativos de um e outro lado desses isolamentos, (ver a figura na sua parte média e inferior), a curva SP seria constituída por segmentos retilíneos. O afastamento SP estático, seria o que se denomina o potencial espontâneo estático. A "curva" assim idealizada é a "curva" do potencial estático.

No caso em que o leito permeável fosse constituído por areia desprovida de cimento ("areia limpa"), e tivesse uma espessura grande,

a curva SP tenderia a forma da "curva" do SP estático (ideal).

Observa-se que o potencial SP é um fenômeno originado somente das diferenças de salinidade dos dois fluidos em contato ( da lama e da água da formação) e da estrutura das argilas.

As relações das inflexões da curva SP com a permeabilidade (ou com a porosidade) são devidas a fatores indiretos, como se verá mais adiante.

Se a lama fosse a base de água salgada, ela seria fortemente condutiva, e assim os pontos próximos ao longo da coluna da lama, estariam ligados em curto circuito, não havendo quedas ôhmicas entre eles. Desse modo a curva tenderia a se aplainar.

Se a lama, ainda for resistiva, porém com maior condutividade do que a água das formações, os picos poderão ter polaridade invertida. Isso pode acontecer com arenitos contendo água doce, quando a sondagem for com lama de baixa resistividade.

Por razões semelhantes arenitos com menor, ou maior salinidade, darão picos respectivamente, com menor ou maior amplitude.

Se a lama fosse a base de óleo, ela seria isolante, impedindo o fluxo de corrente, não havendo portanto registro da curva SP.

4.8.4-3 Potencial estático da curva SP e resistividade da água da formação (  $\int$  água da formação) =  $R_w$  (notação usual na literatura especializada)

Pode ser demonstrado ( em termodinâmica), que no caso em que a atividade eletroquímica da água da formação, seja devida à presença de NaCl, que:

$$E_M = k_1 \log_{10} \frac{C(\text{água da formação})}{C(\text{filtrado da lama})}$$

$$E_j = K_2 \log_{10} \frac{C(\text{água da formação})}{C(\text{filtrado da lama})}$$

sendo : C(água da formação) - Concentração de NaCl na água da formação.

$C(\text{filtrado da lama})$  - Concentração de NaCl no filtrado da lama.

$K_1$  e  $K_2$  - Constantes que dependem da temperatura, da litologia e relacionadas, respectivamente, ao potencial de membrana e ao de junção dos dois fluidos.

Assim nas condições supostas:

$$SP \text{ Estático} = E_M + E_J = K \cdot \log_{10} \frac{C(\text{água da formação})}{C(\text{filtrado da lama})}$$

Na prática :

$$\frac{C(a.f.)}{C(\text{filt.lama})} = \frac{\text{Atividade eletroquímica da água da formação}}{\text{Atividade eletroquímica do filtrado da lama}}$$

Tendo-se, nas condições supostas:

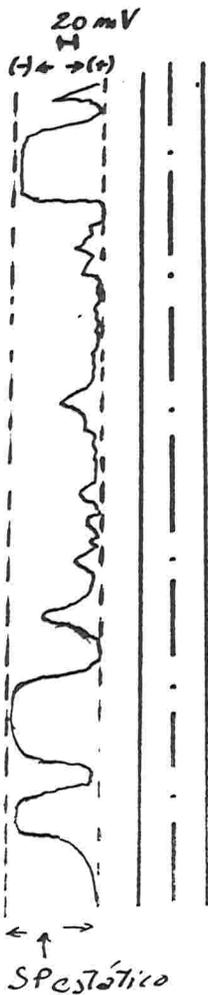
$$SP \text{ Estático} = K \cdot \log_{10} \frac{\int \text{filtrado da lama}}{\int \text{água da formação}} ; \text{ na literatura espe-}$$

*cializada*  $\int \text{filtrado da lama}$  é anotada como  $R_{mf}$

O valor de  $K$  é dado por tabelas para diferentes rochas, corrigindo-se para a temperatura na formação.

A figura a seguir representa uma perfilagem SP numa sondagem atravessando uma sequência arenosa e de folhelho, em que se tenha condições aproximadas das ideais admitidas.

Nessas condições :



- Pelas amplitudes da curva SP pode-se estimar a linha representativa base dos folhelhos, e a linha correspondendo aos arenitos limpos. Desse modo avalia-se o valor do SP estático.
- Conhecendo-se as características da lama utilizada na sondagem, tem-se o valor de  $\rho$  (filtrado da lama)
- Na fórmula anterior, a única incógnita será a resistividade da água da formação  $\rho$  (água da formação), a qual poderá ser então determinada. Esse é o fundamento das interpretações quantitativas, no sentido de determinar a resistividade da água da formação e consequentemente de sua salinidade.

Na literatura especializada são dadas as notações:

$$\rho_{\text{(filtrado da lama)}} = R_m \rho$$

$$\rho_{\text{(água da formação)}} = R_w$$

#### 4.8.4-4 Fatores que influenciam na forma e na amplitude da curva SP.

Além das estruturas das argilas e relações de salinidade entre a lama e a água das formações, outros fatores influenciam, indiretamente, na forma da curva SP.

##### a) Efeitos de folhelhos nos intertícios da formação permeável:

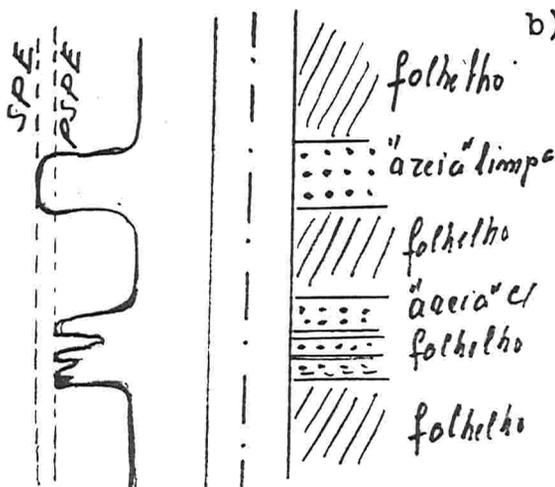
- A presença de argila no leito permeável, restringe os movimentos dos íons  $\text{Cl}^-$ , auxiliando ao mesmo tempo os movimentos dos íons  $\text{Na}^+$ , reduzindo assim as f.e.ms  $E_J$ .

Numa determinada porcentagem de argila,  $E_J$  torna-se igual a zero ( $E_J = 0$ ), e então o SP estático =  $E_M$ .

Aumentando o teor em argila além dessa porcentagem no leito permeável, resultará num  $E_J$  oposto à  $E_M$  frente ao leito permeável, diminuindo a inflexão. No limite de 100% de folhe-

lho, ter-se-á  $E_J = -E_M$  e o SP estático =  $E_M - E_J = \text{Zero}$ , não havendo inflexão.

Leitos permeáveis ("areias") contendo algum teor de argila, darão menor inflexão na curva SP, indicando o que se denomina um pseudo SP estático (P.SP.E.), menor que o SP estático (SP.E.).



b) - Presença de óleo na formação permeável contendo folhelho.

- Presença de óleo, incrementa o efeito do folhelho, porque restringe os caminhos dos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , obrigando-os a passarem mais junto às partículas de folhelho.

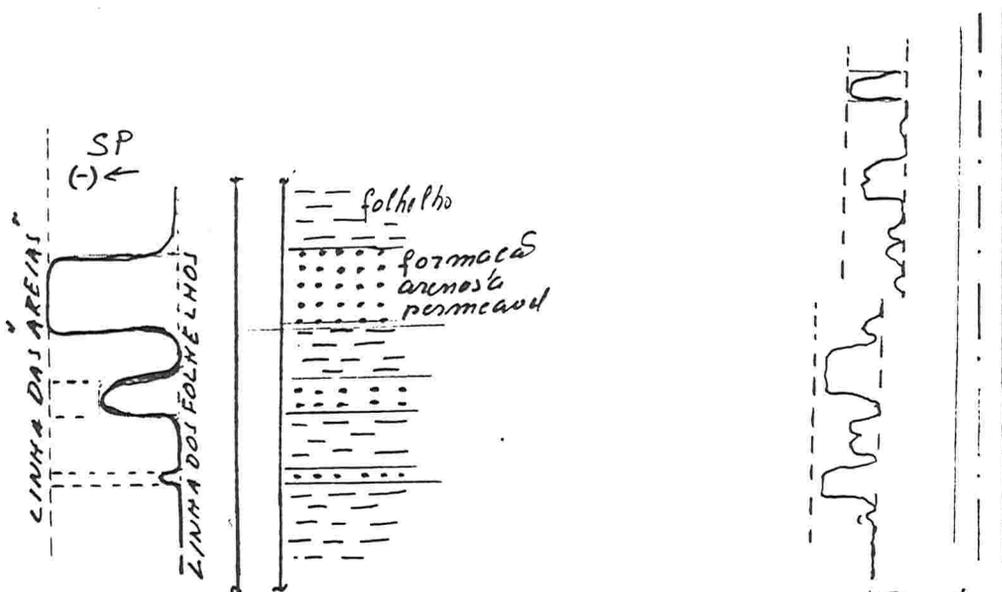
c) Efeito da porosidade da formação permeável, contendo folhelho.

Duas "areias" 100% saturadas com água da formação, contendo o mesmo montante em volume de folhelho (de mesma composição mineralógica); se as atividades da lama e da água da formação são as mesmas, o leito de "areia" com menor porosidade (maior granulometria), mostrará menor pseudo potencial espontâneo (P.SP. estático). Porque sendo menor a porosidade na parte arenosa, serão mais restritos os caminhos do íon  $\text{Cl}^-$ , obrigando-o a passar, relativamente, mais junto ou através das partículas de argila (à semelhança como acontece com a presença de óleo).

d) Efeitos da espessura do leito permeável, do diâmetro do furo, da profundidade da invasão da lama, e de variações no condicionamento da lama.

Pelo fato da corrente circular não somente em oposição ao leito permeável, a curva SP não se apresenta como segmentos retilíneos (como seria no SP estático). O leito permeável é delineado aproximadamente, no âmbito da inflexão. Assim sendo maior a espessura do leito, melhor o mesmo será delineado. Devido a maior influência relativa das quedas Ohmicas devido as resistências fronteiras aos leitos adjacentes, o pseudo SP estático será menor para os leitos finos.

O maior diâmetro do furo tende a aplinar a curva SP. Maior invasão da lama tem o mesmo efeito que o aumento do diâmetro do furo. Qualquer variação do condicionamento da lama, trará como consequência, deslocamentos para direita ou esquerda da linha base dos folhelhos, e das amplitudes dos picos. Esse fato explica deslocamentos relativos observados nos registros da curva SP em diferentes segmentos do furo, quando a perfilagem desses segmentos foram feitas em dias diferentes.

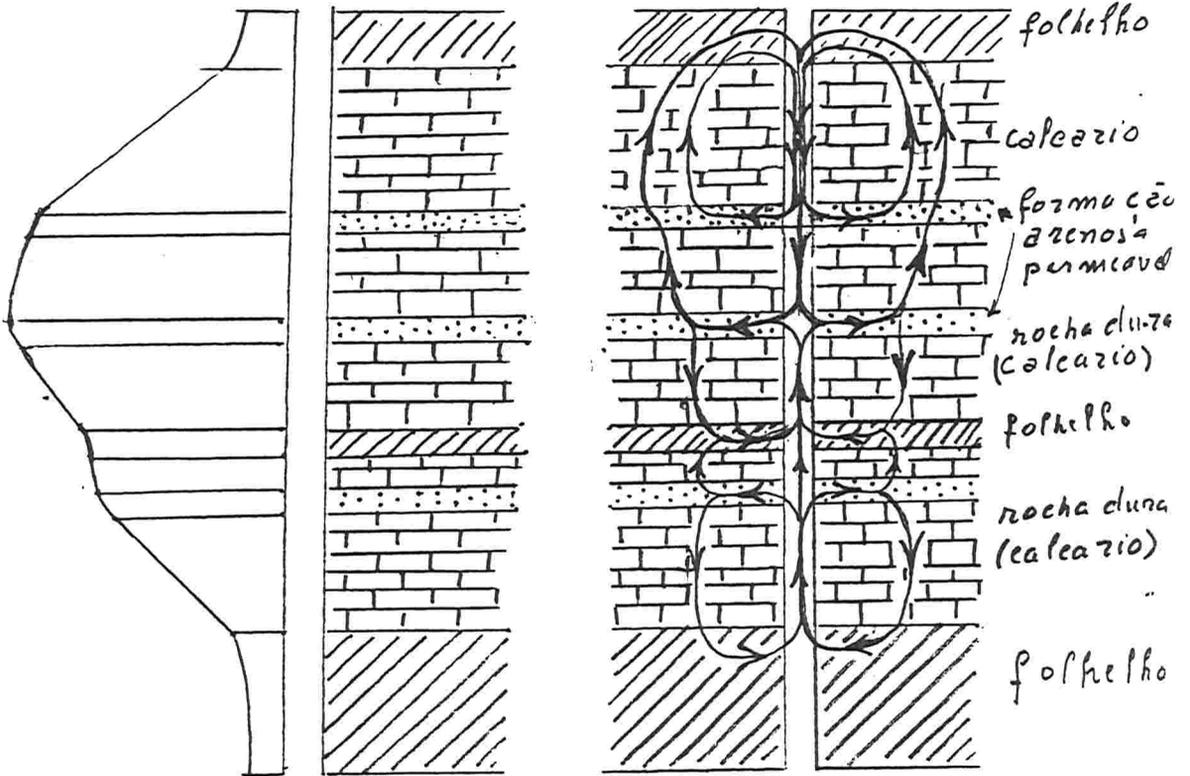


*Influência da espessura dos leitos permeáveis*

*Deslocamento da linha de base de um registro SP, por efeito de mudança no condicionamento da lama, por ocasião da perfilagem em cada segmento do furo.*

4.8.4-5 Forma da curva SP numa sequência de rochas "duras" (calcários, diabásios, etc.), com intercalações de leitos arenosos permeáveis, e de folhelhos.

Essas formações apresentam leitos espessos de alta resistividade (rochas duras), e intercalações de leitos condutivos. Em geral, os leitos permeáveis não são adjacentes aos leitos de folhelho, sendo separados por consideráveis espessuras de rochas duras.



Curva SP ao longo da sequência.

(Fig. de Schlumberger Doc. nº 8 - 1975-modificada)

Fluxos de corrente numa sequência de rochas duras com intercalações de folhelho e leitos arenosos permeáveis.

Conforme mostra a figura, somente ocorrem forças eletro-motrizes nos leitos permeáveis arenosos e nos leitos contendo folhelhos. Essas f.e.ms. serão respectivamente, no sentido para o interior da formação, e no sentido da formação para o furo, portanto de sentidos contrários.

As correntes elétricas devidas às f.e.ms. frente aos leitos arenosos, não poderão atravessar os leitos da formação dura, junto às paredes do furo, porque em seções pequenas as resistências serão muito grandes. Por isso elas penetram fundo no leito arenoso, podendo assim atravessar a espessura de rocha dura. Porque maiores seções transversais darão menores resistências.

Após atravessar a espessura de rocha dura, se a corrente encontrar um leito de folhelho, ela retornará ao furo. Assim o circuito será fechado através da lama no interior do furo. No caso em que a corrente após atravessar um segmento de rocha dura, encontrar outro leito arenoso, ela não poderá retornar, pelo mesmo, para o furo. Porque será de sentido contrário as f.e.ms. desse leito. Nesta última condição, ela se somará com a corrente devida às f.e.ms. desse segundo leito arenoso, atravessará outro segmento de rocha dura (e assim por diante). Encontrando um leito de folhelho retornará ao furo. Assim fechando o circuito através da lama do mesmo.

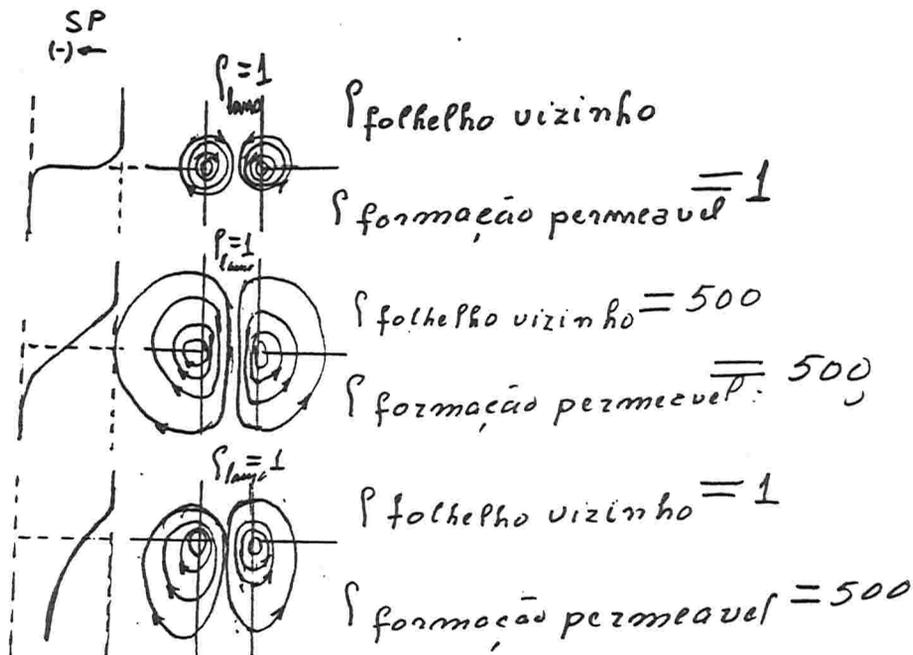
No registro do potencial espontâneo na coluna de lama, (na curva SP), em frente à um segmento de rocha dura, a curva se apresentará como segmentos de reta inclinados. Porque não havendo acréscimos ou decréscimos de f.e.ms. nesses segmentos, haverá um gradiente constante de quedas ôhmicas. Em frente de intercalações de leitos permeáveis arenosos, a curva será convexa para esquerda, por causa dos decréscimos de f.e.ms. nesses intervalos.

Em frente as intercalações de folhelho, a curva se apresentará concava por razão similar (por acréscimos positivos de f.e.ms.)

Assim nessas formações (formações duras com intercalações de leitos arenosos e argilosos), a curva SP apresentar-se-á sinuosa

sem delimitar com nitidez os contatos dos leitos.

4.8.4-6 Influência na forma e na amplitude da curva SP, das relações das resistividades da lama ( $\rho_{\text{lama}}$ ), dos leitos argilosos vizinhos ( $\rho_{\text{vizinhos}}$ ) e do leito permeável arenoso ( $\rho_{\text{formação permeável}}$ ) intercalado.



Efeitos na forma e na amplitude da curva SP frente a um leito permeável, relacionados às resistividades das formações em contato, e da lama.

Fig. reproduzida de Iternberg S. 1971

Por várias razões é possível que a formação no conjunto, tenha maior resistividade do que a lama, mesmo que a água da formação tenha menor resistividade do que a lama. Por exemplo por efeito de pequena porosidade efetiva, ou pela presença de óleo na formação juntamente com água.

Como mostra a figura:

- Quando :  $\rho_{\text{formação permeável}} = \rho_{\text{folhelho vizinho}} = \rho_{\text{lama}}$   
os fluxos de corrente do SP, distribuem-se uniformemente, bem junto aos contatos, coluna de lama-leito permeável-leito vizinho.

Consequentemente a curva SP tem forte inflexão, e sua amplitude tende à do SP estático.

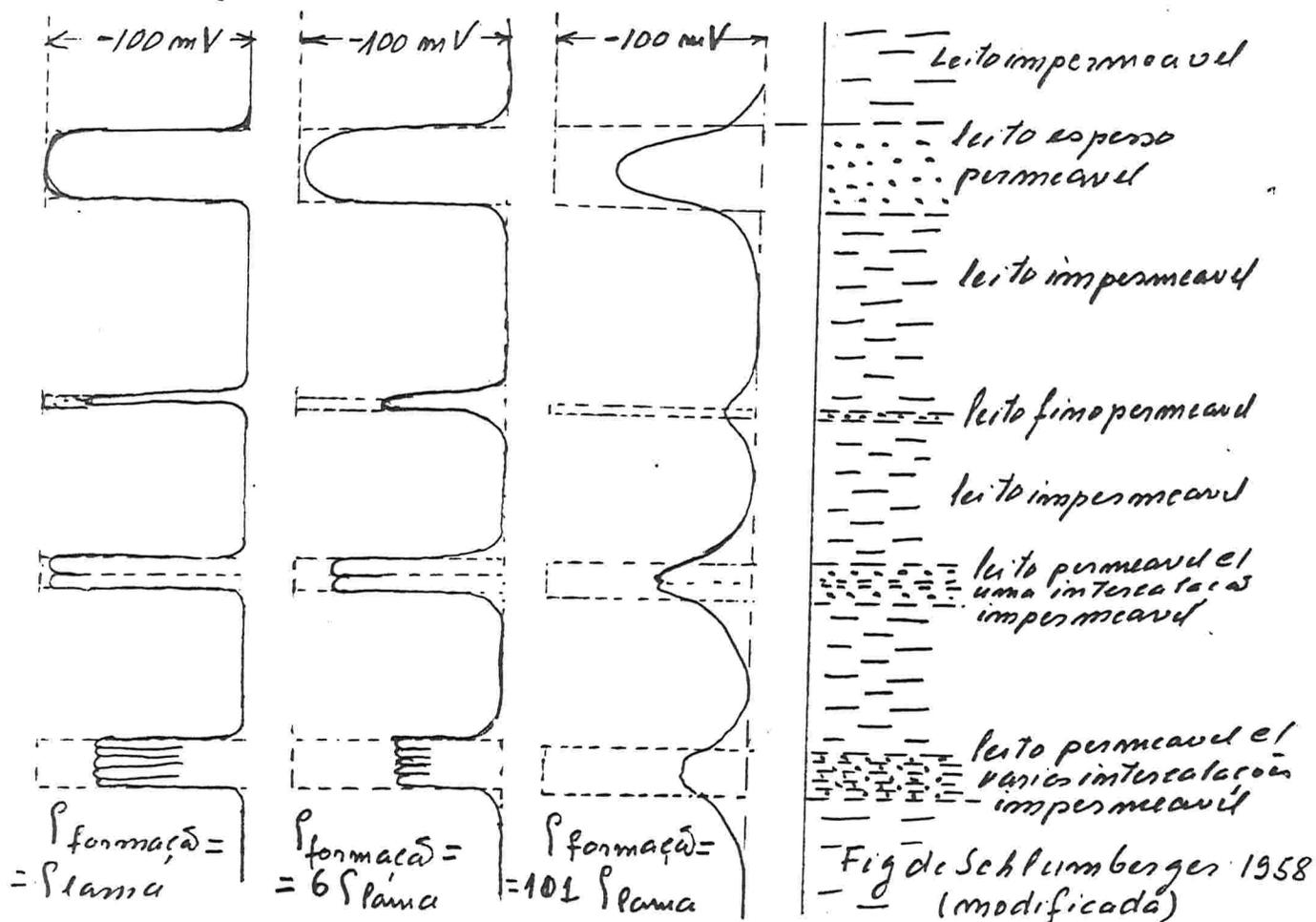
- Quando:

$\rho_{\text{formação permeável}} = \rho_{\text{folhelho vizinho}} > \rho_{\text{lama}}$ , os fluxos de corrente do SP deformam-se, tendendo a penetrar mais nas duas formações igualmente. Consequentemente diminui a inflexão da curva SP no contato, delineando com menor nitidez o contato.

- Quando:

$\rho_{\text{formação permeável}} > \rho_{\text{folhelho vizinho}} = \rho_{\text{lama}}$ ; a inflexão e a amplitude da curva SP diminuem, com conseqüente menor definição do leito permeável.

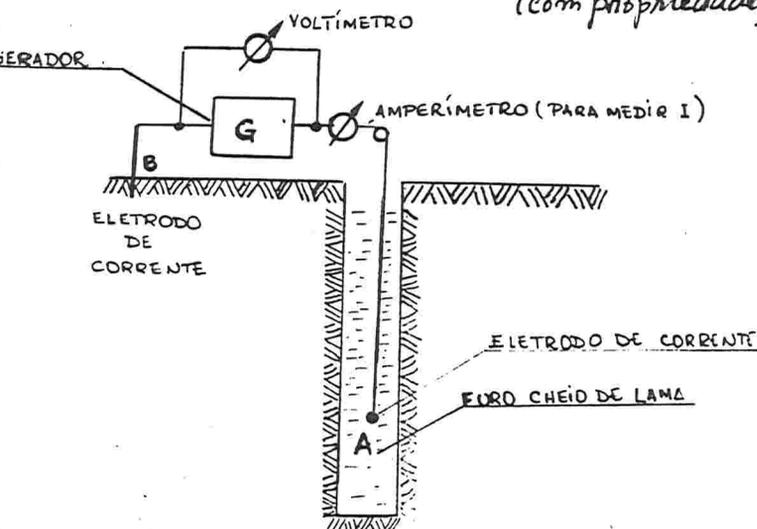
A figura seguinte representa curvas teóricas mostrando efeitos simultâneos na curva SP: de diferenças de espessuras dos leitos; e de resistividades da lama e da formação.



## 4.8.5 - Perfilagem de resistividade

Ver diversificações dessas técnicas, preliminarmente mencionadas no item 4.8.2 .

4.8.5.1 - Perfilagem de resistividade com um único eletrodo, ou com sonda mono-eletródica. Também *é denominada (com propriedade), perfilagem de Resistências, ou perfil resistência.*



É o mais simples dispositivo para perfilar resistividades. Algumas vezes é utilizado em perfuração para pesquisa de água sub-terrânea.

O circuito é muito semelhante ao utilizado para perfilar potencial espontâneo, com as diferenças da existência de um gerador para

fornecer corrente, e as medidas serem da intensidade de corrente, por intermédio de um amperímetro.

Sendo mantida constante a diferença de potencial na saída do gerador, as variações de resistência no circuito estarão relacionadas às amperagens medidas  $I$ .

A resistência ohmica total do circuito  $R$ , será a soma das seguintes resistências parciais.

$R_{\text{cabo}}$  = resistências no cabo, no gerador, e no equipamento de medida.

$R_B$  = resistência no contato do eletrodo de superfície, B.

$R_{\text{terreno}}$  = resistências no terreno, entre os pontos A e B

$R_A$  = resistências no eletrodo A, as quais compõe-se de duas parcelas:

- Resistências no contato entre o eletrodo A e o fluido de sondagem (lama)

- Resistências no terreno, num volume relativamente pequeno, nas proximidades do eletrodo A.

-  $R_{\text{cabo}}$  e  $R_B$  permanecerão constantes durante a perfilagem.

-  $R_{\text{terreno}}$  serão variáveis. Porém sendo a secção condutora da corrente muito grande, serão pequenas as resistências  $R_{\text{terreno}}$ , e serão insignificantes suas variações.

- A parcela das resistências  $R_A$ , devida ao contato entre o eletrodo A e a lama, permanecerá constante.

- Por outro lado,  $R_A$  variará sensivelmente, por efeito das resistências nas proximidades das paredes do furo (junto ao eletrodo A), que serão variáveis quando o eletrodo A é movido do furo, na operação de perfilar.

Assim, a variação sensível da resistência total dependerá somente, das variações das resistências nos pequenos volumes de rocha, em torno do eletrodo A.

Desse modo perfilando-se as variações da corrente I quando o eletrodo desloca-se ao longo do comprimento do furo, obtém-se indiretamente variações das resistências junto as paredes do furo.

Essas serão devidas às variações das resistividades aparentes das formações atravessadas.

Esse dispositivo assinala com muita nitidez os contatos das formações. Porém a penetração, isto é, o alcance da investigação lateralmente ao furo, é pequeno, sendo da ordem de grandeza de seu diâmetro. Conseqüentemente, as medidas são muito influenciadas pelo filtrado da lama nas formações. São pouco representativas das verdadeiras resistividades das formações.

#### 4.8.5.2 - Perfilagem de resistividade com dispositivos convencionais

##### 4.8.5.2.1 - Generalidades e conceituação dos dispositivos convencionais. (dispositivo normal e dispositivo lateral)

Na perfilagem de resistividade com os dispositivos convencionais, e com outros dispositivos especiais, pesquisa-se, registrando-se continuamente, as variações do parâmetro

$$\rho_{ap.} = K \frac{\Delta V}{I} = K.R, \text{ já definido no item } \overset{4.4.2}{\text{métodos de}}$$

resistividade de superfície. A pesquisa é lateralmente às paredes do furo ao longo de seu comprimento. Trata-se, portanto de uma pesquisa lateral, como foi definida para os métodos de superfície.

No caso de perfilagem, os valores de  $\rho_{ap.}$  são representativos do espaço que envolve os eletrodos no furo, enquanto que nos métodos de superfície  $\rho_{ap.}$  refere-se ao semi-espaço abaixo dos eletrodos no terreno.

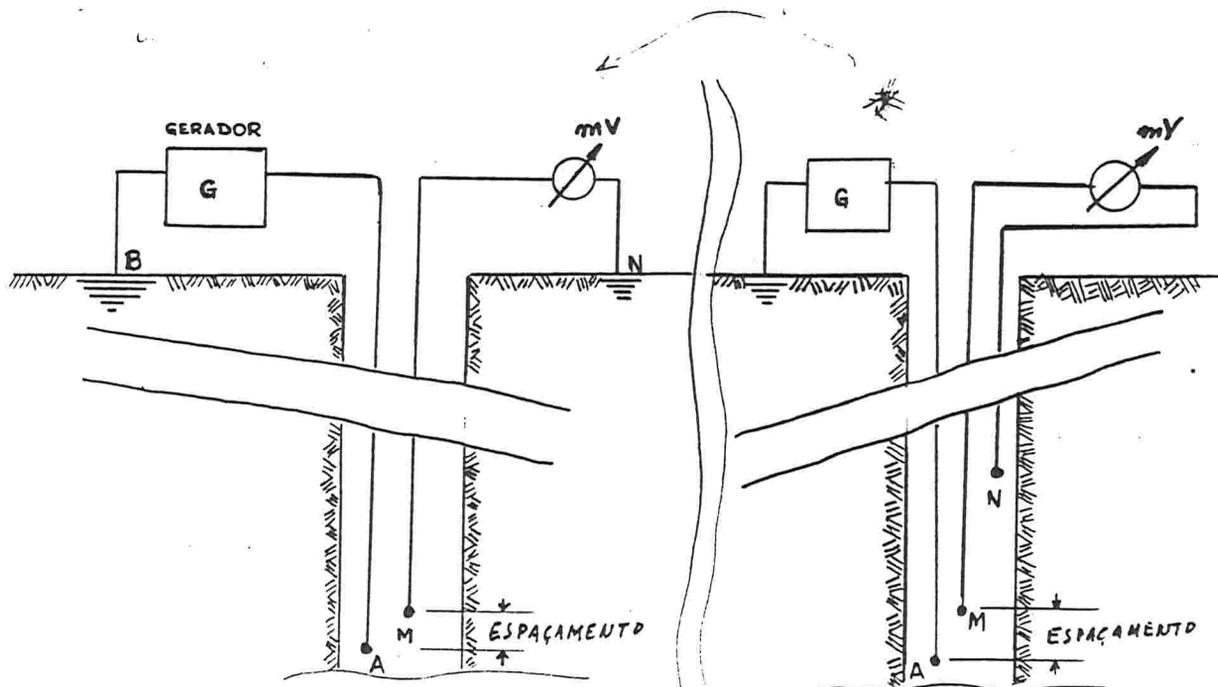
Entre os muitos dispositivos de eletrodos utilizados em perfilagem de resistividade, os mais comuns são os chamados convencionais. Essa denominação compreende dois tipos :

a) Dispositivo normal, ou sonda normal, também referido como sonda do potencial;

b) Dispositivo lateral, ou sonda lateral, também referido como sonda do gradiente.

a) Dispositivo normal -

Os circuitos para o dispositivo normal, são os representados nas seguintes figuras :



*Circuito para a perfilação de resistividade. Dispositivo convencional normal - teórico*

*Circuito para perfilação de resistividade. Dispositivo convencional - normal prático*

*Figs conf. Schlumberger Doc nº 8 - 1958*

A figura da esquerda representa o dispositivo normal teórico.

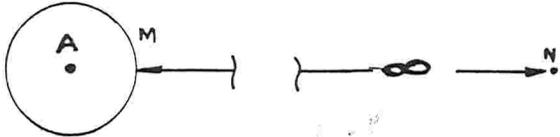
A figura da direita representa o circuito comumente utilizado na prática. Difere do teórico, pela colocação do segundo eletrodo de potencial N no interior do furo, à uma distância  $\overline{MN}$  maior do que doze vezes a distância  $\overline{AM}$ , isto é  $\overline{MN} > 12 \cdot \overline{AM}$ .

Essa modificação traz vantagens técnicas, no sentido de minimizar efeitos da indução nos cabos condutores. Desde que convenientemente modificado o fator geométrico K do cálculo do parâmetro  $\rho_{ap}$ , essa diferença entre os circuitos teórico e prático, não ocasiona diferenças sensíveis. A distância  $\overline{MN} > 12 \cdot \overline{AM}$  pode ser considerada muito grande, produzindo o mesmo resultado como se o eletrodo N estivesse instalado na superfície.

Consideremos o circuito teórico ( ver figura da esquerda) :

- Os valores  $\Delta V$  dados pelo voltímetro instalados entre M e N, representarão diferenças de potencial entre os pontos ocupados pelo eletrodo M no interior do furo e o potencial da terra no ponto N da superfície, este último instalado a uma distância praticamente infi-

nita dos eletrodos de corrente A e B. Portanto  $\Delta V$  serão os potenciais absolutos dos pontos no interior do furo, produzidos pelas forças eletro-motrizes devidas ao fornecimento de corrente através dos eletrodos de corrente A e B.



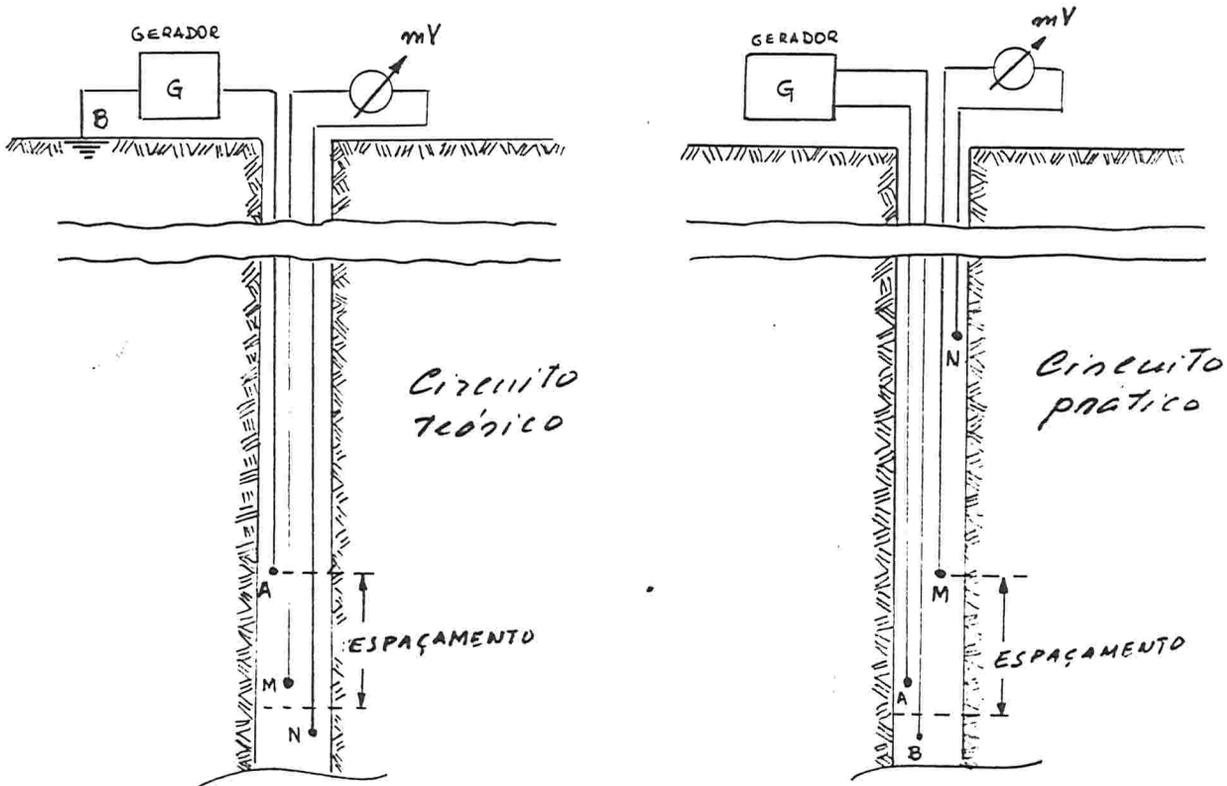
Se o terreno fosse homogêneo,  $\Delta V$  representaria o potencial numa superfície esférica de raio  $\overline{AM}$  em torno do eletrodo A, e a resistividade do terreno seria igual

$$\rho_{ap.} = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad \text{sendo } K = 4 \cdot \pi \cdot \overline{AM} \quad (\text{deduzido com o mesmo raciocínio visto no item 4.4.2}).$$

Variações de  $\rho_{ap.}$  ao longo do comprimento do furo, serão devidas às heterogeneidades das formações, podendo ser interpretadas da mesma maneira como nos métodos de resistividade no terreno.

b) Dispositivo lateral :

*Dispositivo para perfilação de resistividade lateral. Circuitos convencional-lateral. Figs. com Schlumberger Doc. n.º 8 - 1958*



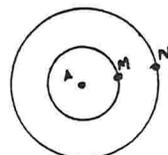
A figura da esquerda representa o dispositivo, e circuito teórico lateral.

A figura da direita representa o circuito dos dispositivos laterais mais utilizados na prática, devido vantagens técnicas.

Os dois circuitos equivalem-se devido ao chamado princípio de reciprocidade (já referido no item 4.4.4). Segundo esse princípio, os efeitos serão indiferentes quando trocadas, entre si, as posições dos eletrodos de corrente pelas posições dos eletrodos de potencial. Também a colocação do quarto eletrodo no interior do furo a uma distância relativamente muito grande, não ocasiona diferença sensível, como no caso de dispositivo normal.

Consideremos o dispositivo lateral teórico :

- Se o terreno fosse homogêneo,  $\Delta V$  representaria diferenças de potencial entre duas superfícies esféricas em torno do eletrodo de corrente A, com raios respectivamente, AM e AN.



A resistividade do terreno seria :

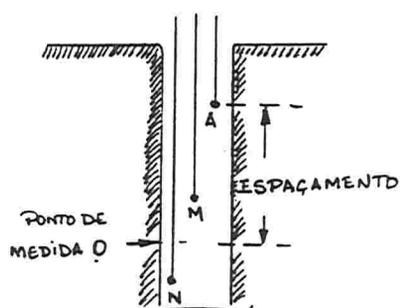
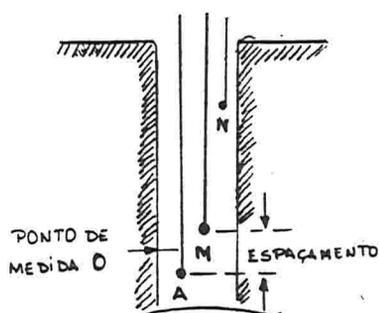
$$\rho_{ap.} = K \cdot \frac{\Delta V}{I}, \text{ sendo } K = 4 \cdot \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} ;$$

(deduzido com o mesmo raciocínio visto no item 4.4.2).

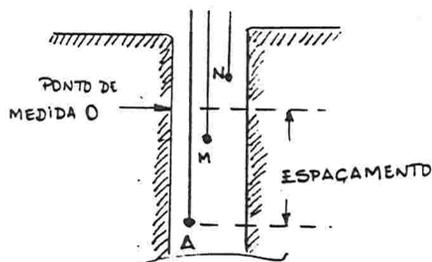
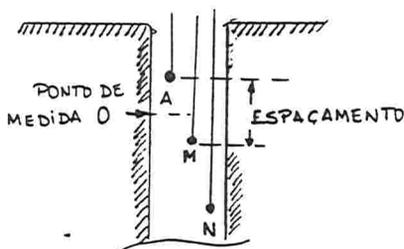
Sendo o terreno heterogêneo, variações de  $\rho_{ap.}$  poderão ser interpretadas de forma semelhante como na pesquisa em superfície, no terreno).

- Diversificação e características dos dispositivos normais e laterais utilizados comumente.

1º) Dispositivo normal pelo fundo ; Dispositivo lateral pelo fundo  
 fundo fundo



2º) Dispositivo normal pelo topo ; Dispositivo lateral pelo topo  
 topo



Em qualquer um dos casos, os dispositivos são caracterizados pelos espaçamentos figurados. Os pontos onde se considera representativa a medida, são os pontos denominados pontos de medida, O (assinalados nas figuras).

Como foi visto, ao serem abordados os métodos de resistividade na superfície do terreno, o conceito de ponto de medida em cada caso, é convencional (sendo um conceito adotado com restrições, por conveniência prática).

Os espaçamentos, (também com muitas restrições), são determinantes da profundidade lateral de investigação no furo.

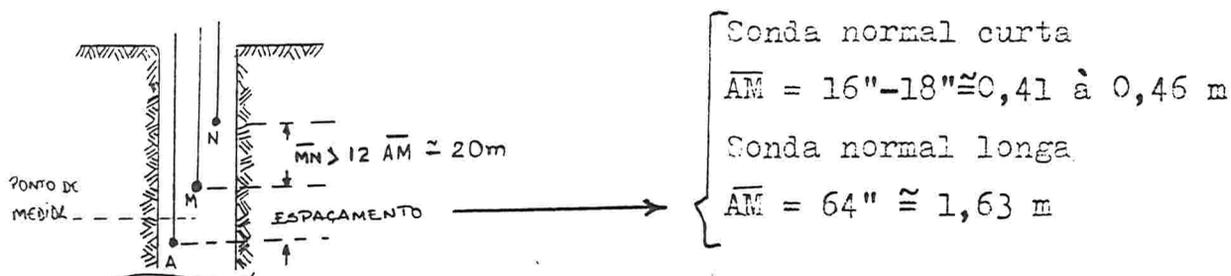
Com respeito à isso, veja o item 4.4.4.4, o qual trata da penetração no terreno, dos métodos de resistividade aplicados

na superfície.

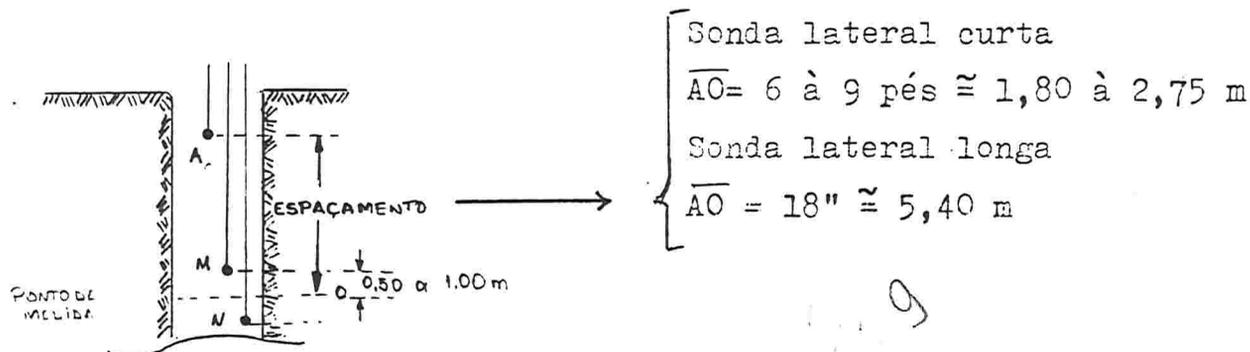
- Sonda normal curta; sonda normal longa
- Sonda lateral curta; sonda lateral longa

Essas denominações caracterizam os espaçamentos utilizados no uso comum dos dispositivos convencionais. O dimensionamento comumente utilizado, são os das figuras à seguir (conforme Schlumberger. DOC. nº 8-1958).

Sonda normal:



Sonda lateral:



A perfilagem é praticada comumente, perfilando-se duas ou mais curvas para resistividade, e uma curva de potencial espontâneo (SE).

- Profundidades de investigação (lateralmente ao furo), com os dispositivos convencionais de resistividade.

Como foi visto, ao serem abordados os métodos de resistividade no terreno ( em superfície) as profundidades de investigação dependem de muitos fatores ( ver item 4.4.4.4).

No caso de perfilagem, a profundidade de investigação dependerá da distribuição das resistividades, dos materiais do terreno em torno do furo, inclusive do fluido de perfuração que enche o furo ( do filtrado do mesmo, e do reboco nas paredes do furo).

Assim dependerá das litologias, texturas, estruturas, atitudes das formações; ainda da composição da lama de sondagem, e também do espaçamento dos eletrodos.

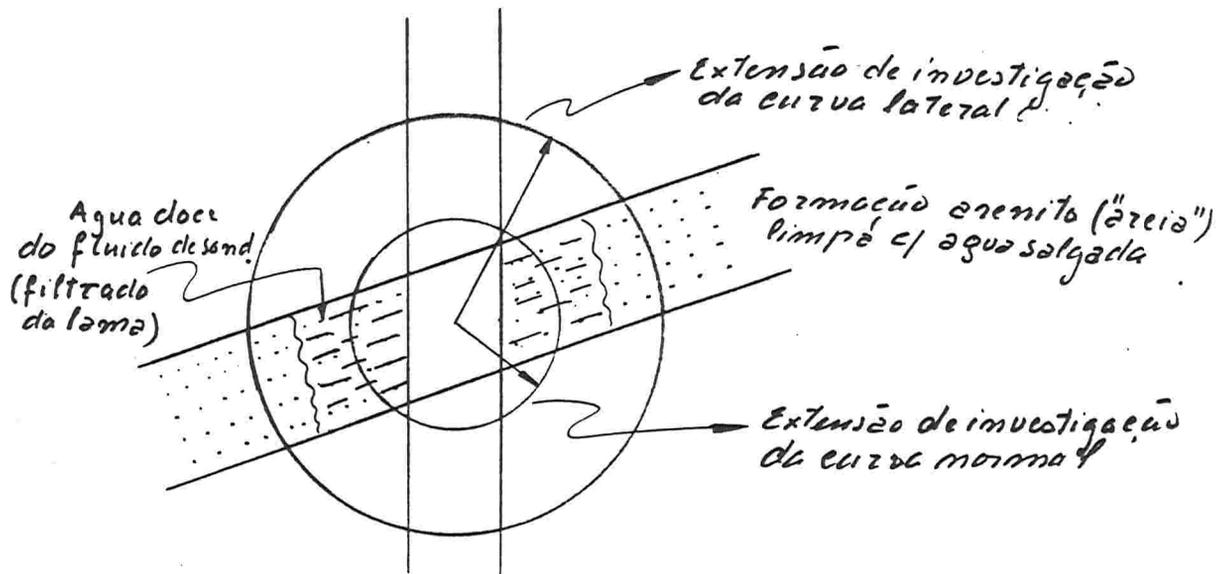
O espaçamento dos eletrodos, contribui com parcela ponderável na profundidade de investigação. Por esse motivo, é útil fazer-se estimativas da profundidade de investigação com base somente no espaçamento do dispositivo utilizado.

De modo geral admite-se :

- Para o dispositivo lateral : profundidade de investigação ou raio de investigação igual a seu espaçamento.
- Para o dispositivo normal : profundidade ou raio de investigação igual a duas vezes seu espaçamento AM.

Assim, a sonda normal terá um alcance da ordem de 1,00m à 3,00 metros ; a sonda lateral de 3,00 m à 5,00 metros.

As profundidades de penetração do filtrado da lama nas paredes do furo, afetam as medidas de  $\rho_{ap}$ , como mostra a figura a seguir:

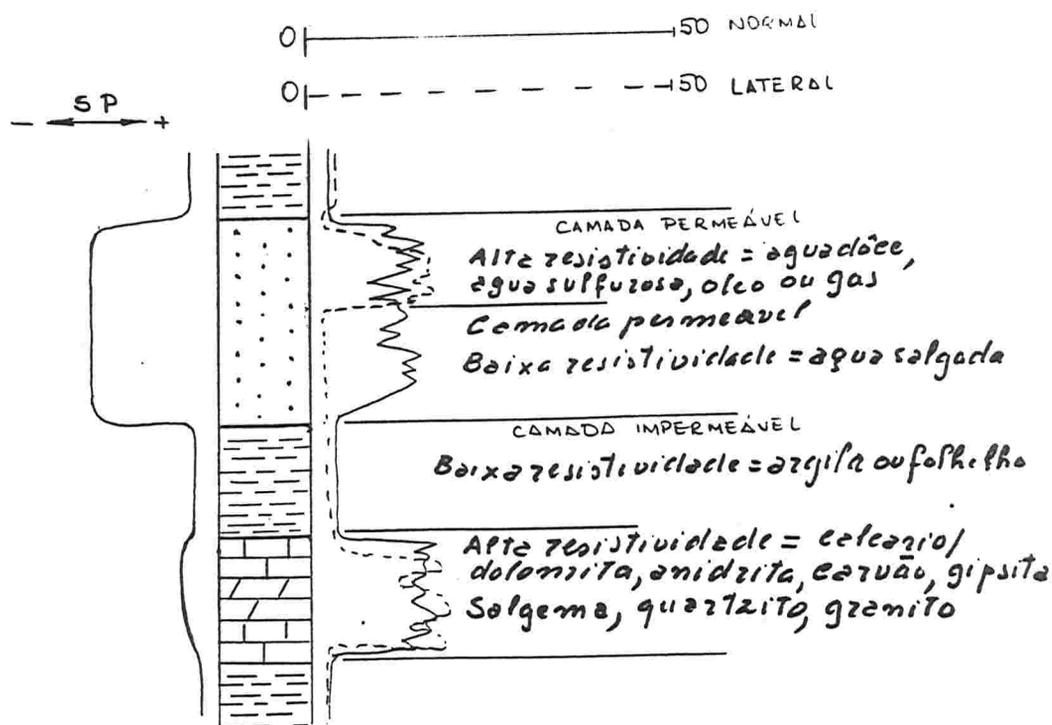


\*. Profundidade de investigação com os dispositivos convencionais de resistividade, em relação a zona invadida pelo filtrado da lama num leito permeável, contendo água salgada.

*Fig de Moore, C.A 1964*

4.8.5.3.4 - Fundamentos de interpretação das curvas de resistividades, perfiladas com dispositivos convencionais.

I- Curvas de resistividade convencionais e curva SF, numa sequência de leitos impermeáveis e de leitos permeáveis, contendo fluidos resistivos e condutivos. Sondagem com lama de água doce mais bentonita (lama resistiva). (Ver figura adiante)



Curvas do potencial espontâneo e de resistividade para diversos tipos de rocha e os fluidos nelas contidos  
Fig de Mooze, C.A 1964

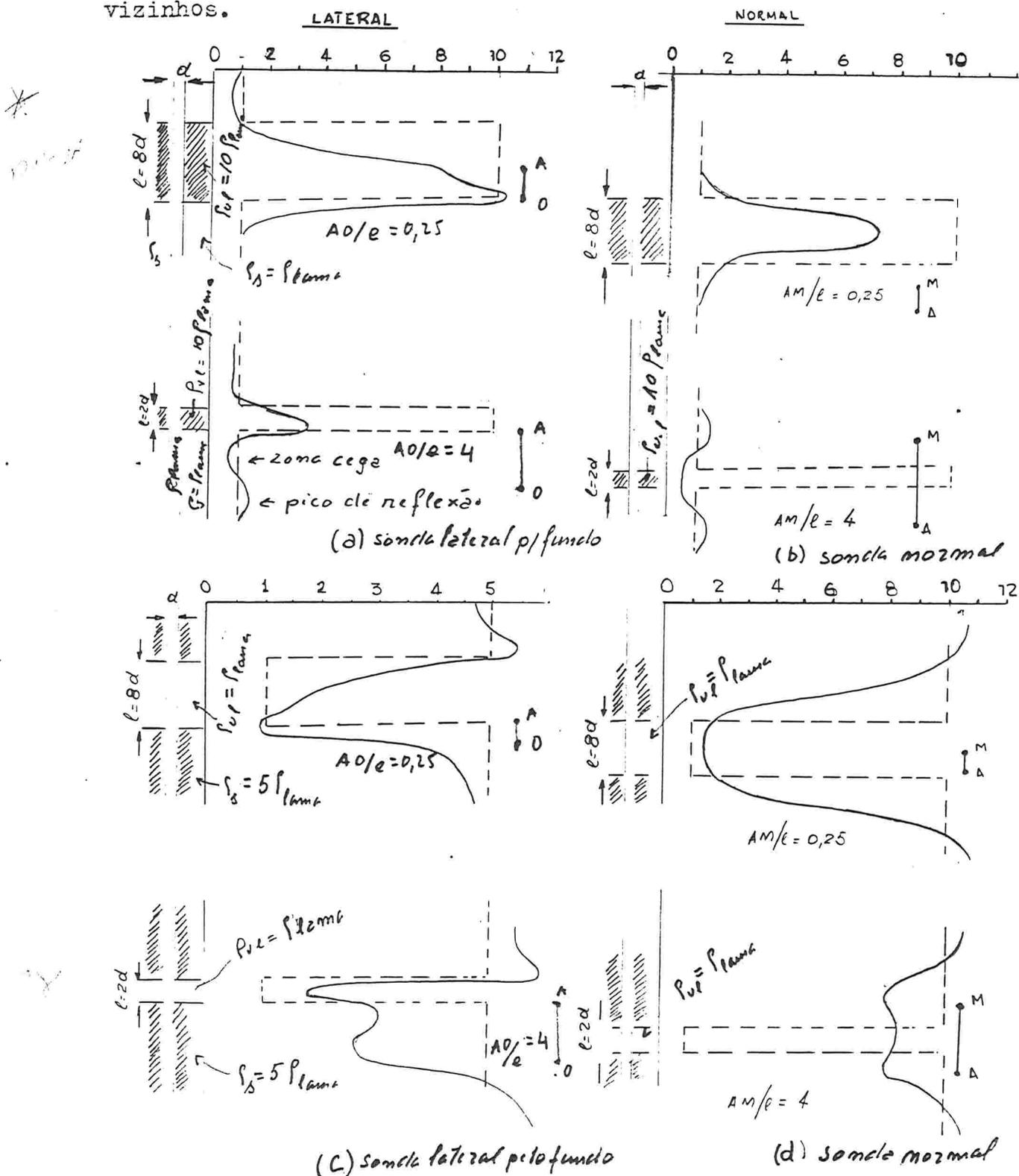
- Observar na figura:

- 1º) Distinção da sequência de leitos permeáveis dos de leitos impermeáveis, através da curva SP, e diferenciação dessa curva frente a rochas duras e de folhelho (impermeáveis).
- 2º) Diferenciação das curvas de resistividade frente a leitos de alta e de baixa resistividade.
- 3º) Na base da sequência permeável a curva de resistividade normal, mostra alta resistividade num leito contendo água salgada (de baixa resistividade), por efeito da invasão do filtrado da lama (de alta resistividade).

A curva de resistividade lateral, distingue esse leito mostrando baixa resistividade, porque seu raio de investigação é maior do que o de uma curva normal, sendo conseqüentemente, menos influenciada pela zona invadida do filtrado da lama.

4º) A boa diferenciação do leito de rocha dura de grande espessura na sequência impermeável, por ambas as curvas de resistividade, em relação aos leitos de folhelho ( de baixa resistividade).

II- Forma das curvas de resistividade (normal e lateral) frente a leitos intercalados, mais resistivos ou mais condutivos <sup>do</sup> que os leitos vizinhos.



Curvas de resistividade para formações homogêneas:

(a, b) de alta resistividade Fig de Itenberg, S 1971

(c, d) " baixa "

$\rho_{1,2}$  = resistividade verdadeira do leito ;  $\rho_3$  = resistividade do leito vizinho

A figura ( página anterior) representa curvas obtidas por procedimentos experimentais e teóricos.

Observar :

1º- Curva de resistividade normal frente a um leito mais resistivo:

- Caso (  $e > \overline{AM}$  - parte b superior da figura)

A espessura do leito  $e$  é maior do que o espaçamento  $\overline{AM}$  do dispositivo - curva simétrica deslocando-se para direita, no sentido da maior resistividade.

- Caso (  $e < \overline{AM}$  - parte b inferior da figura)

A espessura do leito  $e$  é menor do que o espaçamento  $\overline{AM}$  do dispositivo - curva simétrica, com dois pequenos picos para direita além dos contatos, e um pico maior (invertido), no sentido da esquerda (de menor resistividade). O mínimo (negativo) é no centro do leito.

2º- Curva de resistividade lateral frente à um leito mais resistivo.

- Caso (  $e > \overline{OA}$  - parte a superior da figura)

A espessura do leito é maior do que o espaçamento do dispositivo- curva assimétrica, com um pico no sentido da direita (da maior resistividade), na base do leito resistivo.

- Caso (  $e < \overline{OA}$  - parte a inferior da figura)

A espessura é menor do que o espaçamento - curva assimétrica, com um pico de moderada grandeza no sentido da maior resistividade na base do leito resistivo, seguido de uma depressão (chamada zona cega)

para esquerda, abaixo do contato. Mais um segundo pico, menor e chamado pico de reflexão.

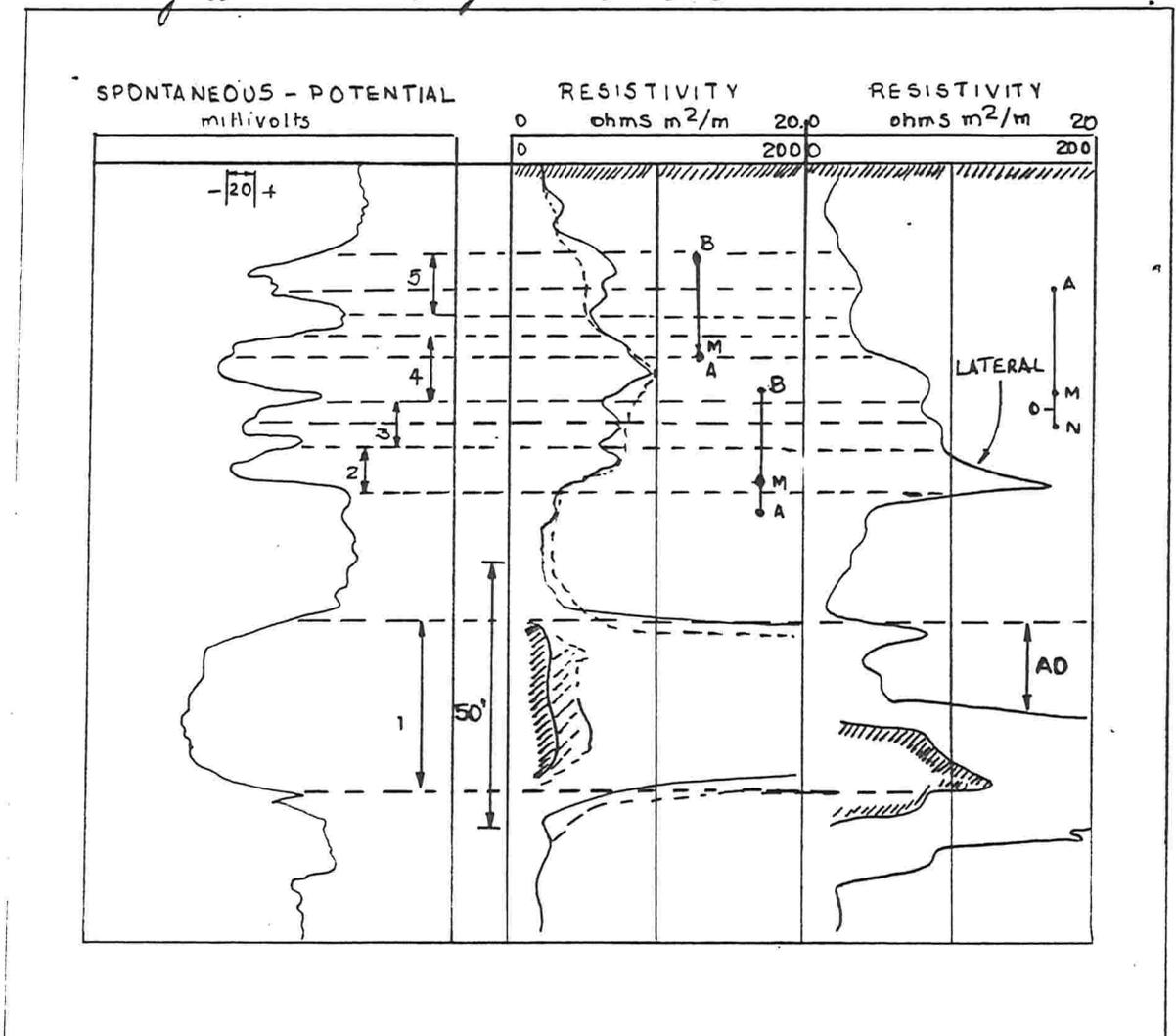
3º- Curvas de resistividade normal e lateral frente a leitos mais condutivos que os adjacentes ( ver partes c e d da figura).

Em cada caso as curvas são de forma recíprocas, em relação aos casos de leito mais resistivo.

4º- Curvas normais serão aplainadas, não indicando presença de leitos resistivos(ou condutivos), para espessuras críticas em relação ao espaçamento  $\overline{AM}$  dos eletrodos, nos casos limites entre os casos de espessura do leito nitidamente maior ou menor do que  $\overline{AM}$

III- Feições típicas das curvas de resistividade convencionais e da curva SP numa sucessão de folhelhos e leitos arenosos mais resistivos.

*Fig de Schlumberger Doc 8 1958*



### Interpretação das curvas figuradas:

- Leito 1 , leito espesso mais resistivo do que os leitos de folhelho adjacentes- Ambas as curvas normais tendem à simetria indicando maior resistividade. Curva lateral tem pico máximo deslocado para a base do leito resistivo (com deslocamento igual ao espaçamento AO do dispositivo).
- Leitos 2,3,4, e 5 - Quatro leitos permeáveis indicados pela curva SP. Nessa curva pequenas depressões a , b e c indicam pequenas intercalações de folhelho.

As espessuras dos leitos permeáveis 2,3,4 e 5 são pouco maiores do que o espaçamento da curva normal curta, sendo pouco nítidas as delimitações desses leitos nessa curva.

Intercalações a,b, e c não são marcadas nessa curva (normal curta).

Para a curva normal longa, não há distinção dos leitos 2,3 e 5 , marcando somente o leito 4. Isso significa que o leito 4 é pouco mais espesso que os leitos 2,3 e 5. Estes últimos tem espessuras da ordem de grandeza do espaçamento da curva normal longa.

- Curva lateral - O espaçamento do dispositivo dessa curva é relativamente grande, quando comparado com as espessuras dos pequenos leitos 2,3,4 e 5 e seus distanciamentos na coluna. Por isso para a curva lateral o conjunto dos leitos 2,3,4 e 5 comporta-se como se fosse um único leito espesso.
- Feições típicas das curvas de resistividade convencionais e da curva SI, no caso de finos leitos resistivos intercalados numa formação condutiva (sequência de folhelhos).

( Figura na página seguinte )

A parte superior da figura mostra um fino leito resistivo, cuja espessura é menor que os espaçamentos dos dispositivos de resistividade utilizados.

A curva lateral indica bem o leito fino resistivo, apresentando-se com os característicos picos, principal e de reflexão e a zona cega.

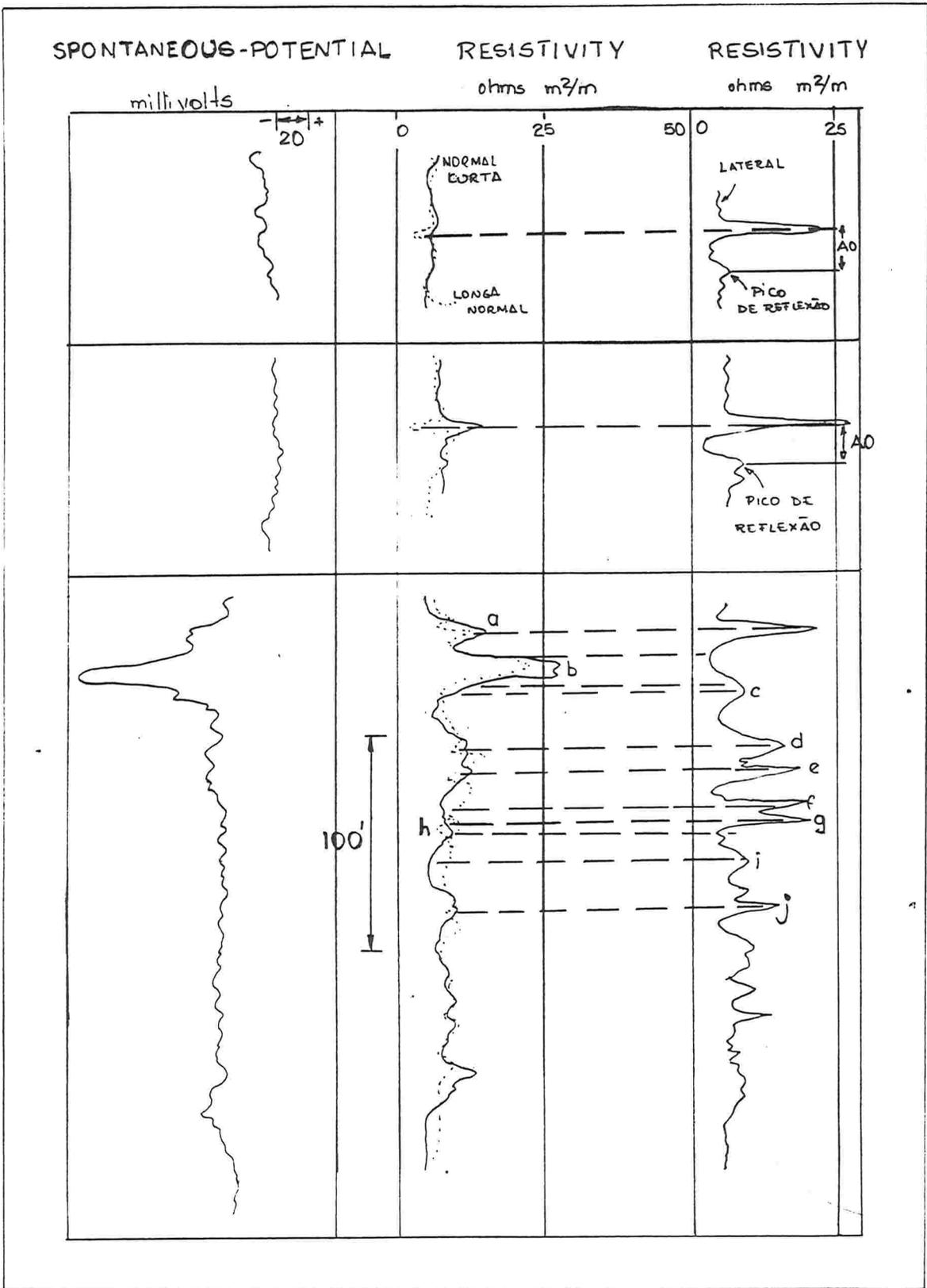


Fig. de Schlumberger Doc nº 8 1958

As curvas normais, longa e curta, mostram depressões nesse leito, indicando que o mesmo é mais fino do que seus espaçamentos. Essa feição é mais marcante na curva normal longa.

A parte média da figura mostra o efeito de um leito resistivo cuja espessura é maior do que o espaçamento da curva normal curta e menor do que o da normal longa.

A parte inferior mostra feições de interpretações complicadas devido a existência de sucessões de leitos finos resistivos - pouco distantes entre si.

A depressão da curva lateral frente a leito permeável pode ser devido a que ele esteja dentro da zona cega, devido ao outro leito resistivo a, ou porque sua espessura seja aproximadamente igual ao espaçamento da curva lateral.

Mais abaixo, as curvas normais mostram picos e depressões que seriam facilmente interpretadas sem ajuda da curva lateral. O pico i da curva lateral é um pico de reflexão correspondendo a intercalação resistiva g, porque a separação desses picos é igual ao espaçamento AD do dispositivo. O pico h nitido nas curvas normais - (positivo e negativo nessas curvas), não aparece na curva lateral, por estar dentro da zona cega correspondendo a intercalação resistiva g.

IV- Feição das curvas normais e laterais em formações de rochas - duras. Rochas duras significando formações com segmentos e - pessos de calcário sedimentar, de intrusões de diabásio ou outras litologias, de alta resistividade. As intercalações são de leitos porosos mais condutivos.

O comportamento das curvas de resistividade frente a um - segmento altamente resistivo (de rocha dura), nessas condições, é consequência do que se segue: *Ver fig pg 329*

- A corrente elétrica fluindo do eletrodo A é quase toda confinada dentro do furo. Parte dela flui na razão inversa da resistência desses dois caminhos, para cima e para baixo.

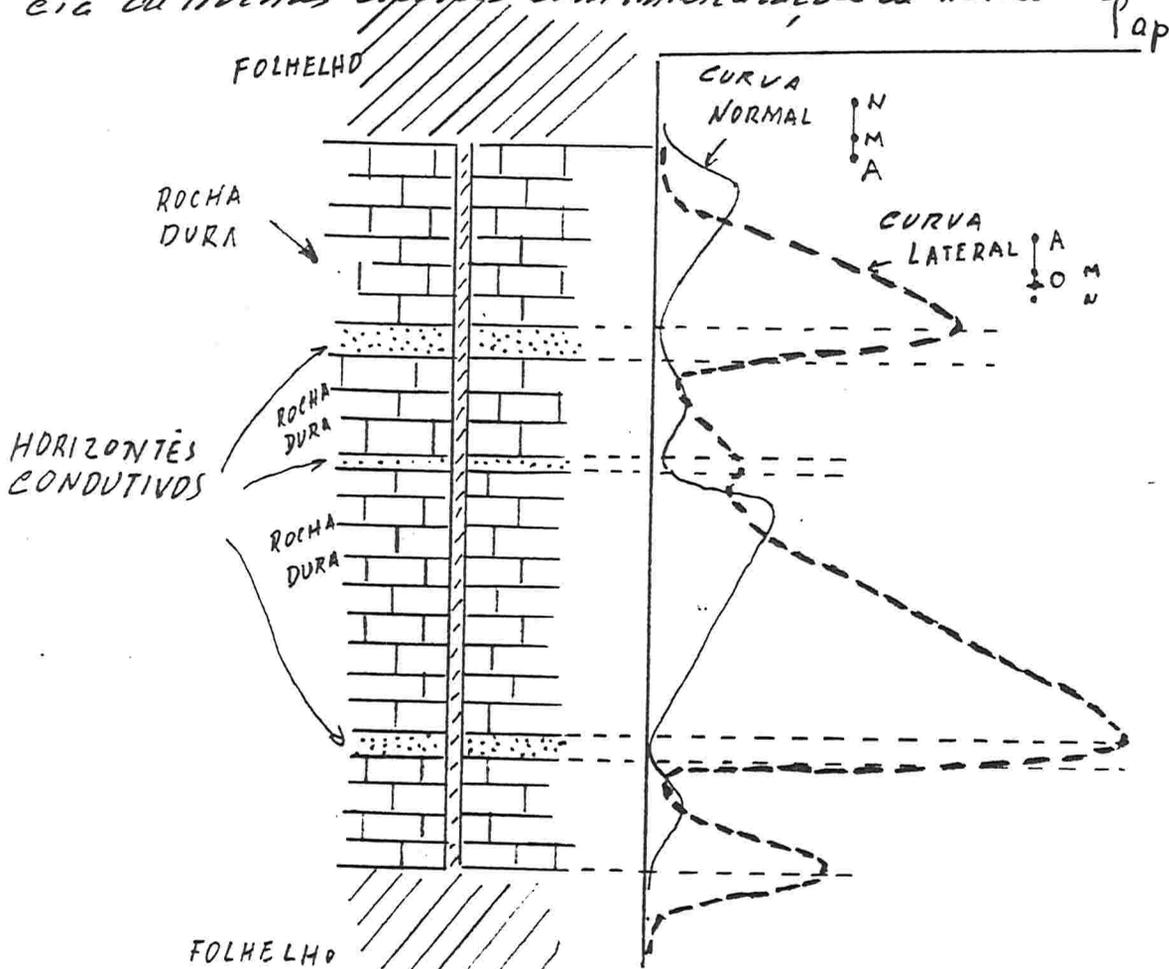
A resistência de cada caminho em cada caso, é determinada pela resistência da coluna de lama do furo entre o eletrodo de corrente A e o mais próximo leito condutivo existente, no sentido da corrente. Quando a corrente atinge o leito condutivo, ela encontra um caminho para fora do furo (para o interior da formação), de resistência relativamente baixa.

Por esse motivo o dispositivo lateral, no qual os eletrodos M e N de potenciais estão abaixo do eletrodo de corrente A, registra uma curva assimétrica, (como se fosse aparada), aumentando -

no sentido para baixo (crescendo com tendência retilínea). O máximo de  $\rho_{ap}$ , é na base do segmento resistivo. Quanto mais o dispositivo penetra (de cima para baixo) no interior do segmento resistivo, mais corrente flui no sentido inferior, e conseqüentemente maior será a queda ohmica  $\Delta v$  determinante do parâmetro  $\rho_{ap} = K \cdot \frac{\Delta v}{I}$ , (para os valores constantes de  $I$  - fornecidos para o dispositivo).

- A curva normal por razões análogas, apresenta-se também assimétrica com máximo na parte do topo do segmento resistivo. Porque nesse caso, o eletrodo de corrente A está na parte inferior do dispositivo.

*Feições das curvas normal e lateral de resistividade de uma sequência de rochas duras com intercalação de horizontes condutivos.*



*Fig da Schlumberger Doc nº 8 1958*

#### 4.8.5.4- Dispositivos e curvas especiais de resistividade

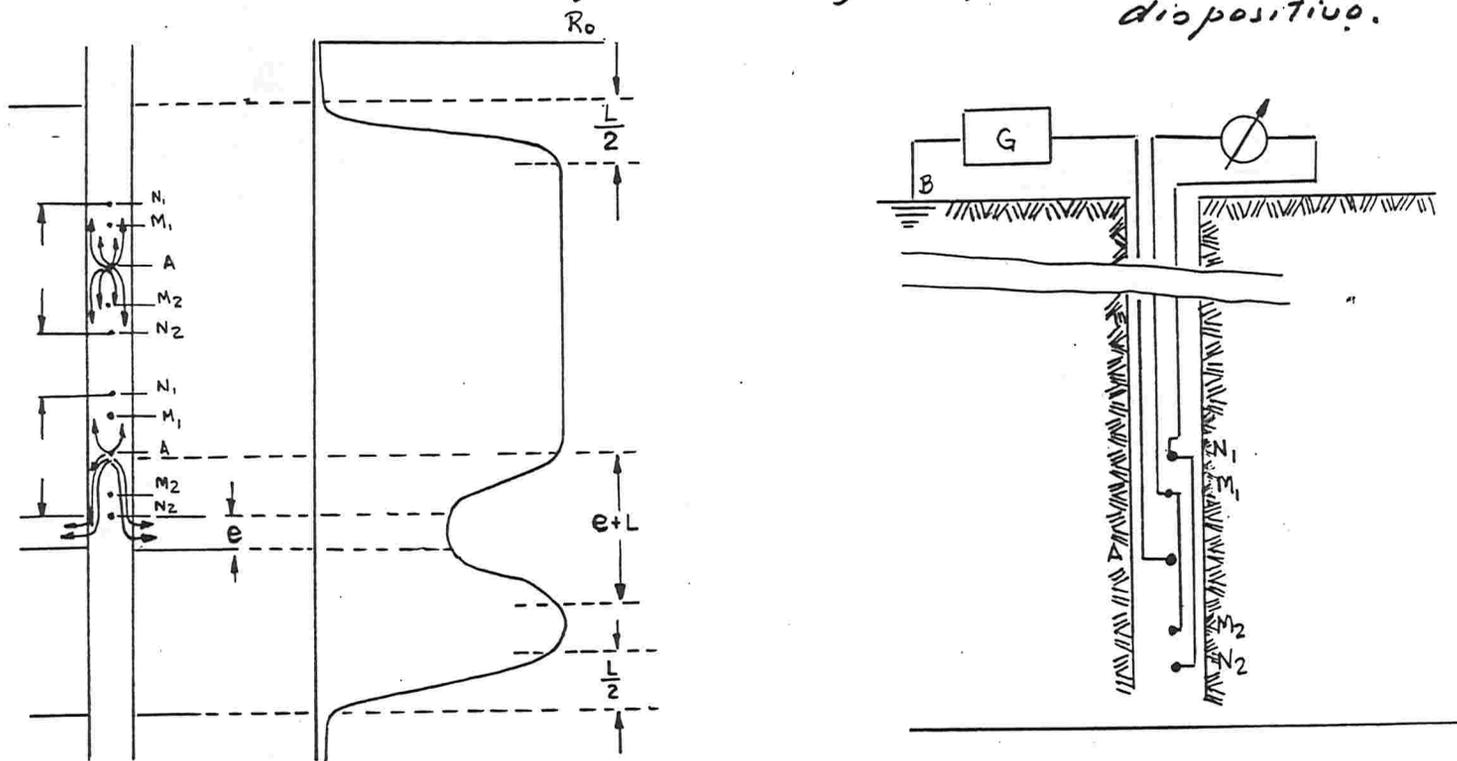
##### 4.8.5.4.1 - Dispositivo para calcário ("Limestone device")

Como foi visto no item anterior ( 5.8.5.2.2- IV ), perfila-  
gem de resistividade com dispositivos convencionais dão curvas algo  
confusas ( deformadas) no caso de formações duras( de calcários sedimen-  
tares).

Por esse motivo foi idealizado, o dispositivo especial (pa-  
ra calcário) o bjetivando obter melhor clareza da perfilagem nesse tipo  
de formação. As figuras a seguir mostram no que consiste esse disposi-  
tivo, e a curva teórica bem representativa obtida com o mesmo, naquelas  
condições.

*Dispositivo para calcário*

*Fluxos de corrente e registro obtido; Esquema do circuito do dispositivo.*



*Fig de Schlumberger Doc B - 1958*

*F66*

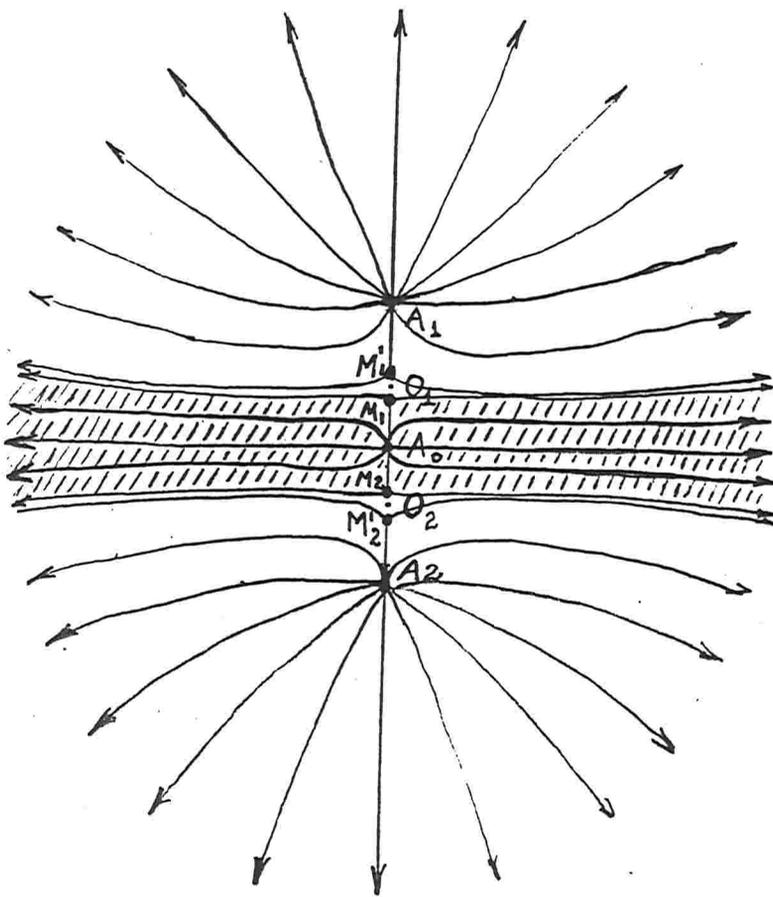
Verifica-se nas figuras que esse dispositivo, consiste na combinação de dois dispositivos laterais convencionais, dispostos simetricamente acima e abaixo.

A principal vantagem do dispositivo para calcário é no sentido de determinar leitões permeáveis condutivos em formações duras.

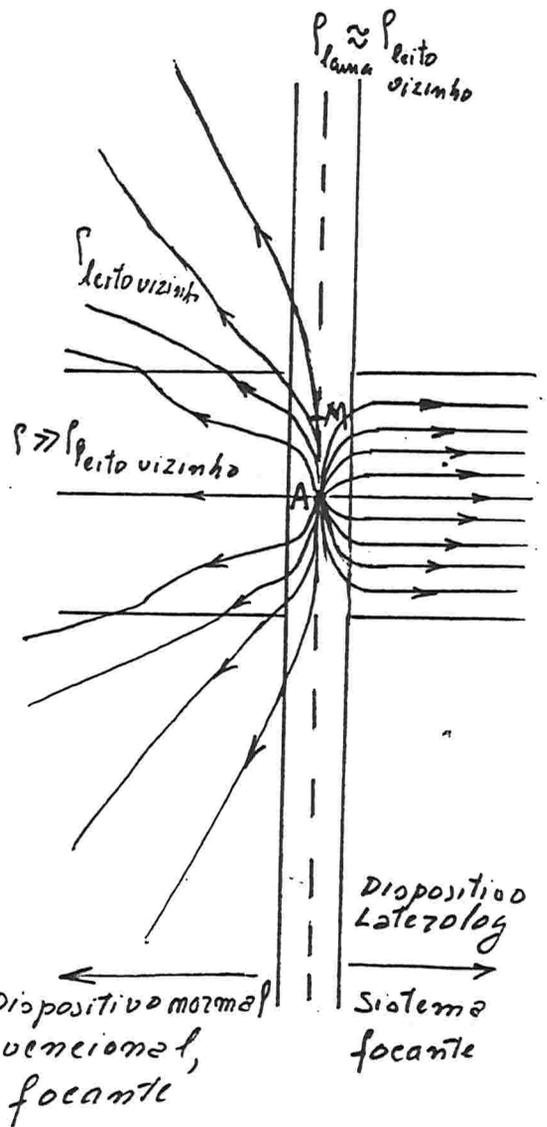
Nesse sentido é mais eficiente que os dispositivos convencionais, e menos eficiente que os microdispositivos (a serem vistos mais tarde).

Serve também, para medidas de porosidade nas interpretações quantitativas. Não é apropriado para medidas de verdadeiras resistividades das formações, porque suas medidas são muito influenciadas pela coluna de lama.

- 4.8.5.4.2 - Laterolog (figuras)



Sistema Laterolog  
Distribuição das linhas  
de fluxo da corrente  
em um meio homogêneo



Companha das linhas  
de distribuição dos fluxos  
de corrente, com dispositi-  
vo normal convencional, e  
com laterolog

Figuras de Schlumberger Doc nº 8 1958

467

#### 4.8.5.4.2- Laterolog (texto)

Esse dispositivo faz com que a corrente seja forçada através da formação, como se fosse uma lâmina de espessura pré-determinada. Desse modo as medidas envolvem uma porção das paredes do furo numa extensão ~~perpendicular~~ limitada. Ao mesmo tempo, praticamente não são afetadas pela coluna de lama.

As vantagens desse dispositivo, quando comparado com os dispositivos convencionais são as seguintes:

- a) Nitida discriminação entre os diferentes leitos, e discriminação mais acurada de seus contornos.
- b) Medidas de  $\rho_{ap}$  mais aproximadas do valor da verdadeira resistividade no caso de leitos finos. Especialmente no caso em que a sondagem é feita com lama de alta salinidade.

Como mostra a figura, da página ~~anterior~~, o dispositivo consiste de três pares de eletrodos  $M_1$  e  $M_2$ ,  $M'_1$  e  $M'_2$ ,  $A_1$  e  $A_2$ , dispostos simetricamente em relação a um outro eletrodo  $A_0$ , central. Os eletrodos de cada um par são ligados entre si, em curto circuito. Uma corrente de intensidade calibrada constante, é fornecida através do eletrodo  $A_0$ . Adicionalmente correntes de mesma polaridade são fornecidas aos eletrodos auxiliares de corrente  $A_1$  e  $A_2$ . As intensidades dessas correntes são, automaticamente e continuamente ajustadas, de tal modo, que: As duas diferenças de potenciais entre os pares em curto-circuito ( $M_1M_2$  e  $M'_1M'_2$ ) são sempre mantidas zero ( nos pontos médios  $O_1$  e  $O_2$ ).

Desse modo é impedida a passagem de corrente nos espaços compreendidos entre os eletrodos  $M_1$  e  $M'_1$  e  $M_2$  e  $M'_2$ , respectivamente. Ao mesmo tempo a corrente é forçada para dentro da formação, como se fosse uma lâmina de espessura  $O_1O_2$  ( aproximadamente).

As resistividades aparentes são obtidas mediante as medidas dos potenciais de qualquer um dos quatro eletrodos  $M_1, M_2, M'_1$  ou  $M'_2$ .

4.8.5.4.3 . Microdispositivos: Microlog-(Curvas micronormal e micro-inversa); Microlaterolog.

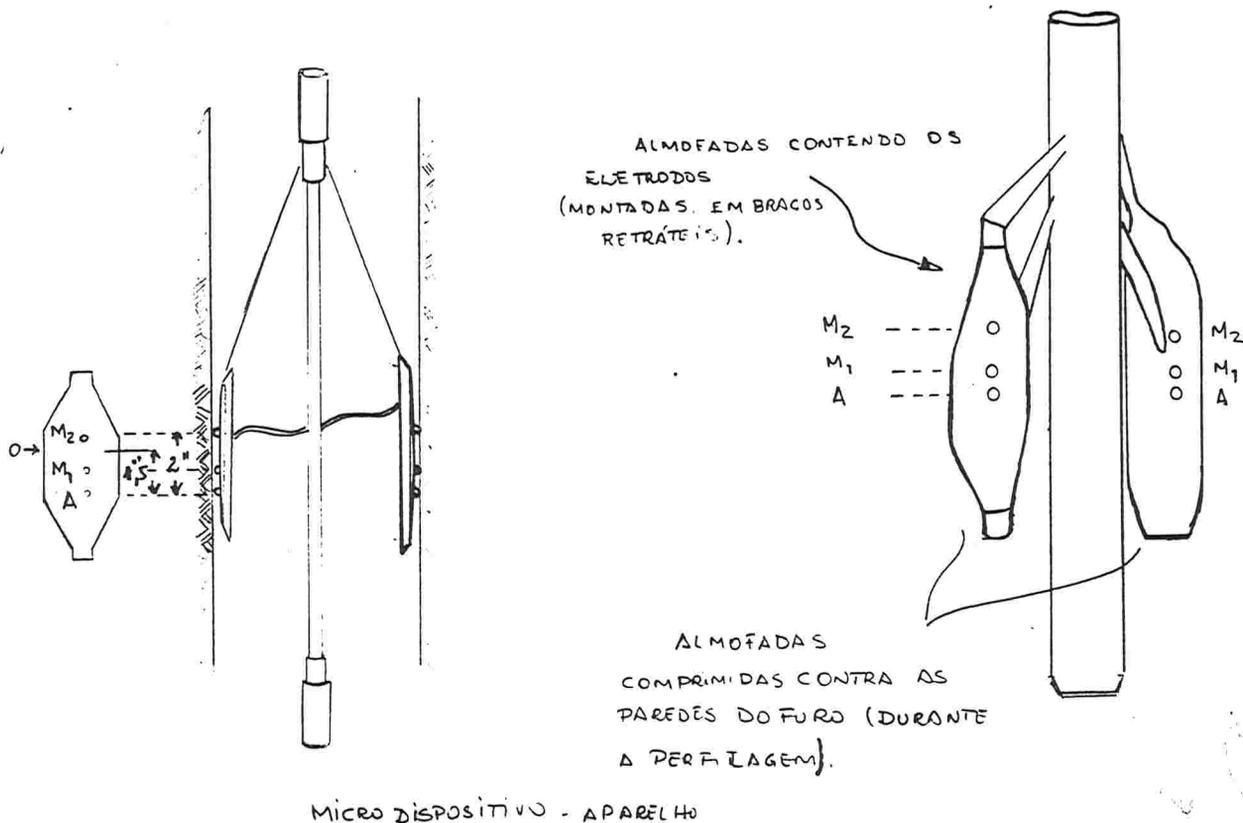
Os micrologs foram desenvolvidos primeiramente para determinar leitos permeáveis intercalados em formações duras, nas quais a curva do potencial espontâneo (SP), não dá resposta satisfatória, como foi visto no item 4.8.4.5 .

Além disso, os micrologs são usados em formações de folhelhos e arenitos, porque dão melhor discriminação dos pequenos leitos.

Também, os micrologs são muito usados para interpretações quantitativas, para determinação do fator da formação ,

$$F = \frac{\int \text{da formação saturada por água}}{\int \text{da água que satura a formação}} = \frac{R_o}{R_w}$$

Esse é um importante parâmetro utilizado para determinação da porosidade efetiva da formação.  $F$ ,  $R_o$  e  $R_w$  são símbolos utilizados na literatura especializada.



da figura anterior temos:

- Dispositivos conjugados no aparelho :

-  $AM_1M_2$  - Microinverso (Dispositivo lateral com espaçamento  
 $\overline{AO} = 1,5'' \approx 38\text{mm}$  )

-  $AM_2$  - Micronormal (Dispositivo normal com espaçamento  
 $AM_2 = 2'' \approx 51\text{mm}$  )

- Microcalibre - Dispositivo eletro-mecânico, medindo e registrando os diâmetros do furo ao longo de seu comprimento.

A Operação com microdispositivo : -

- É fornecida uma corrente de intensidade conhecida pelo eletrodo A, sendo registradas simultaneamente ;
- A curva micro inversa ( a qual é uma curva lateral ) - Representando variações de  $\int_{ap}$  ( com espaçamento  $\overline{AO} = 1,5''$  ) relacionadas às diferenças de potencial medidas entre  $M_1$  e  $M_2$
- A curva micronormal ( a qual é uma curva normal com espaçamento  $\overline{AM}$  de 2" ) - Representando variações de  $\int_{ap}$  relacionadas às diferenças de potencial medidas entre  $M_2$  e um outro eletrodo instalado na superfície.
- A curva microcalibre, obtida mediante engenho eletro-mecânico, relacionado com a abertura das almofadas. Representa as variações do diâmetro do furo, quando as almofadas são mantidas pressionadas contra suas paredes.
- A operação é iniciada pelo abaixamento do aparelho até o fundo do furo, com os braços retraídos, obtendo-se o registro das resistividades da coluna de lama. Seguida pelo levantamento da sonda ao longo do furo, com os braços comprimindo as almofadas contra as paredes do furo. Desse modo registrando as três curvas referidas.

- Comportamento das curvas do microlog frente a diferentes tipos de formações ou litologias.

#### I- Leitos porosos e permeáveis.

Nesses, o reboco da lama representa proporção importante do material envolvido nas medidas, cujo volume ~~corresponde a~~ cerca de 75mm atrás das paredes do furo. Normalmente, a resistividade do reboco é da ordem do triplo da resistividade da lama ( $\rho_{reboco} \approx 3 \rho_{lama}$ ). Havendo considerável invasão da lama, todo fluido da formação foi substituído pelo filtrado da lama até a profundidades compatíveis com as medidas (compreendidas na zona completamente invadida).

Essa, normalmente, adquire resistividades poucas vezes superior a resistividade da lama.

Assim as medidas de resistividade são relacionadas às resistividades do reboco e da zona completamente invadida, em proporções relacionadas aos espaçamentos, dos dispositivos conjugados no microdispositivo.

A curva microinversa é mais influenciada pelo reboco da lama, do que a curva micronormal ( porque o espaçamento  $\overline{AO}$  é menor que o espaçamento  $\overline{AM}_0$ ). As diferenças entre as medidas das duas curvas (micronormal e microinversa) são denominadas separação.

Geralmente a resistividade da zona completamente invadida é bem maior do que a resistividade do reboco, e em consequência a curva micronormal dá valores maiores do que a curva microinversa. Nesse caso a separação é dita positiva. Se o contrário acontecesse a separação seria dita negativa.

O reboco tende a nivelar as medidas, de modo que ambas as curvas mostram pouca variações frente aos leitos permeáveis ( porque nesses o reboco é mais espesso).

## II- Formações duras ( Calcários, diabásios, etc.).

Nessas formações os eletrodos mantêm-se separados das paredes do furo por uma película muito fina de lama. Consequentemente as resistividades medidas são muito grandes (praticamente as resistividades da rocha).

Como as paredes do furo são irregulares, o contato dos eletrodos com as mesmas é muito variável, ocasionando picos irregulares nas curvas.

As separações são aleatoriamente positivas ou negativas.

## III- Formação de folhelho.

Não havendo desmoronamentos, também nesse caso os eletrodos são separados das paredes do furo por película fina de lama. Em consequência as formas de ambas as curvas são variáveis, como no caso das formações duras. Porém as resistividades são pouco menores do que no caso de rocha dura.

A separação é negativa na maioria dos casos, podendo ser em outros casos, zero ou pouco positiva. Admite-se que a separação negativa no caso de folhelhos, seja devido a propriedades anisotrópicas de condução da corrente nessas litologias, sendo o fenômeno, ainda não compreendido perfeitamente.

Nos casos frente a folhelhos em que a separação fosse positiva, poderia haver dualidade de interpretação, no sentido da confusão com formação dura. Porém nesses casos, a curva do potencial espontâneo ( ou do gama log) dirime a duvida.

## IV- Caso de caimentos no furo.

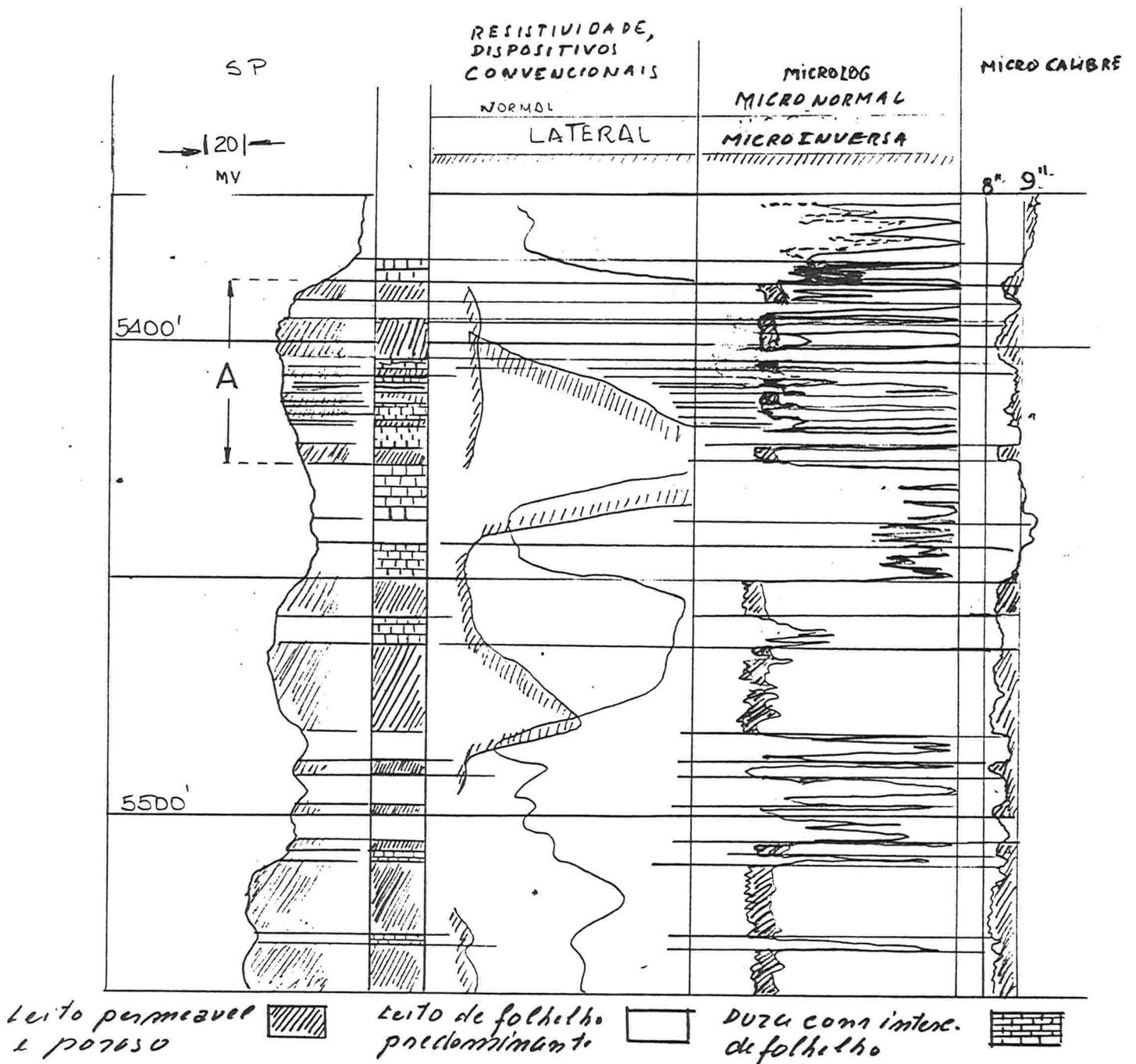
Nesses casos, ambas as curvas, darão valores uniformes e iguais à resistividade da lama. Porque os eletrodos estarão em contato

somente com a coluna de lama, e separados das paredes do furo.

Exemplo de perfilagem, combinada:

- Curva SP de resistividades normal e lateral, e microlog (micronormal, microinversa e microcalibre).

*MICROLOG E MICROCALIBRE NUMA FORMAÇÃO "DURA"  
Fig. de Schlumberger DOC 908 1958*



- Observar na figura :

O segmento A, apresenta-se como totalmente permeável na curva SP. Entretanto o microlog mostra que o mesmo é constituído por sucessão de leitos finos, permeáveis e impermeáveis, interestratificados (cuja produtividade em óleo ou água seria bem menor).

A curva do microcalibre confirma os leitos permeáveis indicados pelo microlog, através da diminuição do diâmetro do furo, devido a existência de reboco mais espesso.

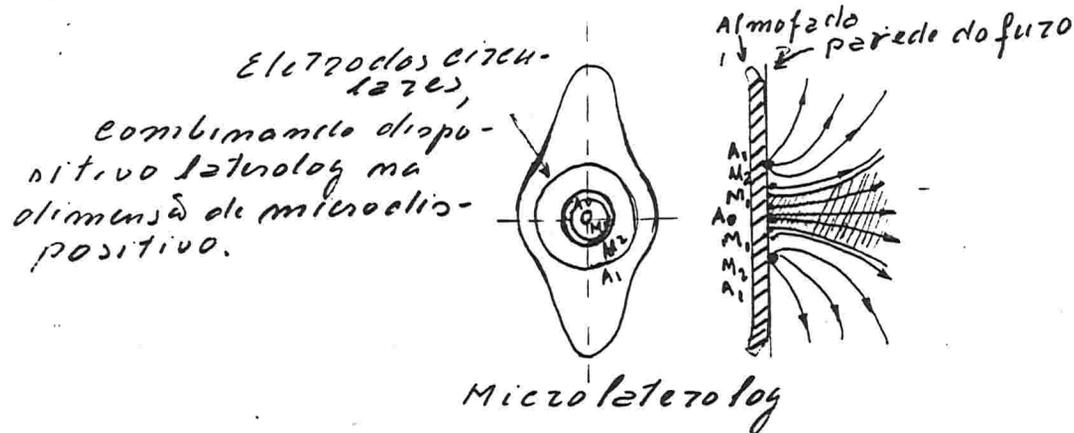
#### Microlaterolog:

Esse dispositivo constitui uma diversificação do microlog convencional, aplicando em microdispositivo o mesmo artifício do laterolog.

Foi desenvolvido com a finalidade de medir a resistividade da zona completamente invadida ( $\int$  da formação saturada por água) em leitos com porosidade inferior à 15%.

Como foi visto nas aplicações do microlog, esse parâmetro é importante para determinação do fator da formação. No caso em que a porosidade do leito seja inferior a 15% o microlog convencional não fornece esse parâmetro com a acuracidade necessária, devido a grande influência relativa do reboco.

Como mostra a figura, os eletrodos do microlaterolog são circulares. São dispostos de tal forma, que a corrente é forçada para dentro da formação, mediante o mesmo artifício utilizado no dispositivo laterolog, visto anteriormente. ( Ver figura )



4.8.5.4.4 - Perfilagem das atitudes dos estratos -  
Inclinômetro ( dip meter)

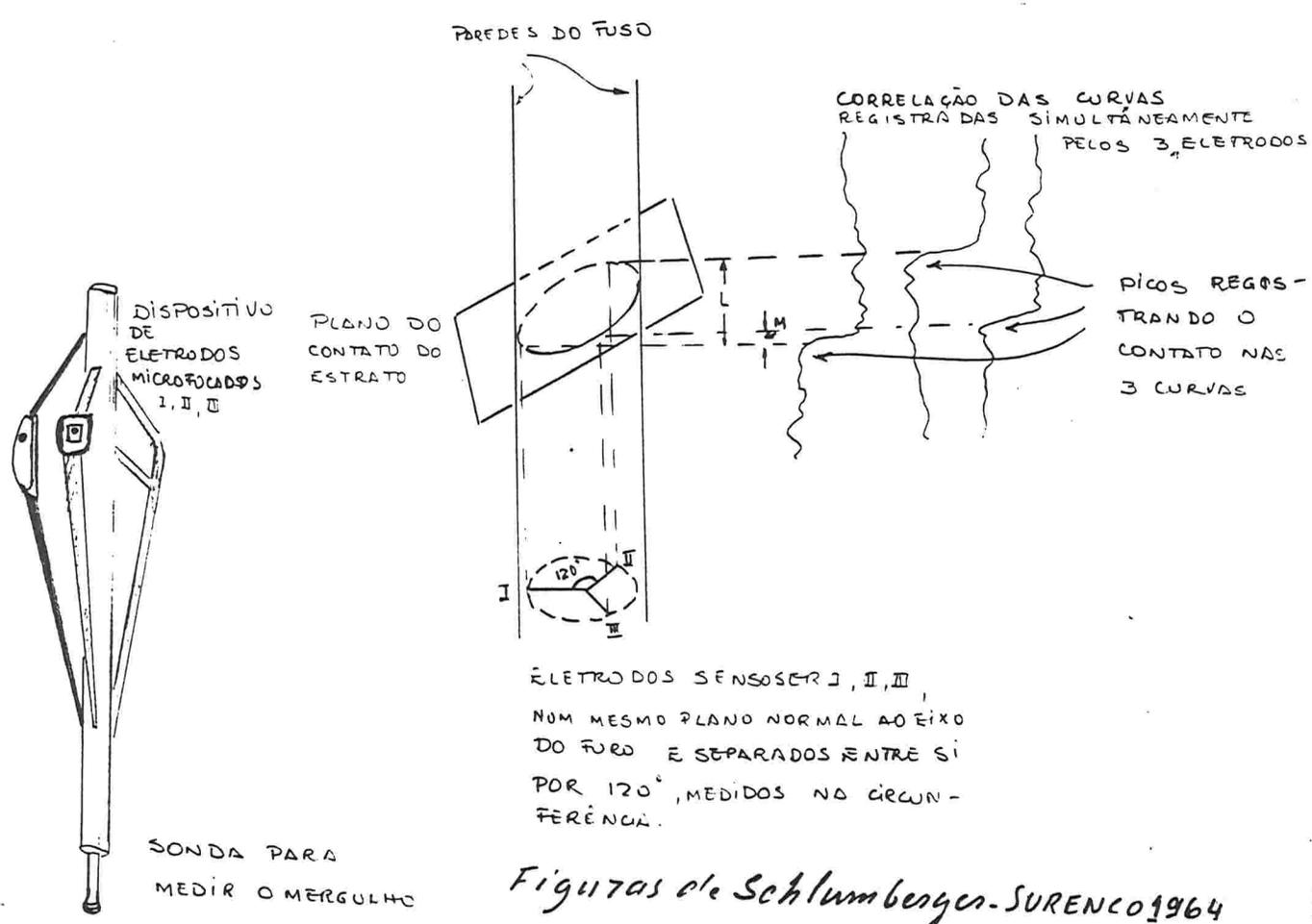
Não é propriamente um método de perfilagem, mas sim um dispositivo especial de perfilagem elétrica, com objetivo de medir o mergulho dos estratos atravessados pelo furo.

No início (década de 1940) foram utilizadas curvas de potencial espontâneo, posteriormente curvas de resistividade lateral, e a partir da década de 1950, curvas de resistividade com microdispositivos focados.

Consiste na perfilagem elétrica simultânea com três curvas, obtidas mediante um equipamento adequado.

Os três eletrodos sensores estão num mesmo plano, e separados entre si de  $120^\circ$ , em torno do eixo do furo. ( ver figura)

A correlação dos picos por efeito de um mesmo contato, nas três curvas perfiladas, permite determinar a posição do plano do estrato, em relação ao eixo do furo (como mostra a figura).

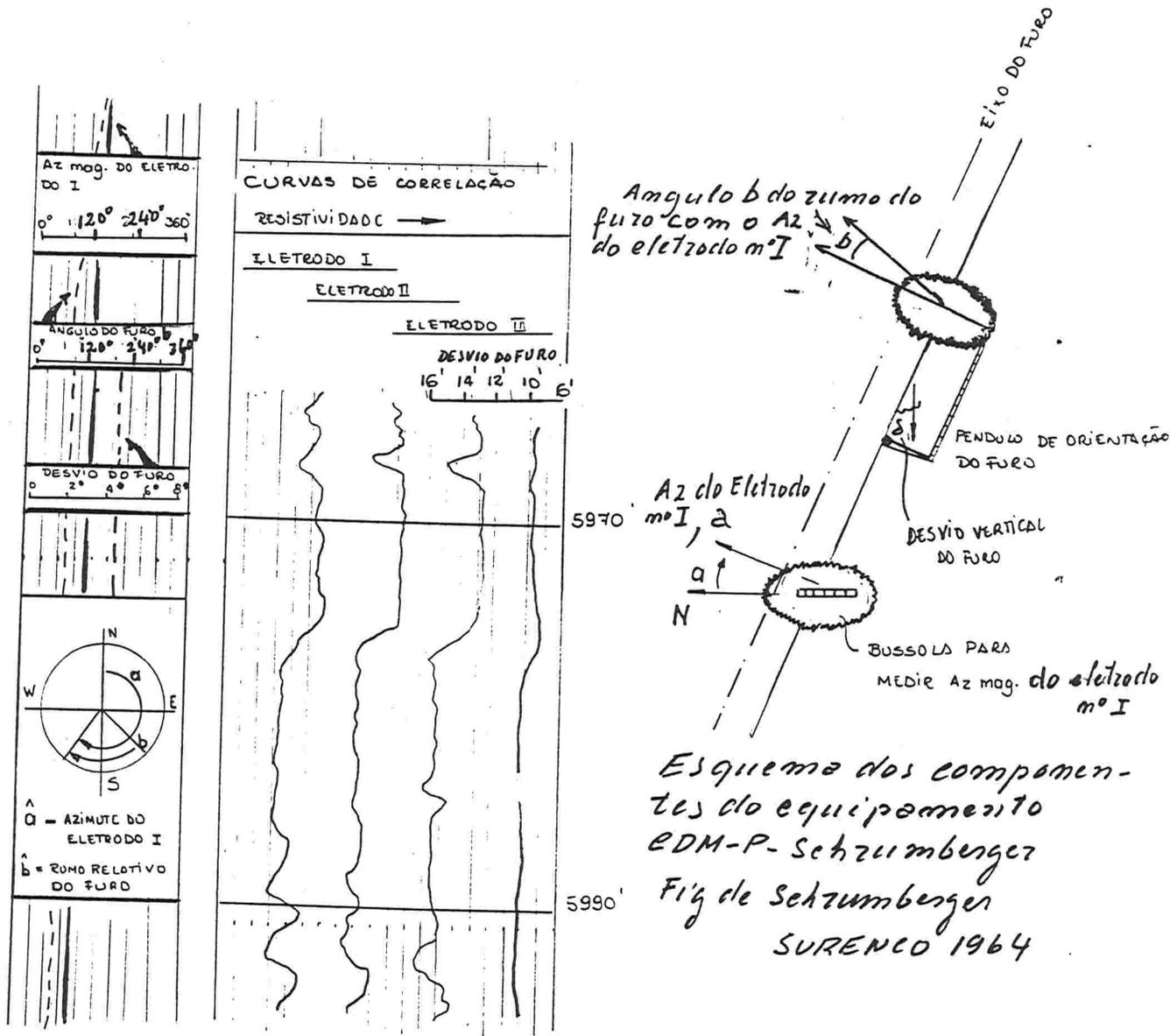


Figuras de Schlumberger-SURENCO 1964

777

Ao mesmo tempo um dispositivo eletro-mecânico do mesmo equipamento ( da sonda dip-meter), permite registrar:

- O azimute magnético do eletrodo nº I (a); o ângulo horizontal do eixo do furo (b), com o azimute do eletrodo nº I (a); e o desvio do furo da vertical. Adicionalmente o equipamento contém dispositivo de perfilagem de diâmetro do furo (mediante calibre).



Esquema dos componentes do equipamento EDM-P-Schrumberger  
Fig de Schrumberger  
SURENCO 1964

Registro do equipamento clinometro Dip-Meter EDM-P Schrumberger  
Fig de Schrumberger - SURENCO 1964

F72

A parte da esquerda da figura mostra um registro típico de inclinômetro. A parte da direita da figura, é um esquema mostrando os componentes mecânicos do dispositivo eletromecânico, que permite perfilar simultaneamente :

- Azimute do eletrodo nº I (ângulo  $a$ )
- Rumo relativo do furo em relação ao eletrodo nº I (ângulo  $b$ )
- Desvio da vertical, do furo  $\delta$

A simulação dos dados fornecidos pelos registros, permite mediante computação, a medida continua das atitudes dos estratos atravessados.

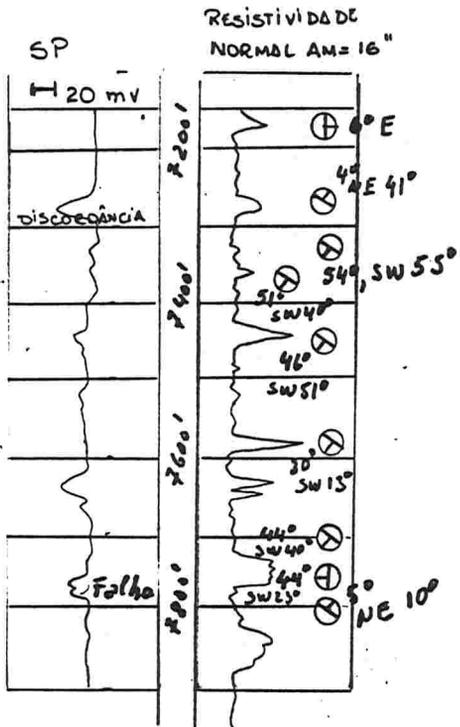
Existem outros dispositivos de inclinômetros, com diferentes sistemas de registros, com os mesmos objetivos essenciais do descrito acima.

O sistema descrito é o do equipamento CDM-F Schlumberger.

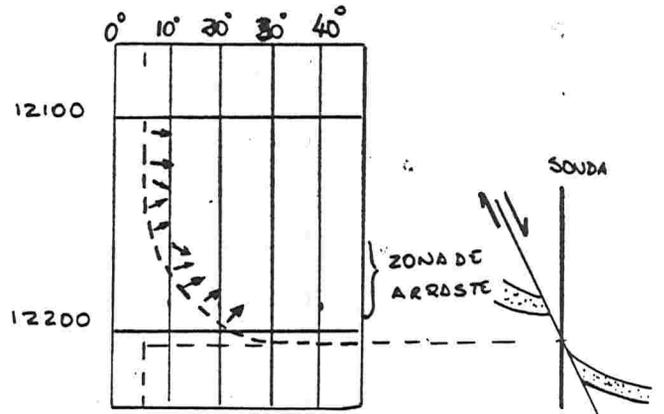
Após computação, os resultados das medidas são representados, em forma descontinua ou continua por vetores, segundo convenções adequadas.

Geralmente as origens dos vetores representam, em escalas verticais e horizontais nos perfis, respectivamente as profundidades das medidas, e os valores em graus dos mergulhos dos estratos; os azimutes medidos no sentido horário (da vertical), representam direções e sentido dos mergulhos.

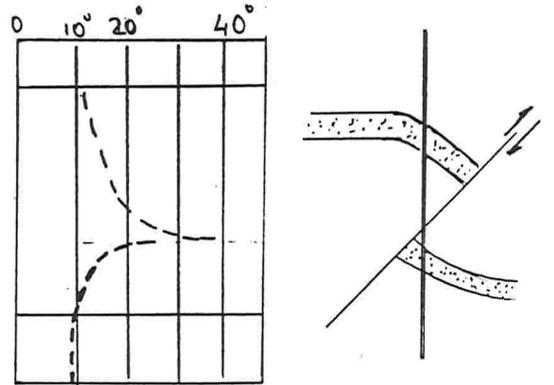
As figuras a seguir, mostram exemplos de representações gráficas de resultados computados de medidas com inclinômetro, e interpretações mostrando estruturas típicas.



PERFIL COMPOSTO COM REPRESENTAÇÃO DE MEDIDAS DE MERGULHOS EM FORMA DESCONTÍNUA.

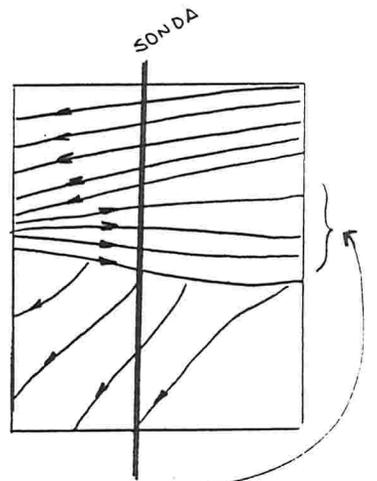
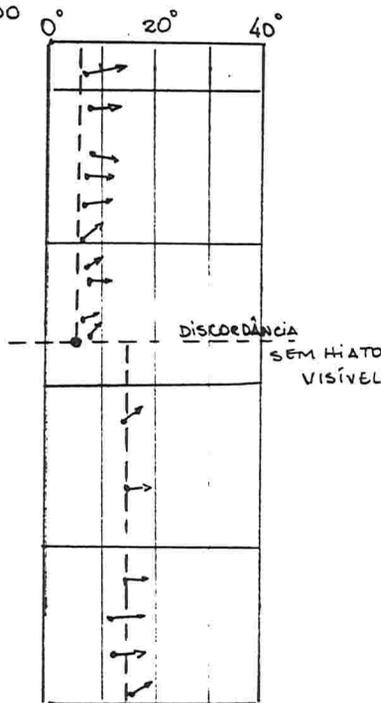
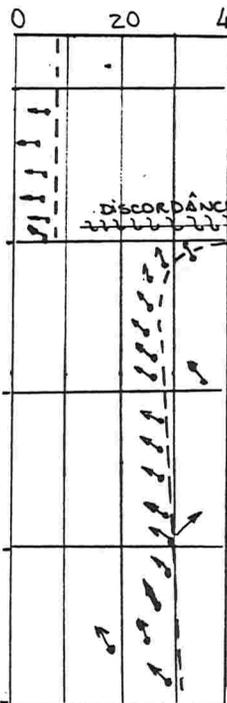


REGISTRO DE MERGULHOS MOSTRANDO ARRASTE DEVIDOS A UMA FALHA NORMAL



REGISTRO DE MERGULHOS MOSTRANDO EFEITO DE UMA FALHA INVERSA

DISCORDÂNCIAS  
REGISTROS CONTÍNUOS DE MERGULHOS MOSTRANDO DISCORDÂNCIA



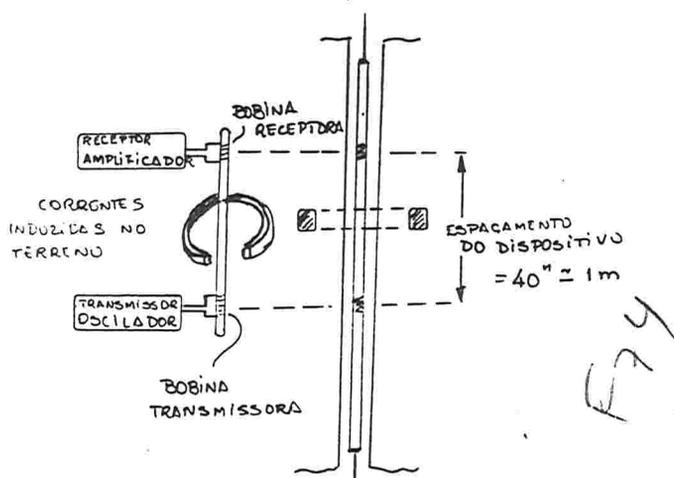
AUMENTO DE MERGULHOS DEVIDO EROSAO NA BASE DA DISCORDÂNCIA.

F73

4.8.6 - Método de indução ou perfil IL ( de <sup>"induction"</sup> Indução log ), ou ainda método de condutividade.

É um método de perfilagem mediante aplicação de método eletro-magnético ( método E-M).

#### 4.8.6.1- Equipamento IL



ESQUEMA do equipamento IL

Essas correntes induzidas, por sua vez, induzem f.e.m. na bobina receptora, constituindo o "sinal", o qual é amplificado e registrado.

Sendo a intensidade da corrente induzida no terreno proporcional a sua condutividade, resulta que o sinal induzido no receptor é também proporcional a condutividade ( ou inversamente proporcional à resistividade).

A fonte de corrente, e os equipamentos amplificadores e registradores, são instalados na superfície.

Mediante calibração, elimina-se qualquer "sinal" devido a recepção direta do campo primário do sistema transmissor ao receptor.

O sinal registrado será o dos campos secundários devidos às induções no terreno. Mediante calibragem, o equipamento é ajustado para dar um sinal zero, quando estiver suspenso no ar.

Assim o equipamento de perfilagem IL, é um sistema de méto-

do E-M de fonte e receptor, solidários e móveis, com bobinas coaxiais. Destinase à uma pesquisa lateral, ao longo do comprimento do furo.

Além dos sistemas essenciais transmissor e receptor, o equipamento é provido de bobinas <sup>adicionais</sup> adicionais. Essas são montadas de tal forma, que, minimizam efeitos E-M devidos à coluna de lama, e às formações situadas acima e abaixo do dispositivo. Disso resulta um efeito "focante" nas formações, em frente ao dispositivo. Com o mesmo equipamento são registrados simultaneamente, uma curva SP e uma curva normal de resistividade.

#### 4.8.6.2 - Registros de curva IL

Sendo a condutividade recíproca da resistividade ( $\sigma = \frac{1}{\rho}$ ), e a relação entre as unidades respectivas :

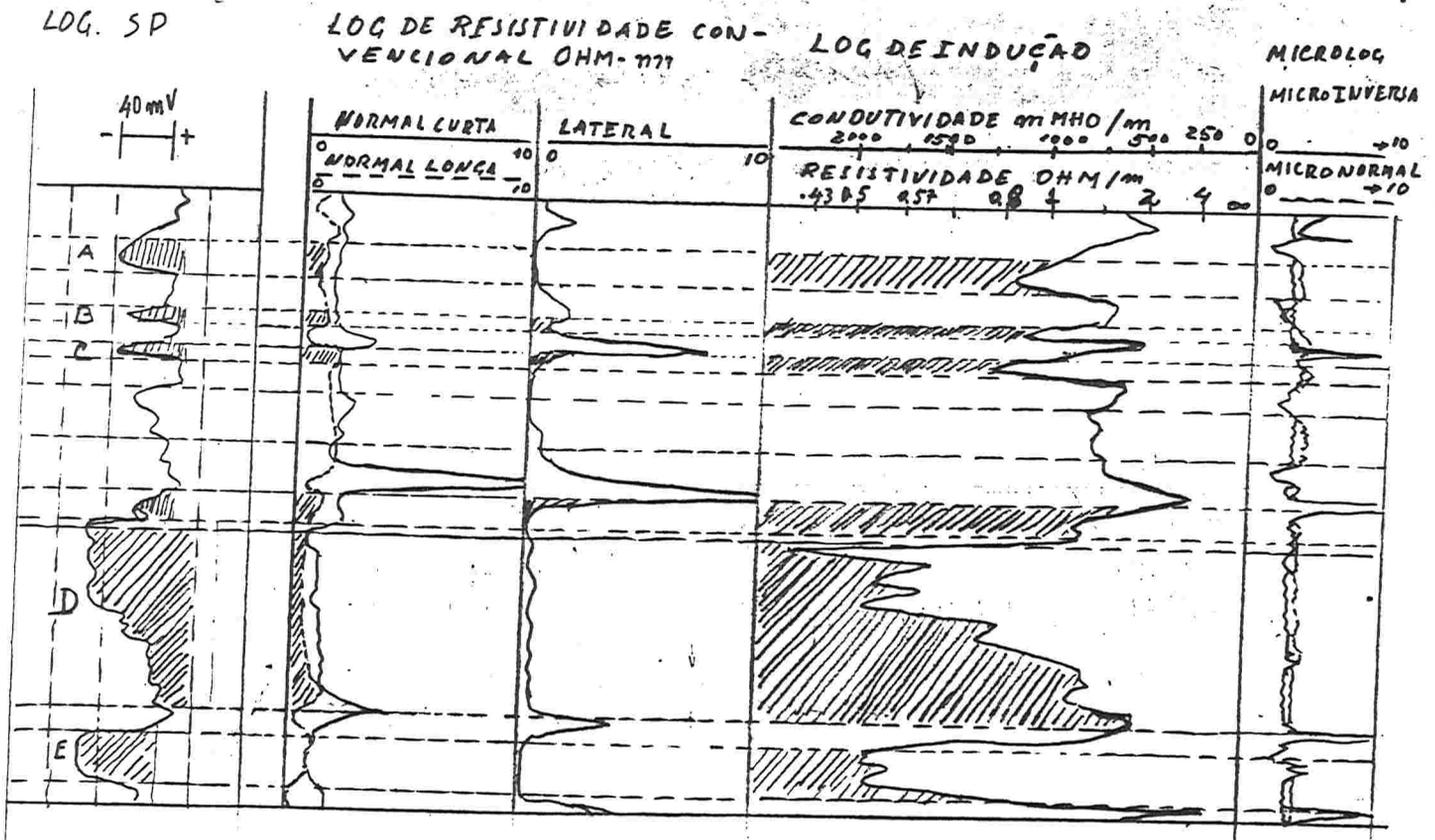
$$\text{mho.m} = 1 / \text{ohm.m} \quad :-$$

- Todos os valores em que a resistividade  $\rho$  fosse maior que a unidade, a condutividade (dada em mho.m) seria fracionária. Por esse motivo é usado o submúltiplo m mho.m. Assim para:

= 10 ohm.m corresponde	= 100 mho.m
= 100 ohm.m       "	= 10 mmho.m
= 1000 ohm.m       "	= 1 mmho.m

A escala do registro da curva de condutividade é linear, com o zero a direita. Zero de condutividade, corresponde a  $\infty$  de resistividade. Desse modo quando a condutividade cresce (ou a resistividade decresce) a curva inflete para esquerda, da mesma forma como nos registros dos dispositivos de resistividade. Assim a curva IL poderá indiferentemente, ser lida em termos de condutividade ou resistividade.

Além disso é hiperbólica ( tendendo para infinito ( $\infty$ ), para os valores altos de resistividade). Desse modo acentua as diferenças para valores baixos da resistividade. Isso constitui uma vantagem em relação aos registros com método de resistividade convencionais.



PERFILAGEM CONVENCIONAL (LOG SP E LOGS DE RESISTIVIDADE), COM METODO DE INDUÇÃO (INDUÇÃO LOG-IE) E MICROLOGS NUMA SEQUÊNCIA ARENITO-TOLHELHO, COM INTERCALAÇÕES DE ROCHAS DURAS

FIG. DE SCRUMBERGER DOC. nº 8 - 1958 (modificada)

A figura permite uma comparação da curva IL, com as curvas :

- Curva normal curta = CNC com AM = 16"
- Curva normal longa = CNL com AM= 64"
- Curva lateral = C lat.
- Curvas Microlog = Mlog

Formação perfilada, sucessão folhelho - arenito, contendo intercalações finas de rochas duras altamente resistivas.

- Leito D - Verifica-se a "habilidade" da curva IL para representar pequenas variações de resistividade num leito espesso.
- SP - Mostra rocha porosa e permeável.
- CNC- Mostra pouca sensibilidade para as variações de resistividade. Na base de D mostra uma diferenciação (leito duro resistivo com espessura maior que o espaçamento = 16").
- CNL- Pouca "sensibilidade" como a CNC. Leito da base de D, menor que seu espaçamento de 64".
- C lat. - Pouca "sensibilidade" idem como a CNL. Base do leito D, com tendência á formar zona cega característica da curva ( leito resistivo menor que o espaçamento do dispositivo).

Leito A - Curva IL, dá um valor da resistividade próximo do real ( 0,8 ohm.m).

SP - Mostra leito poroso e permeável.

CNL e CNC - Mostra resistividades mais elevadas devido influência de leitões vizinhos. A leitura é maior em CNC, devido maior influencia da zona invadida pela lama.

C lat- O leito A está frente a "zona cega" devido a leito mais resistivo acima, dando menores valores para a resistividade.

M log- Determina espessura de 8"

Leitos B e C, com um leito intercalado muito resistivo.

- Curva IL - não sofre distorção devido a intercalação do leito resistivo.
- Curvas CNC e CNL dão maiores valores para B e C, devido influência da intercalação resistiva.
- Curva C Lat. - Leito C está frente à zona cega da intercalação.

#### 4.8.6.3 - Utilização da perfilagem IL

A perfilagem IL poderá ser feita com furo vazio (sem lama), ou com lamas a base de água doce, ou a base de óleo.

Não poderá ser feita em furo com revestimento metálico, e também não é indicado no caso de lama à base de água salgada (condutiva).

Idealizado originalmente na década de 1940, para perfilar resistividade em furos com lama à base de óleo, posteriormente tornou-se um método alternativo, considerado mais eficiente que os métodos convencionais de resistividade, para a maioria dos casos em que pode ser usado.

É mais eficiente para identificação de leitos finos, devido seus efeitos "focantes" referidos, e seu maior raio de investigação. A forma hiperbólica da curva registrada, acentua pequenas variações de resistividade, permitindo delimitar contatos pouco diferenciados como por exemplo o contato óleo-água, nos reservatórios de petróleo.

Sendo os valores lidos na curva mais próximos dos valores de resistividades reais das formações, algumas vezes a curva IL é utilizada para determinar o parâmetro  $R_t$  nos cálculos de porosidade.

4.8.7 - Determinações de porosidade efetiva e saturação das formações, a partir dos perfis de resistividade. Princípios de interpretação.

### Porosidade e saturação.

Porosidade é a fração do volume total da rocha ( ou da formação ) ocupada pelos seus poros ( ou vazios ). Distingue-se:

porosidade total - incluindo as frações de volume de poros conectados entre si, e de poros isolados por material circundante.

porosidade efetiva - Incluindo somente a fração dos poros que se comunicam. Os fluidos neles contidos, podem passar através dos mesmos. É portanto um fator condicionante da permeabilidade, e conseqüentemente dos volumes úteis dos reservatórios de fluidos. Na linguagem comum, a porosidade efetiva é referida simplesmente por porosidade, sendo representada pelo símbolo  $\phi$ .

A porosidade intergranular, dada em percento, é expressa

$$\phi = \frac{\text{Volume dos poros}}{\text{Volume total da rocha}} \times 100$$

Saturação em água ou óleo de uma rocha ( ou formação ), é de seu volume de poros, que é ocupada pelo fluido considerado.

Na interpretação quantitativa de perfis elétricos, admite-se que a água contida na rocha, é o único condutor da eletricidade. Por-

tanto a resistividade da rocha será relacionada a sua porosidade, e a sua saturação em água.

Saturações em água e em óleo são representadas pelos símbolos  $S_w$  e  $S_o$ , respectivamente.

Se uma formação contém água mais óleo

$$S_w = \frac{\text{Volume de água}}{\text{Volume de poros}} = \frac{V_a}{V_p}$$

Admitindo-se que os poros estejam totalmente preenchidos com água mais óleo, exclusivamente:

$$S_o = \frac{V_p - V_a}{V_p} = 1 - \frac{V_a}{V_p}$$

Assim a saturação em óleo será expressa por:

$$S_o = 1 - S_w \quad ; \quad S_w \text{ e } S_o \text{ são expressas em } \%, \text{ usualmente.}$$

#### Fator de resistividade de uma formação F

Conforme simbologia adotada correntemente:

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad \therefore \quad R_o = F \cdot R_w$$

$R_w$  = Resistividade da água que satura uma formação arenosa desprovida de folhelho.

$R_o$  = Resistividade da formação completamente saturada em água.

F depende da estrutura da formação :

Se os poros forem cilíndricos e paralelos,  $F = 1/\Phi$  e  $\Phi$  será inversamente proporcional a resistividade  $R_o$ . Na realidade sendo os poros de formas variadas, F é expresso pela fórmula empírica

$F = a / \Phi^m$ , onde  $a$  e  $m$  são constantes para determinados tipos de estruturas.

Para arenitos e calcários bem consolidados  $F = \frac{1}{\Phi^2}$

Para formações em geral (consolidadas e inconsolidadas) pode-se considerar:  $F = 0,81 / \Phi^2$ . Nas tabelas de interpretação, publicada pelo Schlumberger. W.S. corp., é adotada  $F = 0,62 / \Phi^{2,15}$ .

Essas fórmulas foram estabelecidas para porosidade intergranular em arenitos e calcários. Poderão ser aplicadas para estruturas cavernosas ou fisuradas, desde que as mesmas sejam pequenas para serem compatíveis com os dispositivos usados na perfilagem. Nesses casos  $m$  é maior do que 2 ( $m > 2$ ), sendo estabelecido da experiência local, em cada caso.

Folhelho também conduz a eletricidade pela sua rede estrutural. Assim a presença de folhelho contribui para a condutividade, afetando o fator F através de  $R_o$ . Porém não contribui para a porosidade.

Numa formação areno-argilosa, sendo a água da formação de pequena condutividade, o conteúdo em folhelho terá grande influência em  $R_o$ . Sendo a água da formação mais mineralizada (de maior salinidade), será mais condutiva, e  $R_o$  baixará até valores da ordem de 0,1 Ohm.m. Nestas últimas condições, F será praticamente independente da contribuição devida ao folhelho, sendo então aplicáveis as mesmas fórmulas estabelecidas para formações arenosas "limpas" (desprovidas de folhelho).

Determinação da porosidade  $\bar{\phi}$  numa formação arenosa desprovida de folhelho e não contendo óleo.

Num perfil de resistividade adequado, é medida a resistividade da zona completamente invadida, a qual é representada pelo símbolo  $R_{xo}$ . Tem-se então  $R_o = R_{xo}$ . Em princípio a resistividade do filtrado da lama (representada por  $R_{mf}$ ), que satura a zona completamente invadida em torno do furo, poderia ser obtida experimentalmente. ~~Após ser~~ corrigida para a temperatura da formação, mediante tabelas. Esse valor corresponderia à  $R_w$ , tendo-se então :

$$F = \frac{R_{xo}}{R_{mf}}$$

Através de  $F$  se obteria a porosidade aplicando as relações empíricas referidas.

Para os leitos porosos, os registros do microlog são funções de  $R_{xo}$ , do diâmetro do furo  $D$ , e da resistividade do reboco  $R_{mc}$ .

$D$  é dado pela perfilagem do microcalibre.  $R_{mc}$  pode ser medido experimentalmente numa amostra da lama num filtro-prensa, ou pode ser determinado de curvas estabelecidas para diferentes resistividades da lama ( $R_m$ ), e temperatura. Também é possível avaliar  $R_{xo}$  e espessura do reboco ( $T_{mc}$ ) a partir dos registros das curvas dos microdispositivos (curvas micronormal e microinversa).

Em casos de porosidade inferior a 15%, o microlaterolog dará diretamente o valor de  $R_{xo}$ , quando o reboco não é espesso e que haja suficientemente invasão do filtrado da lama na formação. No caso de reboco espesso, é possível a medida mediante correções relacionadas a  $T_{mc}$  e  $R_{mc}$ .

No caso de formações "duras", as curvas de resistividade

normal curta, e do dispositivo para calcário, dariam valores da resistividade da zona invadida ( $R_t$ ), as quais mediante correções apropriadas, poderiam ser usadas em lugar do valor  $R_{xo}$  para determinar F.

A bibliografia referida Schlumberger 1958- contém as tabelas necessárias para a prática dessas interpretações, juntamente com exemplos explicados e detalhados dos diferentes procedimentos.

Nos casos em que a formação contenha óleo, restará na zona invadida ( ou na zona completamente invadida), uma saturação residual em óleo, juntamente com a saturação em água ( do filtrado da lama). O óleo residual afeta a resistividade da formação. Por isso torna-se necessário considerar também a relação da resistividade da formação, com a saturação em óleo, como será visto a seguir.

Relação entre a resistividade da formação  $R_t$  e a saturação em água da formação  $S_w$ , na presença de óleo.

$R_t$  da formação é afetada pela água da formação, e também pela quantidade de óleo coexistente.

Num reservatório de petróleo,  $S_w$  (saturação em água), dependerá de muitos fatores :

- Da porosidade, da permeabilidade, e da área da superfície dos grãos, os quais são características da rocha.
- Da viscosidade e da densidade dos fluidos contidos na rocha.
- Da situação na coluna, acima ou abaixo do horizonte limitante água-óleo.  $S_w$  será 100% abaixo desse horizonte, decrescendo até um mínimo no topo do reservatório ( não sendo nunca zero%).

Para formações arenosas desprovidas de folhelhos, foi estabelecida a fórmula empírica :

$$S_w = \left( \frac{R_o}{R_t} \right)^{\frac{1}{p}}$$

$R_o$  - Resistividade da formação quando totalmente saturada com água, ou

seja quando  $S_w = 1$  ;

$R_t$  = Resistividade da formação contendo óleo mais água da formação com a saturação  $S_w$  ;

$S_w$  = Saturação em água da formação.

$\left( \frac{R_t}{R_o} \right) = I$  , índice de resistividade da formação.

Como foi visto  $R_o = F \cdot R_w$  , donde :

$$S_w = \left( \frac{F \cdot R_w}{R_t} \right)^{\frac{1}{p}}$$

p varia de 1,7 a 2,2 sendo adotado  $p = 2$ . Então  $S_w = \left( \frac{F \cdot R_w}{R_t} \right)^{\frac{1}{2}}$  ;

fórmula aplicável para formações desprovidas de folhelho.

Medida de porosidade  $\phi$  numa formação arenosa desprovida de folhelho e contendo óleo.

Aplicando a fórmula de  $S_w$  para o caso da zona completamente invadida pelo filtrado da lama ( a qual ainda conterá uma saturação residual em óleo), tem-se :

$S_w = S_{xo}$  = Saturação em água da zona completamente invadida.

$R_w = R_{mf}$  = Resistividade da água ( do filtrado da lama), que está saturando a zona invadida. Obtida experimentalmente ou mediante tabelas. Ver Schlumberger 1958.

$R_t = R_{xo}$  = Resistividade da zona invadida saturada por água mais óleo. Obtida de um perfil de resistividade adequado, e aplicando tabelas correspondentes. Ver Schlumberger 1958.

Substituindo, tem-se :

$$S_{xo} = \left( \frac{F \cdot R_{mf}}{R_{xo}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{\sqrt{F}} = \sqrt{\frac{R_{mf}}{R_{xo}}} \cdot \frac{1}{S_{xo}}$$

Combinando-se com as fórmulas estabelecidas do fator de formação :

$$F = \frac{0,81}{\Phi^2} \quad \text{ou} \quad \Phi = \frac{\sqrt{0,81}}{\sqrt{F}} \quad \therefore \quad \frac{\Phi}{0,9} = \frac{1}{\sqrt{F}}$$

chega-se finalmente à :

$$\Phi = 0,9 \sqrt{\frac{R_{mf}}{R_{xo}}} \cdot \frac{1}{S_{xo}}$$

Observação : Algumas vezes  $R_t$  pode ser obtida diretamente dos perfis II, aplicando tabelas.

Na fórmula acima de  $\Phi$ ,  $S_{xo}$  é o único valor desconhecido, o qual é estimado com o procedimento seguinte :

$S_{xo} = 1 -$  Saturação residual em óleo

Sabe-se da experiência, que a saturação residual em óleo varia entre 15% à 25%, sendo adotado o valor médio 20%. Então

$S_{xo} = 1 - \frac{20}{100} = 0,8$  ; nos casos de formações com baixa permeabilidade e com óleos pesados, esse valor é ajustado para  $S_{xo} = 0,6$ .

Ver exemplo e tabelas de interpretação na bibliografia referida Schlumberger 1959.

Medida da porosidade  $\bar{\phi}$  numa formação areno-argilosa contendo óleo.

Para esses casos, o procedimento mais utilizado para determinar  $S_w$ , consiste na aplicação do perfil de potencial espontâneo (perfil SP), particularmente na relação dos parâmetros : - Potencial estático SP, (SSP) e pseudo-potencial estático SP, (PSP). Ver item 4.8.4.3

Utiliza a relação estabelecida por raciocínio matemático e confirmada experimentalmente :

$$PSP = -K \cdot \log \frac{Rxo}{Ro}$$

Para uma formação inter-laminada de folhelho e arenito limpo :

$$PSP = -K \cdot \log \frac{Rxo}{Rt} - 2dK \cdot \log \frac{Sxo}{Sw} \quad ; \text{ onde}$$

$$\alpha = \frac{PSP}{SSP} \quad . \quad \text{A solução dessa equação para } Sw, \text{ é obtida mediante tabela.}$$

Para a prática do procedimento ver bibliografia Schlumberger 1958.

Bibliografia - Referências bibliográficas do capítulo 4 - Métodos elétricos e eletro-magnéticos.

- ABEM - E M Gun - EM 1062 , 1064 e 1163 - Information Sheet
- ABEM - Tu 0960 , Tu 0664 - Turam method, equipment
- Astier, J.L. - Geofísica aplicada a la hidrogeología - (Trad. Editora Paraninfo - Madrid 1975
- Baird, Jon G. e Bosschart, R.A. e Seigel, H.H. - Geo electrical techniques in areas with conductive near-surface formations- Scintrex-limt. Canadá-Applications brief 72-2.
- Bardin, J. - La polarisation provoquée et son rôle en recherches minières- Annales des Mines- março 1969.
- Creba, T.J. - Moderate increase again reported in geophysical activity - Rev. Mining Engineering-SME-AIME maio 1982.
- Creba, T.J. - Anaconda Minerals Co. - Geophysics-Rev. Mining Engineering, SME-AIME maio 1983.
- Crane Geophysics Inst. - Comparison of field results and model studies with the horizontal shoot back EM system 1973.
- Davino, A. - Glossário de geofísica Aplicada - Rev. Mineração e Metalurgia- fevereiro 1976.
- Dobrin, M. - Introduction to geophysical prospecting 1963
- Don, M.W. - Airborne electromagnetic systems-geotrex Ltd. 1970.
- European Association of Exploration Geophysicists- Geophysical prospecting - Abaques de sondage électrique, la Compagnie Générale de Géophysique- Vol III - suplem. nº 3 - setembro 1955.
- Figuerola, J.C. - Tratado de Geofísica Aplicada- Livraria-Ciência-Indústria, S.L. 2ª edição. 1978.
- Fraser, D.C. - Contouring of VLF -EM data-Rev. Geophysics Vol 34 nº6- dezembro 1969.

- Geonics Ltd. - EM-16- VLF eletromagnetic unit - 1970
- Geoterrex Ltd. - Information Scheet 68-04-Airbone resistivity mapping with the Barringer INPUT EM prospecting system.
- Itenberg S.S. - Study of oil and gas series from Well logs - Mir Publishers-Moscow 1971.
- Jakosky, J.J. - Exploration Geophysics-Trija Publishing Comp. 1950.
- Keller Frischknecht - Electrical methods in Geophysical Prospecting-Edit. Pergamon Press 1966.
- Koller, R. (University of São Paulo, Brazil) - Ground Water exploration by the electrical resistivity method-ABEM-Geophysical Memorandum 3169-Suécia 1969.
- Kunetz, Geza- Principles of Direct current resistivity prospecting- Geoexploration Monographs Series I nº 1 1966.
- Lasfargues, P. - Prospeccion electrica par courants continus, Carte de potentiel , resistivite, polarisation spontanée, polarisation induite-Edit. Masson Paris- 1957.
- Leite, J.L. e Macedo , J.W.F. - Estudo comparativo dos arranjos Wenner e Schlumberger aplicados à sondagem elétrica vertical. Rev. Brasileira de Geociências Edit. SBG-Vol 12 nº4 dezembro 1982.
- Lewis, A. (associate editor) - New directions in exploration geophysics. Rev. E.& M.J. agosto e setembro 1982.
- Mooney, H.M. - Potencial devido a um eletrodo pontual de corrente e curvas de resistividade aparente para estruturas de duas, três e quatro camadas- Tradução-Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em geofísica da UFBA 1974, da edição Universit. Minnesota USA 1956.
- Moore, G.A. - Handbook of subsurface geology-Edit. Harper & Row, N.Y , London 1963.
- Orellana, Ernesto - Prospeccion Geoelectrica en corriente continua-Edit. Biblioteca Técnica Philips-Madrid 1972.

- Orellana, Ernesto- Prospeccion geoelectrica por campos variables-  
Edit. Biblioteca Técnica Philips -Madrid 1974.
- Parasnis, D.S. - Principles of applied geophysics- Edit. John Wiley &  
Sons inc. N.Y. 1962.
- Parasnis, D.S. - Mining Geophysics - 2ª revised and up dated edition  
Elsevier Publishing Comp. 1973.
- Peterson, N. R e Ronka, V. - Five years of surveying with the VLF-EM  
method-Geonics Limited 1969.
- Petrobras-CENAP- Manual de subsuperficie 1963.
- Salisch, H.A. et. al (Schlumberger Surencó SA) - El registro continuo  
del buzamiento-Edit. Asociacion Venezolana de Geolo-  
gia, Minería y Petróleo-Bol. Inf. 7 nº 1 Janeiro 1964.
- Scintrex - Airbone electromagnetic system - Information Sheet.
- Scintrex SE-77- Multifrequency EM receiver (Turan EM system).
- Sharpe of Canadá- Model SE-200-Information Sheet
- Schlumberger - Well Logging, introduction to-Document nº8-Schlumberger  
Well Surveing Corp. 1958.
- Schlumberger-Log interpretation Charts-Schlumberger Well Surveing Corp.  
1958.
- Society of Exploration Geophysicists-Mining Geophysics 1959.
- Telford, W.M ; Geldart, L.R; Sheriff, R.E; Keys, A.A - Applied Geophysics-  
Edit. Cambridge University Press 1976.
- Terratest - Find the earth's waiting assets by remote sensing techni-  
ques- Information sheet
- Vicira, A.P. - Manual do VLF geonics EM 16 - centro de geofísica apli-  
cada-DNEM 3º Distrito 1976.

## 5- Métodos radiométricos ou métodos de radioatividade.

### 5.1- Essência, aplicação e história dos métodos radiométricos.

Radioatividade é propriedade dos núcleos atômicos. É independente das composições químicas das substâncias nas quais os elementos radioativos ocorrem. Geralmente esses elementos ocorrem sob a forma de compostos químicos complexos.

Propriedades radioativas das rochas podem indicar presença de concentração interessantes de elementos radioativos nas mesmas, e podem também caracterizar formações, através do conteúdo desses elementos.

Em prospecção, de modo geral, a radioatividade é detectada ou medida através das radiações gama ( $\gamma$ ). Radiações alfa ( $\alpha$ ) ou beta ( $\beta$ ) naturais, são obstruídas por espessuras de rocha ou solo de menos do que 1,00 centímetro. Radiações  $\alpha$  são obstruídas por cerca de 9,00 centímetros de ar e radiações  $\beta$  por menos do que 2,00 metros de ar. Por isso radiações  $\alpha$  e  $\beta$  prestam-se pouco para serem utilizadas em prospecção.

Radiações  $\gamma$  podem ser medidas após atravessarem algumas dezenas de metros de ar, ou cerca de 1,00 metro de rocha. Assim medidas de radioatividade  $\gamma$  sobre o terreno, fornecem informações com respeito a apenas 0,50m ou pouco mais, abaixo da superfície.

Os levantamentos radiométricos aerotransportados são feitos à alturas da ordem de 120m. São praticados também diretamente sob o terreno, no interior dos trabalhos mineiros de pesquisa (trincheiras, galerias) e ainda ao longo de furos de sonda (perfilagem radiométrica).

Todas as rochas contém naturalmente elementos muito radioativos como os das famílias do Urânio e do Tório, com teores variados e característicos (geralmente sob a forma de elementos traços). O isótopo radioativo do potássio, o potássio de peso atômico 40 ( $K^{40}$ ), está sempre presente junto ao potássio natural (isótopo inerte  $K^{39}$ ) na proporção de 0,012%. Sendo o potássio, um elemento abundante na composição das rochas, como constituinte de minerais essenciais, praticamente todas as rochas contém  $K^{40}$  radioativo.

Assim em qualquer lugar da crosta terrestre existem radiações  $\gamma$  provindas das rochas "in natura", ou de outros materiais (como por exemplo agregados de concreto).

Em qualquer ambiente, radiações dessas origens, somam-se à outras radiações: De raios cósmicos (provindas originariamente do espaço exterior), de radiações provocadas por reações nucleares (explosões atômicas ou em reatores); de radiações devidas as substâncias dos painéis dos aparelhos de medida, etc.

Assim em qualquer lugar existirá uma intensidade de radiação, cujo valor oscila em torno de uma média característica. Esse é o que se denomina o "background" de radioatividade, ou radiação de fundo, - característico para o lugar. Depende também das condições como foram praticadas as medidas.

As litologias ou as formações próximas, condicionam em grande parte o "background", podendo-se através de mudanças sensíveis de "background", localizar contatos e assim delimitar formações.

Por outro lado a pesquisa de indícios de concentrações interessantes de elementos radioativos, consiste em localizar através de medidas geofísicas de radioatividade, locais onde a intensidade sobressaia-se sensivelmente do "background". Diz-se que esses locais tem anomalias radioativas, as quais para serem sensíveis, devem ser superior duas à três vezes a intensidade do "background".

Nem todos os elementos radioativos emitem raios  $\gamma$ , mas mesmo assim poderão ser detectados, através de outro elemento presente de sua família radioativa, que emite raio  $\gamma$ . O Urânio é detectado indiretamente através das radiações emitidas pelo elemento radioativo, principalmente. Radônio ( $Rn^{222}$ ), é um elemento gasoso da família do Urânio, também radioativo e com vida média de 3,85 dias. Emanações gasosas de  $Rn^{222}$  poderão indicar concentrações de Urânio a profundidades relativamente grandes. Desde que a migração até a superfície, através de fraturas dessas emanações, ocorra em tempo compatível com a sua vida média, para que seja sensível no local da medida.

Os elementos radioativos que interessam a prospecção são:

- Os elementos da família do Urânio;
- Os elementos da família do Tório;
- O isótopo radioativo do potássio, o  $K^{40}$ .

Muitos outros nuclídeos existem, porém sem interesse, por não serem elementos naturais, ou por possuírem meia vida muito pequena, ou por ocorrerem em quantidades insignificantes.

O Urânio e o Tório são abundantes na natureza, sendo atualmente, ou potencialmente de valor econômico, as concentrações desses elementos. Os mesmos interessam também por serem indicadores da presença de outros elementos de valor econômico como Zircônio, Tântalo, Nióbio e terras raras. O  $K^{40}$  é importante pela sua contribuição para o "background" de radioatividade. Sendo muito abundante e sem valor econômico, desempenha em relação aos métodos radiométricos, papel análogo ao grafito no caso dos métodos eletro-magnéticos e elétricos. Pode ocasionar anomalia radioativa sem interesse econômico, como o faz o grafito, no caso dos outros métodos referidos.

Métodos radiométricos auxiliam a prospecção indiretamente, como forma de caracterizar formações, de indicar zonas fraturadas, ou

presença de atividades hidrotermais.

Métodos radiométricos são da maior importância, nas técnicas de perfilagem de furo de sonda. Sob a forma de perfilagem são muito usados para estudos estratigráficos na pesquisa de petróleo, de carvão, de água subterrânea, de jazimentos salinos.

Perfilagem de radiação gama fornece informações semelhantes as do perfilagem com potencial espontâneo, sendo uma técnica alternativa para o perfil SP. É utilizada para pesquisa de Urânio, e também para colocação de "marcas" nas técnicas para perfuração na produção de petróleo.

Perfilagem gama-gama, isto é de poder absorvente às radiações gama das formações, é muito utilizada para estudos estratigráficos, definindo contrastes de densidade, servindo também para avaliar porosidade.

Perfilagem neutron-gama, consistindo em perfilar radiações gama dos processos de captura por bombardeamento das formações com radiações de fontes de neutrons, são técnicas de estudos estratigráficos de definições de formações e também para avaliação de porosidades. Técnica desse tipo permite análises "in situ" praticadas em amostragem de minérios metálicos em furos rasos.

~~Emanações gasosas radioativas, principalmente do Radônio ( $Rn^{222}$ ), são muito solúveis, em água. Por isso conferem propriedades radioativas à águas subterrâneas. Técnicas de medidas radiométricas são utilizadas na avaliação de fontes hidrominerais radioativas.~~

~~Radioatividade é também utilizada nas avaliações das idades absolutas das rochas.~~

Estas duas últimas aplicações não são consideradas técnicas de prospecção, motivo pela qual não serão abordadas.

Essencialmente, os equipamentos de medidas utilizados em prospecção, são os contadores Geiger-Müller, os cintilômetros e os espectrometros de radiação gama.

Contadores Geiger-Müller são aparelhos portáteis simples para medir intensidade de radiações através da propriedade das mesmas de ionizarem os gases. Foram desenvolvidos a partir da câmara de ionização utilizada desde os primórdios do conhecimento físico da radioatividade, no princípio do século.

Cintilômetros são aparelhos também portáteis e simples e mais sensíveis que os contadores Geiger-Müller, para medir intensidade das radiações gama. Aplicam a propriedade de fluorescência provocada pelas radiações, em cristais de algumas substâncias como esfalerita etc.

Ambos, transformam o efeito da radioatividade (de ionização ou de

fluorescência) em impulsos elétricos, mediante os quais a radioatividade é medida.

Espectrometros de radiação permitem processar os impulsos elétricos produzidos pela radiação num cintilômetro adequado, de modo a analisá-los discriminando níveis de energia. Desse modo discriminam as contribuições relativas devidas à radiações do Urânio, do Tório e do  $K^{40}$ , na radiação detectada e medida.

Considerando-se as propriedades físicas utilizadas e os respectivos equipamentos de medida e detecção, os métodos radiométricos são métodos geofísicos. Por outro lado as técnicas de interpretação, respectivos raciocínios e as informações possíveis de serem obtidas para a prospecção, são predominantemente geoquímicos.

A semelhança como os métodos geoquímicos, a penetração em subsuperfície é muito pequena, e praticamente não fornecem informação com respeito a parâmetros estruturais.

Até a década de 1940, os métodos radiométricos eram considerados de interesse quase que exclusivamente científico.

Após a 2ª grande guerra, adquiriram muita importância devido a corrida para procura de novos depósitos de urânio, considerados desde então de importância estratégica-econômica.

O desenvolvimento dos métodos radiométricos de prospecção, aproveitou as bases do conhecimento científico da radioatividade e da eletrônica já então muito desenvolvidos.

Datando o conhecimento da radioatividade do fim do século XIX, sua aplicação em prospecção intensificou-se após a década de 1940. Consistiu no desenvolvimento de equipamentos portáteis para a prática de campo, e na sistematização de conhecimentos geoquímicos com enfoque para elementos radioativos.

O contador Geiger-Müller foi concebido por Hans Geiger e Walther Müller na Alemanha, tendo sido a publicação do invento em 1920.

Foi o primeiro equipamento utilizado em prospecção, sendo ainda usado devido seu pequeno custo, para os primeiros reconhecimentos.

O protótipo do cintilometro, aplicando o princípio do espintariscópio idealizado por Crooks em 1903, foi obtido em 1944, acoplando um cristal fluorescente à um foto-multiplicador de impulsos elétricos. Somente em 1954, foram desenvolvidos para uso efetivo de campo, graças a obtenção de cristais sintéticos mais eficientes que os naturais.

Desde logo tenderam à substituir os contadores Geiger-Müller, possibilitando medidas contínuas, transportado em veículos.

Possibilitaram os levantamentos aéreos.

Espectrometria de radiação foi desenvolvida a partir da década de

1960, juntamente com os levantamentos aéreos.

A perfilagem com métodos geofísicos iniciou-se na década de 1950.

## 5.2- Radioatividade - princípios físicos.

### 5.2.1- Natureza das radiações.

Radiações podem ser:

#### a) Partículas

- Possuem propriedades de massa;
- Quase sempre tem carga elétrica associada; com a exceção do neutron que não tem carga elétrica.

#### b) Impulsos eletromagnéticos e/ou ondas eletromagnéticas

- São feixes de energia. Podem ser individualizados, sendo então considerados como se fossem partículas, e então denominados photons.

Tipo de partículas:

#### - Neutron

- Possui a massa de uma unidade de massa atômica  
(1 u.m.a. = massa do núcleo do átomo de hidrogênio)
- Não tem carga elétrica.

#### - Proton

- Possui a massa de 1.u.m.a., e carga positiva de uma unidade de carga elétrica atômica.  
(+ 1 u.e.a. = carga elétrica de um eletron com sinal contrário).

#### - Alfa ( $\alpha$ )

- Equivale ao núcleo de um átomo de hélio (He) com dois protons e dois neutrons.
- Devido a emissão de uma partícula  $\alpha$ , o átomo gerador (o átomo mãe), reduz-se de duas (-2) unidades no número atômico, e de quatro (-4) unidades no peso atômico.
- Radiações  $\alpha$  são fortemente ionizantes, devido suas massa e carga elétrica relativamente grandes. Capturam eletrons orbitais - de outros átomos, tornando-se He neutro (inerte).  
Conseqüentemente, penetram somente 8,62cm de ar, e são obstruídas por uma folha de papel. Radiações  $\alpha$  são inadequadas para - prospecção, devido sua penetração praticamente insignificante.

#### - Beta ( $\beta$ )

- Possui massa de  $5 \times 10^{-4}$  u.m.a., igual a massa de um eletron.
- Em geral possui carga elétrica de (-1) u.e.a.

Alguns núcleos radioativos artificiais emitem positron (ou anti-eletron), com carga elétrica (+1) u.e.a. Definindo-se então a partícula beta mais, distinta da partícula beta menos, acima definida. Entretanto radiações beta positiva, não interessam a -

prospecção porque não existem naturalmente.

- A emissão de uma partícula  $\beta$  (beta menos), aumenta o número atômico do átomo mãe em (+1) unidade, permanecendo seu peso atômico praticamente inalterado.

A velocidade da partícula  $\beta$  é variada. Pode possuir velocidades relativamente baixas e muito altas, (comparáveis com a velocidade da luz).

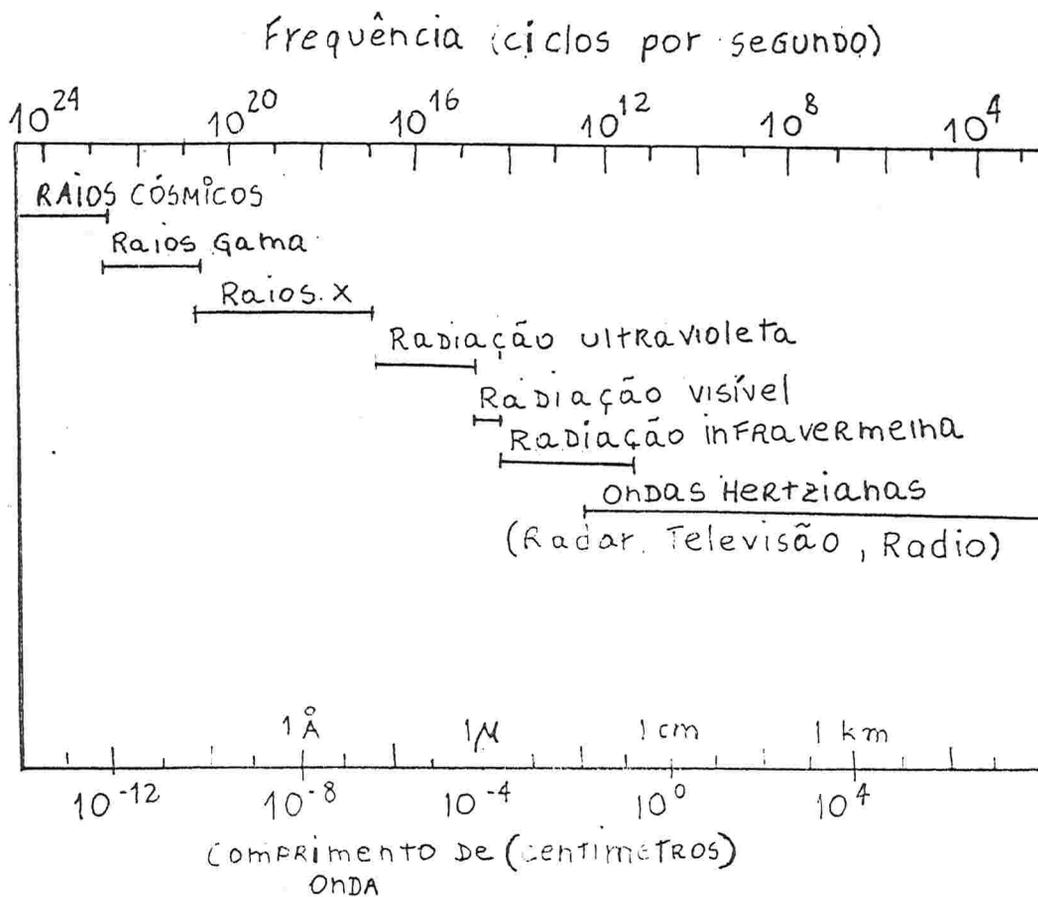
Na prática seu poder ionizante é considerado ser  $1/100$  x menos do que o da partícula  $\alpha$ . Do mesmo modo sua velocidade e penetração 100 x mais do que as da partícula  $\alpha$ .

Radiações  $\beta$  naturais (com energias inferiores a 3.0 MeV), são obstruídas por espessuras de rochas menores do que 2,00cm, espessuras de ar menores do que 2,00 m, e de alumínio menores do que 5,00mm.

Seu pequeno poder de penetração, limita muito sua utilidade em prospecção.

Nas reações de alta energia, são produzidos muitos outros tipos de partículas, que são desinteressantes à prospecção por não serem naturais.

- Radiações por impulsos eletro-magnéticos, em particular radiações gama ( $\gamma$ ).



176

Como mostra a figura, radiações eletro-magnéticas cobrem um amplo espectro, desde radio frequências (com cerca de  $10^4$  Hertz), até radiações de altas frequências (superiores à  $10^{24}$  Hertz). Nas demais altas frequências, estão incluídas as de raios  $\gamma$ . Raios X assemelham-se aos raios  $\gamma$ , com frequências (ou energias) pouco menores.

A energia de uma onda eletro-magnética é expressa pela equação:

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{equação 1}), \text{ onde:}$$

$h$  = Constante física de Plank;  $h = 6,58171 \times 10^{-16}$  e. V. seg.

$c$  = Velocidade da luz = constante para todas as ondas eletro-magnéticas.

$\lambda$  = Comprimento de onda da radiação.

Observação: 1 e. V. = um eletro-volt = a energia adquirida por um eletrón passando entre as placas paralelas de um capacitór, cuja diferença de potencial seja de um volt.

Alguns distinguem raios X de raios  $\gamma$ , conforme a energia da radiação:

- Raios X, com energia entre 40 e. V à 40 K e V, correspondendo à frequências entre  $6 \times 10^{15}$  Hertz e  $6 \times 10^{18}$  Hertz.
- Raios  $\gamma$ , com energia acima de 40 K e V (ou frequências acima de  $6 \times 10^{18}$  Hertz).

Entretanto a distinção mais usada, relaciona-se à origem da radiação, definindo-se

- Raios X - produzidos por mudanças dos eletrons orbitais, de uma órbita mais interna para outra mais externa na coroa do átomo.
- Raios  $\gamma$  - produzidos por reações nucleares (naturais ou provocadas).

Essa última distinção em parte não é coerente com a primeira, pois radiações de origem nuclear emitidas pelo Erbium ( $\text{Er}^{169}$ ) têm energia de apenas 8 K e V. Por outro lado, diferenças de níveis de energia entre eletrons orbitais podem atingir 140 K e V.

Na prática, considera-se o poder ionizante dos raios  $\gamma$ , 100 x menor que o dos raios  $\beta$ . Da mesma forma, considera-se a penetração dos raios  $\gamma$ , 10 x à 100 x maior do que a dos raios  $\beta$ .

Raios  $\gamma$  podem atravessar mais do que 1cm de chumbo, alguns centímetros de alumínio, pouco menos de 100cm de rocha, e mais do que 100 metros de ar.

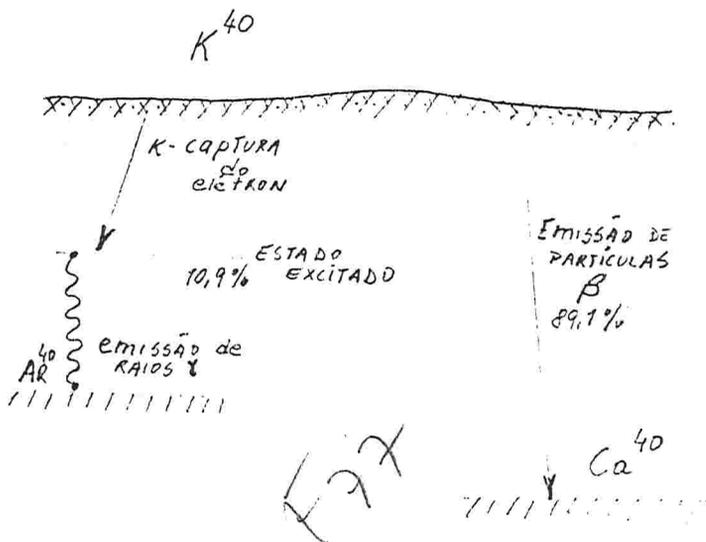
São as radiações utilizadas por excelencia em prospecção. Observe-se que a penetração de uma radiação, depende do seu tipo (partículas ou ondas eletro-magnéticas). Para um tipo em particular, depende também de seu nível de energia. Depende ainda da substância através-

sada, (principalmente da sua densidade e de seu número atômico).

Na prática admite-se que radiações  $\alpha$  ou  $\beta$  não atravessam coberturas de rochas; e 30cm a 50cm de rochas duras obstruem sensivelmente radiações  $\gamma$ . Rochas moles ou solos são atravessados com espessuras pouco maiores; sendo 60cm o limite prático para cobertura de água no caso dos raios  $\gamma$ .

De modo geral, radiações  $\alpha$ ,  $\beta$ , ou  $\gamma$  são produzidas por estados de excitação dos núcleos dos elementos químicos, sendo geralmente fenômenos de origem exclusivamente nucleares.

No caso da radiação emitida pelo isótopo radioativo do potássio - ( $K^{40}$ ), acontece o fenômeno designado por K-captura. Nesse caso, um elétron da órbita mais interna (órbita K) é capturado pelo núcleo do elemento, com emissão de raio  $\gamma$ , contemporaneamente à emissão de raio  $\beta$  por excitação nuclear.



Como mostra o esquema, 10,9% do  $K^{40}$  transmuta-se em  $Ar^{40}$  com emissão de raio  $\gamma$ , enquanto 89,1% transmuta-se em  $Ca^{40}$  com emissão de raio  $\beta$ .  $Ar^{40}$  e  $Ca^{40}$  são os elementos inertes resultantes.

#### - Raios Cômicos

Além das radiações  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são detectadas nos aparelhos de medida os chamados raios cômicos. Esses provêm do espaço exterior à terra, atingindo a atmosfera com energia da ordem de  $10^7$  K e V. Ao penetrarem na atmosfera, perdem energia por chocarem-se com os átomos dos gases da mesma, transformando-se nos chamados raios cômicos secundários.

Estes últimos são radiações complexas constituídas por fons de frequências muito altas (superiores a  $10^{22}$  Hertz), por raios  $\gamma$ , e ainda por vários tipos de partículas.

Raios cômicos estão sempre presentes, contribuindo para o "back-ground" de radioatividade nos locais das medidas.

Aumentam de intensidade com a altitude, porém essa variação é sensível somente em grandes altitudes.

## 5.2.2- Processos de desintegração radioativa.

\* - Constante de desintegração — -

É a probabilidade de um átomo de um elemento radioativo se desintegrar num instante determinado.

Como átomos de um mesmo elemento são idênticos, resulta que a probabilidade é a mesma, sendo uma constante característica de cada elemento radioativo. não é função do tempo nem de condições de pressão, temperatura ou da forma de composição química (ou isolada) que se encontre o átomo.

Isto significa que não depende das condições físicas ou químicas ambientais, e também da idade do átomo.

Num instante determinado, havendo  $N$  átomos do elemento presente, a atividade ou o número de desintegrações que acontecerão num intervalo de tempo  $dt$  será:

$$A = N\lambda$$

A taxa de desintegração (ou de diminuição) do elemento mãe no intervalo de tempo  $dt$  será:

$$\frac{dN}{dt} = -N\lambda; \text{ ou } dN = -N\lambda dt$$

Se  $N_0$  o número de átomos ativos (mãe) num instante inicial  $t=0$ , o número de átomos (mãe)  $N_t$  que permanecerão ativos após um intervalo de tempo  $t$ , será dado pela integral:

$$N_t = \int_0^t -N_0 \lambda dt = N_0 e^{-\lambda t} \text{ (equação 2)}$$

Assim que:

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}, \text{ ou } -\lambda t = \int_M \frac{N_t}{N_0} = 2,303 \log_{10} \left( \frac{N_t}{N_0} \right)$$

\* Vida média

É o tempo necessário para que o número de átomos ativos (mãe) de um mesmo elemento, reduza-se a metade, por efeito da desintegração. Como se verá esse número também é uma constante característica para cada elemento radioativo.

Supondo-se que após um período de tempo  $t_{1/2}$ , permaneçam a metade dos átomos ativos do que o que existia num tempo inicial; chamando-se  $N_{1/2}$  e  $N_0$  nos números de átomos ativos no fim e no início desse período, tem-se por definição:

$$\frac{N_{1/2}}{N_0} = \frac{1}{2}; \text{ ou } N_{1/2} = \frac{N_0}{2}$$

De acordo com o estabelecido na equação (2) tem-se:

$$N_{1/2} = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \therefore \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}; \text{ ou } -\lambda t_{1/2} = \int_M \left( \frac{1}{2} \right)$$

$$-\lambda t_{1/2} = 2,303 \log_{10} 0,5 = -0,693 \text{ ou}$$

$$\boxed{t_{1/2} = 0,693 \times \frac{1}{\lambda}} \text{ equação 3}$$

Assim, a vida média de um elemento radioativo é uma constante, sendo o inverso de sua constante de desintegração multiplicado pelo fator 0,693.

Vidas médias de nuclídeos podem ser tão pequenos como de  $10^{-6}$  segundos, e tão grandes como  $10^5$  milhões de anos.

A vida média do  $U^{238}$  é 4.560 milhões (M) de anos; do  $Th^{232}$  é 14 000 M de anos; do  $K^{40}$  é 1 400 M de anos.

\* - Equilíbrio radioativo

Diz-se que há equilíbrio radioativo, quando numa família de elementos radioativos se desintegrando, a taxa de desintegração de cada elemento filha, for igual a taxa de sua geração pelo seu respectivo elemento mãe.

Desde que todos os elementos permaneçam no sistema, numa família (ou série) se desintegrando, após um tempo suficientemente longo, será atingido o estado de equilíbrio, entre cada par de elementos geradores e gerados da série.

Sendo muito grande a vida média do primeiro elemento da série, sua diminuição no tempo será praticamente insensível e os números de átomos de cada elemento, permanecerão praticamente constante.

Chamando-se  $N_1$  e  $\lambda_1$  o número de átomos e a constante de desintegração de um determinado elemento mãe, sua taxa de desintegração será:  $\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$

Ao mesmo tempo o respectivo elemento filha que lhe segue na série, estará se desintegrando a uma taxa  $-\lambda_2 N_2$ , na qual  $\lambda_2$  e  $N_2$  são: sua respectiva constante de desintegração, e seu número de átomos ativos.

A taxa de acumulação de átomos gerados (filha) será a diferença entre a sua geração e a sua desintegração no intervalo de tempo  $dt$ . Tem-se então:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

Pela mesma razão a taxa de acumulação de um terceiro elemento na série (um elemento neto), será:

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

O mesmo poderá ser estabelecido sucessivamente para os elementos que seguem na série.

No equilíbrio, taxa de acumulação de cada elemento da série, será zero por definição. Então:

$$0 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$0 = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

$$0 = \lambda_3 N_3 - \lambda_4 N_4$$

$$\text{de onde: } \lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots$$

Chamando-se  $t_1, t_2, t_3, \dots$  as vidas médias dos elementos da série, - ter-se-á de acordo com a equação (3)

$$t_1 = 0,693 \cdot \frac{1}{\lambda_1}; t_2 = 0,693 \cdot \frac{1}{\lambda_2}; t_3 = 0,693 \cdot \frac{1}{\lambda_3}; \dots$$

$$\lambda_1 = \frac{0,693}{t_1}; \lambda_2 = \frac{0,693}{t_2}; \lambda_3 = \frac{0,693}{t_3}; \dots$$

Substituindo-se na igualdade acima chega-se à:

$$\frac{N_1}{t_1} = \frac{N_2}{t_2} = \frac{N_3}{t_3} = \dots$$

Essas condições permanecem inalteradas no tempo (na escala humana). Portanto, numa série em equilíbrio, na qual sejam conhecidas as respectivas vidas médias dos elementos da série, torna-se possível:

- O cálculo do teor de todos os elementos da série, mediante a análise do teor de um dos elementos presentes.

Entretanto é necessário que todos os elementos da série permaneçam no sistema. Isto é, que não haja remoção por efeito de erosão, ou evasão no caso de elementos gasosos (como o radônio  $Rn^{222}$  da série do Urânio).

Uma segunda consequência, é a possibilidade de estimar-se o teor de um elemento da série, medindo-se a radioatividade total produzida pelo conjunto da série em equilíbrio na rocha. Compara-se com a radioatividade de um padrão, que por sua composição conhecida, simule as condições existentes na rocha (ou formação).

Essa é uma prática usada rotineiramente na pesquisa de Urânio, sujeita naturalmente a erros mais ou menos significantes.

Sendo o parâmetro comparado a radioatividade total, para a qual contribuem todos os elementos radioativos presentes, resulta:

- Nos casos de erosão removendo elementos do sistema, ou de evasão de  $Rn^{222}$ , haverá intensidade de radiação menor, ocasionando avaliação com erro para menos, no teor em Urânio da formação.

- Absorção da radioatividade pelos elementos inertes da rocha, ou por água contida (umidade da rocha), resulta em intensidade de radioatividade menor. Portanto um erro para mais ou para menos, se o padrão de comparação diferir em composição de substâncias absorventes, ou em umidade.

- Contribuição de radioatividade de elementos estranhos à série do Urânio que a rocha contenha (como elementos da série do Th ou  $K^{40}$ ), ocasionará erro para mais.

### 5.2.3- Poder absorvente das substâncias aos raios $\gamma$ .

Quando raios  $\gamma$  atravessam a matéria, não se extinguem instantaneamente. Eles são absorvidos gradualmente. Sua intensidade é reduzida em cada unidade de comprimento da espessura atravessada.

O poder absorvente de uma determinada substância (ou material), à passagem dos raios  $\gamma$ , é comumente expresso pelo parâmetro valor da meia espessura, ou simplesmente meia espessura (ME).

Meia espessura de uma substância, é definida como a espessura da substância (ou material), capaz de absorver metade da intensidade de uma radiação  $\gamma$  que lhe está atravessando.

Assim 1 ME, reduzirá a intensidade de um feixe de raios  $\gamma$  para a metade da sua intensidade original; 2 ME reduzirão para 1/4; e 3 ME para 1/8, etc.

A tabela seguinte expressa poderes absorventes de alguns materiais:

Raios $\gamma$ - energia em K e. V.	ME em cm			
	Água	Calcário muito compacto	Fe	Pb
200	5,08	2,12	0,66	0,14
1000	10,02	4,56	1,55	0,86
5000	23,20	9,90	2,79	1,47

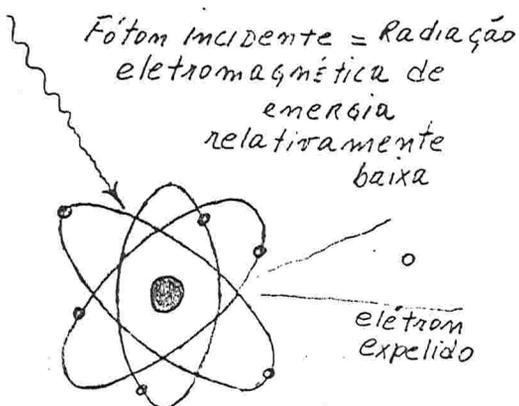
← 78

Revestimentos metálicos em sondagem, reduzem a intensidade dos raios  $\gamma$  na prática de perfilagem de furo, para valores da ordem de 30% em relação as medidas em furos não revestidos.

5.2.4- Processos de interação dos raios gama e de outras radiações eletromagnéticas com a matéria.

Esses processos são denominados, efeito foto-eletrico, efeito (ou espalhamento) Compton e efeito de produção de pares.

#### 5.2.4.1 - Efeito Fotoelétrico



Elemento absorvente

479

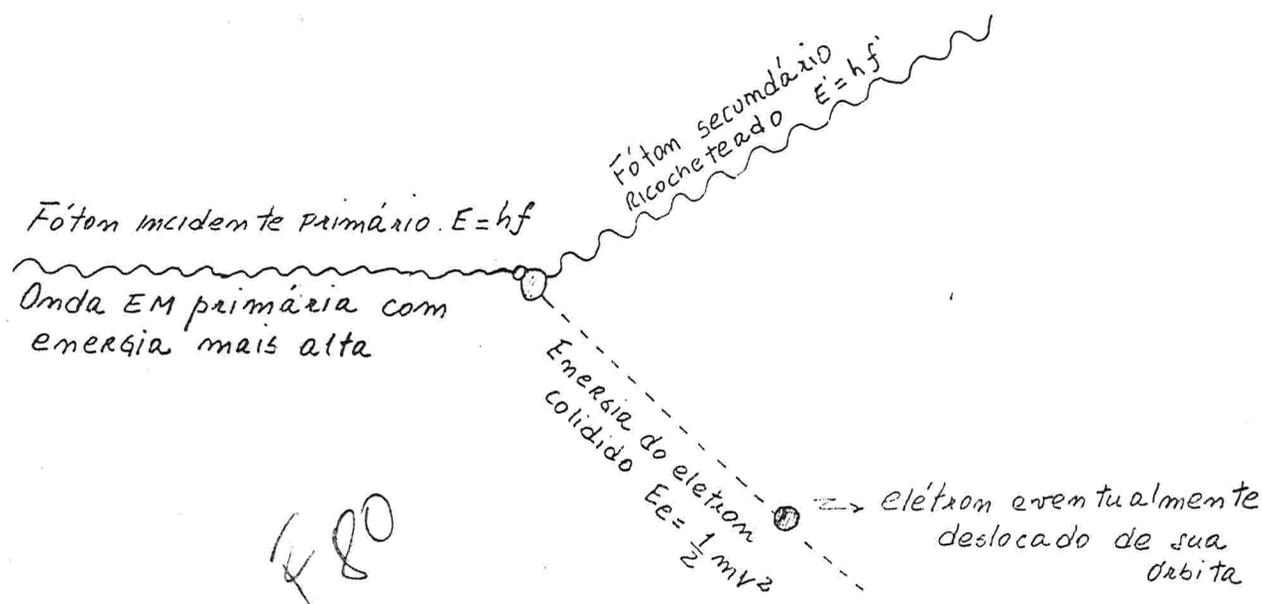
Quando um fóton com (relativamente) pouca energia ( $\leq 200$  K e V) atravessa a matéria, predomina o efeito foto-elétrico. Nesse caso, a energia do fóton incidente é totalmente absorvida ao encontrar um dos elétrons orbitais - mais exteriores do átomo absorvente. O elétron é expelido de sua órbita, com emissão de raio X. Raios X devido aos efeitos foto-elétricos iniciais, são igualmente absorvidos por um segundo efeito foto-elétrico, e assim por diante, até que toda energia do fóton incidente seja absorvida na matéria. O evento desse efeito depende também do número atômico dos elementos da matê-

ria absorvente, os quais indiferentemente, podem estar contidos em -- compostos químicos ou isolados.

Como foi visto no item 5.2.1, a energia do foton incidente  $\bar{e}$  expressa pelo produto da constante de Plank  $h$ , pela frequ $\bar{e}$ ncia  $f$  da radia $\bar{c}$ o incidente:  $E = hf$  (equa $\bar{c}$ o 1 vista anteriormente).

Mesmo com outros tipos de radia $\bar{c}$ o, em cada caso, haver $\bar{a}$  uma frequ $\bar{e}$ ncia  $f_0$  capaz de superar a energia da  $\bar{o}$ rbita do  $\bar{a}$ tomo, expelindo o eletr $\bar{o}$ n e resultando efeito fotoel $\bar{e}$ trico. Na superf $\bar{i}$ cie de metais al $\bar{c}$ alinos esse efeito  $\bar{e}$  poss $\bar{i}$ vel com frequ $\bar{e}$ ncias t $\bar{a}$ o baixas como as da luz vis $\bar{i}$ vel. Esse  $\bar{e}$  o princ $\bar{i}$ pio das c $\bar{e}$ lulas foto-el $\bar{e}$ tricas, pelas -- quais se obt $\bar{e}$ m a transforma $\bar{c}$ o da luz em impulsos el $\bar{e}$ tricos.

#### 5.2.4.2 - Efeito Compton, ou efeito de espalhamento Compton



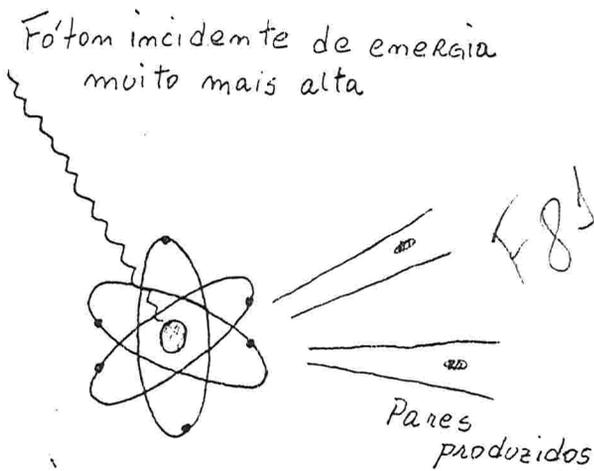
Fotons incidentes com maiores energias (entre 100 K e V e 2 M e V), ao incidirem com eletrons orbitais ricochetam-se, comportando-se como se fossem part $\bar{i}$ culas, e o choque fosse entre corpos el $\bar{a}$ sticos. Desse modo aparece novo foton, com diferente dire $\bar{c}$ o e com energia pouco me $\bar{n}$ or, dada por  $E' = hf'$ , sendo  $f' < f$ .

Muitas vezes a energia do foton incidente tem suficiente energia pa $\bar{r}$ a deslocar o eletr $\bar{o}$ n orbital e ainda dar o foton ricochetado. No caso em que  $f'$  do foton ricochetado, seja ainda maior do que a da luz vis $\bar{i}$ vel, a radia $\bar{c}$ o continuar $\bar{a}$  invis $\bar{i}$ vel. Outras incid $\bar{e}$ ncias ocorrer $\bar{a}$ o, -- at $\bar{e}$  que toda energia do foton prim $\bar{i}$ rio seja dissipada, na mat $\bar{e}$ ria da subst $\bar{a}$ ncia (ou subst $\bar{a}$ ncias) absorvente, espalhando-se a radia $\bar{c}$ o em muitas dire $\bar{c}$ o $\bar{e}$ s. Quando  $f'$  estiver na faixa de frequ $\bar{e}$ ncia do es $\bar{p}$ ectro vis $\bar{i}$ vel, h $\bar{a}$  produ $\bar{c}$ o de luz originando o fen $\bar{o}$ meno da fluores $\bar{c}$ encia. Em determinadas subst $\bar{a}$ ncias esse fen $\bar{o}$ meno pode ser obtido com energias mais baixas do que as dos raios gama e dos raios X, como as

das radiações ultravioletas. Sendo  $f$  do foton da luz ultravioleta, - muito próxima a frequência da luz visível,  $f'$  estará nesta última faixa (sendo visível). Esse é o princípio da identificação de certos minerais mediante observação com luz ultravioleta. Fluorescências são produzidas com cores características para diferentes minerais, quando o fenômeno ocorre. (Ex identificação de sheelita)

O fenômeno de espalhamento compton dos raios gama, é o predominante efeito da dissipação da intensidade das radiações, que ocorrem nas condições práticas da prospecção e da perfilagem com raios gama. É também importante para a compreensão dos fenômenos relacionados as medidas efetuadas com cintilômetros e em espectrometria de raios gama.

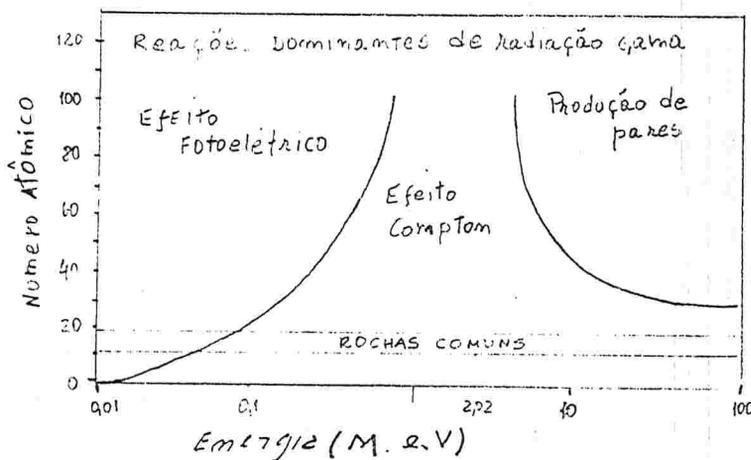
5.2.4.3 - Produção de pares



Quando o foton incidente possui energia muito mais alta - (ou muito maior frequência); - com maior energia do que a massa de um par eletron-positron, ou seja energia superior a  $2,02 M e V$ : - Ele penetra no átomo até junto a seu núcleo, - onde é completamente absorvido. Desaparece então completamente e há produção de um par eletron-positron. O eletron e o positron produzidos não podem

coexistirem juntos, e por sua vez anulam-se entre si, resultando então na emissão de dois ftons. A energia total do par será a energia do foton incidente. A energia dos dois ftons resultantes será de  $0,511 M e V$ , portanto na faixa de predominância de ocorrência do efeito compton, para novas incidências.

Como mostra a figura seguinte, dependendo dos números atômicos dos elementos das substâncias absorventes, e da energia da radiação, predomina um desses tipos de reação ou interação.



F82

Se o foton for de baixa energia não ocorrerá produção de pares; se - for de alta energia não ocorrerá inicialmente, efeito foto-elétrico.

#### 5.2.5 - Unidades de medida da radioatividade

##### 5.2.5.1 - Curie (em homenagem ao casal Pierre e Mme Curie) -

É a principal unidade física, para a medida da atividade de um espécime radioativo. É definida como o número de partículas alfa ( $\alpha$ ) emitidas por uma grama de radio puro ( $^{226}\text{Ra}$ ), num segundo. Esse número é  $3,7 \times 10^{10}$ . São utilizados os múltiplos e submúltiplos K Curie, mili e micro Curie.

##### 5.2.5.2 - Roentgen (em homenagem ao descobridor dos raios X).

É a principal unidade para medir intensidade de raio X. Devido a semelhança dos raios gama ( $\gamma$ ) com os raios X, essa é a unidade mais utilizada para as medidas absolutas dessas radiações. Por extensão é também utilizada para medir radiação-alfa ( $\alpha$ ) ou beta ( $\beta$ ). Um roentgen é definido como a quantidade de radiação que produz uma unidade eletrostática de carga, num  $\text{cm}^3$  de ar nas condições normais de pressão e temperatura ( $0^\circ\text{C}$  e 760 mm de Hg). Significa a produção de  $2,08 \times 10^9$  pares de ions em  $1 \text{ cm}^3$  de ar nas condições normais de P e T. Portanto é uma unidade de medida baseada na propriedade de ionização dos gases por efeito de radiações.

Por exemplo, a dosagem permitida para exposição humana aos efeitos - da radioatividade é de 300 miliroentgen por semana ( $300 \times 10^{-3}$  roentgen/semana).

Em geofísica o submúltiplo mais utilizado para medidas absolutas de radioatividade das rochas, é o submúltiplo microroentgen por hora ( $1 \mu\text{ roentgen/hora} = 10^{-6}$  roentgen/hora).

##### 5.2.5.3 - Impulso por minuto - ou impulso por segundo

Essa é uma unidade arbitrária-relativa, em relação a qual são feitas - as indicações de medida de radioatividade nos aparelhos portáteis de - prospecção geofísica.

Corresponde a impulsos elétricos medidos <sup>num</sup> miliamperímetro, resultante de impulsos radioativos detectados e integrados, em impulsos elétricos ampliados. Esses impulsos dependem das características construtivas do circuito eletrônico integradôr-ampliadôr do aparelho. É uma unidade, - para medidas relativas, no campo. Poderá ser transformada em medidas - absolutas, mediante calibração, por comparação com padrões de radioatividade conhecida. (ver contador Geiger-Müller e Cintilometro, itens 5.5.2 e 5.5.3 ). Impulso por segundo padronizado é unidade API-Ver item 5.6.1.5

5.2.5.4 - Grama - radio - equivalente por grama de rocha, e submúltiplos utilizados em prospecção geofísica, e em perfilagem com métodos radiométricos. pg 411

São submúltiplos muito utilizados na prática corrente em geofísica -

aplicada, para expressar a radioatividade das rochas ou das formações, principalmente em perfilagem de raios gama.

O número de grama - radio - equivalente por grama de rocha, significa a concentração de elementos radioativos existentes em uma grama de rocha, que produziria a mesma intensidade de radiação gama, que a de - sintegração de uma grama de radio puro ( ${}_{86}\text{Ra}^{226}$ ). Sendo muito pequena a radioatividade normal das rochas, são utilizados submúltiplos, definindo-se:

- micro-micrograma-radio-equivalente por grama de rocha  

$$\frac{1 \mu\mu \text{ Mg-radio-equivalente}}{1 \text{ g}} = \frac{1 \text{ g-radio-equivalente}}{1 \text{ g}} \times 10^{-12}$$

- micrograma - radio - equivalente por tonelada de rocha, com a mesma grandeza que o submúltiplo anterior, abreviando-se:

$1 \text{ Mg} - \text{Ra} - \text{equivalente} / \text{ton.}$

Significam que a concentração de todos os elementos radioativos contidos numa tonelada de rocha, produziriam a mesma radioatividade que 1 Mg de radio ( $\text{Ra}$ ).

Frequentemente essa unidade é expressa sob a forma de percentagem, de modo semelhante como teores são expressos.

Assim, por exemplo, dizer-se que a radioatividade de uma formação é de 7 Mg de radio-equivalente é de  $0,0007 \times 10 \%$ .

Com efeito:

1 ton da formação =  $1 \times 10^6$  g da formação, tem  $7 \times 10^{-6}$  g de Ra-equivalente  
 100 g da formação, terá  $\frac{10^2}{1 \times 10^6} \times 7 \times 10^{-6}$  de Ra-equivalente =  $0,0007 \times 10^{-6}$  Ra-equivalente.

#### 5.2.5.5 - Mache

É uma unidade para avaliar a radioatividade de solos ou líquidos produzidos por emanções gasosas contidas nos poros, ou dissolvidas. É referida a radioatividade do radônio,  ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ . 1 Mache =  $4 \cdot 10^{-10}$  curie. Representa a quantidade de  $\text{Rn}^{222}$  em um litro de água (nas condições normais de temperatura e pressão), capaz de produzir uma corrente elétrica de saturação, com carga elétrica de  $1 \cdot 10^{-3}$  v.e.s. numa câmara de ionização.

Na legislação minerária do Brasil, as fontes hidrominerais radioativas são classificadas:

Fracamente radioativa- Com teor em radônio superior à 5 Mache

———— radioativa- Com teor em radônio superior à 10 Mache

Fortemente radioativa- Com teor em radônio superior à 50 Mache

Observe-se que nenhuma dessas unidades (O Curie, o roetgen, o impulso/minuto, ou radio-equivalente e o Mache) relacionam-se com energia da radiação, Medidas de radioatividade com as mesmas, nada indicam com respeito a energia da radiação.

### 5.3 - Elementos naturais radioativos

#### 5.3.1 - Generalidades

Os principais elementos naturais, ou famílias de elementos que se de integram espontaneamente, e que são as fontes da radioatividade natural significantes, são as seguintes:

- Os elementos da família (ou da série) do Urânio ( $92 U^{238}$ ) - os mais importantes.
- Os elementos da família (ou da série) do Urânio ( $92 U^{235}$ ) - De menor importância.
- Os elementos da família (ou da série) do Tório ( $90 Th^{232}$ ) - De muita importância.
- O isótopo radioativo do potássio natural, o ( $19 K^{40}$ ) - Importante.

Existe uma quarta família de elementos naturalmente radioativos a qual é a do netunio ( $93 Np^{237}$ ). Entretanto a vida média desse elemento é muito curta, motivo pelo qual a existência dos elementos dessa família é insignificante na natureza.

Existem 18 isótopos naturalmente radioativos além dos das famílias citadas. Entre os mesmos contam-se o isótopo do potássio citado ( $19 K^{40}$ ) e o do rubídio ( $37 Rb^{87}$ ). Excetuando o potássio 40, todas são desinteressantes. Seja por existirem em quantidades insignificantes, ou seja por não emitirem radiações gama.

No total existem mais do que 50 elementos naturais radioativos, e mais de 800 contando-se os produzidos artificialmente.

As três famílias importantes são iniciadas por um elemento de longa vida, e terminam por um isótopo estável-inerte do Chumbo. Todas tem um elemento intermediário gasoso. A tabela anexa mostra o processo de desintegração dessas três séries, e a do potássio 40.

#### 5.3.2 - Família do Urânio 238 ( $92 U^{238}$ ), e isótopos desse elemento.

O Urânio natural é constituído por dois isótopos que são o  $92 U^{238}$  e  $92 U^{235}$ , que ocorrem na proporção de 99,3% e 0,7% aproximadamente. Cada um deles é o elemento inicial das duas primeiras famílias citadas. Suas vidas médias são respectivamente  $4,51 \times 10^9$  anos e  $7,1 \times 10^8$  anos.

O Urânio 235 ( $92 U^{235}$ ) não pode existir isolado, porque em quantidade superior a sua massa crítica, quando puro, sofre reação espontânea de fissão (princípio da explosão nuclear).

O terceiro isótopo natural do Urânio, o  $92 U^{234}$ , de vida média  $2,48 \times 10^5$  anos, é um elemento intermediário da primeira família citada, a do  $92 U^{238}$  (ver tabela anexa). Este último (o  $U^{234}$ ) existe na proporção de 1:18185 com o  $U^{238}$ .

São 17 os elementos intermediários da família do  $U^{238}$ . A maioria deles emitem raios gama. O radônio ( $86 Rn^{222}$ ) dessa família, com vida média 3,82 dias, é gasoso. É o principal elemento constituinte das ema

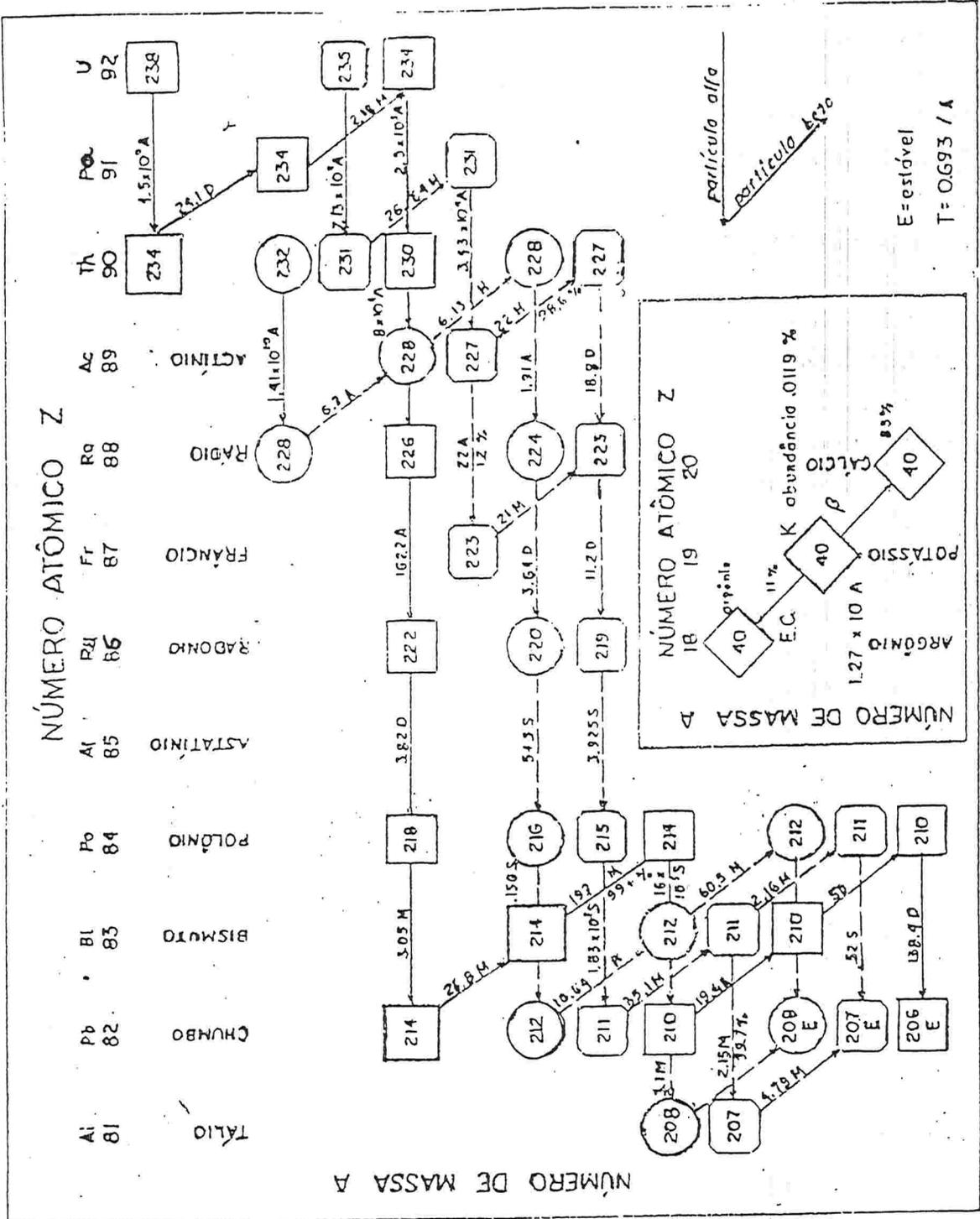


TABELA GERAL DAS SÉRIES DE DESINTEGRAÇÕES COM SEUS PRINCIPAIS EMISSORES

F83

nações radioativas naturais.

O radônio<sup>219</sup> e o radônio<sup>220</sup> ( $86 \text{ Rn}^{219}$  e  $86 \text{ Rn}^{220}$ ), que são respectivamente os elementos gasosos intermediários das famílias do Urânio 235 e do Tório, possuem vidas médias de somente 4 e 51 segundos, sendo por isso desinteressantes em prospecção.

O radônio<sup>222</sup> ( $86 \text{ Rn}^{222}$ ), e também o ( $92 \text{ U}^{234}$ ) e o rádio 226 ( $88 \text{ Ra}^{226}$ ), são muito solúveis na água. Por isso migram facilmente do sistema da série, assim, que muitas vezes a família do Urânio não é encontrada em equilíbrio radioativos.

O elemento da mesma família, o bismuto 214 ou rádio C ( $83 \text{ Bi}^{214}$ ), é o responsável pelo pico energético de 1,764 M e V, mediante o qual, é identificada a família do Urânio 238 nas técnicas de espectrometria de radiação gama. Daí sua importância em prospecção.

5.3.3 - Família do Tório ( $90 \text{ Th}^{232}$ ), e isótopos desse elemento.

Existem 5 isótopos do  $90 \text{ Th}^{232}$ , os quais são  $90 \text{ Th}^{234}$ ,  $90 \text{ Th}^{231}$ ,  $90 \text{ Th}^{230}$ ,  $90 \text{ Th}^{228}$  e  $90 \text{ Th}^{227}$ . Todos são elementos intermediários das famílias do Tório 232, do Urânio 238 e do Urânio 235.

A importante família do Tório 232, tem dez (10) elementos ativos intermediários. O elemento inicial ( $90 \text{ Th}^{232}$ ) tem vida média de  $1,4 \times 10^{10}$  anos.

Essa série quase sempre é encontrada em equilíbrio radioativo, porque seus elementos em geral, são de pequena mobilidade geoquímica nas condições do intemperismo, e também porque os seus elementos intermediários tem vidas médias relativamente pequenas. O de maior vida média com 6,7 anos, e os demais, com vidas médias de poucos dias, horas, minutos ou segundos.

O elemento dessa família, o talio 208 ( $81 \text{ Tl}^{208}$ ), é o responsável pela emissão do pico energético de 2,615 M e V, mediante o qual, a família é identificada, nas técnicas de espectrometria de raios gama.

Essa família é importante:

- Por ser o tório potencialmente interessante como combustível nuclear
- Por ser o tório associado com muitos minérios, como são os de monazita, os de nióbio, os de tántalo e os de Terras raras.
- Por sua abundância na natureza, e conseqüentemente por interferir nos levantamentos radiométricos em geral.

5.3.4 - O potássio 40 - Isótopo radioativo do potássio natural.

O potássio natural é constituído pela mistura dos dois isótopos, o ( $19 \text{ K}^{39}$ ) e o ( $19 \text{ K}^{40}$ ), na proporção respectivamente de 99,9881% e 0,0119%.

O potássio 40 emite radiação gama mediante o processo de K-captura visto no item 5.2.1 e mostrado na tabela anexa. Mediante esse processo origina os dois elementos estáveis argônio ( $18 \text{ Ar}^{40}$ ) e o cálcio ( $20 \text{ Ca}^{40}$ ).

A contribuição da radioatividade do potássio 40 é muito importante - por ser o potássio natural muito difundido na natureza, fazendo parte da constituição de importantes e comuns minerais essenciais das rochas.

Nas técnicas de espectrometria de radiação gama, é identificado pelo seu pico característico de emissão em 1,461 M e V. As emissões de radiação gama do potássio 40, por um lado fornecem interpretações interessantes para mapeamento geológico nos levantamentos radiométricos. Por outro lado ocasiona anomalias radiométricas não significantes quando o objetivo do levantamento e a prospecção para urânio ou associados.

#### 5.4 - Urânio, Tório e potássio 40 nos minerais e nas rochas - Radioatividade das rochas.

##### 5.4.1 - Radioatividade na crosta terrestre.

A radioatividade nos constituintes da crosta terrestre varia, sendo relacionada com seus conteúdos de elementos naturalmente radioativos, principalmente os da séries do Urânio 238, do Tório e ainda do potássio 40.

Por razões físicas admite-se que a crosta silícea seja a responsável significativa pela radioatividade na Terra, e que as concentrações de elementos radioativos nas camadas mais profundas (no sima) sejam insignificantes.

A observação de que as maiores concentrações desses elementos encontram-se nas rochas ígneas ácidas e nos sedimentos, contrastando com as muito menores concentrações nas rochas ígneas básicas, confirmam aquelas conclusões.

##### 5.4.2 - Urânio e Tório nas rochas ígneas (ambientes redutores).

Nos ambientes redutores, como são os da gênese das rochas ígneas, ambos esses elementos são tetravalentes.

Seus compostos típicos são uraninita ( $UO_2$ ) e ( $Th O_2$ ), não encontrado isoladamente este último.

Ambos tem raios iônicos semelhantes, e com os mesmos números de coordenação nas suas combinações com o oxigênio. As órbitas exteriores são completas. Consequentemente ambos são muito estáveis nessas condições (redutoras).

Não ocorrem como elementos nativos, nem na forma de sulfetos, arsenietos, ou teluretos.

Na forma de  $UO_2$  e  $Th O_2$  são raros, ou inexistentes, isoladamente.

Uraninita é encontrada quase que exclusivamente em pegmatitos.

Em filões hidrotermais a forma mais comum é a da pechblenda  $U_{3-4} O_8$ , (mineral encontrado junto com sulfetos e arsenietos metálicos, em filões hidrotermais).

Na pechblenda predomina Urânio tetravalente  $U^{+4}$  junto com Urânio hexavalente  $U^{+6}$ .

Na forma hexavalente constitui, o ion Uranila  $(UO_2)^{+2}$ , com a composição  $[(UO_2)^{+2} \cdot O^{2-}]$ , característico de ambientes oxidantes.

Urânio e Tório não entram na composição dos minerais essenciais das rochas ígneas. Nas rochas ígneas em geral, estão incluídas nas estruturas dos minerais acessórios. Nesses fazem parte de misturas isomórficas complexas, citando-se:

- A série Uraninita  $(UO_2)$  - Torionita  $(Th, U) O_2$ , com termos intermediários do tipo  $(U, Th) O_2$
- A série Torionita  $(Th, U) O_2$  - Torita  $Th (SiO_4)$
- A série Torita  $Th (SiO_4)$  - Zircão  $Zr (SiO_4)$

Substituições Zr - Th e U - Th são características da geoquímica do urânio e do Tório nas rochas ígneas.

O caldasito, minério zircônio - uranífero brasileiro, é uma mistura de Zircão  $Zr (SiO_4)$  e badeleita  $ZrO_2$ , com U substituindo Zr, de modo a atingir teores aproveitáveis economicamente.

Outro aspecto marcante da geoquímica do Tório, é a sua frequente substituição dos elementos de terras raras. Na monazita, terras raras trivalentes, são parcialmente substituídas por  $Th^{+4}$ , ao mesmo tempo que o radical  $(PO_4)^{-3}$  é também substituído parcialmente por  $(SiO_4)^{-4}$ .

Os únicos minerais de Tório encontrados isoladamente como componentes raros de pegmatitos, são a torianita  $(Th, U) O_2$  e a torita  $Th (SiO_4)$ ;

Como resultado desses comportamentos geoquímicos, urânio e Tório nas rochas, normalmente estão incluídos como elementos de substituição na estrutura de minerais acessórios, com teores variáveis. Na maioria das vezes como elementos traços.

Assim:

- Zircão e apatita, costumam contêr traços de U e de Th, podendo o teor em urânio superar 300 ppm.
- Monazita - Contém Th, sendo o principal mineral dos minérios de Th.
- Cassiterita e rutilo - costumam contêr traços de U principalmente, e subsidiariamente de Th.

Descolorações e halos pleocróicas tão comuns em certos minerais essenciais de rochas ígneas ácidas, como por exemplo em biotita, são atribuídos à efeitos de radiações devidas a U e Th da constituição do Zircão, rutilo, cassiterita ou apatita. Esses minerais, por sua vez estão incluídos na biotita (ou outro mineral essencial).

Minerais de urânio e tório, são das primeiras fases da cristalização, durante a diferenciação magmática. Minerais cristalizados à mais altas temperaturas, contém relativamente muito  $UO_2$ .

Rochas ígneas ácidas contém relativamente muito urânio e tório, enquanto que as rochas básicas são pobres nesses elementos.

Esse comportamento assemelha-se com o empobrecimento em potássio no

sentido das rochas ácidas para as rochas básicas, característico das rochas ígneas.

Nos pegmatitos os minerais ricos em Urânio, são os das últimas fases de deposição. Nos estágios pneumatólitico e hidrotermal, o Urânio é encontrado com o estanho e também junto aos sulfetos e sulfosais de cobalto, níquel, arsênico, prata e bismuto. A pechblenda (de deposição hidrotermal), é uma forma parcialmente oxidada do urânio, como foi visto anteriormente.

A concentração do tório continua-se somente até a fase pegmatítica, não atingindo a fase hidrotermal.

A tabela seguinte mostra conteúdos representativos médios de urânio e tório em rochas ígneas.

	U ppm	Th ppm
Granito e riolito	4	15
Basalto	0,6	2
Ultramáficas	0,05	0,2

F84

#### 5.4.3 - Urânio e tório durante o intemperismo das rochas ígneas, e nos sedimentos (ambientes oxidantes em geral).

Durante o intemperismo químico, em ambiente oxidante, o tório permanece tetravalente, e estável nos seus compostos originais. Seus minerais são afetados e transportados somente por ação mecânica.

O urânio, pelo contrário torna-se hexavalente formando o ion uranila ( $UO_2$ )<sup>+2</sup> com grande mobilidade. Os minerais originais decompõem-se, formando-se, novos compostos complexos, em geral altamente solúveis, em condições oxidantes. São hidroxidos, fosfatos, arseniados, vanadatos, uranatos, carbonatos, silicatos e sulfatos de composições variáveis e complicadas.

Encontram-se como minerais, nas partes meteorizadas sobre massas de concentração de urânio, em rochas ígneas, sedimentares, e também em filões hidrotermais.

Exemplos:

- Uraninita - Óxido de U, Pb, Ra + Th e terras raras, encontrada em pegmatitos e em filões de Ag, Pb, Cu etc.
- Carnotita -  $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$  concentrada em arenitos.
- Autunita -  $Ca[(UO_2)_2(PO_4)_2] \cdot 10-12H_2O$ , produto de alteração encontrada em granitos, pegmatitos e em filões hidrotermais.

Os compostos de urânio oxidados são transportados pelas águas (em superfície e em subsuperfície), sob a forma de soluções ou em suspensão.

O ion uranila pode ser absorvido pelos geis de hidróxido de ferro, de manganês ou de sílica, depositando-se assim o urânio a partir de suas soluções.

Quando as condições tornam-se redutoras, o urânio volta à ser tetravalente, formando compostos insolúveis e depositando-se.

Isso acontece com as soluções que atingem o mar, depositando-se nos evaporitos marinhos à grandes profundidades. Também em águas continentais na presença de matéria orgânica carbonosa mais sulfetos, e ausência de oxigênio dissolvido. Esse condicionamento controla a deposição de urânio em canais de arenitos, a partir de águas subterrâneas, nos importantes jazimentos desse tipo.

Assim o urânio é concentrado, absorvido em argilas, ou em sílica gel, em jazimentos de carvão, de alumínio, de manganês, de ferro e em jazimentos de fosfato de origem marinha.

Por outro lado o íon carbonado inibe a deposição do urânio, explicando a pobreza em urânio, de modo geral (com exceções), em calcários e dolomitos.

O urânio também se encontra em organismos vivos, sendo provável que tenha alguma função fisiológica, podendo haver deposição por ação bacteriana. Argilas carbonosas de origem marinha, presumivelmente depositadas em ambientes sapropélicos, costumam ser bem mais ricas em urânio do que sedimentos carbonosos, carvões, e mesmo granitos.

Minerais primários de urânio, somente são encontrados em jazimentos de minerais pesados, quando a deposição a partir de transporte mecânico, não foi longe das origens. Alguns minerais primários mais resistentes de urânio, podem contribuir subsidiariamente, para a radioatividade dos depósitos de aluvião de minerais pesados.

O tório pelo contrário, é somente transportado e depositado por ação mecânica, permanecendo os minerais primários quimicamente inalterados indefinidamente.

Os depósitos concentrados de tório, são aluviões de metais pesados, tanto continentais como marinhos, São exemplos:

- As areias aluviais monaziticas, principais jazidas de tório (de origem marinha).
- Depósitos secundários de cassiterita e outros minerais pesados podem apresentar alta radioatividade devido, principalmente a presença dos minerais resistentes contendo tório, como o zircão e a monazita.

As rochas ígneas (fonte primária do urânio e do tório), em média, contém três vezes mais tório do que urânio. Nas águas do mar a relação se inverte, contendo três vezes mais urânio.

Lateritas e bauxitas originadas por intemperismo "in situ" costumam apresentar razões altas Th/U anômalas em relação as rochas originais, sendo adicionalmente caracterizadas por anomalia negativa em potássio. A razão Th/U alcança valores mais altos em sedimentos depositados em ambientes oxidantes, uma vez que urânio não se deposita nessas condições.

A razão Th/U é um importante parâmetro para interpretação, fornecido pelos levantamentos aero-radiométricos.

#### 5.4.4 - Potássio 40 nas rochas ígneas e sedimentares.

O isótopo radioativo  $K^{40}$ , estando presente junto ao potássio natural (na proporção de 0,012%), é relativamente abundante nas rochas.

Os principais minerais que contêm potássio são:

Ortoclásio e microclínio

Micas (muscovita e biotita)

Hornblenda e plagioclásios (com cerca de 1% de potássio)

Minerais das argilas

Minerais de evaporitos:- Silvita (KCl), carnalita ( $MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6 H_2O$ )

Nas rochas ígneas o conteúdo em potássio geralmente está relacionado com o teor em sílica (maior nas rochas ácidas, decrescendo no sentido das rochas básicas e ultrabásicas).

Em granitos o conteúdo é da ordem de 2% à 6%; no basalto de 0,37% à 1,4% e em ultrabásicas (peridotito) de apenas 10 ppm.

Nas rochas sedimentares, dependerá das quantidades relativas presentes de feldspato, mica, argila e de outros constituintes ricos em potássio dos sedimentos.

Um arenito derivado de fonte granítica, próxima do local de sua deposição, conterá muito potássio, aproximando-se do conteúdo pré-existente no granito fonte. Se for derivado de um quartzito, ou mesmo de um granito mais distante, conterá menos potássio. Sedimentos argilosos em geral com muita mica, conterão muito potássio.

Calcários desprovidos de material argiloso, serão pobres em potássio.

As ordens de grandeza dos conteúdos de potássio:

- em arenitos - 1% ou mais (mais do que 1,2 ppm de  $K^{40}$ )
- em calcários - menos do que 1% (menos do que 1,2 ppm de  $K^{40}$ )
- em falhinhos - cerca de 3% (cerca de 3,6 ppm de  $K^{40}$ )

#### 5.4.5 - Radioatividade das rochas.

A radioatividade das rochas de um lado, depende dos seus conteúdos em elementos radioativos e por outro lado, das capacidades de auto absorção das radiações, devidos aos constituintes inertes das mesmas rochas.

Estima-se, considerando-se as rochas em geral, que do fluxo total de radiação medido, 40% à 45% do mesmo, provenha de elementos da família do tório e do  $K^{40}$ . Somente 15% a 20% provenha dos elementos da família do urânio. Nos casos de minérios, essas proporções serão muito diferentes. Com respeito a radioatividade das rochas, podem ser estabelecidas regras gerais, as quais entretanto, estão sujeitas a exceções importantes:

- Radioatividades de sedimentos ou de sedimentos metamorfozados, costumam ser maiores do que as de rochas ígneas ou outros tipos de rochas me

tamórficas. Importantes excessões constituem os granitos e riolitos que por serem muito ricos em potássio, apresentam em geral, maiores radio-atividades do que os sedimentos.

- Rochas ígneas ácidas são caracterizadas por altas radioatividades, enquanto que rochas ígneas básicas e ultrabásicas, por baixas radioatividades.

- Excluindo-se os falhelhos e os arenitos, as rochas sedimentares costumam ter baixas radioatividades. O mesmo se pode dizer com respeito à intrusões e extrusões básicas.

- Rochas metamórficas tendem a apresentar a radioatividade da rocha original (antes do metamorfismo). Importantes excessões:

- Intrusões graníticas causadoras de metamorfismo, e efeitos de circulação hidrotermal relacionados, frequentemente causam aporte de novos elementos radioativos, e conseqüentemente aumento da radioatividade.

- Concentrações de radio-elementos por ação hidrotermal, apresentam altas radioatividades.

- A maior densidade dos grãos nos sedimentos poderá significar riqueza em minerais pesados ricos em urânio e tório, e portanto maior radioatividade.

- Contrariamente, maior densidade de grãos em sedimentos, poderá também significar maior densidade de constituintes inertes, e conseqüentemente maior poder de auto absorção de radiação, resultando em menor radioatividade.

- Do mesmo modo maior umidade na rocha, diminui a radioatividade, devido a maior absorção ou espalhamento das radiações.

- Concentrações de minerais pesados por gravidade, em geral apresentam alta radioatividade. A interpretação dos resultados dos reconhecimentos radiométricos por medida de radiações gama, são interpretadas com base nos comportamentos geoquímicos do urânio, do tório e do potássio e no conhecimento geológico do terreno.

Os levantamentos aéreos-radiométricos (aplicando técnicas de espectrometria de radiação gama) fornecem parâmetros das contribuições relativas do U, do Th e do  $K^{40}$  para a radioatividade total gama medida, juntamente com a razão U/Th. São interpretados os desvios desses parâmetros em relação aos respectivos "backgrounds", estabelecidos para cada formação.

A integração dos conhecimentos geológicos da área levantada, com os resultados do levantamento, permite localizar anomalias, ao mesmo tempo que fornece subsídios para melhor definição e delimitação das formações.

#### 5.4.6 - Origem da radioatividade medida e do Background (radiações de fundo)

Medidas de radioatividade são praticadas sobre o terreno, no ar (até altitudes da ordem de 150m), no interior de trabalhos mineiros, ou no

interior de furos de sonda (em perfilagem).

Em qualquer desses casos, o fluxo de radiações gama que atinge o sensor (aparelho de detecção ou de medida), que contribuem para o back-ground, provem de todas ou de partes das cinco fontes a saber:

a) Dos radioelementos que ocorrem naturalmente no solo ou nas rochas:

Os de interesse prático (das séries do U, do Th e do  $K^{40}$ ), ocorrem normalmente juntos, nas mais diversificadas proporções e concentrações, dependendo unicamente da natureza geoquímica da rocha, como foi visto anteriormente.

Devido a absorção dos raios gama nas próprias rochas ou solo, a contribuição praticamente sensível, provem dos elementos contidos nos primeiros 100cm de solo. No caso de furo de sonda, admite-se que a contribuição sensível provenha de um volume da rocha, com raio de 10cm à 20cm em torno do sensor no furo.

b) De contaminações atmosféricas ou terrestres, produzidas pela presença do gás radônio ( $Rn^{222}$ ), migrado de locais mais ou menos distantes. No caso de levantamentos aereos, o  $Rn^{222}$  que escapa do solo para atmosfera, contribui com parcela significativa e variável para o fluxo detectado. Nas primeiras horas do dia, o  $Rn^{222}$  concentra-se nas proximidades do solo junto a superfície do terreno. Com o aquecimento do ar durante o dia, a camada de ar contaminada pelo  $Rn$ , se eleva produzindo-se uma variação diurna da radiação detectada, devido a contribuição do  $Rn$ .

Por outro lado a migração do  $Rn^{222}$  através da porosidade ou de fraturas das rochas, possibilita em muitos casos, detectar concentrações de urânio localizadas relativamente longe do ponto de medida.

A concentração de  $Rn^{222}$  que atinge a superfície do terreno é controlada por:

- Permeabilidade das rochas da cobertura, ou seu fraturamento. Quando a permeabilidade através dos poros for boa, a superfície anômala correspondente, estará relacionada a geometria do corpo de minério fonte.
- Temperatura em subsuperfície, de modo a provocar a elevação daquele gás. Sendo iguais outras condições, a grandeza da anomalia produzida depende da temperatura do corpo de minério fonte.
- Variações de pressão atmosférica, favorecendo a maior expansão do  $Rn^{222}$  contido nos poros das rochas. Foram observados aumentos de fluxos de radônio dentro de minas, por efeito de abaixamento da pressão barométrica.
- Tamanho e profundidade do depósito de urânio fonte. Sendo de apenas 3,82 dias a vida média do  $Rn^{222}$ , significa que após um período de tempo relativamente pequeno, de cerca de 20 dias, sua presença não será sensível. Assim a profundidade da fonte, juntamente com a velocidade da migração são fatores importantes.

c) As radiações cósmicas secundárias. Fluxo constante e variável desse

tipo de radiações, contribuem sensivelmente para o background, como foi visto no item 5.2.1.

d) Dos radioelementos associados a diversos materiais ou substâncias - nas proximidades do sensor. Relógios de pulso, lentes tório-ativadas de câmaras fotográficas, e painéis luminosos no caso de aeronaves (nos levantamentos aéreos), assim como materiais de construção, são fontes que contribuem sensivelmente para o "background" das medidas.

e) De contaminações atmosféricas produzidas por fissões nucleares provocadas. Explosões atômicas e instalações de reatores provocam "chuvas" - de partículas radioativas de efeitos mais ou menos sensíveis.

Releva notar que medida de radioatividade, mesmo nas condições mais - uniformes, apresentam flutuações aleatórias no tempo.

Essas flutuações além de serem inerentes aos fenômenos de radioatividade, também são relacionadas às diversificações litológicas. Uma mesma formação (ou litologia) será caracterizada por um "background." Esse - por sua vez comporta uma faixa de variação, controlada por diversificações de composição numa mesma litologia, e também por flutuações inerentes ao fenômeno da radioatividade.

## 5.5 - Medidas da radioatividade

### 5.5.1 - Instrumentos - antecedentes

No início foram utilizadas câmaras fotográficas para detectar radiações. <sup>foi</sup> a propriedade de impressionarem foto-emulsões, o ponto de partida para o conhecimento científico das mesmas.

Seguiram-se o aproveitamento de suas propriedades de ionizarem os gases, observando-se seus efeitos na descarga de eletroscópios. Após foram desenvolvidas as câmaras de ionização que possibilitaram medidas, a partir do efeito da ionização de gases. O contador Geiger-Müller aproveitando essa propriedade, foi concebido em 1920. Esses transformam os efeitos ionizantes em impulsos elétricos, os quais são ampliados, integrados e contados.

A propriedade de certos cristais naturais (como p. ex. a esfalerita), de emitirem cintilações luminosas, quando submetidos à radiações, foi aproveitada desde 1903 para observação, através de um aparelho denominado - espintariscópio. Cintilômetros, aproveitando essa mesma propriedade foram desenvolvidos somente na década de 1950, graças a utilização de cristais sintéticos mais eficientes. Nos cintilômetros a energia luminosa é transformada em impulsos elétricos, os quais são ampliados, integrados, e contados.

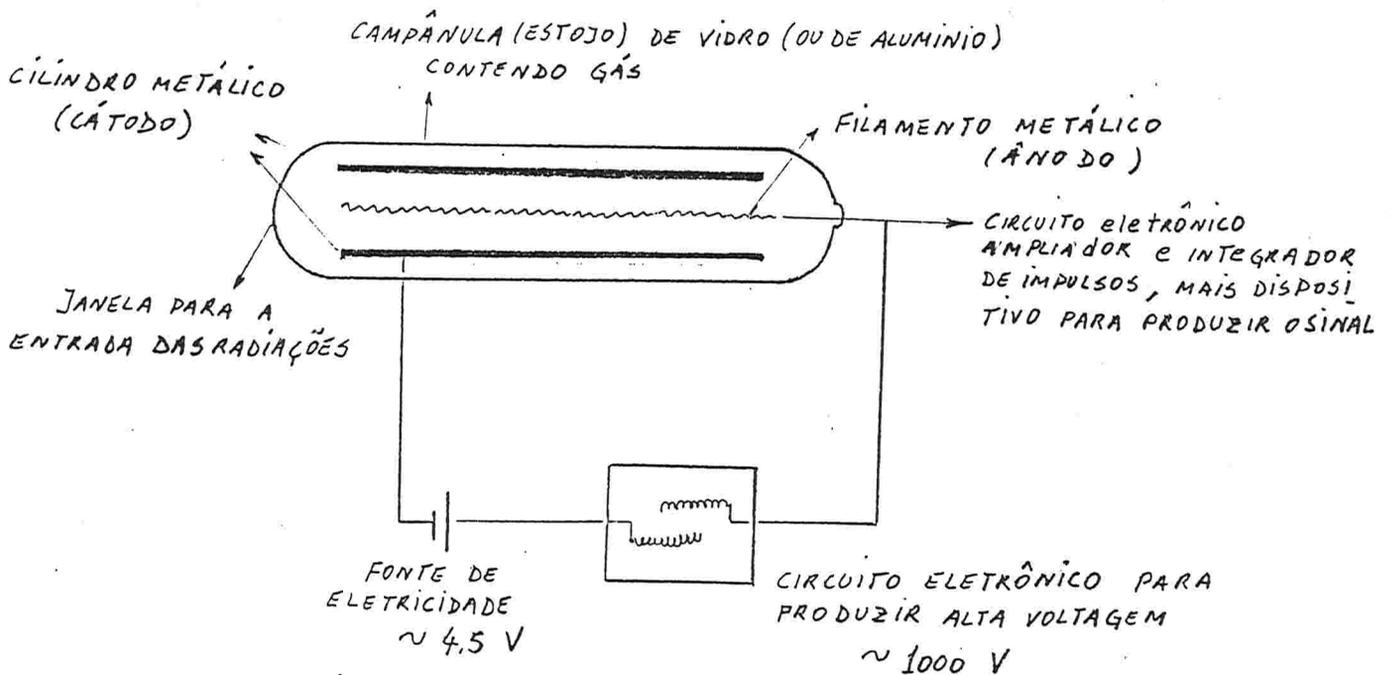
O posterior processamento eletrônico dos impulsos elétricos, possibilitando selecionar alturas (energia) de pulsos, constitui o princípio - dos espectrômetros de radiação gama, desenvolvidos desde a década de 1960.

Emanômetros são aparelhos para detectar e medir emanações gasosas radioativas, construídas com base no princípio da câmara de ionização.

Atualmente, na prospecção direta no terreno são utilizados contador Geiger-Müller e cintilômetro (este último mais sensível que o primeiro). Nos levantamentos aerotransportados são utilizados como sensor cintilômetros, sendo feito o processamento em espectrômetro de radiação gama. Em perfuração de furo de sonda, o sensor é um cintilometro.

Emanômetros são eventualmente utilizados para prospecção de urânio, e indispensáveis para a pesquisa de fontes hidrominerais radioativas.

### 5.5.2 - Contador Geiger-Müller



CONTADOR GEIGER - MÜLLER  
ESQUEMA E CIRCUITOS  
(MUITO SIMPLIFICADO)

485

O sensor do contador Geiger-Müller consta essencialmente:

- De um estojo de alumínio ou de vidro, tubular;
- De um cilindro metálico contido no estojo, constituindo um cátodo.
- De um filamento centralizado no estojo metálico, constituindo um ânodo.
- gás inerte (argônio ou outro gás equivalente), e um gás moderador (gás etílico, metano, vapor d'água ou mistura dos mesmos), no interior do estojo.

A pressão do gás, é de cerca de 1/10 normal.

A partir de uma fonte constituída por pilhas elétricas, é produzida a diferença de potencial entre 800 V à 1500 V, entre o ânodo e o cátodo. As radiações ambientais à serem detectadas e medidas, penetram no es-

tojo, seja atravessando suas paredes laterais, ou seja através de uma janela de mica com espessura muito pequena ( $\approx 0,025$  mm), produzindo ionização do gás. Devido a diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo, iões positivos dirigem-se para o cátodo, enquanto elétrons liberados vão para o ânodo. Por efeito da diferença de potencial, são aceleradas as velocidades de deslocamento dos ions e eletrons. Estes últimos por sua vez, colidindo com outros átomos produzem mais ionização, causando um efeito multiplicador cumulativo do fenômeno. Desse modo um número da ordem de um milhão de elétrons atinge o ânodo, para cada um dos elétrons inicialmente liberados diretamente pela radiação.

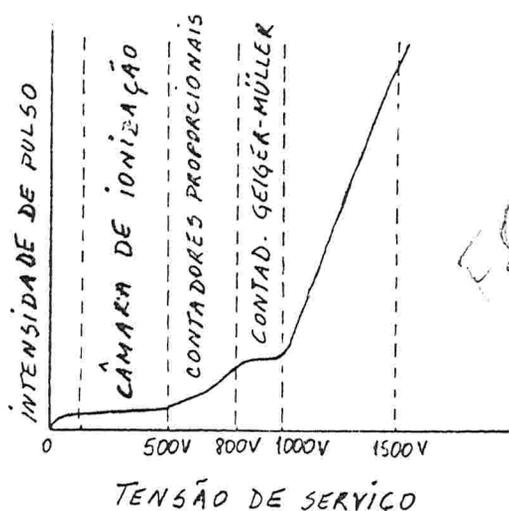
O resultado é que uma avalanche de eletrons e de iões, são coletados respectivamente no ânodo e no cátodo. Por isso, num determinado instante há passagem brusca de corrente, como se fosse um estalo de descarga elétrica entre o ânodo e o cátodo. Essa descarga elétrica, ou impulso elétrico, vai a condensadores e é processada num circuito eletrônico. Assim após serem ampliados modelados e integrados vários impulsos, produzem o sinal. O sinal poderá ser:

- Estalidos audíveis em fones ou alto falantes.
- Cintilação em lâmpada incandescente
- Medida de corrente num miliamperímetro, o qual é graduado em impulso/minuto.

O gás moderador tem a finalidade de suprimir emissões secundárias de elétrons no cátodo, causadas pelo bombardeamento dos ions positivos, que tenderiam a prolongar a descarga. Rápida extinção da descarga, permite o sistema retornar ao estado não condutor, separando os sucessivos efeitos dos raios que penetram no estojo.

Contadores Geiger-Müller são relativamente simples e de baixo custo (cerca de US\$ 100,00), porém sua utilização em prospecção é limitada, porque respondem mais à radiações beta ( $\beta$ ), do que à radiações gama ( $\gamma$ ). Isso é devido a pequena capacidade de ionização das últimas, em relação às primeiras. Sendo radiações  $\beta$  de pequena penetração, portanto inadequadas para fins de prospecção, causa a limitação aludida.

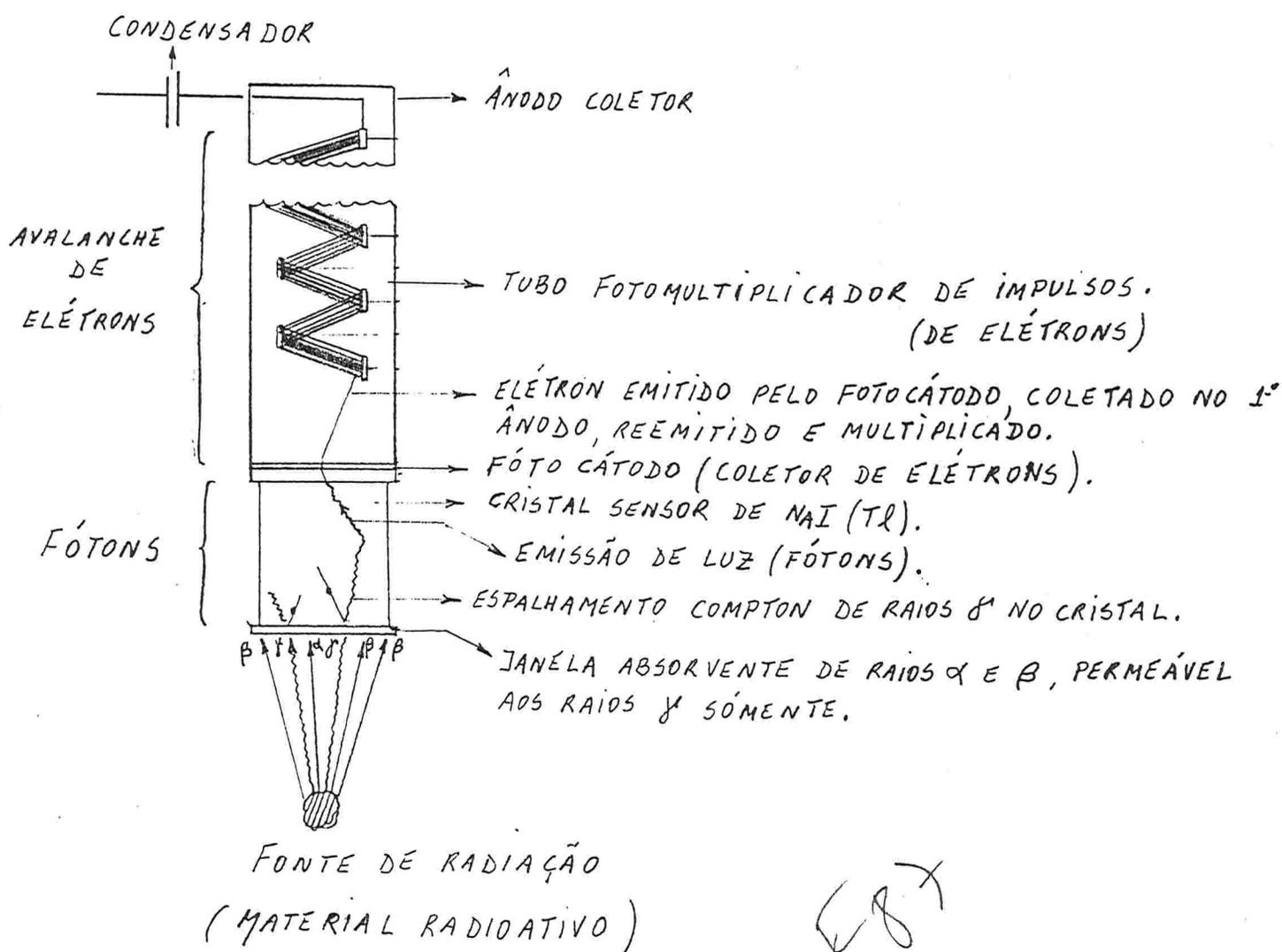
Os contadores Geiger-Müller, como se pode ver na figura a seguir, são construídos para trabalharem na faixa de 800 V à 1000 V. Nesse intervalo são minimizadas as diferenças de ionização (para uma mesma intensidade de radiação) em função de diferenças de tensão. A vantagem é a de minimizar efeitos de variação das tensões nas pilhas fontes. Existem contadores (ditos proporcionais) que trabalham em intervalos de 500 V à 800 V, faixa em que é bastante inclinada aquela função, como se verifica na figura.



Nessa faixa, operando com baixa tensão, diminui a aceleração dos ions e das partículas. Desse modo acentua a sensibilidade do contador às radiações  $\beta$ , em relação as radiações  $\gamma$ . O contrário acontece operando com maior tensão. Desse modo permitem, ainda que imperfeitamente, selecionar efeitos das radiações  $\beta$  das radiações  $\gamma$ .

Contadores Geiger-Müller com janelas mais impermeáveis à radiações (de vidro), filtram radiações. Assim o equipamento pode ser construído para ser insensível à radiações alfa e beta de menor penetração, e sensível apenas à radiações gama, e beta de maior penetração.

### 5.5.3 - Cintilômetro



Átomos de certas substâncias, como cristais de esfalerita, de sheelita e outras, ao absorverem radiações gama cintilam. Esse fenômeno acontece, quando elétrons orbitais da substância, são excitados, emitindo radiações ultravioletas e de luz visível.

Foram desenvolvidas substâncias sintéticas, que apresentam essa propriedade com grande eficiência. A mais comumente utilizada na construção de cintilômetros, é o cristal sintético de iodeto de sódio, ativado por tálio [Na I (Tl)]. O cristal é transparente à sua própria fluorescência, e suas faces com excessão de uma, são recobertas por material refletor à luz. Desse modo todos os ftons de luz produzidos, são conduzidos à um fotocátodo (isto é um cátodo de uma célula fotoelétrica): Sendo o cristal suficientemente grande e transparente, é possível obter-se, praticamente, 100% eficiência, na transformação da energia dos raios gama incidentes no cristal, em energia luminosa incidental no fotocátodo. Neste último, os ftons de luz são transformados em emissão de elétrons por efeito fotoelétrico, com perdas de energia insignificantes, originando pequenos impulsos elétricos. Cada impulso elétrico simula a cintilação produzida no cristal, no que diz respeito a sua grandeza e duração.

Cada eletron produzido no fotocátodo, é atraído por um primeiro eletrodo de um tubo fotomultiplicador (por efeito de tensão fornecida ao eletrodo). Este último, sendo construído com material apropriado, por sua vez emite novos elétrons, devido a colisão do primeiro eletron que o atingiu. Os elétrons produzidos no primeiro eletrodo vão colidir num segundo eletrodo que está à uma maior tensão que o primeiro, multiplicando por sua vez a emissão de elétrons. Esses vão a um terceiro eletrodo. O mesmo acontecendo em sucessivos eletrodos, até o último do tubo fotomultiplicador, denominado ânodo coletor. Para cada eletron produzido no fotocátodo, uma avalanche de elétrons atinge o ânodo coletor. Um circuito eletrônico adicional, fornece finalmente, um impulso elétrico integrado e ampliado, para cada um dos pequenos impulsos originados no fotocátodo.

Nos cintilômetros comuns, o impulso final é transformado em sinal visível, audível, ou medido num miliamperímetro, de forma semelhante que nos contadores Geiger-Müller. As medidas relativas em impulso/minuto poderão ser transformadas em medidas absolutas, ou em outras medidas relativas, mediante calibração, por intermédio de padrões de radioatividade conhecida.

A seletividade do cristal sensor dos cintilômetros para radiações gama, é obtida por filtragens dessas radiações na janela de entrada, a qual é através de substância absorvente de raios alfa e de raios beta.

Cintilômetros são muito mais sensíveis que contadores Geiger-Müller,

às radiações gama. Por isso são preferidos na maioria das aplicações, embora custem cerca de dez vezes mais do que aqueles.

5.5.4 - Espectrometros e espectrografia (ou espectroscopia) de radiações gama.

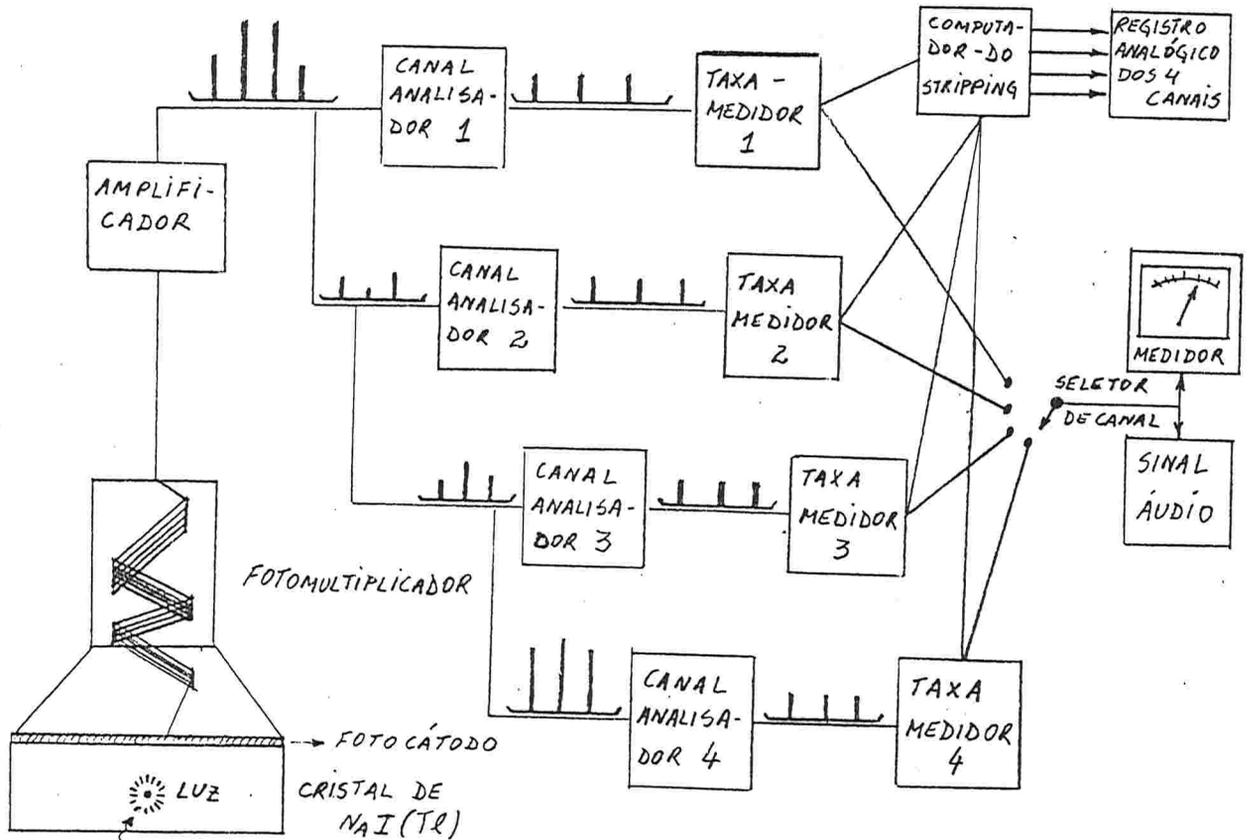
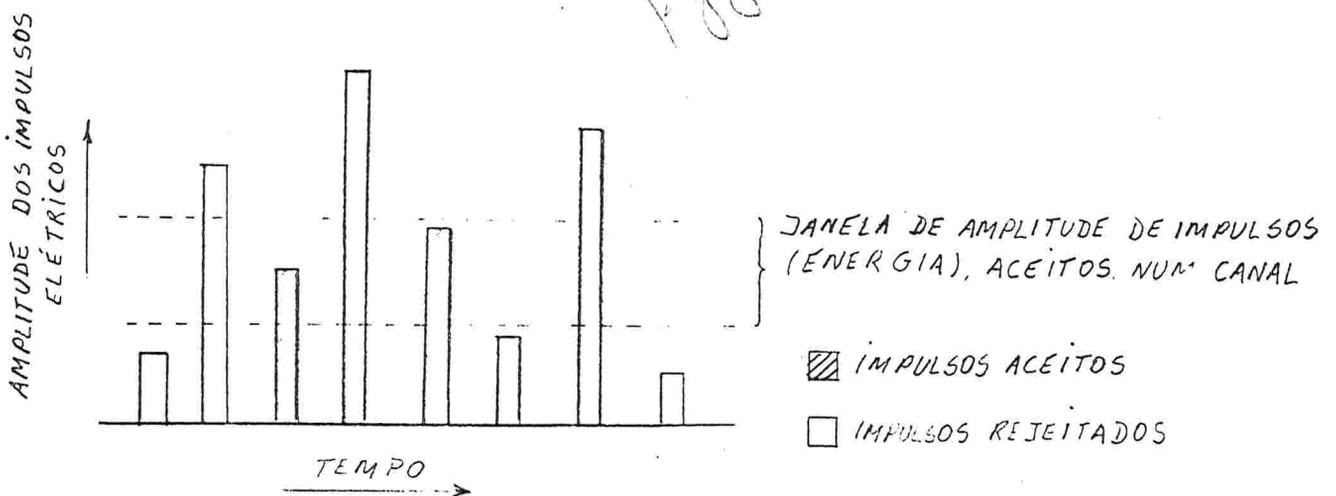


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ANALISADOR DE ALTURAS DE IMPULSOS (ESPECTROGRAMETRO DE RADIAÇÕES GAMA)



ESQUEMA MOSTRANDO ACEITAÇÃO E REJEIÇÃO DIFERENCIAL DE IMPULSOS ELÉTRICOS NUM CANAL, CORRESPONDENDO A NÍVEIS DE ENERGIA SELECIONADOS.

O princípio da espectrografia de radiações gama é o a seguir explicado:

- Desde que o cristal sensível de um cintilometro seja bastante grande e eficiente, a intensidade do impulso luminoso que atinge o fotocátodo, e conseqüentemente a amplitude da voltagem resultante, do impulso elétrico de saída no tubo fotomultiplicador, guarda proporcionalidade com a energia original do raio gama, que produziu o início do processo.

Se toda a radiação gama que atingisse o cristal fosse totalmente absorvida, e o processo de absorção fosse totalmente fotoelétrico, aquele princípio seria totalmente verdadeiro.

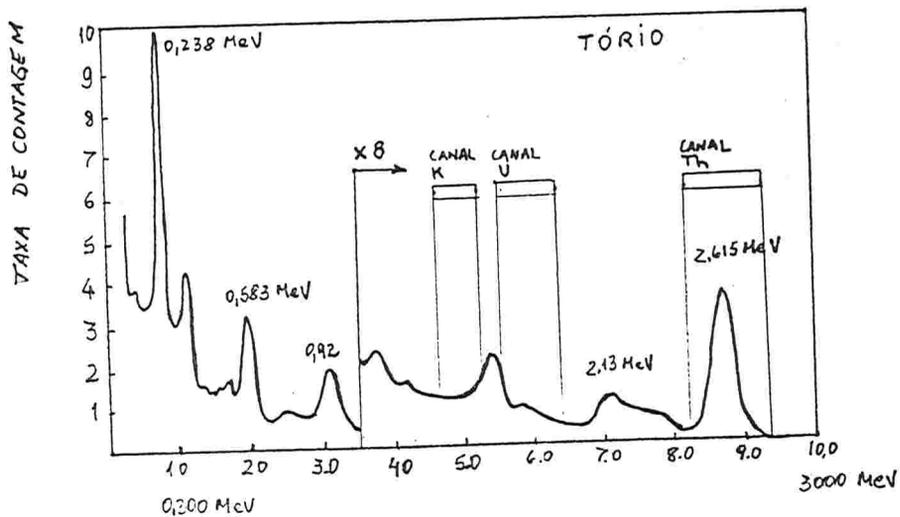
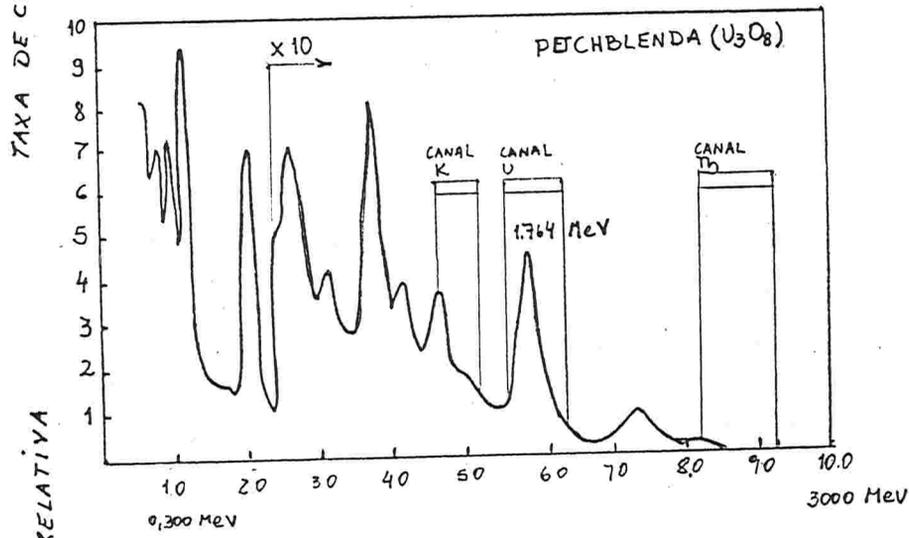
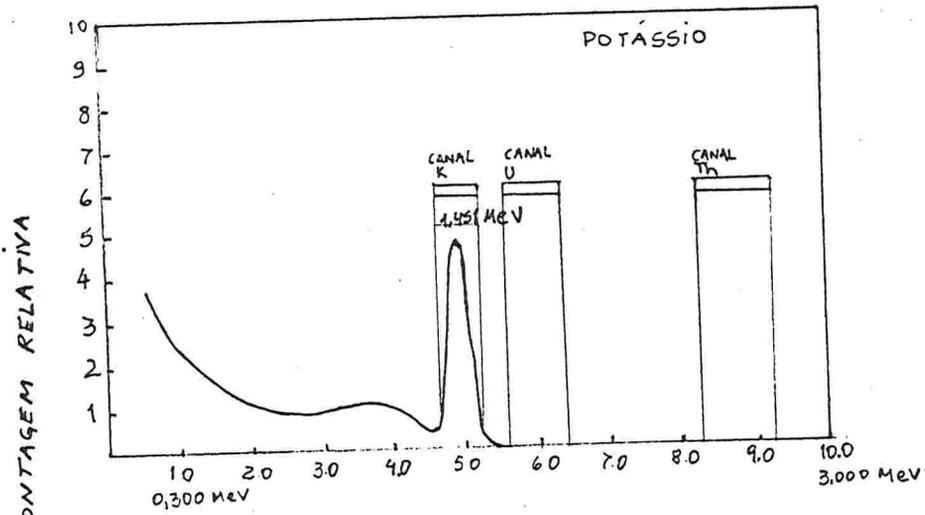
Na realidade o processo é mais complexo, havendo dissipação da energia original por efeito Compton e por produção de pares, com produção intermediária de radiações eletro-magnéticas de menor energia, até que toda a radiação inicial seja absorvida. Haverão contribuições de impulsos de menor amplitude, as quais se acrescentarão aos de mesma amplitude do espectro. Todo o processo é praticamente instantâneo, devido serem as velocidades das radiações eletro-magnéticas, a da luz.

São utilizados cristais grandes, obtendo-se eficiências de praticamente 100% de transformação da energia das radiações incidentes.

Como mostra a figura, nos espectrômetros, são acrescentados ao cintilometro, canais analisadores dos impulsos elétricos de saída. Esses canais selecionam por rejeição ou aceitação, níveis característicos de energia, das radiações produzidas pelas famílias do urânio, do tório e do  $K^{40}$ . Desse modo são automaticamente computadas as taxas de contribuição respectivas, que constituíam a totalidade da radiação incidente sobre o sensível (no cristal).

Na figura, o canal 1 computa taxas de contribuição de uma ampla faixa do espectro. O canal 2, seleciona e computa, a taxa de contribuição de energia num intervalo próximo a 1,764 M e V. Esse nível corresponde a radiação do  $Bi^{214}$  (elemento da família do urânio). Caracteriza-se assim a presença e a contribuição do urânio. O canal 3 faz o mesmo com respeito as radiações num intervalo próximo a 2,615 M e V, correspondendo a radiação do  $Tl^{208}$ . Esse nível caracteriza a família do Tório. O canal 4 seleciona contribuição de radiação próxima a 1,461 M e V, característica do  $K^{40}$ .

As figuras a seguir mostram os espectros típicos das radiações gama emitidas pela pechblenda ( $U_{3-4}O_8$ ), pelo tório, e pelo potássio. Mostram também os níveis de energia selecionados, nos canais que caracterizam a contribuição de urânio, tório e potássio.



ENERGIA (IMPULSOS - em MeV)  
 (EQUIPAMENTO CALIBRADO DE 1,0 = 0,300 MeV a 10,0 = 3000 MeV)

ESPECTROS EXPERIMENTAIS PARA POTÁSSIO (K<sup>40</sup>), MINÉRIO DE URÂNIO (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), E TÓRIO, ESTANDO AS RESPECTIVAS FONTES EM EQUILÍBRIO RADIOATIVO.  
 FIGS. DE BAIRD, B E NARGOLWALLI, S - SCINTREX - APPLICATION BRIEF 75-1, 1975

← 90

Em abcissas, são locados os níveis de energia das radiações de 0,300 M e V à 3,000 M e V, numa escala arbitrária, graduada de 1,0 à 10,00. São locados em ordenadas, as taxas relativas de contagens nos diferentes níveis de energia. Verifica-se que o espectro do potássio ( $K^{40}$ ) é simples por ser uma fonte monoenergética.

Os espectros do urânio (pechblenda) e tório são bem mais complexos, pois apresentam picos de emissão característicos dos diversos elementos das famílias respectivas. A parte contínua do espectro do  $K^{40}$  para baixos níveis de energia é causada pelo espalhamento compton da radiação com 1,461 M e V. Nos espectros do urânio e tório, observa-se altas taxas de contagens nos níveis inferiores (representados em escalas reduzidas) em relação as taxas de contagem nos níveis mais altos.

Observe-se ainda que radiações devidas à uma fonte de tório puro por exemplo, dão contagens nas janelas (nos canais) de urânio e potássio. Também radiações devidas a urânio puro, dão contagens na janela do potássio.

Por esse motivo, para computar-se a contribuição de um desses dois elementos em particular, torna-se necessário descontar a contribuição do nível de energia característico do mesmo, devido a presença dos outros dois elementos. Esse processo é executado automaticamente pelo equipamento, mediante um computador, (processo denominado Stripping). (Ver esse componente na parte superior e a direita da figura - diagrama analisador dos impulsos).

A técnica de espectrometria vem sendo utilizada, em laboratório, desde a década de 1950. Seu uso em prospecção (principalmente em aero-levantamentos) começou a partir da década de 1960.

Nos primórdios da prospecção radiométrica, constituia grande limitação, o fato de não poder ser distinguida a contribuição do urânio para uma anomalia radiométrica detectada. Desse modo, indícios de tório (considerados sem interesse econômico), podiam ser confundidos com indícios de urânio. Essa limitação ainda persiste quando se usa contadores G.M. e cintilômetros portáteis simples.

A espectrometria de raios gama, além de permitir aquelas distinções, fornece os parâmetros das relações  $U/Th$  e contribuições do  $K^{40}$ , U e Th discriminadas. Esses parâmetros são utilizados para interpretações geológicas, como foi visto nos itens 5.4.3; 5.4.4; 5.4.5.

Além disso técnicas recentemente desenvolvidas, permitem análises "in situ" de metais nos minérios, a partir da espectrometria de radiações gama, emitidas mediante bombardeamento com neutrons, das formações.

Essas últimas técnicas são praticadas a partir de furos rasos em operações de amostragem "Bulk sampling". Ver METALOG item 5.64

## 5.5.5 - Emanômetro

É um aparelho para detectar e medir emissões gasosas radioativas. - Principalmente de gás radônio ( $Rn^{222}$ ).

O  $Rn^{222}$  é um gás nobre muito solúvel em água, e move-se através dos poros das rochas, podendo estar presente em solos ou em água, (nas nascentes). Serve para detectar indícios de concentrações de urânio, através da presença de  $Rn^{222}$  em solos, e para a pesquisa de fontes hidrominerais radioativas.

Consta essencialmente de um recipiente para coletar água ou ar, de um cintilometro, e de uma bomba pneumática para aspirar o ar.

A amostragem (do material a ser analisado), é feita a partir de furos rasos (de aproximadamente 1,00m), perfurador no solo, de onde é coletado o ar; ou diretamente nas captações hidrominerais sendo coletada água. A água é desgasificada e o gás analisado. Em todos os casos a amostra de gás é filtrada e secada, medindo-se então sua radioatividade. Em alguns modelos, o cintilometro é substituído por uma câmara de ionização sendo contados impulsos devido à partículas  $\alpha$  em lugar de radiação  $\gamma$ .

Nos líquidos a medida é avaliada comumente em unidades de  $1 \text{ Mache} = 4 \times 10^{-10}$  Curie (como foi visto no item 5.2.5.5).

EMANÔMETRO - DETERMINAÇÃO DE RADÔNIO EM GASES  
NO SOLO

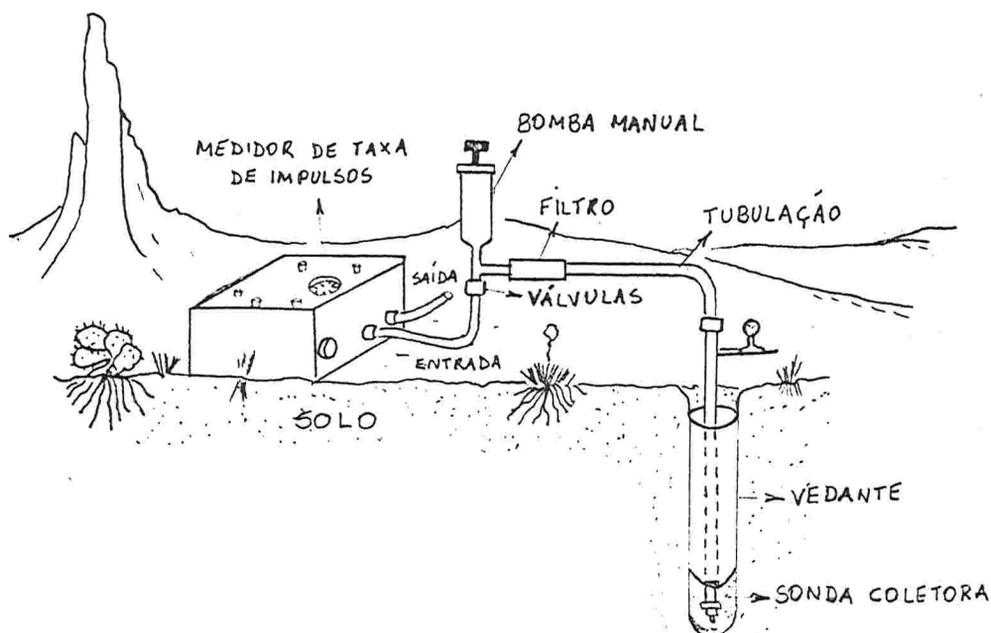


FIG REPRODUZIDA DE SAUM, N.M E LINK, 7-M. 1969

Fig 15

5.5.6 - Flutuações estatísticas e constante tempo, nas medidas de radioatividade.

5.5.6.1 - Flutuações estatísticas

Medidas de radioatividade não fornecem valores fixos, mas sim variáveis, flutuando aleatoriamente no intervalo de tempo em que a medida é feita. Assim o valor representativo é uma estimativa do valor médio observado denominando-se o fenômeno, flutuações estatísticas das medidas.

As flutuações são inerentes aos fenômenos de radioatividade, e não devidas à instabilidade dos aparelhos de medida.

Para a compreensão do fenômeno, considere-se um certo número de núcleos radioativos, os quais estão sofrendo desintegração espontânea, aleatoriamente, no tempo:

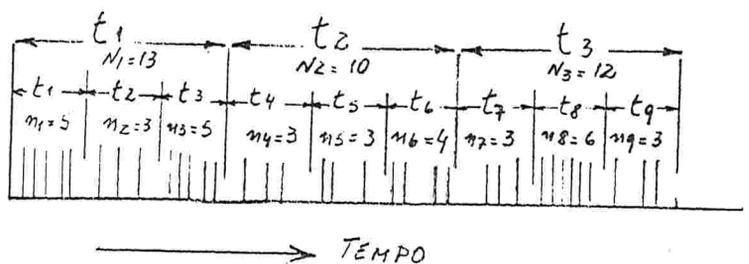
- Todos os núcleos se desintegrarão, porém é imprevisível o instante exato no qual um núcleo determinado (individualmente) se desintegrará.
- O evento da desintegração, acontecerá naquele núcleo, sem influência dos que previamente se desintegraram. Também é independente da idade do núcleo, e dos condicionamentos físico e químico ambientais (pressão temperatura, estado de combinação química).
- O fenômeno da desintegração espontânea, é regido por causas fortuitas ou aleatórias. Dois núcleos podem se desintegrar simultaneamente ou quase simultaneamente; um longo, ou pequeno intervalo de tempo, poderá ocorrer até que um terceiro núcleo, nas mesmas condições, por sua vez se desintegre. O fenômeno é regido por lei estatística, através da probabilidade do evento acontecer. Essa probabilidade é expressa pela constante de desintegração da substância radioativa em questão, como foi isto no item 5.2.2 - Processos de desintegração.

Na prática das medidas em campo, o operador deverá manter imóvel o sensor do instrumento, durante o tempo que for necessário, para avaliar uma média dos valores flutuantes observados. Nas medidas descontinuamente ao longo de um perfil, quanto menor for o contraste de radioatividade à ser detectado, tanto maior deverá ser o tempo necessário - em cada medida, para que a curacidade satisfatória seja obtida.

5.5.6.2 - Constante tempo

Para visualizar o fenômeno das flutuações, considere-se a figura seguinte:

Na figura, cada segmento vertical representa um evento de desintegração, os quais acontecem em intervalos de tempo, representados em escala, na direção horizontal.



499

- Contando-se os números de eventos nos intervalos de tempo iguais entre si de  $t_1 = t_2 = \dots = t_8 = t_9$ , teria-se  $n_1 = 5, n_2 = 3, \dots, n_8 = 6, n_9 = 3$ .  $n_1, n_2, n_3, \dots, n_9$  flutuam em torno de um valor, o qual estimado pela média aritmética será  $\bar{n} = 3,9$ ; o desvio padrão será  $\sigma_{n-1} = 1,17$ ; seu coeficiente de variação  $V_n = \frac{1,17}{3,9} \times 100 = 30\%$ .

- Contando-se os números de eventos em intervalos bem maiores e também iguais entre si  $T_1 = T_2 = T_3$ . Teria-se:  $N_1 = 13, N_2 = 10$  e  $N_3 = 12$ ; com a média aritmética  $\bar{N} = 11,7$ , o desvio padrão  $\sigma_{N-1} = 1,53$  e o coeficiente de variação  $V_T = \frac{1,53}{11,7} \times 100 = 13,1\%$ .

Verifica-se que medindo-se os números de eventos em maiores intervalos de tempo, suas flutuações serão mais atenuadas (com menor desvio relativo em relação a média).

Os resultados fornecidos nas leituras dos contadores Geiger-Müller - ou nos cintilômetros, são impulsos elétricos integrados, que resultam da integração num intervalo de tempo determinado, dos eventos (ou impulsos) da radiação medida. O intervalo de tempo da integração é uma característica de construção do circuito do instrumento, e é denominada constante tempo da medida. Pode ser de frações de segundos, até mais do que 10 segundos. Assim a constante tempo do aparelho, condiciona o valor representativo dos eventos de desintegração, havidos no respectivo intervalo de tempo.

Muitos instrumentos, permitem que se selecione a constante tempo mais adequada para as condições das medidas, manipulando-se um dos seus botões de controle.

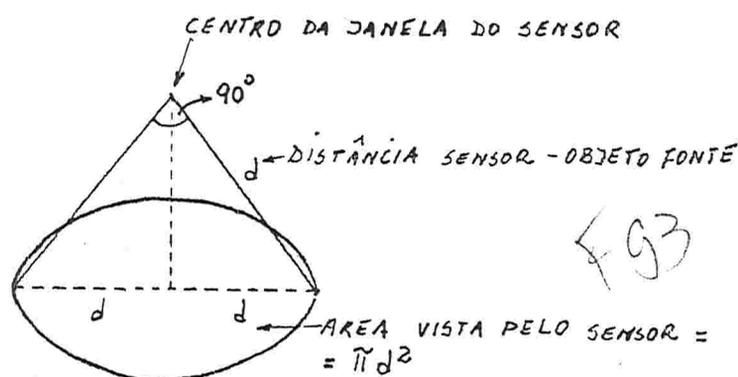
Assim os resultados expressos em impulsos/minuto, são relativos à constante tempo adotada na medida.

Na operação, quanto menor for o contraste de radioatividade à ser detectado, maior deverá ser a constante tempo adotada, para que se obtenha uma acuracidade adequada.

5.5.7 - Outros parâmetros que influenciam nas medidas

### 5.5.7.1 - Área "vista" pelo sensôr (do contador G. M. ou cintilômetro)

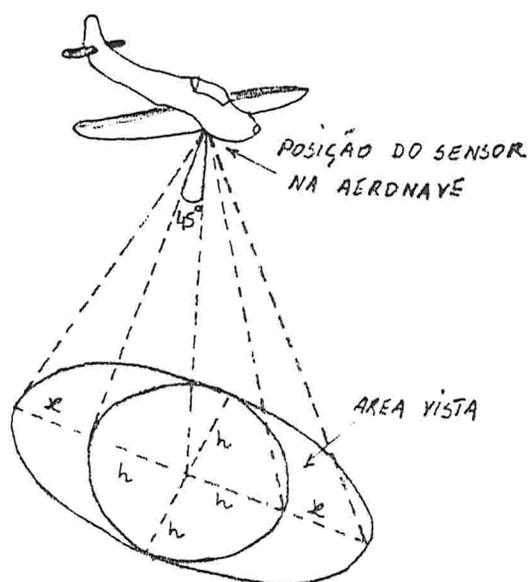
No caso em que o plano da janela de entrada das radiações, num sensôr imóvel, seja paralelo ao plano da superfície ativa onde se encontra a fonte de radiação; e que o meio que separa o sensôr e a fonte seja o ar; a área "vista" dependerá exclusivamente, da distância sensôr-fonte. Essa é a situação idealmente admissível para o caso de levantamentos aéreos sobre terreno plano num instante determinado. Nessa situação, admite-se que a área "vista" é a de um círculo cujo o diâmetro seja o dobro da distância sensôr-objeto fonte. Isto significa que a área "vista" está delimitada por um ângulo sólido de  $90^\circ$  cuja bicetriz é a perpendicular ao centro da janela do sensôr.



tanto a experiência mostra que praticamente 90% das radiações que atingem o sensôr, provém da área assim definida.

No caso em que o sensor esteja em movimento, a área vista se deformará alongando-se no sentido do movimento. A deformação aumentará com a velocidade do movimento do sensôr, e também com a constante tempo adotada na medida. Esse é o caso admissível na situação dos levantamentos aéreos,

Como mostra a figura. Outras deformações haverão da área "vista", por efeito do não paralelismo entre a superfície fonte e a janela do sensor, como no caso dos levantamentos aéreos sobre terreno acidentado.



2. CRESCE COM A VELOCIDADE DE VÔO E COM A CONSTANTE DE TEMPO

### 5.5.7.2 - Características da fonte de radiação

Esses parâmetros são compreendidos em:

- a) Atividade específica da superfície ativa - Dependendo das concentrações dos elementos ativos na fonte, da natureza desses elementos, e ainda da densidade da própria fonte.
- b) Área efetiva da superfície ativa - Dependendo da grandeza e da situação espacial da área da superfície ativa. O aumento da radioatividade aparente de uma fonte, devida ao aumento de grandeza de sua efetiva superfície ativa, é o que se denomina efeito de massa. No caso de superfície ativa plana, deve-se considerar também a sua forma geométrica.

Numa fonte de grande espessura e homogênea, a atividade específica da superfície ativa, pode ser definida como a densidade teórica de fluxo de radiação gama emitido por unidade de área da superfície. Se os elementos radioativos contidos na fonte (na rocha) forem uniformemente distribuídos, o fluxo de radiação será proporcional aos teores em urânio, tório e potássio 40. Como consequência do efeito de auto-absorção de raios gama na fonte, a densidade da mesma, é determinante da profundidade máxima na qual o fluxo pode ser sensivelmente recebido em superfície. Para um minério de urânio a profundidade máxima é da ordem de 30cm, e para outras rochas é pouco maior. A absorção nos poros de uma rocha saturada com água, diminui o fluxo sensível em superfície de 10 à 20%, em relação ao caso em que a rocha estivesse seca. A área efetiva da superfície ativa, é a grandeza da área da superfície, que estiver posicionada de modo que as emissões que dela partem, possam atingir o sensor. A grandeza ou tamanho dessa área efetiva, determina o efeito de massa, o qual é o fator mais importante para a produção do sinal.

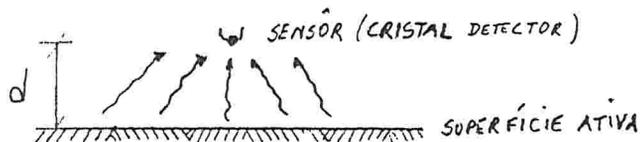
Assim no caso em que o sensor estivesse sobre uma superfície ativa plana, a área praticamente seria de  $\pi d^2$ , como foi visto anteriormente (sendo  $d$  a distância ao sensor). Portanto o sinal seria proporcional à  $\pi$ . Se o sensor estivesse no interior de um furo de sonda, praticamente envolvido pela superfície ativa, o sinal seria proporcional a  $4\pi$  (desde que as radiações pudessem atingir o sensor por todos os lados).

No caso de um espécime de mão o sinal seria praticamente proporcional a  $0,1\pi$ .

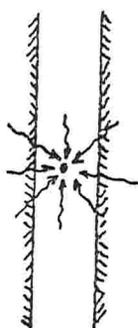
Devido o efeito de massa, por razões semelhantes, uma medida dentro de uma trincheira, com o sensor na posição (1) da figura 2, produziria um sinal bem maior do que no caso em que a medida fosse na superfície do terreno, com o sensor na posição (2) da mesma figura.

Efeitos de massa poderiam ser observados em medidas no interior de uma galeria de pesquisa, ou junto à uma escarpa no terreno.

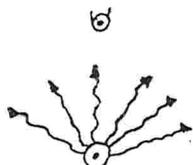
Denomina-se também efeito de massa, diferenças no sinal detectado so



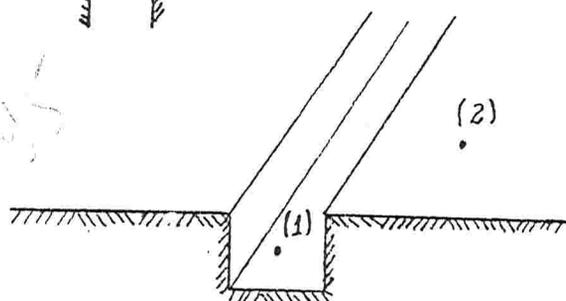
FURO DE SONDA



SENSOR (CRISTAL DETECTOR)



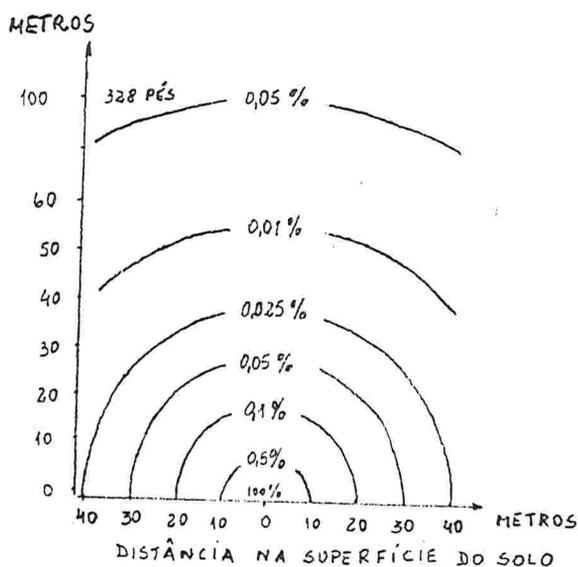
ESPÉCIME DE MÃO



bre uma superfície do terreno des-  
coberto, em relação ao que seria  
produzido sobre superfícies parci-  
almente cobertas por terra vege-  
tal, água, etc (que diminuíssem a  
área da superfície efetivamente a-  
tiva exposta).

No caso de superfícies planas,  
principalmente nos levantamentos  
aéreos, é importante a forma geo-  
métrica da superfície ativa. Quan-  
to a esse parâmetro, distinguem-  
-se tipos geométricos de fontes,  
como as seguintes:

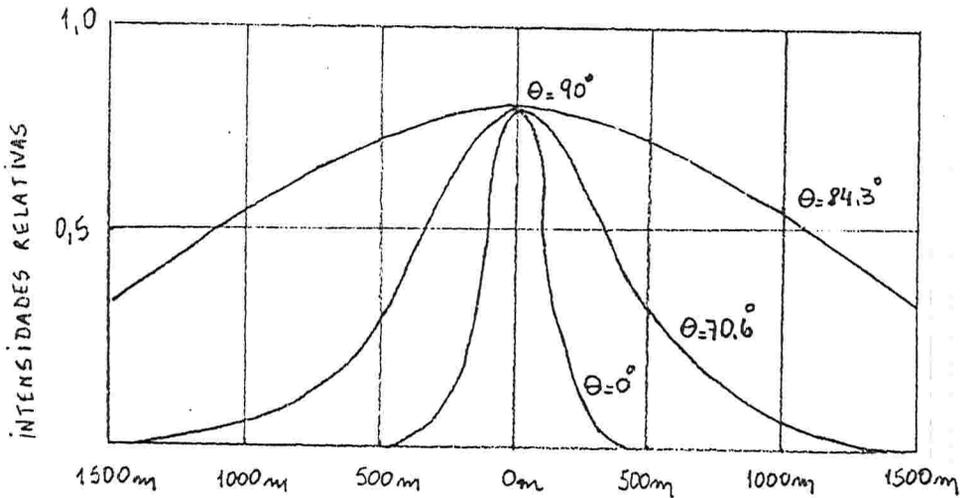
Fonte pontual - Fonte cuja área é tão pequena, de modo a produzir um  
efeito, como se a mesma tivesse as dimensões de um ponto geométrico.



ISOLINHAS DO CAMPO RADIOATIVO PRODUZIDO POR UM CORPO DE MINÉRIO, EM %  
DA INTENSIDADE DA RADIAÇÃO  $\gamma$  NA SUPERFÍCIE DO CENTRO DA ANOMALIA.

Fonte linear - Fonte de largura insignificante, e de grande comprimen-  
to.

Fonte alongada - Uma fonte de largura significativa, e de comprimento  
muito maior.



INTENSIDADES RELATIVAS A DIVERSAS DISTÂNCIAS DA LINHA CENTRAL  
DE UMA FONTE ALONGADA COM LARGURA  $a = 120 \text{ m}$

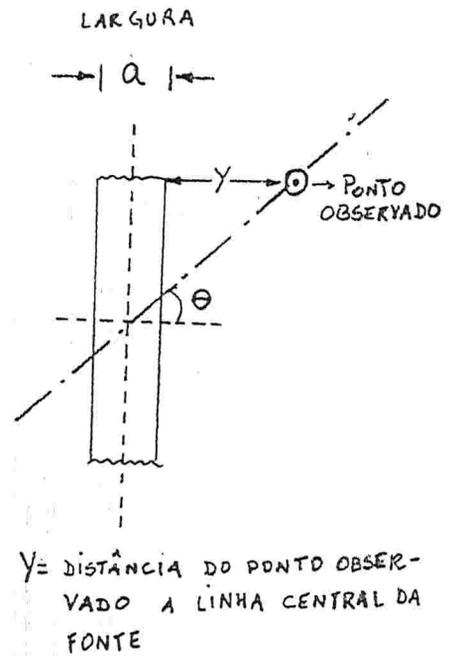
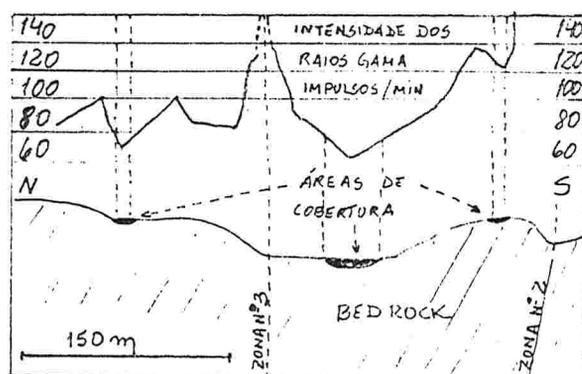


Fig 7

Fonte planar - Fonte de tão grande extensão, que as medidas sobre sua região central, independem dos seus contornos, permanecendo invariáveis lateralmente.

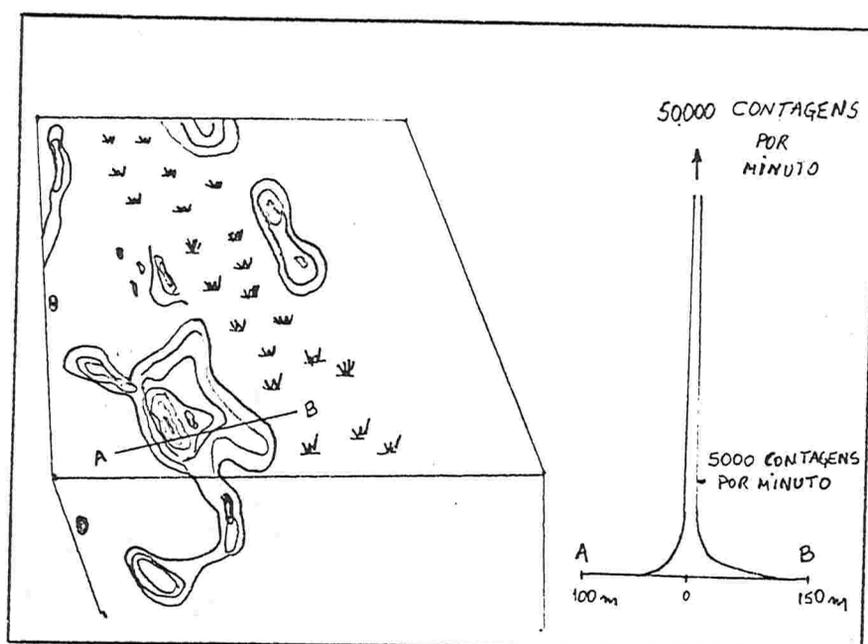
Fonte finita - Fonte relativamente pouco extensa, de modo que seus efeitos no que diz respeito aos parâmetros geométricos, sejam intermediários entre os de uma fonte planar e o de uma fonte pontual.

## 5.5.8 - Operação com métodos radiométricos e utilização.



PERFIL DA INTENSIDADE DE RADIAÇÕES GAMA, SOBRE ZONAS BRECHADAS E/ PECHBLENDAS E ÁREAS DE COBERTURA.

F98



LINHAS DE IGUAL RADIOATIVIDADE, MINA NICHOLSON LTD, GOLDFIELDS, SASKATCHEWAN. FIGURAS REPRODUZIDAS DE DOBRIN, M. 1960

F99

Nos levantamentos no terreno são utilizados principalmente cintilometro, e eventualmente contador Geiger-Müller, portáteis.

Esses instrumentos são de baixo custo e não requerem conhecimentos especializados para serem operados. O apoio de topografia é insignificante. São essenciais, conhecimentos dos fundamentos dos métodos radiométricos, geologia, e noções dos comportamentos geoquímicos do urânio, tório e potássio 40.

O levantamento consiste em anotar as taxas de contagem em impulsos por minuto em cada ponto ao longo de perfis no terreno. A correlação com dados de geologia, permite estabelecer "backgrounds" para as formações. Desvios de três ou mais valores de "background" são em princípio

anomalias interessantes. A partir de perfis dispostos em malha no terreno, poderão ser levantadas isolinhas de intensidade de radiação (linhas de contorno).

Simultaneamente com o levantamento radiométrico, são anotados os dados de geologia, principalmente litologias (formações) e seus contatos, geometria das estruturas visíveis, e dos afloramentos.

Cuidados devem ser tomados com respeito a uniformidade das medidas. Erros podem ocorrer advindos de desconsideração de efeitos de massa, de medidas efetuadas com diferentes alturas do sensor, de diferenciações nas coberturas para uma mesma litologia.

Esses erros conduzem amiude à identificação de pseudo-anomalias. Comparações de taxas de medidas desconsiderando-se as litologias, levam a anomalias não significantes, devidos à variações de "background". Flutuações estatísticas nas medidas podem ser confundidas com variações significantes de radioatividade.

Medidas com cintilômetros são feitas em caminhamento à pé, e também sobre veículos em movimento. Contadores Geiger-Müller, devido limitações de sensibilidade, não podem ser utilizados sobre veículos.

Em perfilagem, são utilizados cintilômetros. Técnicas de espectrometria de radiações gama, requerem conhecimentos especializados, sendo utilizadas nos levantamentos aéreos. Levantamentos aereo-radiométricos são de menor custo que outros métodos geofísicos aerotransportados.

Métodos radiométricos e métodos geoquímicos são preferenciais e indispensáveis na pesquisa de Urânio. Geralmente são utilizados conjuntamente, nas fases do reconhecimento regional, nas fases do prosseguimento (de "follow up"), e na pesquisa de avaliação dos depósitos. Eventualmente, nas duas últimas fases, são utilizados emanômetros para detectar radônio em solo ou em água. Não há atualmente interesse econômico na pesquisa para tório, a qual se fosse praticada, seria semelhante a pesquisa para urânio.

Métodos radiométricos são utilizados de forma indireta para a pesquisa de titânio, zinco, tantaló, nióbio, terras raras e fosfato.

Fornecem também indícios, na prospecção de minérios metálicos não ferrosos e outros minérios. Não são aplicados na pesquisa de petróleo, embora alguns distritos apresentem relações peculiares na distribuição de radioatividade com as estruturas. Obviamente não são utilizáveis em geotécnica.

Nas técnicas de perfilagem de furos de sonda, métodos radiométricos são de importância quase comparável aos métodos elétricos e eletromagnéticos, sendo muito utilizados sob essa forma, na pesquisa de petróleo, de água subterrânea, de carvão e de jazimentos salinos.

## 5.6 - Perfilagem de furo de sonda com métodos radiométricos

### 5.6.1 - Perfilagem gama.

Denominada correntemente, perfil gama, ou também gama-"log", é uma perfilagem da radioatividade gama natural das formações.

Esse tipo de perfilagem é indispensável na pesquisa de urânio. Além de outras aplicações, é também muito utilizada para estudos estratigráficos na pesquisa de jazimentos sedimentares em geral.

#### 5.6.1.1 - Operação e equipamento

A perfilagem é feita por intermédio de uma sonda, a qual é levantada do fundo para a boca do furo, com velocidades da ordem de 1000 metros/hora.

A sonda consiste num estojo cilíndrico, contendo um cintilômetro com o respectivo equipamento eletrônico. O equipamento eletrônico supre o detectôr com a voltagem necessária, retifica e amplia as pulsações, - transmitindo-as mediante um cabo de ligação, ao equipamento registrador, o qual é instalado na superfície.

Os números de pulsações, são transformados em voltagens, e registrados continuamente.

Desse modo, é registrada uma curva das intensidades das radiações gama, detectadas ao longo do comprimento do furo. Quando há aumento da radiação, a curva inflete para a direita. O registro da curva, pode ser mecânico, por impressão em filme, ou por intermédio de gravação em fita magnética.

Os registros podem ser obtidos em unidades arbitrárias de impulsos/minuto, ou também mediante calibração, em micro-grama-radio equivalente por tonelada ( $\mu\text{g}$  - radio equival./ton.) ou ainda em micro-Röntgen. (\*)

A calibração é feita colocando-se uma capsula contendo material radioativo (geralmente radio), com uma concentração conhecida, junto a sonda no ar, e à uma distância determinada.

Nas medidas deverão ser considerados também, o diametro do furo, o condicionamento da lama e ausência ou presença de revestimento.

Esses fatores afetam muito, as grandezas das medidas.

A constante tempo do circuito, é escolhida de modo à poder-se distinguir, os contrastes de radioatividade das litologias perfiladas, das flutuações estatísticas das medidas.

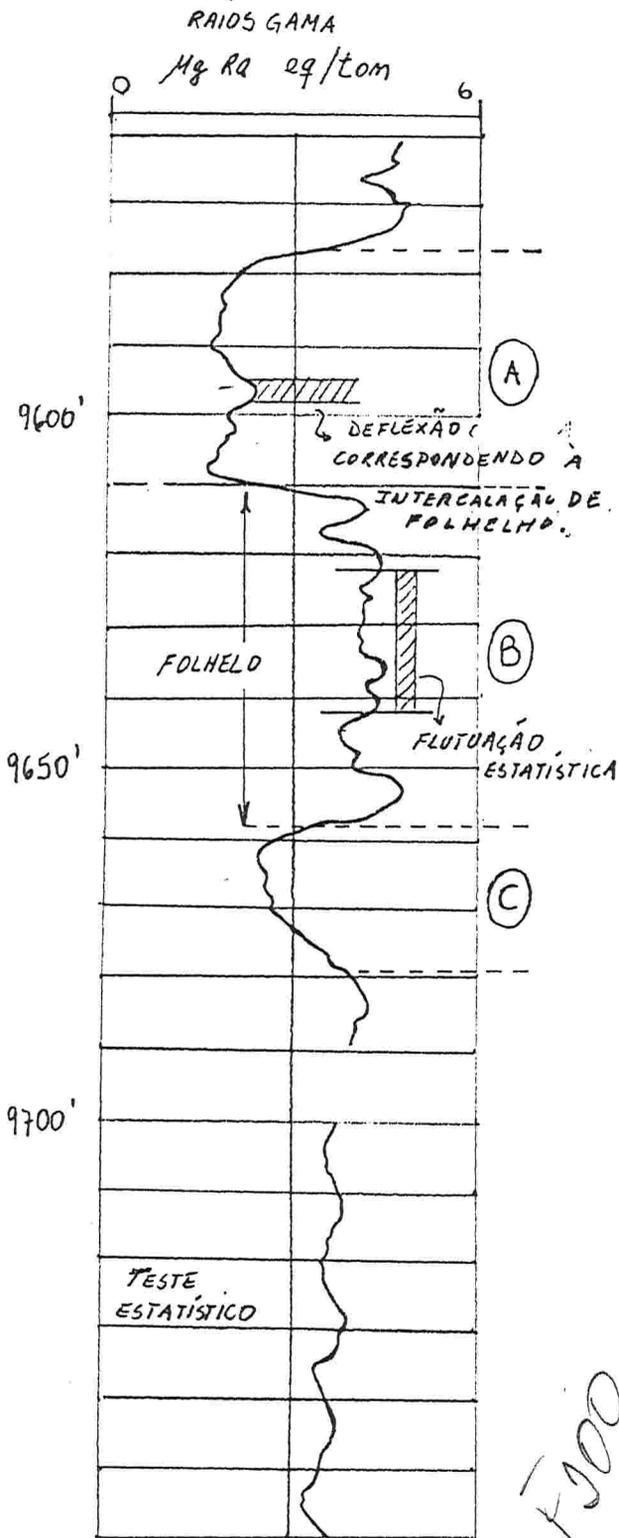
Constantes tempo demasiadamente grandes, ocasionam demora no registro, produzindo aparente arredondamento nos contatos das formações, e também deslocamentos dos mesmos, no sentido do movimento da sonda (normalmente para cima). Esse efeito é acentuado quando a velocidade da perfilagem é aumentada. Assim, constante tempo e velocidade da perfilagem, são dois parâmetros que devem ser adequadamente ajustados,

(\*) Muitas vezes são calibrados em unidades API, ver item 5.6.1.5.

para a obtenção de uma boa perfilagem.

A perfilagem pode ser obtida com furo vazio, ou com furo cheio de lama de qualquer natureza (incluindo lamas a base de óleo ou de água salgada). Poderá ser obtida também, com furo revestido.

#### 5.6.1.2 - Fundamentos de interpretação dos perfis gama (gama-log).



DISTINÇÃO DE DEFLECCÕES CORRETAS APARTIR DE VARIAÇÕES ESTATÍSTICAS  
Fig de Schlumberger Doc nº 8

Na figura:

\* Secção B - É uma parte onde a radioatividade é relativamente grande. Foi interpretada como contendo predominantemente folhelho.

- Secções A e C, com baixos valores de radioatividade, deverão ser interpretadas como contendo (predominantemente) outros sedimentos (como arenito, calcário, etc), ou ainda intrusões ígneas básicas (como diabásio).

As grandes inflexões da curva são interpretadas sem ambiguidades. As pequenas inflexões poderão ser devidas a pequenas intercalações de folhelho, e também podem significar flutuações estatísticas das medidas.

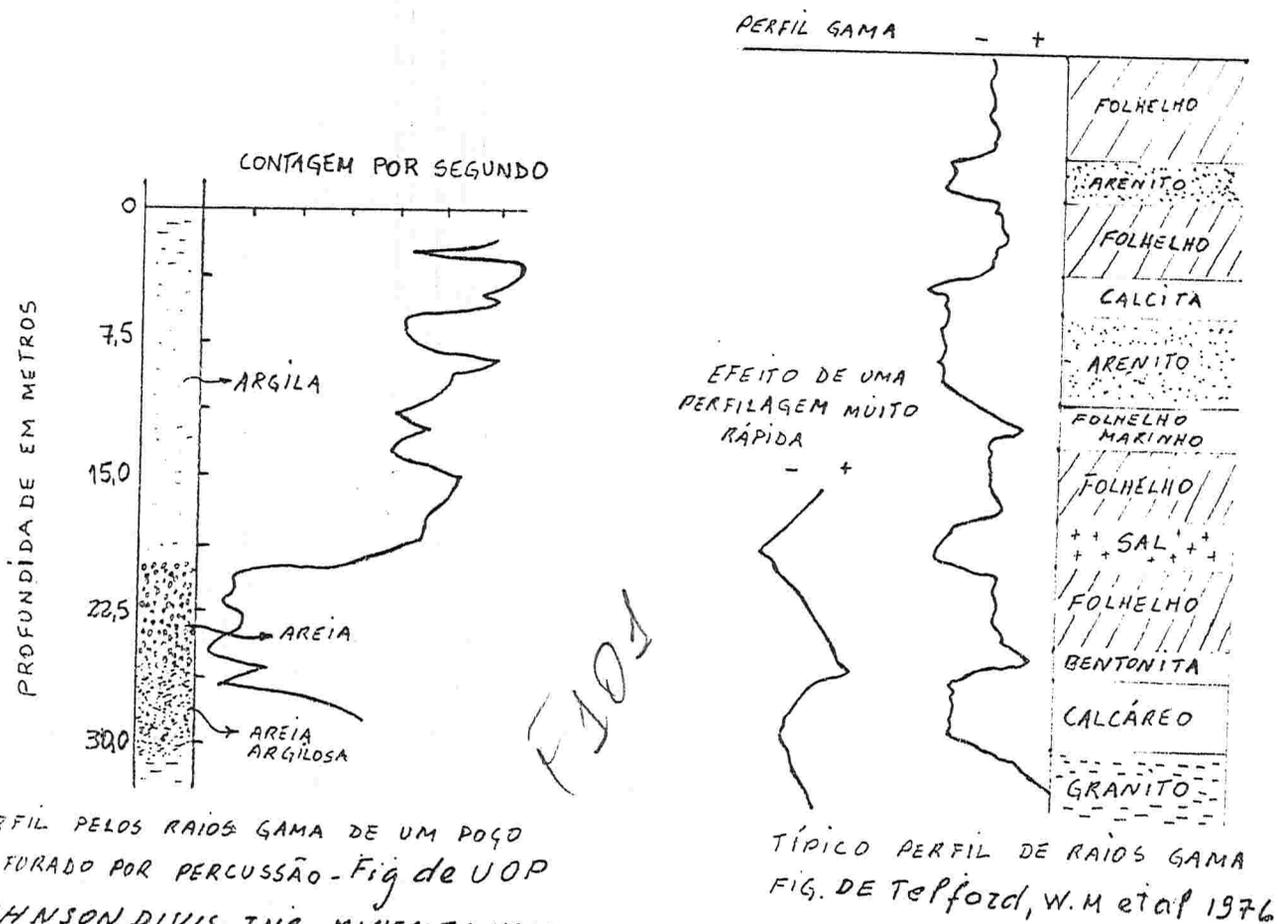
Esse tipo de ambiguidade torna-se mais difícil de resolver, quando os contatos das formações apresentem pequenos contrastes de radioatividade.

A parte inferior da figura, mostra um teste para avaliar a amplitude das flutuações estatísticas. Nessa parte, o registro foi obtido com a sonda imobilizada, frente à uma mesma formação.

Com esse teste, se poderá concluir que a inflexão assinalada com a seja devida à intercalação de folhelho, enquanto que as assinaladas com b sejam devidas às flutuações.

Outra maneira de eliminar esse tipo de ambiguidade, será repetindo a perfilagem. Nos registros duplicados (repetidos) coincidirão inflexões causadas por diferenças de background das

formações, enquanto que as devidas à flutuações por serem aleatórias, não coincidirão.



### 5.6.1.3 - Utilização do perfil gama

Em primeiro lugar o perfil gama é um dos mais importantes recursos - para a pesquisa de urânio, possibilitando inclusive, estimar-se teores "in situ" no jazimento, através de seus registros. Ver item 5.6.1.4 à seguir.

- Nas técnicas de perfilagem para fins estratigráficos, o perfil gama costuma ser utilizado juntamente com um ou mais perfis elétricos ou eletromagnéticos; e ainda com outros tipos de perfis radiométricos (o perfil gama-gama, e perfil neutron-gama). Estes últimos serão vistos - mais adiante.

A perfilagem gama, fornece informações semelhantes às do perfil elétrico de potencial espontâneo (perfil SP). Sob esse aspecto constitui uma técnica alternativa, utilizada quando as condições impossibilitam a aplicação do perfil SP, ou que tornem o mesmo insatisfatório. Assim:

- Quando a lama é de alta salinidade, impossibilitando o uso do perfil SP (o qual torna-se aplainado), o perfil gama distingue bem folhelhos de outras litologias.

- O perfil gama pode ser utilizado para perfilar furos vazios (cheios de ar), ou com lama a base de óleo, as quais são condições que impossi

bilitam a perfilagem SP. Importante exemplo é o da pesquisa de sedimentos salinos, (evaporitos) quando lama a base de óleo é necessária, para que se obtenha testemunho, e o perfil gama é utilizado em lugar do perfil SP.

- No caso de formações "duras", isto é, formações com predominância de leitos de calcário, ou com intrusões de diabásio, onde o perfil SP é de pequena resolução para as intercalações de folhelho, o perfil gama as discrimina nitidamente.

Muitas vezes o perfil gama assinala com nitidez diferenças nos ambientes de sedimentação, em sequências de formações siltico-argilosas, através de diferenças marcantes de background de radioatividade. Exemplo notável é a distinção do contato das formações Palermo e Irati, nas perfurações para pesquisa de carvão no litoral do RS, através do perfil gama. (Ref. Informação das equipes da CPRM - Projeto Carvão RS).

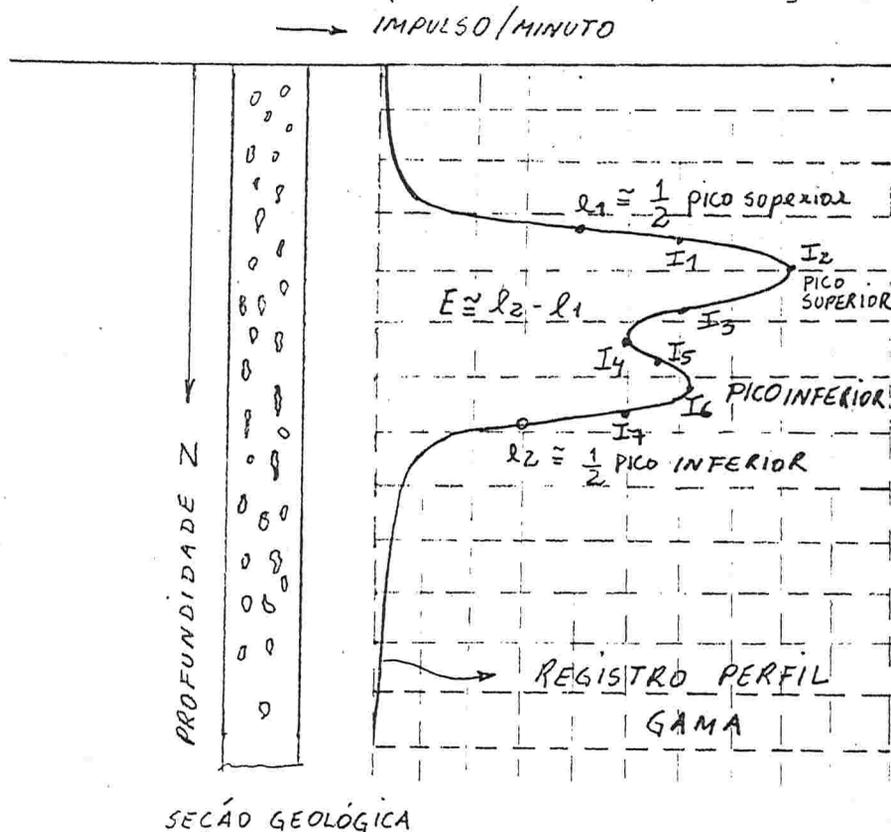
Em regiões onde a experiência mostra relações fixas entre os conteúdos de folhelho e as radioatividade das formações, o perfil gama é útil para estimar porosidades. Por esse motivo, em muitos casos, na pesquisa de água subterrânea, o perfil gama determina com precisão os pontos de entrada de água, sendo por isso de muita utilidade para o dimensionamento de filtros na captação de água subterrânea.

- Na perfuração para produção do petróleo, muitas vezes o perfil gama é útil para determinar-se precisamente os pontos onde o revestimento - deverá ser perfurado, em frente à uma formação produtora. Isso é feito comparando-se perfilagens gama, obtidas antes e após o poço estar revestido. Técnica denominada "tracer operations", consiste em colocar substâncias radioativas em horizontes à assinalar, ou no cimento introduzido entre o revestimento metálico e as paredes do poço (na operação de cimentação). Um perfil gama executado posteriormente mostrará com nitidez, o horizonte "marcado", ou a altura atingida pelo cimento.

- Perfil gama utilizado juntamente com perfil neutron-gama, elimina ambiguidades de interpretação deste último tipo de perfilagem, no que diz respeito a distinção entre formações duras e de folhelhos. Ver item 5.6.3 perfil neutron-gama.



5.6.1.4 - Estimativas do teor de urânio (avaliado em %  $U_3 O_8$ ), através dos resultados de um perfil gama.



$$\Delta Z = \text{DISTÂNCIA VERTICAL ENTRE } I_1 I_2 = I_2 I_3 = I_3 I_4 = \dots$$

Seja a figura acima, representando uma curva de registro de um perfil gama. A deflexão para direita (aumento em impulsos/minuto), foi causada por uma concentração em elementos radioativos na secção. Desconsiderando outros fatores, como sejam, diâmetro e revestimento do furo, umidade na formação, e água no furo etc;

- a intensidade de raios gama  $I$ , devido uma camada mineralizada, dependerá: -

- Da profundidade da sonda  $Z$
- Do teor médio de elementos radioativos  $G$ , concentrados na secção.
- Da espessura ativa da camada mineralizada  $E$ .

O registro gama é uma curva representada pela função  $I f (Z)$ . Pode ser estabelecido que:

$$GE = K \int_{-\infty}^{+\infty} I f (z) dz; \text{ onde}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} I f (z) dz = A = \text{área compreendida pela inflexão da curva,}$$

Então  $GE = KA$  e  $G = K \frac{A}{E}$

O valor  $E$  é medido no perfil, através da fixação dos pontos  $e_1$  e  $e_2$ , considerados os pontos de contato da camada ativa, acima e abaixo na secção. Esses pontos estarão sobre arredondamento da curva na transição para atingir o background da secção (parte considerada praticamen

te inativa).

O arredondamento nos contatos da camada ativa, está relacionado a constante tempo, e a velocidade de perfilação adotada. Como mostra a figura,  $e_1$  e  $e_2$  são fixados nas metades das profundidades entre o valor do "background" e os picos, respectivamente, superior e inferior.

A área  $A$  é avaliada segundo a relação:

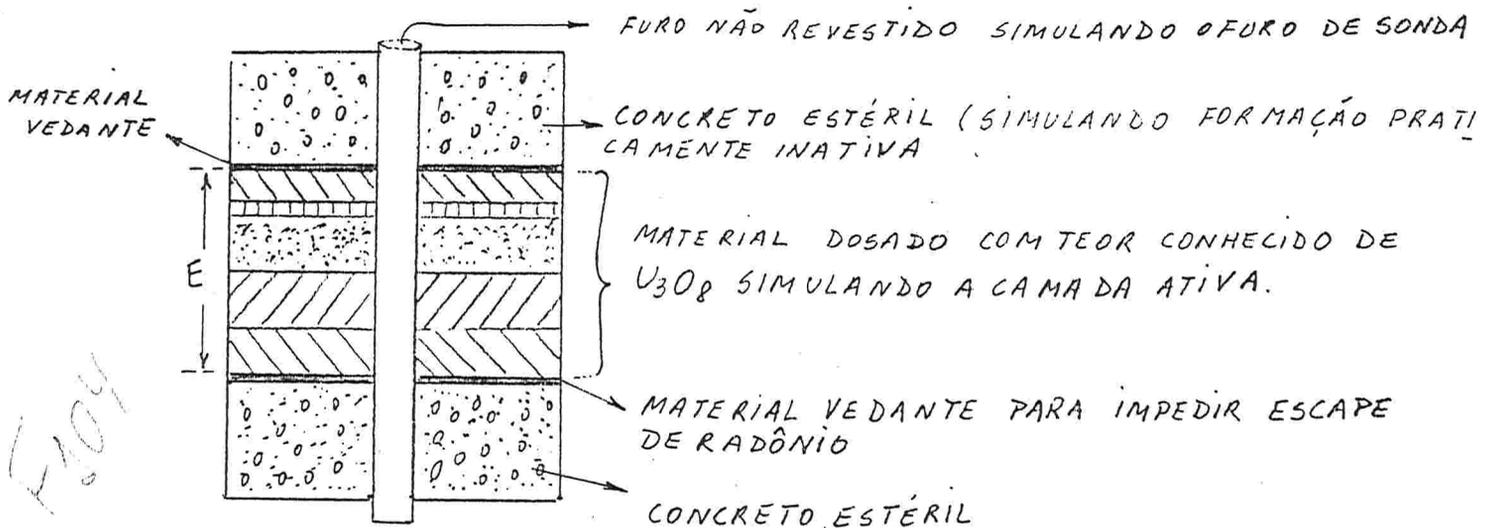
$$A = \Delta z \sum_{j=1}^{j=n} I_j + 1,38 (e_1 + e_2) ; \text{ (no caso } n=7)$$

Nessa relação:

$\Delta z =$  Intervalo vertical entre os valores  $I_j$  vizinhos, usualmente 0,5 pés

$1,38 (e_1 + e_2) =$  correção do tempo morto, sendo 1,38 valor empírico adotado quando  $z = 0,5$  pé.

$K$  é um fator de proporcionalidade constante para determinadas condições da formação. É obtido mediante calibração da sonda com um poço-padrão, como mostrado na figura a seguir:



Um poço padrão (ou poço teste) consiste na simulação das condições encontradas num furo de sondagem, preparada dentro de um tanque de aço como mostra a figura.

Perfilando-se com o gama-log o poço padrão, obtém-se uma curva. Sendo conhecido  $G$  do material dosado, e a espessura  $E$  da camada preparada, torna-se fácil calcular  $K$  a partir de  $K = G \cdot \frac{E}{A}$ .

O valor de  $K$  assim determinado será aplicado para as determinações de  $G$  nos furos de sonda, através da fórmula  $G = K \frac{A}{E}$ .

O teor  $G$  assim determinado deverá ser adicionalmente corrigido para outros fatores de ajustamento às condições reais.

Outros fatores de correção são:

- Fator de correção devido presença de água no furo, a qual afeta as medidas como se a densidade das camadas ativas tivesse aumentado, e

também pela sua ação causando espalhamento Compton das radiações.

- Correção devido presença de revestimento metálico.

Os equipamentos para perfilagem de furo destinados à pesquisa de urânio, são fornecidos com tabelas e ábacos de valores K e dos fatores de correção, representando diversificados modelos. Mediante ajustamento com as condições locais, seleciona-se os elementos necessários para o cálculo em cada caso.

Observe-se que medidas de teores, através das medidas de radioatividade utilizando o perfil gama, estarão afetadas de erros inerentes ao método:

- A presença de outros elementos que não sejam da família do urânio - (principalmente do tório), contribuirá para aumento da radioatividade, e portanto para superestimação do teor em urânio.

- Uma vez que os cálculos dos teores em urânio, admitem que os elementos da família estejam em equilíbrio, escapes de radônio resultarão em subestimação de teores.

Esse método de calcular o teor dos jazimentos é usado correntemente na pesquisa de urânio. Seus resultados tornam-se confiáveis, mediante controle com amostragem direta .

.5.6.1.5 - Unidade API (American Petroleum Institute) para medir radioatividade, e impulso por segundo (Cps) padronizado.

Modernamente os perfis de radioatividade são calibrados em unidades API, cujo padrão é assim definido:

- A diferença entre as secções cimentadas de alta e baixa radioatividade do poço de calibração API da Universidade de Houston, Texas USA, é definida como de 200 unidades API.

Folhelhos dão valores médios de radioatividade, em torno de 100 unidades API. Areias e arenitos desprovidos de argila 30-80 API; calcário e dolonito 30-100 API; argilas 150-500 API; Lavas 10-100 API.

Outros equipamentos modernos de perfilagem radiométrica, são calibrados em relação à padrões, os quais por sua vez são constituídos com base nas unidades API.

Desse modo as medidas são fornecidas em impulsos por segundo calibrados, os quais são referidos abreviadamente por Cps, significando contagem por segundo. Assim as medidas em Cps dos diferentes equipamentos - são comparáveis, e referidos à unidades API.

## 5.6.2 - Perfilagem gama-gama ou gama-gama log ou perfilagem de densidades.

### 5.6.2.1 - Essência e aplicações

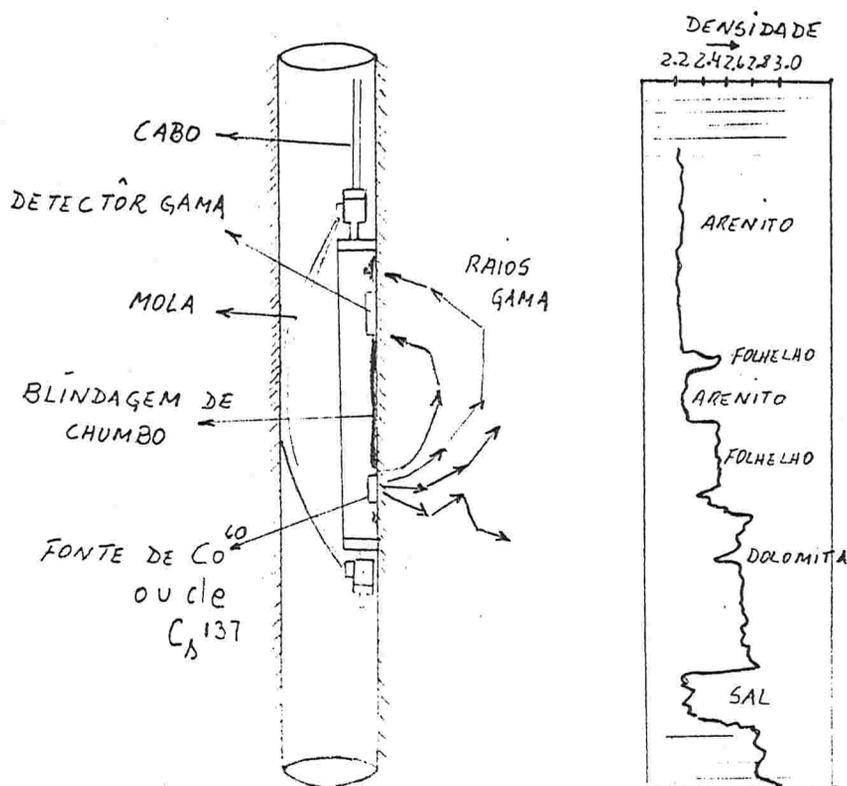
#### Perfilagem gama-gama:

Consiste na perfilagem dos contrastes de absorção nas formações, de radiações gama, emitidas por uma fonte colocada na sonda. Essa perfilagem responde pelos contrastes de densidades das litologias perfiladas, motivo pelo qual é denominada correntemente perfilagem de densidades.

O perfil densidade é da maior utilidade para identificar camadas de evaporitos, folhelhos oleíferos e carvão. É a perfilagem geofísica que melhor discrimina as camadas de carvão nas sondagens para a pesquisa dos jazimentos carboníferos no RS, SC e PR - Brasil. Ver desenho perfil composto típico na formação Rio Bonito - Projeto Carvão - SC 1976 (CPRM) - Item 5.6.2.3 à pg 417

Mediante o conhecimento das densidades da matriz e do filtrado da lama que satura as litologias junto ao furo, dá indicações que permitem determinações da porosidade em formações livres de folhelho. Combinações de perfis gama-gama, com perfis de resistividade, com perfis neutron-gama e com perfis de contrastes de velocidade de propagação do som (perfis de sons ou "sonic log"), são usadas para interpretações - mais complexas: - Para determinações de índices de saturação em água, para melhor identificar litologias, para problemas mais complexos de computação de porosidades.

### 5.6.2.2 - Equipamento e operação da perfilagem gama-gama



A sonda é constituída por uma almofada blindada ou patim, a qual é mantida comprimida contra a parede do furo, pela ação de um braço metálico excentrico ao mesmo.

Na parte baixa da sonda está colocada uma fonte monoenergética de raios gama de média energia, usualmente uma partícula de  $^{60}\text{Co}_{27}$  ou de  $^{137}\text{Cs}_{55}$  (este com emissão de 0,66 M e V). O detectôr de radiação é um cintilômetro (podendo eventualmente ser utilizado um contador G.M.). O mesmo é colocado mais acima na sonda, à pouco menos de 0,50m de fonte. A fonte e o detectôr são blindados por chumbo, excepto nas suas faces, que estão voltadas para a parede do furo. Assim os únicos raios gama emitidos pela fonte, que atingem o detectôr, são aqueles que viajam - através da formação, como mostra a figura.

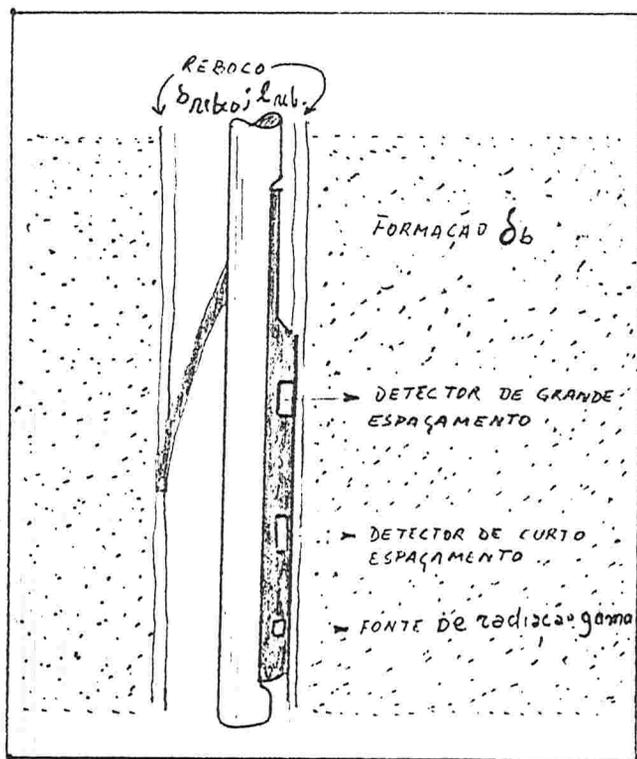
Os raios gama provindos da fonte que atingem a formação, interagem com a substância da mesma, predominantemente por efeito de espalhamento Compton. As contagens de impulsos no detectôr, devidos aos raios gama que o atingem, são transmitidas sob a forma de voltagens para os equipamentos medidores-registradores instalados na superfície, mediante cabo de ligação, operando de forma semelhante como no caso da perfilagem gama.

As profundidades máximas de investigação, contados lateralmente a partir das paredes do furo para o interiôr das formações, são da ordem de 15cm. Essa profundidade corresponde nas formações porosas, a parte completamente invadida pelo filtrado da lama de sondagem.

O equipamento é calibrado em relação a intensidade da fonte emissora, a sensibilidade do sensôr, à densidade da lama de sondagem e aos diâmetros da secção do furo (seu calibre). A perfilagem gama-gama pode também ser feita em furo desprovido de lama (furo vazio). Velocidade de perfilagem e constante tempo das medidas, são adequadamente ajustadas, como no caso de perfilagem gama. Velocidades máximas recomendadas são de 550 metros/hora.

Simultaneamente o equipamento perfila as distâncias entre a face do patim e a extremidade do braço excêntrico. Desse modo, a sonda fornece informações quanto ao calibre do furo (diâmetros da secção), e a qualidade do contato almofada - com a parede do mesmo.

Quando o reboco da lama é brando, o que é normal em profundidades pequenas e médias, ele é cortado pelo patim, de modo que o mesmo não afeta a perfilagem. Porém quando o reboco é consistente, ou no caso de cavernas produzidas por caimentos do furo, ou ainda quando as paredes apresentam muita rugosidade, parte significativa das medidas são devidas ao reboco. O mesmo é "visto" pelo sensôr, como se fosse uma formação. Correções das informações do perfil densidade, são então - necessárias.



F106

Equipamentos modernos, tem dois detectores colocados em diferentes alturas como mostra a figura. Assim o mais próximo à fonte, as medidas serão mais afetadas por diferenças de constituição da lama (e do reboco), do que as do detector mais afastado. Mediante as diferenças de leituras dos dois detectores, alguns equipamentos corrigem automaticamente diferenças causadas por variações na espessura e na densidade do reboco. (\*)

#### 5.6.2.3 - Fundamentos da perfilagem gama-gama

Sendo as medidas produzidas, relacionadas aos efeitos de interação dos raios gama que viajam através das formações, com os átomos constituintes da substância das mesmas, resulta que:

- As medidas do perfil gama-gama estão essencialmente relacionadas às densidades eletrônicas ( $\delta_e$ ) das substâncias constituintes das formações. Ou seja, com número <sup>relativo</sup> de elétrons existentes em um centímetro cúbico ( $1 \text{ cm}^3$ ) das substâncias (número relativo e expresso pelo número atômico ou molecular)

Por outro lado a densidade global (ou peso específico) ( $\delta_b$ ) da substância, dado em  $\text{g/cm}^3$ , está relacionado à densidade eletrônica ( $\delta_e$ ) da mesma. Por sua vez ( $\delta_b$ ) dependerá da densidade da matriz da rocha ( $\delta_{ma}$ ) da sua porosidade ( $\phi$ ), e ainda das densidades ( $\delta_f$ ) dos fluidos que ocupam os poros das mesmas rochas.

Se a formação fosse constituída por um único elemento químico, suas densidades eletrônica ( $\delta_e$ ) e barimétrica ( $\delta_b$ ) estariam relacionadas - conforme a expressão:

$$\delta_e = \delta_b \frac{Z}{A} \quad \text{ou} \quad \frac{\delta_e}{\delta_b} = \frac{Z}{A}, \text{ onde:}$$

(\*) OBS: na página seguinte.

(\*) Medidas com o detector próximo a fonte, são denominadas BRD, (de "bed resolution density"); dão melhores discriminações dos leitos. 416  
 Medidas do detector mais afastado são denominados LSD (de "long spacing density"); dão melhores indicações quanto as densidades das formações.

Z = número atômico do elemento = número de elétrons orbitais

A = peso atômico do elemento

Se a formação fosse constituída por um único composto químico a relação seria:

$$\delta_e = \delta_b \cdot 2 \frac{\sum Z_s}{\text{peso molecular}} ; \text{ onde:}$$

$\sum Z_s$  = somatório dos números atômicos dos átomos constituintes da molécula = ao número total de elétrons orbitais existentes na molécula.

Para a maioria das substâncias os fatores  $\frac{2Z}{A}$  e  $\frac{2\sum Z_s}{\text{peso molecular}}$  são valores próximos à unidade, como se verifica na tabela seguinte:

EL.	$\frac{2Z}{A}$	Substância	$\frac{2\sum Z_s}{\text{peso molecular}}$
H	1,9841	Quartzo SiO <sub>2</sub>	0,9985
C	0,9991	Calcita CaCO <sub>3</sub>	0,9991
O	1,0000	Dolomita CaCO <sub>3</sub> MgCO <sub>3</sub>	0,9977
Na	0,9569	Anidrita CaSO <sub>4</sub>	0,9990
Mg	0,9868	Silvita KCl	0,9657
Al	0,9637	Halita NaCl	0,9581
Si	0,9968	gesso CaSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	1,0222
S	0,9978	Carvão antracitoso	1,030
Cl	0,9588	Carvão betuminoso	1,060
K	0,9719	Água doce H <sub>2</sub> O	1,1101
Ca	0,9980	Água salgada 200 x 10 <sup>3</sup> ppm	1,0797
		Petróleo n (CH <sub>2</sub> )	1,1407
		Metano CH <sub>4</sub>	1,247
		Gás natural C: 1,1 H: 4,2	1,238

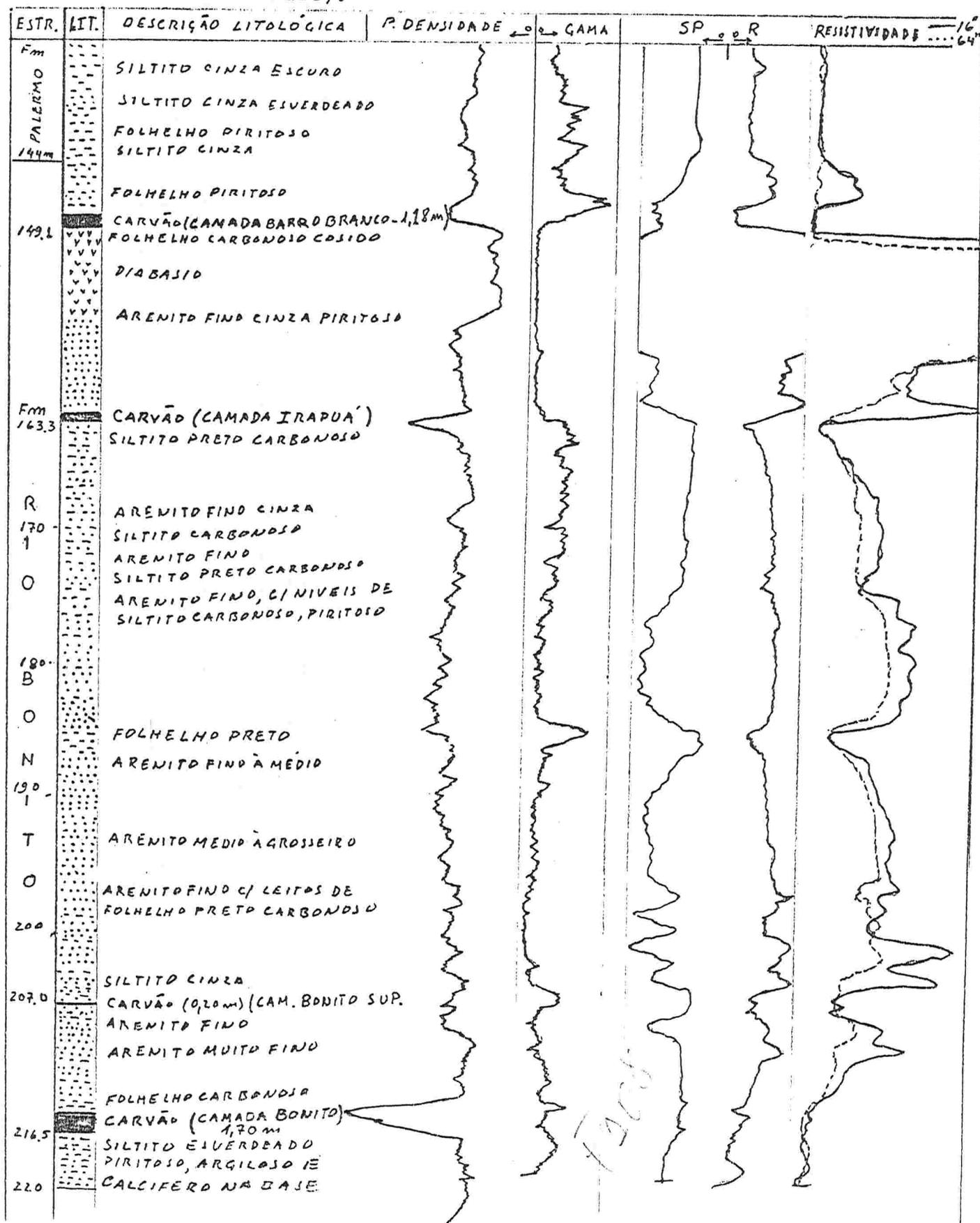
Em consequência, desde que a curva gama-gama seja obtida com um equipamento adequadamente calibrado, os valores das densidades globais - ( $\delta_b$ ), das substâncias constituintes das formações comuns perfuradas, serão valores muito próximos daqueles "vistos" pelo dispositivo (densidades aparentes  $\delta_a$ ).

Para arenitos, calcários e dolomitos saturados com água, os valores lidos  $\delta_a$  serão praticamente iguais aos  $\delta_b$  correspondentes. Para algumas formações são necessárias correções para avaliar  $\delta_b$  através do valor lido  $\delta_a$ .

Em geral a perfilagem gama-gama registra essencialmente, uma curva representando os contrastes de densidades das formações. Ver perfil - composto típico na formação Rio Bonito - Projeto Carvão - SC (CPRM).

F 307

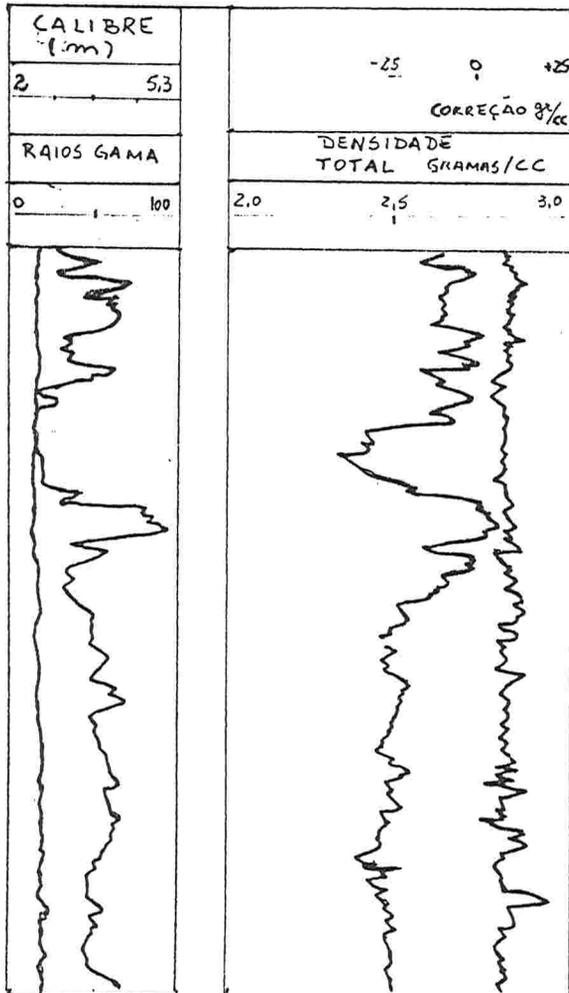
Perfil composto de sondagem numa secção típica da form. Rio Bonito em Laurio Müller SC. Reprodução reduzida e simplificada, de original da CPRM, do Proj. carvão - DNPM - CPRM - 1976. Descrição no intervalo 152,26m à 195,00, a partir da amostra de calha (intervalo não testemunhado).



- Perfilagem geofísica - curvas a partir da esquerda:-
- 1- Perfil densidade - C. gama-gama (const. tempo 5 seg, veloc. de registro 3,5m/minuto - escala de sensibilidade 0-130 Cps).
  - 2- Perfil radioativ. natural - C. gama (const. tempo 1 seg, veloc. de registro 2m/minuto, esc. de sensibilidade 0-100 Cps).
  - 3- Perfil potencial espontâneo - C. SP (escala de sensibilidade 0-50m V)
  - 4- " Resistência - C. de resistividade com dispositivo monoelétrico.
  - 5- " Resistividade - Duas C. com dispositivos normal curto (15") e normal longo (64").

Os equipamentos mais aperfeiçoados, são calibrados e registram:

- a) Uma curva das densidades aparentes das formações ( $\delta_a$ ), graduada em  $g/cm^3$ , mediante calibração. Essa curva já está compensada das diferenças causadas pelos efeitos do reboco da lama (correção automaticamente feita).



- b) Uma curva de ( $\Delta\delta$ ) também em unidades de  $g/cm^3$ , registrando o que foi corrigido na curva das densidades, por efeito do reboco da lama e de rugosidades nas paredes do furo.
- c) Uma curva do calibre (perfilagem de diâmetros do furo). Essa é utilizada nos cálculos de interpretação, principalmente para avaliações de porosidade.
- d) Uma curva de perfilagem gama natural das formações.

F 109

#### 5.6.2.4 - Determinações de porosidade a partir do perfil gama-gama

Supondo o caso simples, de uma formação desprovida de argila (formação limpa), cuja densidade global seja ( $\delta_b$ ). Chamando-se ( $\delta_{ma}$ ) a densidade da matriz da rocha (da formação), de ( $\delta_f$ ) a densidade do fluido que satura a rocha, e ( $\Phi$ ) a sua porosidade efetiva, (i. é, a fração do volume da rocha ocupada pelos vazios ou poros, correctados entre si).

Ter-se-á  $\delta_b = \Phi \delta_f + (\delta_{ma} - \Phi \delta_{ma})$ , de onde se deduz:

$$\Phi = \frac{\delta_b - \delta_{ma}}{\delta_f - \delta_{ma}}$$

( $\delta_{ma}$ ) para os sedimentos comumente perfurados variam de 2,87 (em dolomitos) até 2,65 (em areias, arenitos e quartzitos).

O fluido que satura as formações porosas até à cerca de 15cm (profundidade "vista" pela sonda), é o filtrado da lama, cuja densidade -

varia de pouco menos de 1,0 até 1,1 (dependendo da salinidade, da pressão e da temperatura). ( $\delta_b$ ) como foi visto, pode ser determinado a partir de ( $\delta_a$ ) lido na curva, no caso de um equipamento calibrado.

Havendo saturação residual em hidrocarbonetos leves ou gás, ou na presença de formações contendo folhelhos, o fenômeno torna-se mais complexo. Nesses casos o problema de determinação de porosidade é resolvido com maior ou menor precisão, combinando-se informações obtidas de outros tipos de perfilações (principalmente perfilagem de som e de neutron-gama) - Para melhor informação consultar Ref-Alger R.P et al 1962.

5.6.2.5 - Estimativas do teor em cinza de carvões, a partir do perfil - densidade.

Geralmente existe relação razoavelmente uniforme, entre a densidade do carvão e o seu teor em cinza, para carvões de um determinado tipo ou "rank". Assim mediante um perfil densidade calibrado, é possível estimar-se o teor em cinza da camada de carvão "in situ". Com base nas leituras do perfil desde que a função densidade - teor em cinza, esteja determinada, para o distrito pesquisado.

Por vezes, simples exame do perfil permite separar intervalos com diferentes densidades, bloqueando-se intervalos de diferentes qualidades. Num equipamento de dupla separação fonte-detector, o perfil utilizado é o LSD (longo espaçamento densidade). Ver figura.

Outras vezes as variações da curva tornam o problema mais complexo, procedendo-se como se segue:

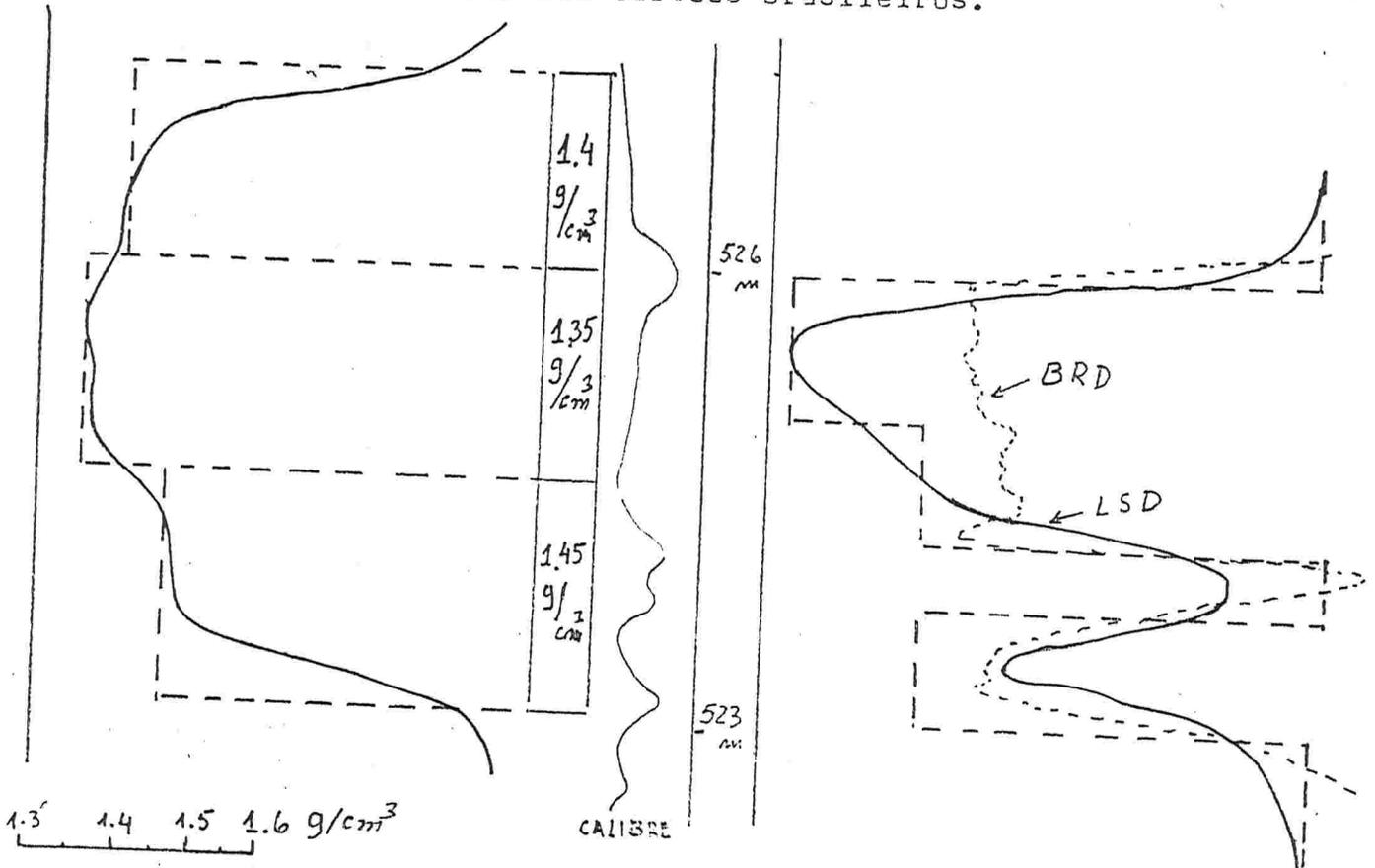
- Bloqueia-se primeiramente os intervalos bem definidos de piores qualida de, utilizando-se o perfil densidade de pequeno espaçamento fonte-detec- tór (BRD). Os intervalos remanescentes são delimitados em intervalos com qualidades razoavelmente médias, de acordo com a curva do perfil, como mostra a figura.

Devido a forma exponencial da curva de radiações gama, obtem-se melhor acuracidade nas estimativas, para carvão com baixos teores em cinza, as- sim:

Para carvões de 0-5% Cz, obtem-se a curacidade de  $\pm 1\%$  Cz

Para carvões de 15-25% Cz, obtem-se a curacidade de  $\pm 4\%$  Cz

Esse fato entretanto prejudica as estimativas para carvões de altos teo- res em cinza, como nos casos dos carvões brasileiros.



BLOQUEANDO INTERVALOS COM DIFERENTES DENSIDADES EM CAMADAS DE CARVÃO, MEDIANTE O PERFIL DENSIDADE (gama-gama) FIGURAS DE BPB INSTRUMENTS LIMITED - 1981

1-30

5.6.3 - Perfilagem neutron-gama, ou perfil neutron-gama-"log" ou ainda perfil porosidade. Variante perfil neutron-neutron.

5.6.3.1- Essência do método, e aplicações

Esse método de perfilagem, consiste em perfilar radioatividade gama provocada nas formações, mediante bombardeio das mesmas, com radiações de partículas neutron, produzidas por uma fonte colocada na sonda. O detectôr (geralmente um contador G.M.), está também colocado na sonda, à pouco menos de 0,50m acima da fonte.

Ao lado das radiações gama naturais, são detectadas as radiações gama de mais alto nível de energia, as quais são emitidas pelas substâncias, quando as partículas de neutron são absorvidas pelos átomos constituintes das mesmas.

Existe uma variante do método, a qual é denominada perfilagem neutron-neutron. Nessa variante o equipamento mede as taxas de contagem de radiações neutron num detectôr (uma câmara de ionização) colocado na sonda, à distâncias de 0,45m ou 0,25m da fonte de radiação neutron. Nas duas variantes a perfilagem consiste em medir contrastes de poder absorvente das formações às radiações neutron produzidas pela fonte.

A perfilagem neutron-gama, é muito útil para delinear formações e para correlação estratigráfica, quando suas informações são combinadas com as de outros tipos de perfilagem (principalmente do perfil gama natural). Para correlação é considerado o melhor perfil.

O poder absorvente às radiações neutron, depende principalmente da quantidade de hidrogênio (H) existente na substância por unidade de volume da mesma. O H está contido principalmente, nos fluidos das formações (água, óleo e gás). Argilas são porosas mas impermeáveis, e ricas em H. O H está contido na argila (na água de constituição ou absorvida). Conseqüentemente o perfil neutron-gama (e também o perfil neutron-neutron), responde pela porosidade efetiva da formação, através dos efeitos dos fluidos que a saturam, quando em condições equivalentes de conteúdo em argila. Os equipamentos podem ser calibrados para informarem diretamente a porosidade efetiva das formações, para condições peculiares de um determinado jazimento. Daí a denominação de perfil porosidade.

Quando o filtrado da lama não expulsa os fluidos da formação até às distâncias "vistas" pelo dispositivo, e em condições equivalentes de porosidade efetiva e do furo, o perfil neutron-gama, pode distinguir o horizonte limitante óleo-gás, nos jazimentos de petróleo. Isso é possível, graças ao contraste sensível de conteúdo em H, nos hidrocarbonetos óleo e gás.

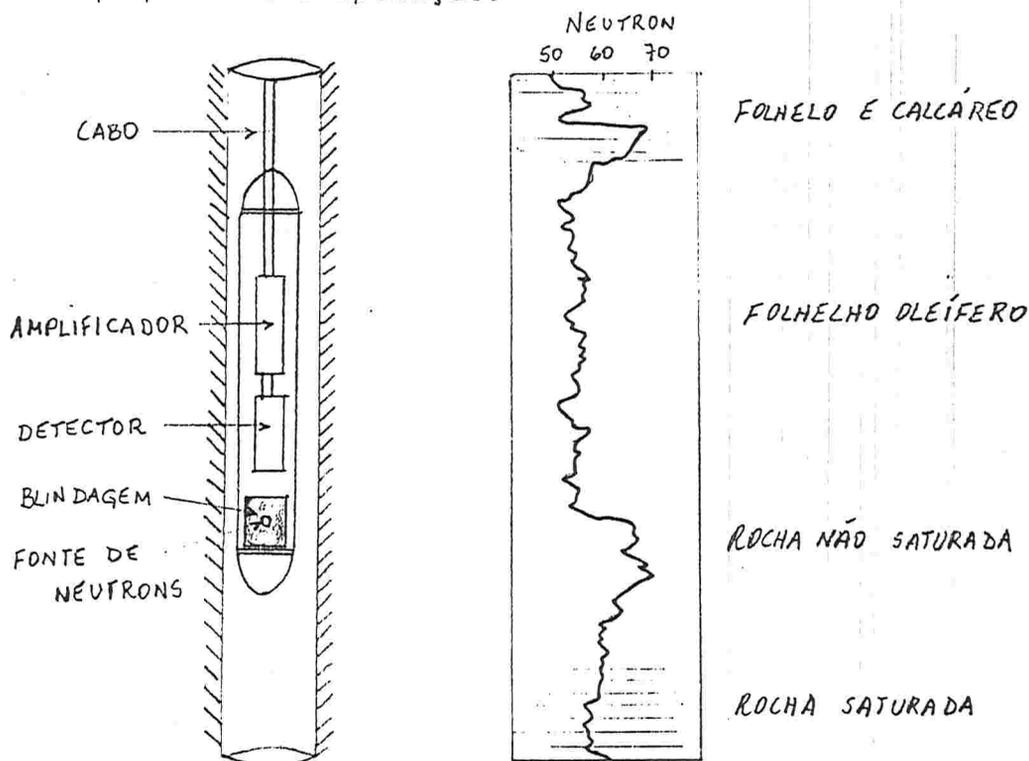
Tem sido demonstrado nas formações carboníferas, na ausência de perturbações tectônicas, que a resistência das rochas depende principal-

mente do seu conteúdo em sílica. Esse conteúdo pode ser considerado inversamente proporcional ao conteúdo em argila, à porosidade efetiva e, diretamente, à compactação. Nessas condições o perfil neutron (neutron-gama e neutron-neutron), dá boa correlação com a resistência da rocha, sendo por isso útil para estudos de resistências dos maciços rochosos e para desmonte de rochas.

Para essas aplicações, as informações do perfil neutron, são combinadas com as do perfil sísmico sonoro (perfil de som). Este último, complementa com informações da presença de descontinuidades acústicas, correspondendo à descontinuidades estruturais (fraturamento). Ver perfilação sonora - item 6.4.3.3.

O perfil neutron pode ser aplicado em furos vazios e também em furos cheios com água ou lama. A lama pode ser à base de água ou de óleo. O furo pode estar revestido.

#### 5.6.3.2. Equipamento e operação.



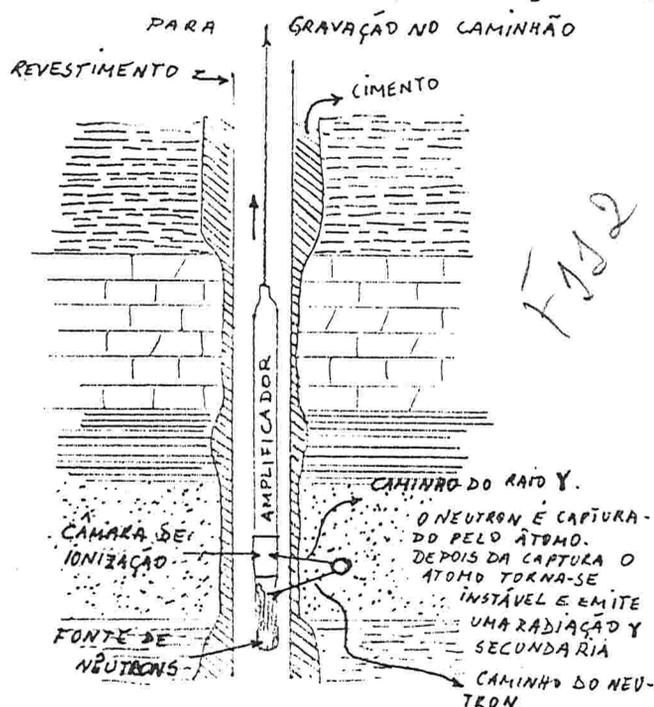
EQUIPAMENTO E PERFIL NEUTRON TÍPICO  
FIGS DE TELFORD, W.M et. al - 1976

A sonda contém uma fonte de neutrons e um detector de radiação gama ou de neutron, como descrito no item anterior. A fonte de neutron é constituída por uma combinação de Berílio com radio, polonio ou plutonio ou outro elemento emissor de partícula alfa. A liberação de partículas neutron se processa pela interação de núcleos de  $\text{He}$  (partículas  $\alpha$ ) com o  $\text{Be}^9$ , resultando  $\text{C}^{12}$ , e partículas de neutron. A fonte de neutron e o detector são blindados, de modo a impedir que radiações produzidas pela fonte atinjam diretamente o detector.

No caso do equipamento para a perfilagem neutron-gama, o detector - (contador G.M.), por construção, é sensível somente aos raios gama produzidos no processo de captura das partícula neutron, os quais são de mais alto nível de energia do que as radiações gama natural. No caso - de perfilagem neutron-neutron, o detector é sensível somente a radiações neutron.

A energia para o sistema é fornecida da superfície para a sonda, por intermédio do cabo. Da mesma forma os impulsos elétricos de contagem - do detectôr, são transmitidos à superfície, após serem ampliados na - sonda. Na superfície, esses impulsos são medidos e registrados de maneira análoga como é feito para os outros sistemas de perfilagem radiométrica. As considerações feitas anteriormente com respeito à flutuações estatísticas e ajustagem adequada da constante tempo e da velocidade - de perfilagem, valem também para este tipo de perfilagem. Em geral a velocidade de perfilagem costuma ser manór do que nas outras perfilagens radiométricas. Procedimentos de calibragem dos equipamentos, poderão ser motivo de consulta na bibliografia referida. Schlumberger Doc. nº 8 - 1958.

### 5.6.3.3 Fundamentos da perfilagem neutron-gama.



As partículas neutron são emitidas da fonte com velocidades relativamente altas (da ordem de 10.000 Km/Seg). Ao atravessarem a rocha as partículas de neutron, colidem com os núcleos dos elementos constituintes da substância da mesma, ou dos fluidos que estão contidos nos seus poros.

Desse modo são retardadas perdendo energia em cada colisão. Quando a velocidade da partícula torna-se comparável com as velocidades dos movimentos vibratórios do estado térmico da

matéria atravessada (cerca de 2 Km/seg), os neutrons são capturados, por interação com os núcleos das substâncias.

Esses por sua vez, além de adquirirem energia cinética, são excitados emitindo radiações gama, ditas de captura, com energia variável entre 1,0 à 7,0 MeV, conforme o elemento colidido.

A distância que a partícula viaja no interior da rocha, antes de ser

capturada, depende da natureza dos átomos que ela encontra. As perdas de energia das partículas nas colisões, acontecem de forma semelhante como no caso da perda gradual de energia cinética de uma bola de bilhar. Em tais condições a bola cede mais energia na colisão com outra bola de mesma massa, e não nas colisões com bola de maior massa, como poderia parecer.

Sendo os átomos de hidrogênio os únicos com massa quase igual às partículas de neutron, são por isso os mais eficientes para retardá-las.

Outros átomos comuns nas rochas, como por exemplo os de cálcio e de silício, pesando aproximadamente 25 vezes mais, absorvem relativamente muito pouca energia, mesmo que a colisão seja frontal. Outros elementos são também fortes absorventes de partículas neutron, mas esses não são abundantes nas formações sedimentares. Desse modo a composição química da rocha, é um fator irrelevante nesse fenômeno. Por outro lado a água e óleo, são ricos em hidrogênio, sendo por isso sua presença, da maior relevância. Quando a concentração de hidrogênio na formação vizinha da fonte é grande, os neutrons são capturados à curtas distâncias. Pelo contrário, diminuindo a concentração de hidrogênio, as partículas neutron atingem maiores distâncias, antes de serem capturadas.

Numa formação de baixa porosidade, as radiações neutron penetram até distâncias de cerca de 60cm na formação. Numa formação porosa saturada com água ou óleo, a penetração é muito menor, de modo que a maior parte do sinal detectado, provém de efeitos ocorridos nos primeiros 18cm de profundidade na formação.

O detectôr de radiações é muito mais sensível aos raios gama de captura, produzidos nas suas proximidades. Desse modo raios gama produzidos por captura próxima a fonte, não produzem sinal sensível no detectôr.

Disso resulta:

- A taxa de contagem do detector (do contador G.M.) umenta, quando diminui a concentração de átomos de hidrogênio na formação, e vice-versa.

5.6.3.4- Princípios da interpretação do perfil neutron-gama

a) Considere-se uma formação desprovida de folhelho.

Nesse caso o hidrogênio estará presente somente na água, no óleo ou no gás, que estejam ocupando os poros da rocha. Diferenças de concentração de H na água e no óleo são insuficientes para causar contrastes sensíveis nas medidas do detectôr (contador). Assim estando a rocha saturada por um mesmo fluido, os valores medidos serão inversamente proporcionais à sua porosidade. Diferenças de concentração de H na

água e no óleo são pequenas, de modo que o efeito é como se fossem um mesmo fluido.

Porém a concentração de H no gás, é muito menor do que em água ou óleo. Por isso, em condições equivalentes de porosidade de um reservatório, as contagens no detector serão sensivelmente maiores, se o fluido que satura a rocha for gás. Assim na equivalência de porosidade, o perfil indicará o horizonte de separação óleo-gás no reservatório de petróleo.

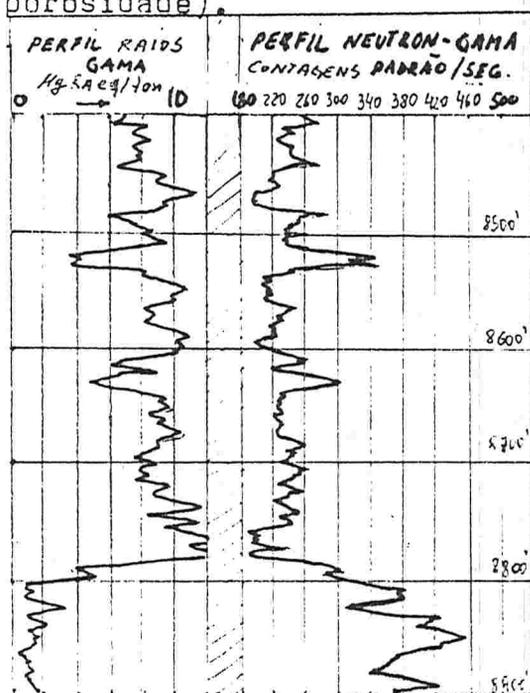
b) Considere-se uma formação contendo folhelho.

Folhelhos contém grande quantidade de H, devido a água presente de constituição ou absorvida. Assim a presença de folhelho contribui para a concentração de H na formação, mas não contribui para sua porosidade efetiva.

Por esse motivo, variando para menos, as condições de porosidade efetiva em uma formação saturada contendo folhelho, o aumento de contagens no detector será menor, do que no caso em que a formação fosse desprovida de folhelho.

Demodo geral em condições iguais com respeito ao furo (seu diametro, salinidade da lama, presença de revestimento ou proximidade da sonda com a parede do furo), os intervalos perfilados com menores taxas de contagem no perfil neutron-gama, corresponderão às mais altas porosidades efetivas, ou também aos maiores conteúdos de folhelhos.

Essa duplicidade de interpretação é resolvida mediante a interpretação conjunta, por exemplo com um perfil gama (natural) ou um perfil de potencial espontâneo (SP), os quais discriminam sem ambiguidade os intervalos com folhelho. Carvões tendo mais altos conteúdos em H do que folhelhos, dão menores taxas de contagens (correspondendo mais altas medidas em escala de porosidade).



F113

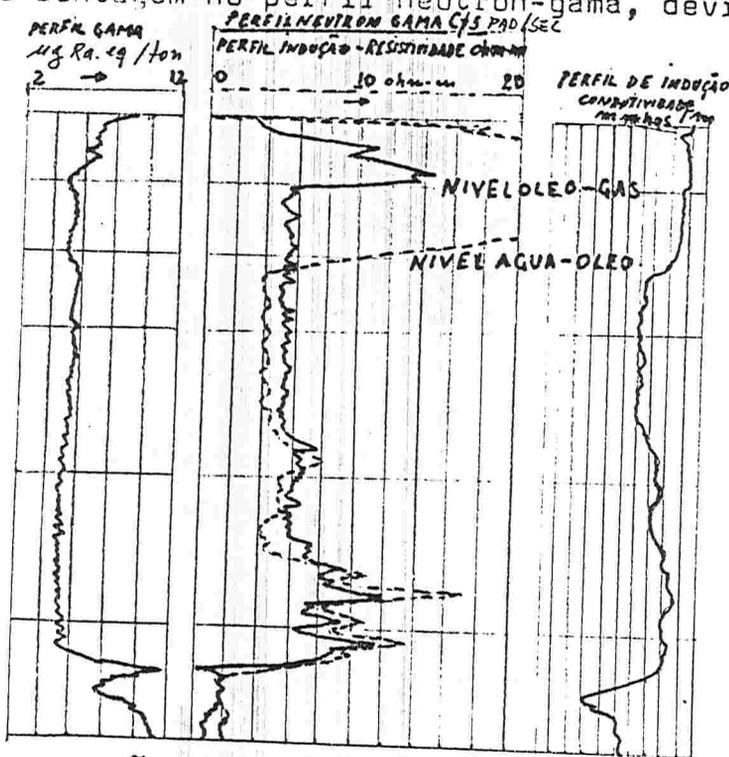
INTERPRETAÇÃO QUALITATIVA DE UM PERFIL NEUTRON-GAMA E DE UM PERFIL GAMA (FIG. DE SLUMBERGER, DOC N° 8 - 1958)

Na figura, o perfil gama indica que o intervalo acima de 8790 pés, - com altas taxas de contagem de radioatividade natural, de modo geral é de folhelho.

Na parte inferior aquela profundidade, o perfil gama mostra baixa radioatividade com relativa uniformidade, indicando predominância de areia.

Concordantemente, o perfil neutron-gama mostra menores taxas de contagem na parte de cima. Nesse mesmo intervalo, distingue-se valores intermediários, pouco maiores, indicando intercalações de leitos de folhelhos arenosos. Essas intercalações são confirmadas no perfil gama, por intermédio de valores pouco menores.

Na parte abaixo de 8790 pés, observa-se variações de valores de taxa de contagem no perfil neutron-gama, devido variações de porosidade.



A figura mostra perfilagem composta com perfil gama, neutron-gama e indução, num reservatório de petróleo.

Indicado pelos perfis gama e neutron-gama, na parte superior, distingue-se facilmente o intervalo com predominância de areia, com alta porosidade efetiva, e saturado com água salgada, óleo e gás, constituindo o depósito.

O nível de separação óleo-gás, é indicado pelo perfil neutron-gama. Isto acontece

em condições favoráveis, nas quais há uniformidade de porosidade, e - que o filtrado da lama não expulsou o gás na formação, até às profundidades "vistas" pelo dispositivo.

O nível de separação água salgada-óleo, é indicado pelo perfil de indução, devido ao grande contraste de condutividade, da formação saturada com um e outro desses fluidos.

De modo geral são características do perfil neutron-gama:

- Perfis neutron-gama não representam as litologias, respondendo primeiramente pelos fluidos contidos na rocha. Por isso, nem sempre pode ser correlacionado com a litologia.

Isoladamente são difíceis de serem interpretados, sendo necessária a interpretação conjunta com outros perfis. Principalmente com o perfil gama ou com o perfil de potencial espontâneo, ou outro perfil capaz de

distinguir, sem ambiguidades, os níveis de folhelho.

Suas feições são similares aos perfis elétricos de resistividade, embora a presença de fluídos diferenciados, possa alterar essa semelhança.

Geralmente a parte de valores baixos da curva, corresponde à folhelhos. Porém saturação em fluídos produzem o mesmo efeito. É muito afetado - por mudanças no diâmetro do furo, devido a presença de hidrogênio na - lama.

Em condições uniformes de diâmetro, a lama não prejudica a interpretação, porque contribui com parcela constante para o sinal.

- Apesar de ser afetado pela presença de revestimento, pela mesma razão, a interpretação não fica prejudicada, em condições de revestimento uniforme.

Apresenta diferença marcante devido a presença ou ausência de lama - no furo, mas não indica diferenças na constituição da lama.

É muito afetado pela penetração do filtrado da lama, na parte invadida da formação.

- Constitue uma medida indireta da porosidade através do conteúdo em hidrogênio dos fluidos que saturam a rocha, porém não indica permeabilidade uma vez que argila produz efeito no mesmo sentido.

Interpretações quantitativas de porosidade com o perfil neutron-gama, tem a grande vantagem de não dependerem do fator de resistividade da formação ( $F = \frac{R_o}{R_w}$ ), o qual é a base dessas interpretações no caso dos

perfis elétricos (Ver item 4.8.5.3.5).

- Devido ao maior nível de energia das radiações gama de captura, radioatividade natural das formações, mesmo em formações de alta radioatividade, pouco afeta o perfil neutron-gama.

#### 5.6.3.5 - Unidade neutron API (American Petroleum Institute)

Modernamente as medidas de perfilagem neutron são em unidades Cps padronizadas, e também em unidades neutron API, mais frequentemente.

Unidade API neutron é baseada na medida de um poço padrão onde um calcário com porosidade de 19% preenchido por água, é definido como 1000 unidades API neutron.

5.6.4- "METALOG" - Análises de minérios "in situ" com técnica nuclear.

5.6.4.1- Essência do método e aplicações.

"METALOG" foi a denominação adotada pela "Scintrex Limited" do Canadá, para designar o processo desenvolvido por aquela companhia, para analisar minérios (porfirítico de cobre, laterítico de níquel e outros), mediante combinação de técnicas de perfilagem neutron-gama com espectroscopia de radiação gama. Os princípios do método, os protótipos de equipamento utilizados, e resultados de testes experimentais, foram publicados em 1975 na bibliografia referida, Seigel, H O e Nargolwalla, S- Scintrex Lmtd.1975.

Radiações gama de captura, produzidas por bombardeio do corpo de minério com partículas neutron, são analisadas mediante técnica de espectrometria de radiação gama (vista no item 5.5.4), para diversos elementos de interesse econômico. É uma aplicação da técnica de análise, conhecida por ativação neutronica.

Segundo os resultados experimentais publicados, e respectivas conclusões, é possível praticar o método em furos de sonda com diâmetros de 6 polegadas (~15,2cm).

Mediante normalização dos resultados experimentais, com respeito ao equipamento e flutuações das condições quanto a matriz da rocha, umidade e condicionamento do furo, são atingidos resultados como se seguem:

- Para minérios lateríticos de níquel, com rocha encaixante serpentinito, para intervalos com teores maiores do que 1,0% Ni, resultados analíticos dos teores em níquel, com erro relativo de cerca de 4,0%; para teores em ferro superiores à 10,0% Fe, erro de cerca de 4,0%; para sílica com teores maiores do que 15,0% SiO<sub>2</sub>, erros de 3,0%. As análises simultâneas desses três componentes do minério, são obtidas com velocidades de perfilagem, de 6 à 7 metros por hora.

- Para minérios de cobre porfiríticos uniformes, obtida sensibilidade - abaixo de 0,2% Cu; Para minérios com teores entre 0,15% Cu até 0,52% Cu, erros relativos menores do que 9,0%; velocidades de perfilagem 30 m/h.

Os resultados desses testes são considerados promissores para possibilidade de analisar ferro em minério de ferro, e vanádio em minérios sedimentares. Também para delinear camadas de carvão, analisando simultaneamente teores em enxofre.

Suas aplicações são indicadas como método alternativo de amostragem volumétrica ("bulk sampling"), nas pesquisas dos jazimentos porfiríticos - de cobre, e lateríticos de níquel. Também são indicadas para avaliação de depósitos de rejeito.

Comparando com amostragem volumétrica, a amostragem mediante o METALOG, é considerada mais representativa que a amostragem por métodos convencionais.

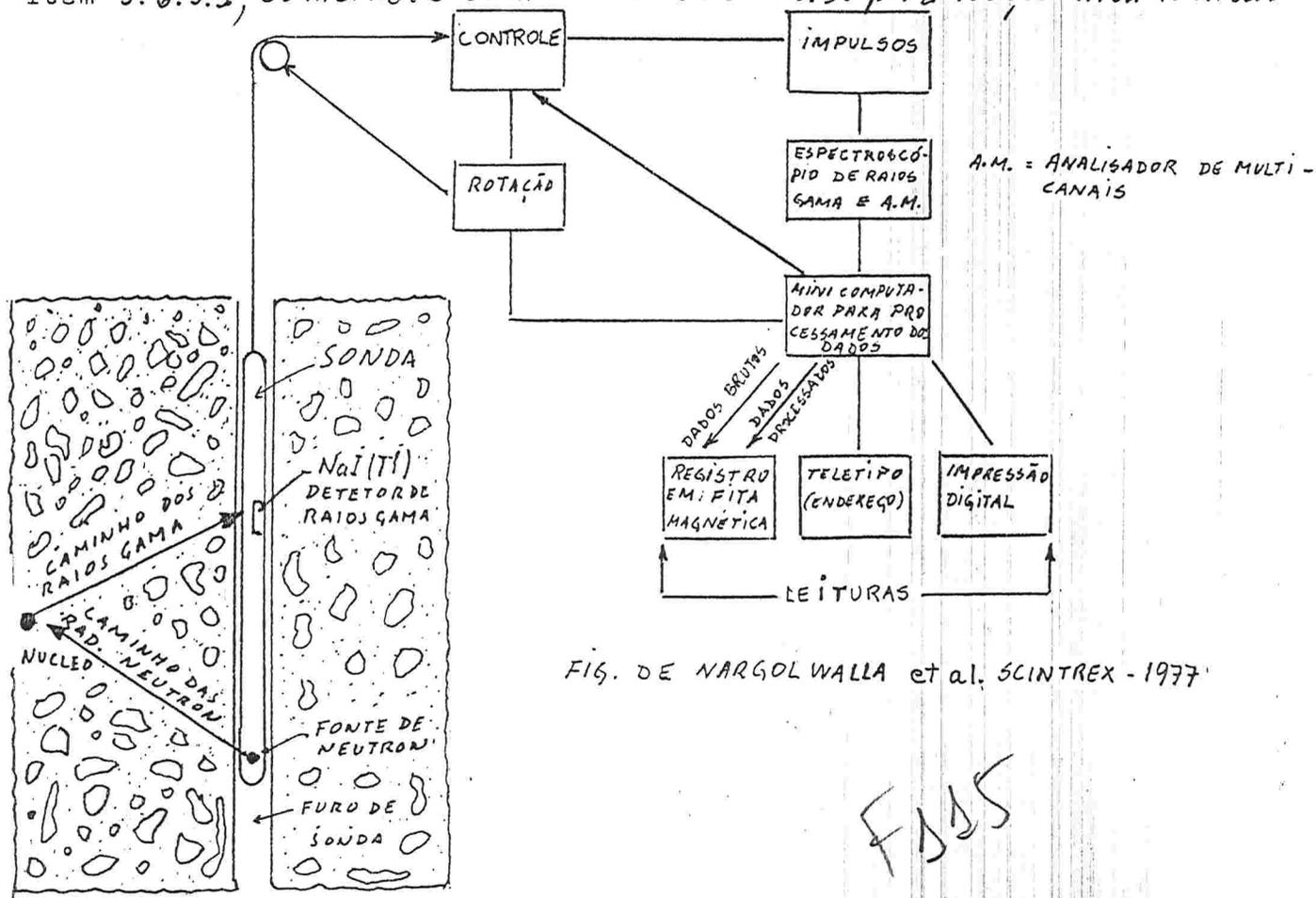
nais de testemunhagem e análises dos testemunhos em laboratório. Isso porque, os resultados obtidos pelo METALOG, representam os teores num volume cilíndrico em torno do furo, com diâmetro de cerca de 90cm (para um furo com diâmetro de 15cm). Portanto um volume bem maior, do que o volume dos testemunhos analisados nos métodos convencionais.

Os custos são considerados comparáveis aos métodos convencionais de amostragem. Com as vantagens, de ser obtida mediante furos não testemunhados, e da rapidez com que os resultados são obtidos (simultaneamente com a perfilagem).

A perfilagem pode ser contínua, e também descontínua, isto é paralisando a sonda em intervalos sucessivos ao longo do furo perfilado.

#### 5.6.4.2- Fundamento do método, e equipamento.

Como mostra o esquema simplificado do sistema Metalog, trata-se basicamente de um processo de perfilagem neutron-gama visto anteriormente no item 5.6.3.3, combinado com técnica de análise por ativação neutromica.



As partículas neutron, emitidas pela fonte instalada na sonda, são capturadas pelos núcleos dos elementos das rochas em torno do furo. Os núcleos resultantes da interação com a partícula neutron, instantaneamente emitem raios gama. Esses com níveis de energia altos e médios (10 M e V à 2 M e V). As radiações gama emitidas e detectadas na sonda (no detector), tem níveis de energia característicos dos núcleos que as emitiram.

Muitos metais como cobre, níquel e cromo, produzem raios gama com alta - energia (maiores do que 7 M e V). Desse modo produzem picos característicos quando as radiações detectadas são processadas por espectroscopia de radiações gama.

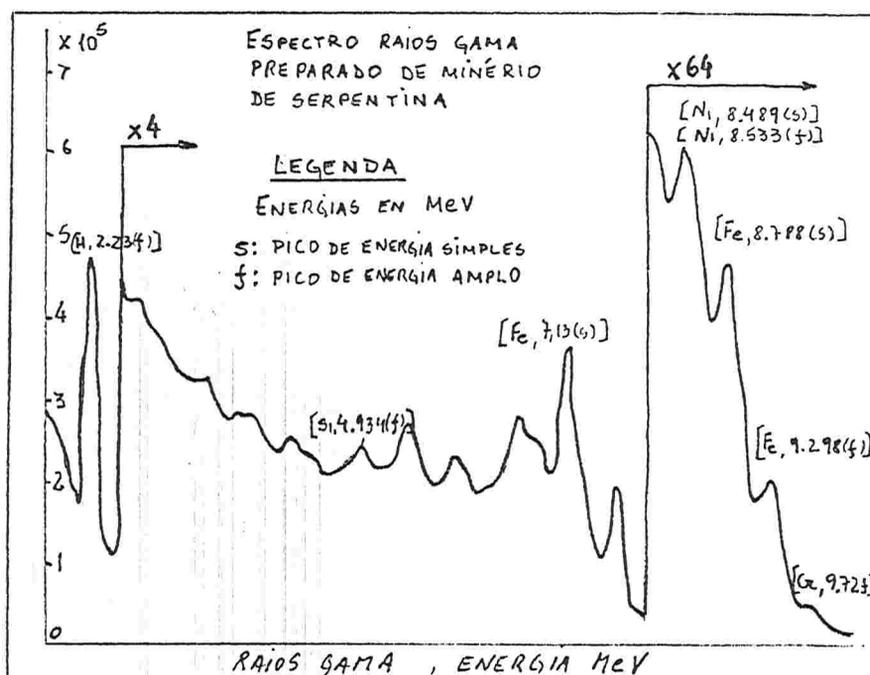


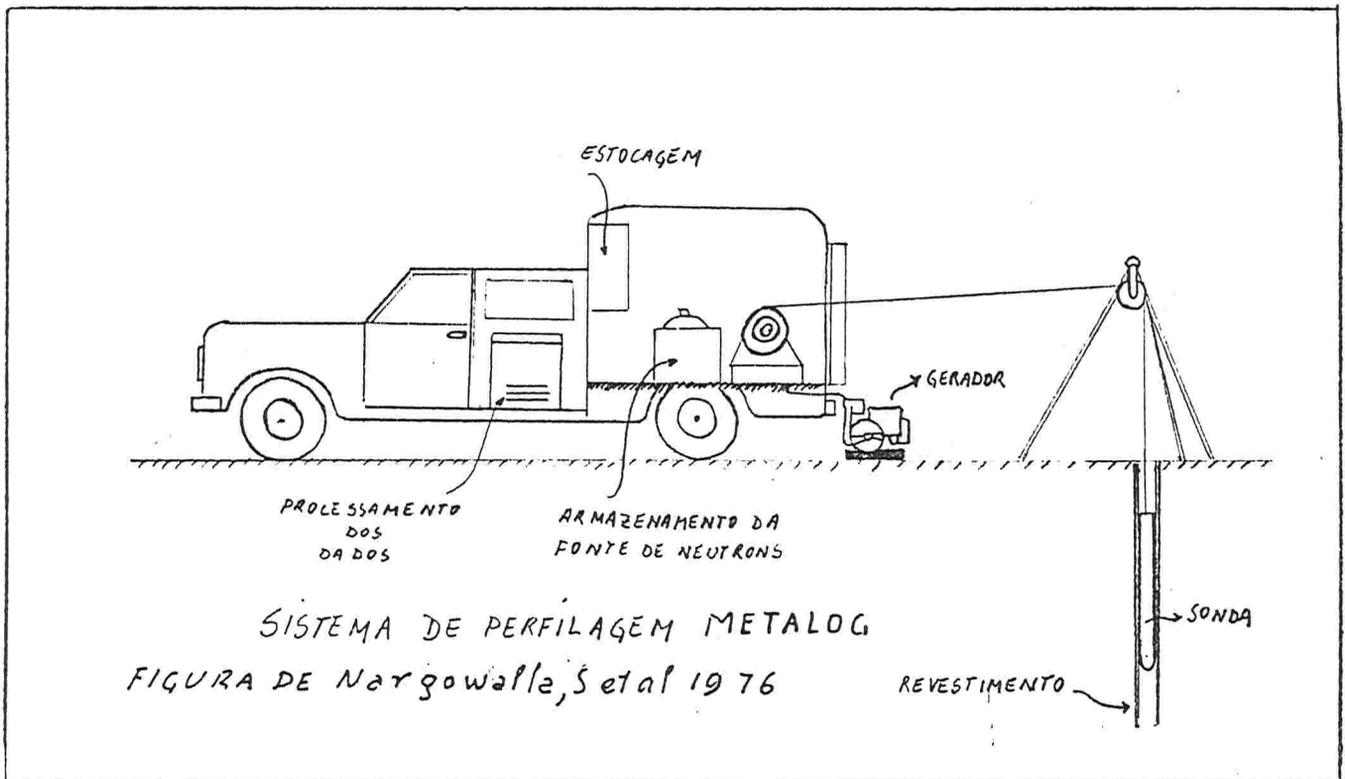
Fig. DE NARGOLWALLA, S et al. SCINTREX, 1977.

F-156

Seus níveis de energia apresentam contrastes com os produzidos pelos - outros átomos contidos na rocha, (em geral de baixos pesos atômicos). Desse modo podem ser analisados mediante computação em condições normalizadas.

A sonda tem um diâmetro de cerca de 12cm. O detector é um cristal de cintilometro de NaI(Tl) com alta sensibilidade e estabilidade. O processamento e análise dos pulsos produzidos é feito em superfície, num sistema de multicanais seletores e computador. Em cada ensaio, os teores analisados e respectivas profundidades são impressos, e também armazenados em fita magnética.

A computação, a impressão e o armazenamento dos dados são feitos, enquanto se processa a seguinte acumulação dos dados de contagem, na operação de perfilagem.



F 127

Como mostra a figura todo o equipamento de processamento, computação e armazenamento de dados, é instalada num veículo utilitário, juntamente com os comandos e controle da sonda, e gerador de energia. Durante a operação o veículo com o equipamento é instalado junto ao furo.

- Métodos radiométricos - Bibliografia - Referências bibliográficas do Cap. 5.
- Alger, R. P. et al - Formation density log applications in liquid - filled holes - Society of Petroleum Engineers of AIME - Paper nº SPE - 435 - 1962.
- Astier, J. L. - Geofísica aplicada a la hidrogeología - tradução Rio, A. Edit. Paraninfo - Madrid 1975.
- Baird, J. G. e Norgolwalla, S. - Nuclear exploration techniques - Scintrex Limited, Application Brief 75-1 1975 - Toronto - Canadá.
- Dobrim, M. B. - Introduction to geophysical Prospecting McGraw - Hill Book Comp. inc. 1960.
- Elkington, P. A. S. Scoble, M. J. Brow, J. R. Muftuoglu, Y. V. - Geophysical techniques applied to surface mine design in stratified deposits - Mining Science and Technology - Elsevier Science Publishers BV - Amsterdam - Holanda - 1983.
- Figuerola, J. C. - Tratado de geofísica aplicada - Madrid - Espanha - 1974 - Edit. Libreria Ciencia-Industrial, SL
- Fischer, W.A. - Status of remote sensing - USGS - Eros Reprint # 150 - The XII Congress of International Society for Photogrammetry - Julho 1972.
- Frayha, R. - Urânio e Tório no Planalto de Poços de Caldas - DNPM - DFPM Bol 116 - 1962.
- Heiland, C.A. - Geophysical exploration - Prentice - Halling 1946.
- Itemberg, S. - Study of oil and gas series from well logs - Mir Publishers - Moscou - 1971.
- Jakosky, J.J. - Exploration geophysics - Trija Publishing - Comp. 1950
- Michelson, R.A. - Prospecting for uranium - Mineral Industries Bulletin - Colorado School of Mines - Julho 1966.
- Nargolwalla, S. e Seigel, H.O. - In-situ mineral deposit evaluation with the Scintrex Metalog system - Scintrex Ltd - application Brief 76-2 - 1976. Reprint Canadian <sup>Minings</sup> Journal - abril 1977.
- Nargolwalla, S., Robertshaw, P., Hiscott, M. - Nuclear Metalog grade - logging in lateric nickel and porphyry copper deposits - Scintrex Ltd Application Brief - 1976 - 2.
- Parasmis, D.S. - Mining geophysics - Elsevier Publishing 1966.

- Rackley, R.I., Shockey, P.N. e Dahill, M.P. - Concepts and methods of uranium exploration. W.G.A. Earth Science Bulletin - setembro 1968.
- Rankama, K. e Sahama, T.G. - geoquímica - Trad. Aguilar editores 1954.
- Reeves, D.R. - Coal Interpretation Manual - BPS Instruments Lmtd - Loughborough LE12 6 JQ - England - 1981.
- Saum, N.M. e Link, J.M. - Exploration for uranium Mineral Industries bulletin - Colorado School of Mines - Julho 1969.
- Seigel, H.O. e Margolwalla, S. - Nuclear logging system obtains "bulk samples" from small - boreholes - Reprint. Engineering & Mining Journal - agosto 1975.
- Schlumberger - Introduction to Schlumberger well logging Schlumb. Document nº 8 - Schlumberger well surveying corporation 1958.
- Schlumberger - Interpretacion de perfiles Schlumb. fundamentos - El perfil densidade de la formacion/8.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E e Keys, D.A. - Applied geophysics - Cambridge University Press 1976.
- U.O.P. Johnson Division inc. Saint Paul - Minnesota USA - Trad. e edição da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental SP Brasil - Agua Subterrânea e poços tubulares 1978.