O MÉTODO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA (IP)

Além do uso corrente do IP na prospecção mineral, o método tem tido uma utilização incipiente em levantamentos para obras de engenharia civil e prospecção de água subterrânea. A aplicação em questões ambientais é promissora e encontra-se nos primeiros estágios.

A polarização induzida (IP) é um fenômeno elétrico provocado pela transmissão de corrente no solo, observado como uma resposta defasada de voltagem nos materiais terrestres. Tem importância prática como método de prospecção de depósitos minerais ou ainda restrita em casos como os citados no parágrafo anterior.

A vantagem principal do IP é sua capacidade de, em condições favoráveis, detectar disseminações de sulfetos metálicos da ordem de 0,5% em volume (SUMNER, 1976).

Assim, o IP é um método particularmente importante na prospecção de mineralizações disseminadas, caso em que outros métodos geofísicos são muito menos eficazes.

BERTIN, J. & LOEB, J. 1976. *Experimental and theoretical aspects of induced polarization*. Gebruder Borntraeger, Berlin-Stutgart, Germany: Geopublicaton Associates, v.1, 250p.

SUMNER, J. S. 1976. *Principles of induced polarization for geophysical exploration*. New York: Elsevier Scientific Publishing Co., 277p.

GALLAS, J. D. F. 2000. Principais Métodos Geoelétricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental. 174p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. Prof. José D. F. Gallas

Os Fenômenos Físico-químicos Associados ao IP

As causas e explicações que descrevem o fenômeno da polarização induzida não são perfeitamente conhecidas e sua base teórica é, em parte, empírica.

Normalmente a corrente se propaga no solo através do movimento de íons em solução e eletronicamente nas partículas metálicas. Na interface sólido-líquido deve ocorrer algum tipo de reação eletroquímica, responsável pela transferência de eletricidade entre os íons da solução e elétrons livres nos minerais metálicos. Várias reações possíveis são discutidas na literatura. Contudo, não são conhecidas as reações predominantes nas medidas IP.

Em se tratando de argilas, a característica essencial destas é o pequeno tamanho de seus cristais, menor que 2 mícrons. Por outro lado, os minerais não argilosos costumam ocorrer em cristais maiores que 2 mícrons. O pequeno tamanho dos cristais das argilas significa uma maior superfície específica (área por massa) e assim, uma maior eletrificação superficial.

Os dois principais fenômenos físico-químicos que poderiam explicar a polarização induzida são a polarização metálica ou eletrônica e a polarização eletrolítica, nãometálica ou de membrana.

Polarização Metálica ou Eletrônica

A polarização metálica, eletrônica ou de eletrodo (sendo eletrodo o grão mineral metálico) é a que ocorre em metais ou minerais em que a condução da corrente dá-se através de elétrons.

Durante a transmissão da corrente os íons móveis acumulam-se na interface eletrólito/metal, ocorrendo uma sobrevoltagem/diferença de potencial (d.d.p.) nesta interface. A situação fica equivalente a dipolos elétricos. Quando a corrente é interrompida, os íons imobilizados difundem-se lentamente no ambiente eletrolítico para voltar ao equilíbrio inicial, decaindo a sobrevoltagem residual acumulada na interface, manifestando-se, deste modo, o efeito IP.

Entre os minerais que apresentam IP sob a forma de anomalias detectáveis, estão a maioria dos sulfetos e alguns óxidos. A grafita é um caso especial, pois manifesta anomalias IP tão intensas quanto os sulfetos.

Polarização de Membrana, Não-metálica ou Eletrolítica

Para explicar o efeito IP de membrana, considera-se comumente a presença de partículas de argilas cujas superfícies estariam carregadas negativamente, induzindo um acúmulo de cátions no eletrólito. A dupla camada iônica assim formada agiria como uma membrana que se opõe ao fluxo de corrente, gerando uma sobrevoltagem ou efeito IP.

A polarização de membrana verifica-se no subsolo onde partículas de argilominerais bloqueiam parcialmente os poros por onde percolam as soluções iônicas. Quando um potencial elétrico é aplicado, ocorrerão de zonas de concentração de íons, formando-se dessa maneira membranas de polarização. Esta polarização é, em parte, função das diferentes mobilidades entre cátions e ânions.

Menos intenso, este caso de fenômeno IP, constitui na prática um "ruído de fundo" na prospecção de corpos minerais metálicos. Outras vezes, a polarização eletrolítica pode fornecer dados suplementares para distinguir certas categorias de rochas, esclarecer problemas estruturais e também fornecer informações importantes ao mapeamento geológico.

Por outro lado, pode ser importante nas aplicações do método em casos de geologia de engenharia e em casos onde os objetivos são investigações relacionadas ao meio ambiente.

ilita, montmorilonita, caulinita, haloisita



O MODELO COLE-COLE

Uma rocha mineralizada com poros pode ser representada analogamente por um circuito elétrico que apresente a mesma resposta.

Neste circuito, a impedância complexa (iwX)^{-c} simula a interface iônica-metálica. A resistência R_0 simula um poro da rocha não bloqueado que permite a condução paralela através de um elemento puramente resistivo. A resistência R_1 simula a resistência da solução na passagem de um poro bloqueado. O modelo serve tanto para a polarização de eletrodo como a de membrana (WARD, 1990).

PELTON et. al. (1978), a partir do modelo Cole-Cole, discutem a identificação de sulfetos econômicos e da grafita, baseando-se na diferentes constantes de tempo e deslocamentos de fase para os domínios do tempo e da frequência, respectivamente.

O Efeito IP – Domínio do Tempo

Quando é estabelecida uma diferença de potencial ΔV , devida à passagem de corrente pelo solo, esta diferença de potencial não se estabelece nem se anula instantaneamente quando a corrente é emitida e cortada em pulsos sucessivos, mas descreve uma curva $\Delta V_{IP} = f(t)$, a qual liga a assíntota ΔVp em regime estacionário, com a assíntota zero após o corte da corrente. Este fenômeno é chamado "Polarização Induzida" (BERTIN & LOEB, 1976).







Prof. José D. F. Gallas



Unidade = mV/V ou ms

Prof. José D. F. Gallas



Prof. José D. F. Gallas



f(x) = 0 de 2 a 4; 6 a 8; 10 a 12...

A transformada de Fourier é chamada de *representação do domínio da frequência* do sinal original, comumente referido como *domínio do tempo*.



HWEI P. HSU (1973) – ANÁLISE DE FOURIER.

As Medidas IP no Domínio do Tempo

A medida da resposta IP chamada cargabilidade (M) é simplesmente a amplitude da voltagem secundária ou de decaimento $V_{IP}(t)$ com relação a amplitude da voltagem primária em volts. Assim, as medidas IP no domínio do tempo são frequentemente expressas em mV/V (também podem ser expressas em milissegundos).

A quantidade que caracteriza o fenômeno IP é a área sob a curva de descarga, inclusive a parte assintótica que tende a zero.

$$IP = \acute{A}REA = \int_{0}^{\infty} \Delta V_{IP} dt$$

Na prática, mede-se uma área sob a curva de descarga através da integração da voltagem transiente no intervalo de uma janela, de t_1 a t_2 , chamada de cargabilidade aparente M.

$$M_{t1,t2} = \int_{t1}^{t2} \Delta V_{IP(t)} dt$$

A área integrada sob a curva de decaimento pode ser normalizada com relação à voltagem primária Vp, ficando:



IP no Domínio do Tempo

Quando se interrompe um pulso de corrente transmitido ao subsolo, observa-se que a voltagem não cai imediatamente para zero. Vai para um valor $V_{IP}(0)$ e depois lentamente decai para zero.

A medida da resposta IP chamada cargabilidade (M) é simplesmente a amplitude da voltagem secundária ou de decaimento $V_{IP}(t)$ com relação a amplitude da voltagem primária em volts. As medidas IP no domínio do tempo são expressas em mV/V (também podem ser expressas em milissegundos).

Como a voltagem secundária é às vezes recebida em níveis muito baixos, sua medida é muito susceptível de ruído. Por isto, esta voltagem é integrada num período chamado janela. Se o ruído for de média zero, a integração tende a cancelá-lo.

É possível extrair mais informações da curva de descarga IP do que uma simples cargabilidade. Uma análise de todo o decaimento pode caracterizar a natureza da fonte anômala.



IP no Domínio da Frequência

Quando as medidas são feitas no domínio da frequência, é usual comparar-se a impedância do solo obtida em uma frequência com outra comparativamente muito mais baixa. Esta baixa frequência é usada como um nível de referência "DC".

O efeito de polarização é avaliado em termos da percentagem do aumento na condutividade para a frequência relativa "AC" com o valor "DC". Em termos de resistividades, o efeito percentual de frequência (PFE) é obtido através da relação:

$$PFE = \frac{\rho_{dc} - \rho_{ac}}{\rho_{ac}} x100$$

onde ρ_{dc} e ρ_{ac} são as resistividades "DC" e "AC", respectivamente.

Equivalência Entre os Domínios do Tempo e Freqüência

Existe a discussão sobre qual das técnicas seria a melhor. Teoricamente, as duas técnicas são equivalentes.

No domínio da frequência, o efeito de frequência é:

$$EF = \frac{\rho_0 - \rho_\infty}{\rho_\infty}$$

sendo $\rho_o e \rho_{\infty}$ as resistividades limites para DC e AC

A definição da cargabilidade M para um material homogêneo polarizável respondendo a uma função degrau (função Heavside) de corrente é:

$$M = \frac{V_{IP}(t) - V_{IP}(t)}{V(t)}$$
$$V(t)$$

onde $V_{IP}(t) \rightarrow 0$ e $V_{IP}(t) \rightarrow \infty$ são as voltagens IP iniciais e finais. Mostra-se que para pequenos efeitos de frequência, onde EF<<1,

$$M \cong EF$$

Na prática esta relação não é totalmente válida, porque:

a) em parte porque uma análise teórica rigorosa do efeito IP não é possível, isto é, as premissas básicas dos dois sistemas de medidas são somente aproximações empíricas.

b) em parte porque as medidas não são feitas em DC e VHF, não sendo possível a passagem de um resultado para outro.

De qualquer maneira, tanto o domínio do tempo como o da frequência têm sido usados e se mostrado eficazes.

A Polarização Induzida (IP) na Prospecção Mineral

O método tem tido aplicação histórica na pesquisa de bens minerais, como sulfetos metálicos de cobre, chumbo, zinco etc.

No entanto, suas possibilidades de utilização, além do restrito meio da mineração, poderão ser são tão boas e promissoras quanto a eletrorresistividade e o SP em casos de hidrogeologia, geologia de engenharia e ambiental.

Ultimamente sua utilização na pesquisa de ouro tem sido intensificada. Devido aos teores da ordem de p.p.m. do conteúdo aurífero das mineralizações, abaixo dos níveis mínimos de detecção pelo IP, sua busca através do método dá-se de forma indireta, como associações do metal com outros minerais ou tipos litológicos de resposta IP anômala. Um exemplo são as associações com a pirita e/ou pirrotita. Um outro caso de associação favorável para a prospecção aurífera é com a grafita, que manifesta o efeito IP à semelhança dos sulfetos.

A grande maioria dos trabalhos anteriores à década de 90 eram voltados à pesquisa de sulfetos metálicos. Os posteriores a esta década são direcionados à mineralizações auríferas, em virtude do declínio de preços no mercado internacional de Cu, Pb e Zn, entre outros, e aumento de preço do ouro.

A Polarização Induzida (IP) na Hidrogeologia

Na hidrogeologia o uso do IP pode ser voltado à identificação de pacotes com conteúdos em argilas que diminuam ou eliminem a porosidade de um potencial aquífero, uma vez que o método pode ser eficaz na identificação de argilominerais.

Isto é válido tanto para pacotes argilosos estratiformes em bacias sedimentares como para fraturas preenchidas com materiais argilosos em áreas cristalinas.

Na diferenciação entre águas salinizadas e doces o emprego conjunto do IP com a eletrorresistividade também pode ser usado com sucesso. Este pode ser considerado um caso de aplicação simultânea em hidrogeologia e geologia ambiental, considerando que salinizações secundárias de aquíferos e/ou lençóis freáticos constituem-se em processos agressivos ao meio ambiente.

A Polarização Induzida (IP) na Geologia de Engenharia

São comuns os casos de ocorrências de argilas com características colapsíveis que podem ocasionar sérios problemas em obras civis e que podem ser detectadas pelo IP. Fraturas ou falhamentos com preenchimento de materiais de alteração sensíveis ao IP igualmente podem ser exemplificados.

O IP também pode ser usado em situações de obras de engenharia e/ou casos ambientais onde ocorram pacotes com diferentes conteúdos de argilominerais, identificação de pacotes arenosos e/ou diferentes graus de compactação de aterros.

Na implantação de obras urbanas é igualmente válido o emprego do método conjuntamente com outros métodos como SP, eletrorresistividade e sísmica de refração, por exemplo.

Também pode ser empregado o método em situações de investigações em corpos de barragens de terra.

Em situações de áreas (urbanas ou não) carstificadas o IP também pode ser utilizado, empregando o método associado com eletrorresistividade e SP. Pode identificar rochas calcárias e/ou locais com processos de carstificação, além da possibilidade de mapear diferentes tipos litológicos.

A Polarização Induzida (IP) na Geologia Ambiental

A mais recente aplicação do método é a geologia ambiental e alguns trabalhos já têm sido realizados neste campo. Em inúmeras situações a presença de contaminantes no subsolo pode ser identificada através do IP, tais como percolação de fluidos contaminados de lixões, aterros sanitários ou indústrias poluentes, entre outros.

Antigos locais de disposição de resíduos químicos ou industriais atualmente soterrados podem ser identificados objetivando-se remediações posteriores.

O método IP é passível de emprego em situações preventivas como a identificação de pacotes arenosos, cuja presença poderia inviabilizar uma área para disposição de resíduos devido a alta porosidade/permeabilidade das areias. Do mesmo modo, a identificação através do IP de um pacote argiloso que exerça a função de uma barreira natural, pode indicar uma área como adequada para instalação de, por exemplo, um aterro sanitário.

Um outro emprego do método é seu uso em conjunto com a resistividade na delimitação de áreas salinizadas.

IP na Geologia Ambiental

Quando um potencial elétrico é aplicado, ocorrerão zonas de concentração de íons, formando-se membranas de polarização.

A maioria das cargas adsorvidas e adjacentes à membrana estão situadas a uma distância <u>d</u> a partir de sua superfície (GRAHAME, 1947).

$$d = \frac{K_e kT}{(2ne^2 v^2)^{1/2}}$$

onde

n = concentração normal de íons no eletrólito

v = valência dos íons

e = carga elementar

K_e = permissividade dielétrica relativa do meio fluido

k = constante de Boltzman (1,38054 x 10^{-16} Erg/°K)

T = temperatura

Portanto, o fenômeno IP torna-se mais intenso à medida que aumenta o valor de d, ou seja:

$$IP \propto d$$

Como locais contaminados apresentarão uma maior concentração de íons e o IP é inversamente proporcional à concentração iônica, constata-se que os mesmos apresentarão um efeito IP menor de que áreas não contaminadas.

Metodologia e Configurações de Eletrodos mais Usuais em IP e Eletrorresistividade

As configurações de eletrodos nos levantamentos de campo para levantamentos de eletrorresistividade e de polarização induzida, são fundamentalmente as mesmas.

Em se tratando de resistividade, é necessário calcular-se o fator geométrico K adequado para obter-se o valor correto de ρ_a que satisfaça o arranjo usado.

No caso do IP, a medida é direta, não havendo necessidade de cálculos ou correções, posicionando-se o valor medido no ponto de atribuição do mesmo.

A escolha do arranjo depende dos propósitos do levantamento, situação geológica e do tipo e qualidade da informação desejada.

Os arranjos de superfície mais utilizados são os seguintes:

- -dipolo-dipolo;
- -pólo-dipolo;
- -pólo-pólo;
- -gradiente (ou retângulo);
- -Schlumberger;
- -Wenner;
- -"mise-à-la-masse".

Arranjo Dipolo-dipolo

As medidas são tomadas em diferentes profundidades de investigação (diversos valores de *n*), do seguinte modo: é mantida uma posição fixa dos eletrodos de corrente *AB* e efetuam-se as medidas movendo-se os eletrodos de potencial *MN* ao longo do perfil de medidas com deslocamentos iguais a *I* : M_1N_1 (*n* = 1); M_2N_2 (*n* = 2); M_3N_3 (*n* = 3) e assim sucessivamente.

A seguir, movem-se os eletrodos de corrente *AB* (deslocamento = *I*) e são feitas as medidas entre as posições $M'_1N'_1; M'_2N'_2$ etc.



Dipolo-dipolo com vários níveis de investigação - pseudo-seção (Gallas, 2000).

Os pontos são plotados na intersecção a 45° das origens Ω e O de cada dipolo, indicando a profundidade teórica naquele ponto (*profundidade* = (n+1)l/2, sendo n = 1; 2; 3, etc). A partir dos valores obtidos nestas séries de medidas são traçadas curvas de isovalores.

Arranjo Pólo-dipolo

Como no caso do arranjo dipolo-dipolo, normalmente os perfis são levantados em diferentes níveis de investigação. Assim, para uma mesma posição do eletrodo de corrente A, são feitas medidas para várias estações *MN*, usando-se, por exemplo, n = 1; 2; 3 etc.



Polo-dipolo com vários níveis de investigação - pseudo-seção (Gallas, 2000).

As pseudo-seções resultantes são elaboradas plotando-se as medições na intersecção a 45° das linhas que partem de A e do centro O de MN. Opcionalmente, também é usual plotar-se na interseccção a 45° da linha que sai do eletrodo de corrente A com a linha a 45° que parte do eletrodo de potencial M.

Arranjo Gradiente (ou Retângulo)

O levantamento é desenvolvido mantendo-se fixos os eletrodos de corrente *AB* com uma abertura igual a *L* e realizandose as leituras através dos eletrodos de potencial *M* e *N*, deslocados em linhas paralelas ao *alinhamento* formado pela linha *AB*. O deslocamento dos *MNs* é geralmente igual a *I*.



Gradiente ou Retângulo (Gallas, 2000).

A profundidade de investigação do arranjo retângulo aumenta com o incremento da abertura L = AB. Para que o campo elétrico permaneça razoavelmente uniforme – profundidade de investigação aproximadamente constante – é necessário que os pontos de medidas situem-se dentro de um retângulo centrado no ponto central Ω de AB.

Arranjo ou Ensaio "Mise-à-la-masse"

Trata-se de um ensaio misto de superfície e subsuperfície. Posiciona-se um dos eletrodos de corrente A no interior de um furo de sondagem no ponto em que o furo interceptou, por exemplo, um corpo de sulfetos maciços. O eletrodo de corrente B é colocado a uma distância suficientemente grande ("infinito"), de modo que as medidas feitas na superfície sejam devidas somente ao eletrodo interno ao furo.

As medidas são feitas em linhas radiais com o eletrodo de potencial *N*, ficando *M* no "infinito" ou com *MN* ao longo dos perfis.



Mise-à-la-masse (Gallas, 2000).

A partir destas medidas traçam-se curvas equipotenciais que assumirão distorções que acompanharão aproximadamente os contornos da mineralização ou do alvo de interesse.

CARACTERÍSTICA (COGGON, 1973)	DIPOLO- DIPOLO	PÓLO- DIPOLO	GRADIENTE
Intensidade da Resposta	1	2	3
Mergulho da Estrutura	3	3	1
Penetração em Coberturas	1	1	1
Irregularidades na Cobertura	1	2	2
Independência de Interferência de Irregularidades na Cobertura	2	1	3
Resolução Horizontal e Locação	2	3	1
Profundidades	1	2	4
Independência de Acoplamentos Indutivos, Acamadamentos	1	2	3
Independência de Acoplamentos Indutivos, Heterogeneidades Finitas	1	2	4

1 a 4 = piora

COGGON, J. H. A comparision of IP electrode arrays. *Geophysics*, v. 36 p. 737-61, 1973.

ARRANJO (WARD, 1990	Razão Sinal/Ruido	Efeito EN Indutivo	1	Resoluç latera	ão 1	Reso anom	l. de talias	R H	esol. oriz.	Prof. Invest.		Efeitos de Topografia
Gradiente	3	3		1]			5	ł		-
Dipolo-dipolo	5	1		2		Ζ	L		2	_		—
Pólo-dipolo	4	2		3		5 2				-		
Schlumberger	2	4		4 2*		*	1		1 _		-	
Wenner	1	5		5		3	*		1	ł		-
ARRANJO (WARD, 1990)	Resolução do Mergulho	Resol. Heterog. Verticais	I H L	Resol. eterog. aterais	R T Ro	esol. opo choso	Reso Efeit Later	l. os ais	Efe Cob Con	itos de erturas dutivas	R P	esolução da rofundidade do objetivo
Gradiente	1	*		5 5 _ 1		5						
Dipolo-dipolo	4	4		2	1		_		1		2	
Pólo-dipolo	5	3		1		2				1		3
Schlumberger	2	1		3		3* _		unadité	1		1	
Wenner	2	2		3		3*	_			1		1

1 a 5 = piora

WARD, S. H. Resitivity and induced polarization methods. *Geotechnical and environmental Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, v.1: Review and Tutorial, p.147-89, 1990.

Sintetização dos aspectos a serem considerados na escolha de um arranjo de eletrodos (GALLAS, 2000)



Razão Sinal/Ruído

Eletrodos de potencial internos aos de corrente \rightarrow quanto maior a abertura entre eles, para a mesma abertura de eletrodos de corrente, maior a amplitude do sinal recebido.

 \rightarrow Wenner é o de melhor relação sinal/ruído.

→ Schlumberger, enquanto os eletrodos estão próximos, a relação de separação entre os eletrodos de recepção e emissão é pequena.

 \rightarrow gradiente, são comuns as separações entre eletrodos de corrente de 1 a 3Km, com aberturas no dipolo receptor da ordem de 30m.

 \rightarrow Dipolo-dipolo e polo-dipolo são os menos favorecidos \rightarrow os eletrodos de recepção do sinal são externos aos de transmissão.

Dipolo-dipolo → relação sinal/ruído menos favorável.

					Fator geométrico K			
Constante G				(espaçamento=5m)				
ARRANJO								
->	DIPOLO-	PÓLO-	PÓLO-		DIPOLO-	PÓLO-	PÓLO-	
NÍVEL	DIPOLO	DIPOLO	PÓLO		DIPOLO	DIPOLO	PÓLO	
1	3	2	1		94,2	62,8	31,4	
2	12	6	2		377,0	188,5	62,8	
3	30	12	3		942,5	377,0	94,2	
4	60	20	4		1.885,0	628,3	125,7	
5	105	30	5		3.298,7	942,5	157,1	
6	168	42	6		5.277,9	1.319,5	188,5	
7	252	56	7		7.916,8	1.759,3	219,9	
8	360	72	8		11.309,7	2.261,9	251,3	
9	495	90	9		15.550,9	2.827,4	282,7	
10	660	110	10		20.734,5	3.455,8	314,2	
11	858	132	11		26.954,9	4.146,9	345,6	
12	1092	156	12		34.306,2	4.900,9	377,0	
13	1365	182	13		42.882,7	5.717,7	408,4	
14	1680	210	14		52.778,8	6.597,3	439,8	
15	2040	240	15		64.088,5	7.539,8	471,2	

Constantes G e K (espaçamento=5m) para os arranjo D-D, P-D e P-P

Dipolo-dipolo

$$G = \frac{1}{\left(\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}\right)}$$

<u>Pólo-dipolo</u>

$$\mathbf{G} = \frac{1}{\left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}\right)}$$

<u>Pólo-pólo</u>

G = n

Resolução de anomalias – arranjo gradiente – para dois corpos em subsuperfície (modificado de COGGON, 1973)



Prof. José D. F. Gallas

Indicação de mergulho, arranjo gradiente, (modificado de COGGON, 1973)



Prof. José D. F. Gallas

Indicação de mergulho para o arranjo dipolo-dipolo (modificado de COGGON, 1973)





Prof. José D. F. Gallas

Arranjo polo-dipolo, indicação de mergulho, eletrodo de corrente à direita (modificado de COGGON, 1973)



Prof. José D. F. Gallas

Arranjo polo-dipolo, indicação de mergulho, eletrodo de corrente à esquerda (modificado de COGGON, 1973





PFE = 1% $P_a = 500 \ \Omega .m$
Profundidades de investigação segundo BARKER (1989) e ROY & APPARAO (1971)

ARRANJO	Prof. Inv. (BARKER	Prof. Inv. (ROY &		
)	APPARAO)		
Wenner	0,17L	0,11L		
	0.101	0 1051		
Schlumberge	0,19L	0,125L		
r				
Dipolo-	0,25L (b/L=1 ou n=∞)	0,195L		
dipolo				

Profundidades de investigação para dipolo-dipolo em função de L (EDWARDS)

DIPOLODIPOLO					
n = 1	0.139L				
n = 2	0.174L				
n = 3	0.192L				
n = 4	0.203L				
n = 5	0.211L				
n = 6	0.216L				
n = ∞	0.250L				

Profundidades de investigação em função de L para gradiente, Wenner e Schlumberger (EDWARDS, 1977)

GRADIENTE		WENNER	SCHLUMBERGER		
L = 40a; x = 20a	0.192L		L = 40a	0.192L	
L = 40a; x = 15a	0.163L	0.173L	L = 20a	0.191L	
L = 40a; x = 10a	0.103L		L = 10a	0.190L	

L= abertura entre os eletrodos extremos do arranjo
a=abertura entre eletrodos de medidas (potencial)
x=distância entre o centro dos eletrodos de potencial
e o eletrodo de corrente mais próximo (L/3 < x < L/2)

Modelagem Analógica (Gallas, 1990, 1995 e 2006)



Prof. José D. F. Gallas

Efeito da topografia nas superfícies equipotenciais e linhas de corrente (adaptado de FOX et al., 1980)



As anomalias de resistividade causadas por efeitos topográficos são significativas em áreas onde os ângulos de inclinação são da ordem de 10 graus ou acima, para trechos inclinados da amplitude de um dipolo ou mais.

O parâmetro IP não é significativamente afetado por acidentes topográficos em um meio homogêneo.

Vale entre os dipolos de transmissão e recepção = dispersão nas linhas de corrente = resistividade aparente mais baixa (Fox et al, 1980)





Prof. José D. F. Gallas

Elevação entre os dipolos de transmissão e recepção = adensamento nas linhas de corrente = resistividade aparente mais alta (Fox et al, 1980)













Prof. José D. F. Gallas







ESCALA DE RESISTIVIDADE (EM OHMS X METRO)



10000	5000	2500	1250	500	250

ESCALA DE RESISTIVIDADE (EM OHMSX METRO)

Prof. José D. F. Gallas



Prof. José D. F. Gallas



Prof. José D. F. Gallas



ESCALA DE RESISITIVIDADE (EM OHMs x METRO)

Prof. José D. F. Gallas



LEVANTAMENTO DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA (IP) ARRANJO GRADIENTE (AB = 400m; MN = 10m) PROJETO NOVO HORIZONTE - ÁREA 1



FIGURA 6 - MAPA DE CARGABILIDADE (IP) DA ÁREA 1, ARRANJO GRADIENTE.

Prof. José D. F. Gallas





Prof. José D. F. Gallas

MÉTODOS GEOLÉTRICOS APLICADOS À PROSPECÇÃO MINERAL PROJETO CAMAQUÃ - JAZIDA SANTA MARIA

LINHA 1100N

PSEUDO-SEÇÃO DE CARGABILIDADE APARENTE

150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900 950 1000 1050 1100 1150 1200 1250 1300 1350 1400 1450 1500 1550 1



MÉTODOS GEOLÉTRICOS APLICADOS À PROSPECÇÃO MINERAL PROJETO CAMAQUÃ - JAZIDA SANTA MARIA

LINHA 1100N

PSEUDO-SEÇÃO DE CARGABILI DADE APARENTE

50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900 950 1000 1050 1100 1150 1200 1250 1300 1350 1400 1450 150



LINHA 1200N

PSEUDO-SEÇÃO DE CARGABILIDADE APARENTE 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900 950 1000 1050 1100 1150 1200 1250 1300 1350 1400 1450 1 9.5 1 9.0 11.0 14.0 13.0 17.0 18.0 9.0 6.0 7.0 8.0 12.0 21.0 15.9 9.0 15.0 12.0 12.5 18.0 20.0 4.0 14.0 11.0 95 50 6.0 9.0 18/0 95 + 10.5 18.5 195 19.5 120 150 11.0 11.0 12.0 12.5 17.0 19.5 85 18.0 200 15.5 9.0 75 13,5 10.0 6.0 .6.0 9.0 9,0 λ 22.0 180 8.5 8.5 120 13.5 16.0 12.5 10.0 (7.0 17.0 (33) 120 1.5 4.0 7.0 25 185 80 6.0 20.0 0.5 155 14.0 125 105 50 35 16.0 13.5 7.0 14 22.0 18.5 10.0 22.0 (125 **LEGENDA** 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0 PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE DE ANO CARGABILIDADE OU BAIXA RESISTI 100m 12.5 + VALOR MEDIDO DE CARGABILIDA DE E SEU PONTO DE PLOTA GEM. ESCALA ESCALA CROMÁTICA DE CARGABILIDADE (EM mV/V) VALOR MEDIDO DE RESISTIVIDADE E SEU PONTO DE PLOTA GEM. 232 PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE APARENTE 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900 950 1000 1050 1100 1150 1200 1250 1300 1350 1400 1450 15 638 606 612 565 582 584 285 211 197 182 208 197 195 217 222 212 202 173 15 247 231 209 735 716 221 230 188 226 199 232 /179 157 152 215 220 221 215 738 743 258 213 230 195 214 197 181 150 215 180 238 182 203 181 181 215 185 226 691 319 203 15,0 436 442 201 242 228 128 /238 228 632 602 29 29 245 -260 292 245 172 185 164 161 174 198 210 173 157 129 / 215

760 720 680 640 600 560 520 480 440 400 360 320 280 240 200 160 120 80

ESCALA CROMÁTICA DE RESISTI VIDADE (EM OHMS X METRO)





MÉTODOS GEOLÉTRICOS APLICADOS À PROSPECÇÃO MINERAL PROJETO CAMAQUÃ - JAZIDA SANTA MARIA





MÉTODOS GEOLÉTRICOS APLICADOS À PROSPECÇÃO MINERAL PROJETO CAMAQUÃ - JAZIDA SANTA MARIA

MAPA DE CARGABILIDADE APARENTE - PLOTAGEM DO NÍVEL 4 DO DIPOLO-DIPOLO



CARGABILI DADE (EM mV/V)





MÉTODOS GEOLÉTRICOS APLICADOS À PROSPECÇÃO MINERAL PROJETO CAMAQUÃ - JAZIDA SANTA MARIA MAPA DE CARGABILIDADE APARENTE - ARRANJO GRADIENTE AB=400m; MN=20m

ESCALA CROMÁTICA DE CARGABILIDADE (EM mV/V)



MÉTODOS GEOLÉTRICOS APLICADOS À PROSPECÇÃO MINERAL PROJETO CAMAQUÃ - JAZIDA SANTA MARIA MAPA DE RESISTIVIDADE APARENTE - ARRANJO GRADIENTE AB=400m; MN=20m

ESCALA CROMÁTICA DE RESISTI VIDADE (EM OHMS X METRO)



Prof. José D. F. Gallas

Arranjo ou Ensaio "Mise-à-la-masse"

Trata-se de um ensaio misto de superfície e subsuperfície. Posiciona-se um dos eletrodos de corrente A no interior de um furo de sondagem no ponto em que o furo interceptou, por exemplo, um corpo de sulfetos maciços. O eletrodo de corrente B é colocado a uma distância suficientemente grande ("infinito"), de modo que as medidas feitas na superfície sejam devidas somente ao eletrodo interno ao furo.

As medidas são feitas em linhas radiais com o eletrodo de potencial *N*, ficando *M* no "infinito" ou com *MN* ao longo dos perfis.



Mise-à-la-masse (Gallas, 2000).

A partir destas medidas traçam-se curvas equipotenciais que assumirão distorções que acompanharão aproximadamente os contornos da mineralização ou do alvo de interesse.



Prof. José D. F. Gallas

MÉTODOS GEOLÉTRICOS APLICADOS À PROSPECÇÃO MINERAL PROJETO CAMAQUÃ - JAZIDA SANTA MARIA ENSAIO "MISE-À-LA-MASSE" ENERGIZAÇÃO DO PC-A3-80-11 A 72/73m DE PROFUNDIDADE MAPA DE Vp BRUTO



ESCALA CROMÁTICA DE Vp BRUTO (EM mV).

Prof. José D. F. Gallas

MÉTODOS GEOLÉTRICOS APLICADOS À PROSPECÇÃO MINERAL PROJETO CAMAQUÃ - JAZIDA SANTA MARIA ENSAIO "MISE-À-LA-MASSE" ENERGIZAÇÃO DO PC-A3-81-03 A 49m DE PROFUNDIDADE MAPA DE Vp BRUTO



ESCALA CROMÁTICA Vp BRUTO (EM mV)

Prof. José D. F. Gallas





ALVARENGA WASTE DISPOSAL - SÃO BERNARDO GEOPHYSICAL SURVEY MAP

GALLAS, J.D.F.; TAIOLI, F. MALAGUTTI FILHO, W. (2011) Environmental Earth Science Induced polarization, resistivity, and self-potential: a case history of contamination evaluation due to landfill leakage. 63:251–261 DOI 10.1007/s12665-010-0696-y.



LINE 30 - PSEUDOSECTION OF APPARENT CHARGEABILITY

CROMATIC SCALE OF CHARGEABILITY (mV/v)

$$d = \frac{K_e kT}{(2ne^2 v^2)^{1/2}} \qquad IP \propto d$$

Prof. José D. F. Gallas


Simulação 3-D de cargabilidade modelada do nível 2 do dipolo-dipolo.

Prof. José D. F. Gallas



Simulação 3-D de cargabilidade modelada do nível 4 do dipolo-dipolo.

Prof. José D. F. Gallas



Prof. José D. F. Gallas