

Sondaggi elettrici sul fondo di un lago (*)

(Electrical sounding on the bottom of a lake)

M. BERNABINI (**)

Ricevuto il 14 Febbraio 1973

RIASSUNTO. — Si prende in esame il caso di un suolo stratificato ricoperto da una coltre d'acqua e si considera di effettuare sondaggi elettrici con elettrodi posti sul fondo. Vengono riportate alcune curve teoriche e vengono indicati i vantaggi ottenibili effettuando i sondaggi elettrici con elettrodi poggianti sul fondo invece che sondaggi con elettrodi galleggianti sulla superficie dell'acqua. Si riportano anche alcune modalità operative.

SUMMARY. — The case of vertical electrical soundings carried out on a zone covered by a lake with electrodes placed on the lake bottom is considered.

The general expression of the apparent resistivities on the bottom of a basin covered with water, in presence of a layered ground, is shown, as well as the theoretical curves when the ground is homogeneous (fig. 1) or composed of a first layer and of a resistive substratum (fig. 2-6).

The A. shows that sometimes the method with electrodes laying on the bottom gives more useful results than the method with electrodes floating on the water surface: in figs. 7, 9 and 10 are reported three examples in which the presence of a thin layer near the bottom is easily recognizable in the bottom method curves (B), while it is not in surface method curves (A).

Informations about the equipment and devices used in carrying out measurements in the country, are given (fig. 8).

(*) Lavoro eseguito con contributo del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

(**) Istituto di Geofisica Mineraria - Università degli Studi di Roma.

1. - PREMESSE

Tra le varie applicazioni dei metodi geoelettrici ed in particolare tra quelle dei sondaggi elettrici verticali effettuate dallo scrivente in questi ultimi anni, è risultato interessante, per le particolarità esecutive e di interpretazione, il caso di una ricerca effettuata in una zona nella quale ricadeva un piccolo lago.

Per il problema specifico, oggetto della ricerca, rivestiva una particolare importanza, oltre che la ricostruzione geologica generale del bacino lacustre, anche la determinazione delle resistività degli strati più superficiali costituenti il fondo del lago. Benché la profondità del lago fosse esigua (dell'ordine dei 5-10 m), si pensò che fosse preferibile, per una migliore ricostruzione e caratterizzazione dei terreni costituenti il fondo del lago, effettuare sia normali sondaggi elettrici verticali con elettrodi galleggianti in superficie (considerando quindi l'acqua come primo strato), sia sondaggi elettrici con elettrodi poggianti sul fondo del lago.

Poiché il rilievo eseguito in tal modo ha dato risultati soddisfacenti, si ritiene possa essere interessante descrivere in breve le modalità operative ed i metodi di interpretazione adottati, in quanto non risulta dalla letteratura a conoscenza dello scrivente che sia stato affrontato in modo adeguato un problema dello stesso tipo. Solo Giuseppe Latmiral⁽³⁾ riporta i risultati di alcune prove effettuate sul fondo di un lago, mentre Gaetano Latmiral e Lorenzo Mirabile⁽⁴⁾ ricavano con il metodo delle immagini elettriche alcune espressioni della resistività apparente per il caso di due strati (acqua e substrato). Determinazioni di resistività sul fondo del mare sono state descritte da Accerboni e Mosetti⁽¹⁾ che si riportano al caso teorico di misure effettuate al contatto tra due mezzi semi-indefiniti: per eliminare l'influenza preponderante dell'acqua marina sui valori delle resistività apparenti, si propone di effettuare anche misure della resistività dell'acqua con dispositivi sospesi ad una certa altezza del fondo.

Nella presente nota verranno ricavate le espressioni generali delle resistività apparenti sul fondo di un bacino ricoperto d'acqua in presenza di un suolo stratificato e verranno fornite le curve teoriche nel caso che tale suolo sia illimitato o costituito da un primo strato e da un substrato. Verrà riportato un esempio di applicazione pratica con le indicazioni dei dispositivi e degli accorgimenti utilizzati nell'esecuzione delle misure in campagna.

L'Autore desidera ricordare il collega Maurizio Grandinetti con la cui collaborazione il presente studio era stato iniziato poco prima che un mortale infortunio lo strappasse per sempre ad una feconda operosità.

2. — RELAZIONI PER IL CALCOLO DELLA RESISTIVITÀ APPARENTE SUL FONDO DEL LAGO

Si consideri il caso di uno spazio costituito da due mezzi semi-illimitati, omogenei, isotropi, di resistività ρ_1 e ρ_2 separati da una superficie piana π sulla quale è posta una sorgente puntiforme erogante una corrente continua I ; il potenziale ad una distanza R dalla sorgente è dato dall'espressione:

$$V = \frac{\rho_1 \rho_2 I}{2 \pi (\rho_1 + \rho_2) R}$$

Supponiamo che siano presenti altri mezzi separati da superfici piane parallele al piano π ; assumendo un sistema di coordinate cilindriche r , φ e z con il centro nella sorgente e l'asse normale al piano π , il potenziale può assumere la forma

$$V = \int_0^{\infty} (A e^{+\lambda z} + B e^{-\lambda z}) J_0(\lambda r) d\lambda \quad [1]$$

cui dovrà essere aggiunta una espressione particolare per i mezzi che contengono la sorgente.

Nel caso che interessa il presente studio, sia presente uno strato superficiale (l'acqua) con resistività ρ_w e spessore h_w sormontato da un mezzo semi-illimitato (aria) con resistività infinita e poggiante su di un complesso stratificato.

Nel caso di un suolo omogeneo illimitato ($h_1 \rightarrow \infty$), per il dispositivo di Wenner, definendo la resistività apparente anche in questo caso con l'espressione

$$\rho_a = 2 \pi a \frac{\Delta V}{I}$$

con a distanza elettroica, si ha

$$\frac{\varrho_a}{\varrho_1} = \frac{K_w + 1}{2} \left\{ 1 + 2(1 - K_w) \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-K_w)^{n-1}}{\left[1 + \left(\frac{2nh_w}{a} \right)^2 \right]^{1/2}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-K_w)^{n-1}}{\left[4 + \left(\frac{2nh_w}{a} \right)^2 \right]^{1/2}} \right] \right\}$$

con $K_w = \frac{\varrho_w - \varrho_1}{\varrho_w + \varrho_1}$.

Per il dispositivo di Schlumberger si ottiene invece

$$\frac{\varrho_a}{\varrho_1} = \frac{K_w + 1}{2} \left\{ 1 + (1 - K_w) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-K_w)^{n-1}}{\left[1 + \left(\frac{2nh_w}{a} \right)^2 \right]^{3/2}} \right\} \quad [2]$$

con a uguale alla semidistanza tra gli elettrodi di corrente $AB/2$.

Nella fig. 1 sono riportate le curve per vari valori di K_w .

Si consideri ora un suolo costituito da un primo strato (ϱ_1, h_1) e da un substrato (ϱ_2) semi-illimitato.

Per il dispositivo Schlumberger si ha, ponendo $h_w = p_u h_0$ e $h_1 = p_1 h_0$ con p_w e p_1 numeri interi:

$$\frac{\varrho_a}{\varrho_1} = \frac{K_w + 1}{2} \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \left[1 + \left(\frac{2nh_0}{a} \right)^2 \right]^{-3/2} \right\}. \quad [3]$$

I coefficienti b_n sono nel caso $p_1 > p_u$

$$\begin{aligned} 1 &\leq n < p_w & b_n &= 0 \\ n &= p_w & b_{p_w} &= 1 - K_w \\ p_w &< n < p_1 & b_n &= -K_w b_{(n-p_w)} \\ n &= p_1 & b_{p_1} &= K_1(1 + K_w) + K_w b_{(p_1-p_w)} \\ p_1 &< n < p_1 + p_w & b_n &= K_1 K_w b_{(n-p_1)} - K_w b_{(n-p_w)} \\ n &= p_1 + p_w & b_{(p_1+p_w)} &= 2K_1 + K_1 K_w b_{p_w} - K_w b_{p_1} \\ n &> p_1 + p_w & b_n &= K_1 b_{(n-p_1-p_w)} + K_1 K_w b_{(n-p_1)} - K_w b_{(n-p_w)} \end{aligned}$$

con $K_1 = \frac{\varrho_2 - \varrho_1}{\varrho_2 + \varrho_1}$

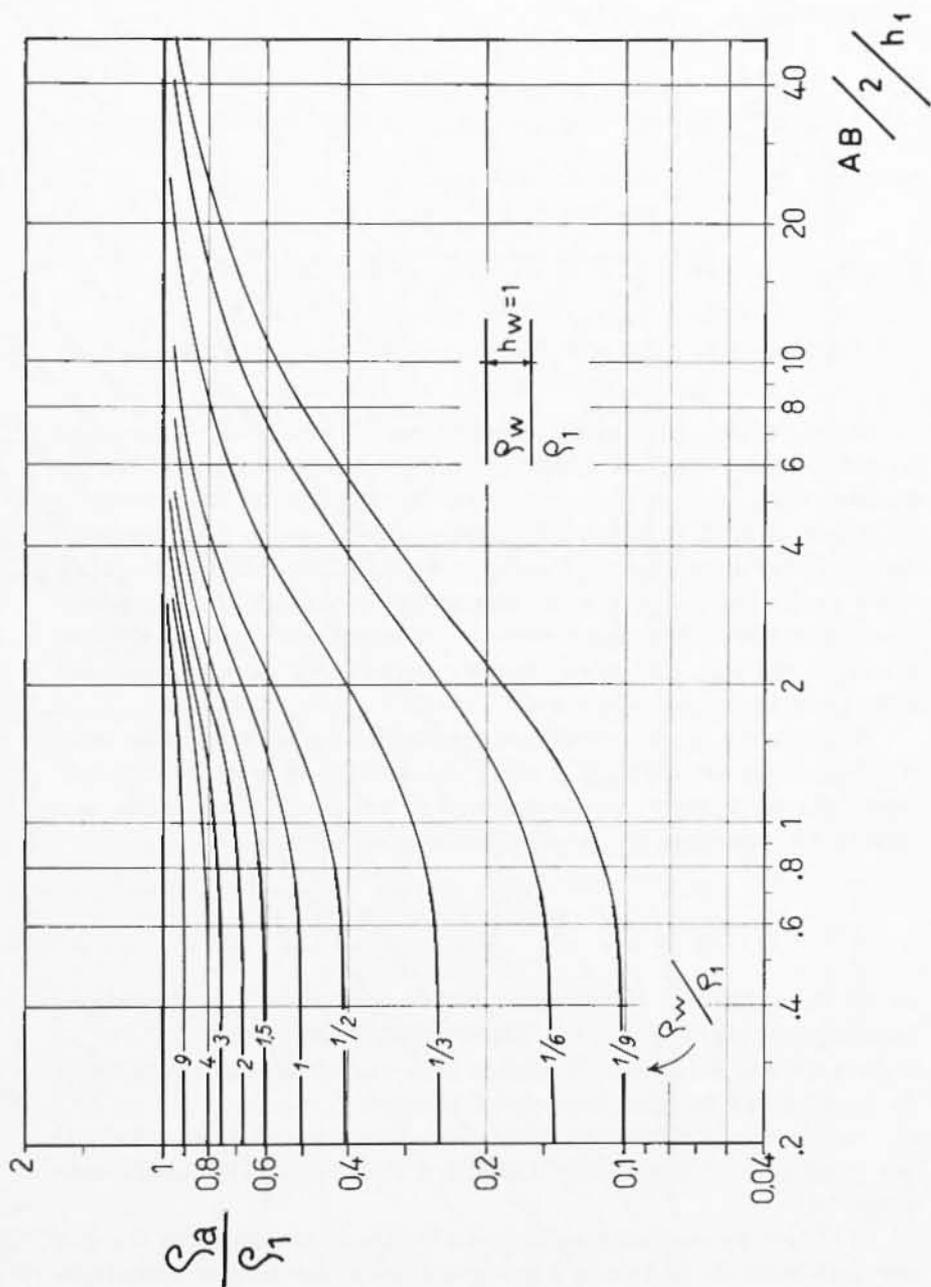


Fig. 1 - Curve teoriche per un substrato semi-illimitato ricoperto da uno strato d'acqua.

Nel caso $p_w > p_1$ si ha:

$$\begin{array}{ll}
 1 \leq n < p_1 & b_n = 0 \\
 n = p_1 & b_{p_1} = K_1 (1 + K_w) \\
 p_1 < n < p_w & b_n = K_w K_1 b_{(n-p_1)} \\
 n = p_w & b_{p_w} = 1 - K_w \div K_1 K_w b_{(p_w-p_1)} \\
 p_w < n < p_w + p_1 & b_n = K_1 K_w b_{(n-p_1)} - K_w b_{(n-p_w)} \\
 n = p_w + p_1 & b_{(p_1+p_w)} = 2K_1 - K_w b_{p_1} + K_1 K_w b_{p_w} \\
 n > p_w + p_1 & b_n = K_1 b_{(n-p_w-p_1)} - K_w b_{(n-p_w)} \div K_1 K_w b_{(n-p_1)}.
 \end{array}$$

L'espressione [3] è stata calcolata per il caso $K_1 = 1$ ($\rho_2 \rightarrow \infty$) facendo assumere a K_w i valori $\pm 0,8$, $\pm 0,5$, 0 e al rapporto tra gli spessori h_w/h_1 i valori $1/25$, $1/15$, $1/10$, $1/7$, $1/5$, $1/3$, $1/2$, 1 , 2 , 3 , 5 , 7 , 10 , 15 , 25 (figg. 2, 3, 4, 5, 6). Il calcolo eseguito per la maggior parte dei casi con il calcolatore Univac 1108 dell'Università di Roma, è stato anche semplificato dalla constatazione che nel caso in esame ($K_1 = 1$) il valore della sommatoria in parentesi non varia scambiando K_w con $-K_w$ e p_w con p_1 , ciò che ha portato ad un dimezzamento del numero di curve da calcolare.

L'approssimazione voluta nel calcolo delle resistività apparenti è stata di almeno $0,5\%$; si è raggiunto tale limite arrestando il calcolo della sommatoria ad un numero di termini S ricavato da una espressione riportata da Mooney-Orellana ed altri (5):

$$S = \sqrt{\frac{a^3 r_s}{8 \varepsilon \rho_a}}$$

in cui r_s rappresenta il massimo valore assoluto che i coefficienti b_n raggiungono per $n > S$ ed ε l'errore percentuale ammesso. Per r_s è stato assunto il valore 2, in quanto per i casi considerati i coefficienti b_n sono sempre risultati inferiori od uguali a 2.

Le curve riportate nelle figure 2-6 possono considerarsi sufficienti per giudicare, nei singoli casi, la effettiva utilità di impiego del metodo proposto.

Per fare un esempio consideriamo il caso di uno specchio d'acqua con resistività di 15 ohm.m e spessore di 50 m che ricopra uno strato di spessore 10 m e resistività di 5 ohm.m poggiante su di un substrato

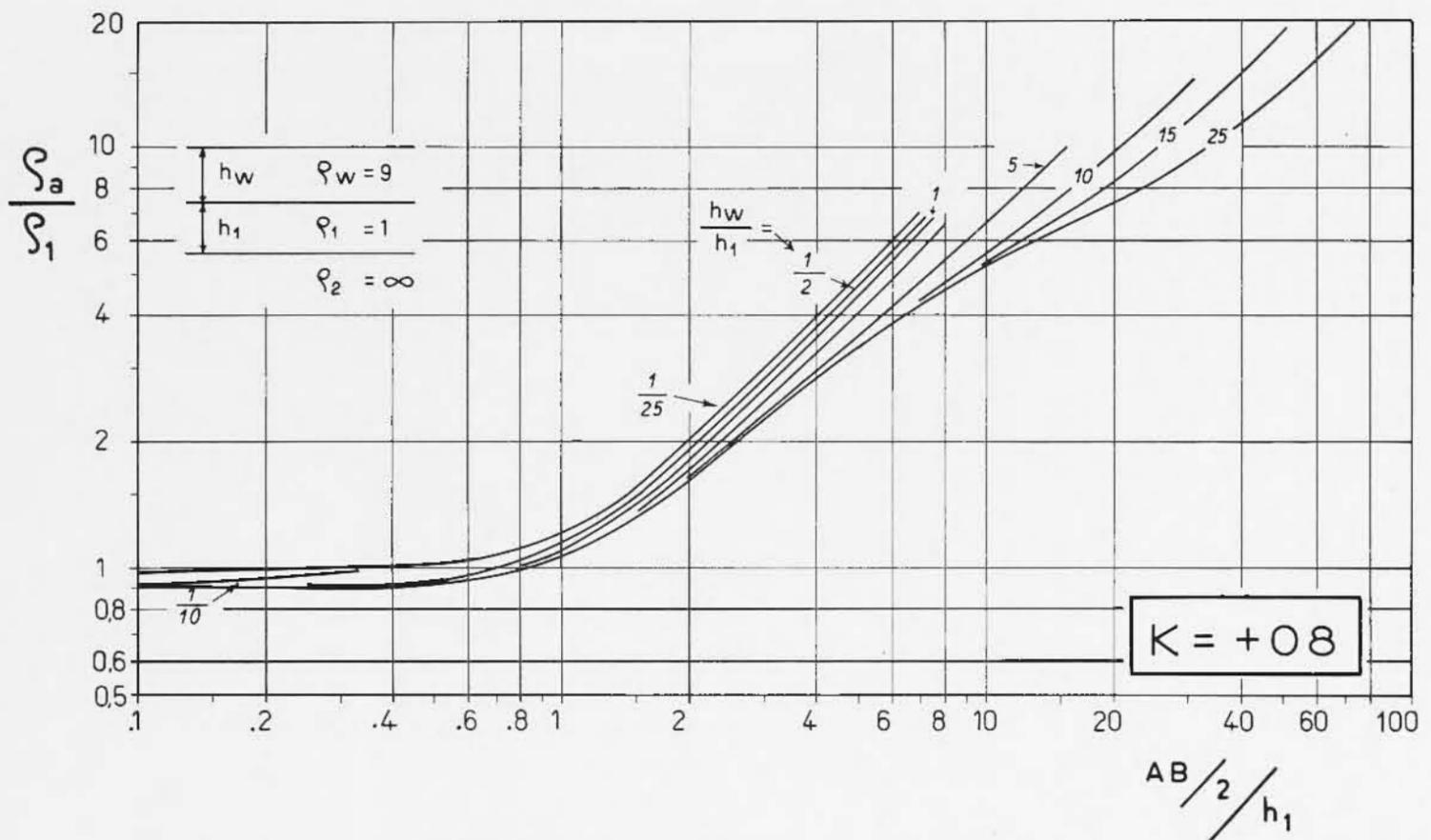


Fig. 2 - Curve teoriche per due strati ricoperti da uno strato d'acqua con elettrodi poggianti sul fondo nel caso di $\rho_w/\rho_1 = 9$ ($K_w = 0,8$) e $\rho_2 = \infty$.

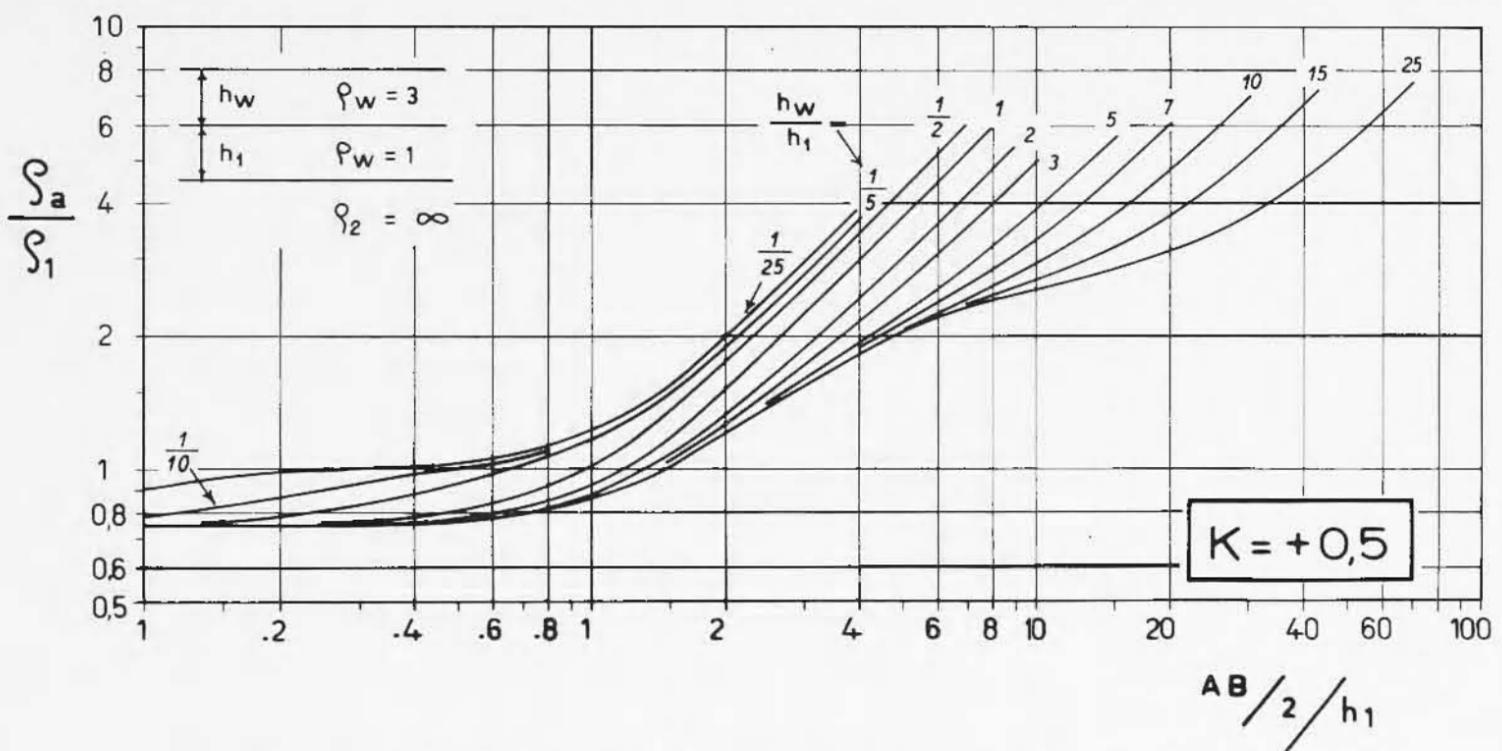


Fig. 3 - Curve teoriche per due strati ricoperti da uno strato d'acqua con elettrodi poggianti sul fondo nel caso di $\rho_w/\rho_1 = 3$ ($K_w = 0,5$) e $\rho_2 = \infty$.

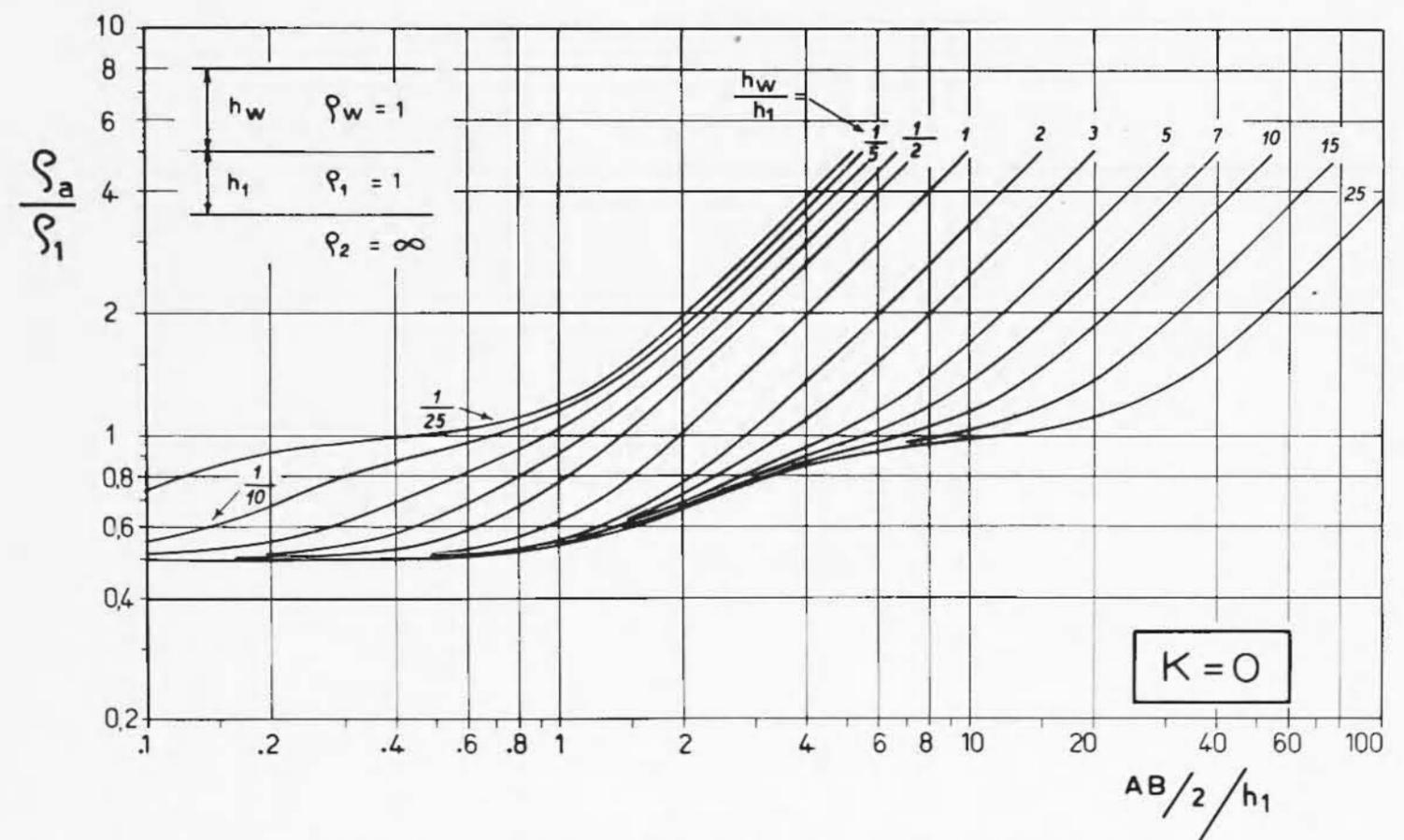
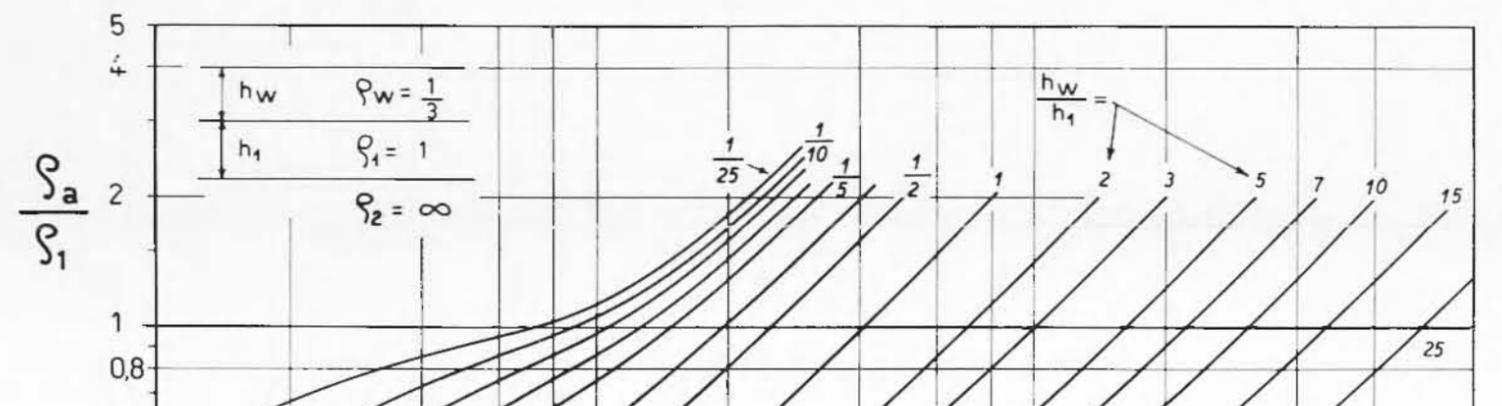


Fig. 4 - Curve teoriche per due strati ricoperti da uno strato d'acqua con elettrodi poggianti sul fondo nel caso di $\rho_w/\rho_1 = 1$ ($K_w = 0$) e $\rho_2 = \infty$.



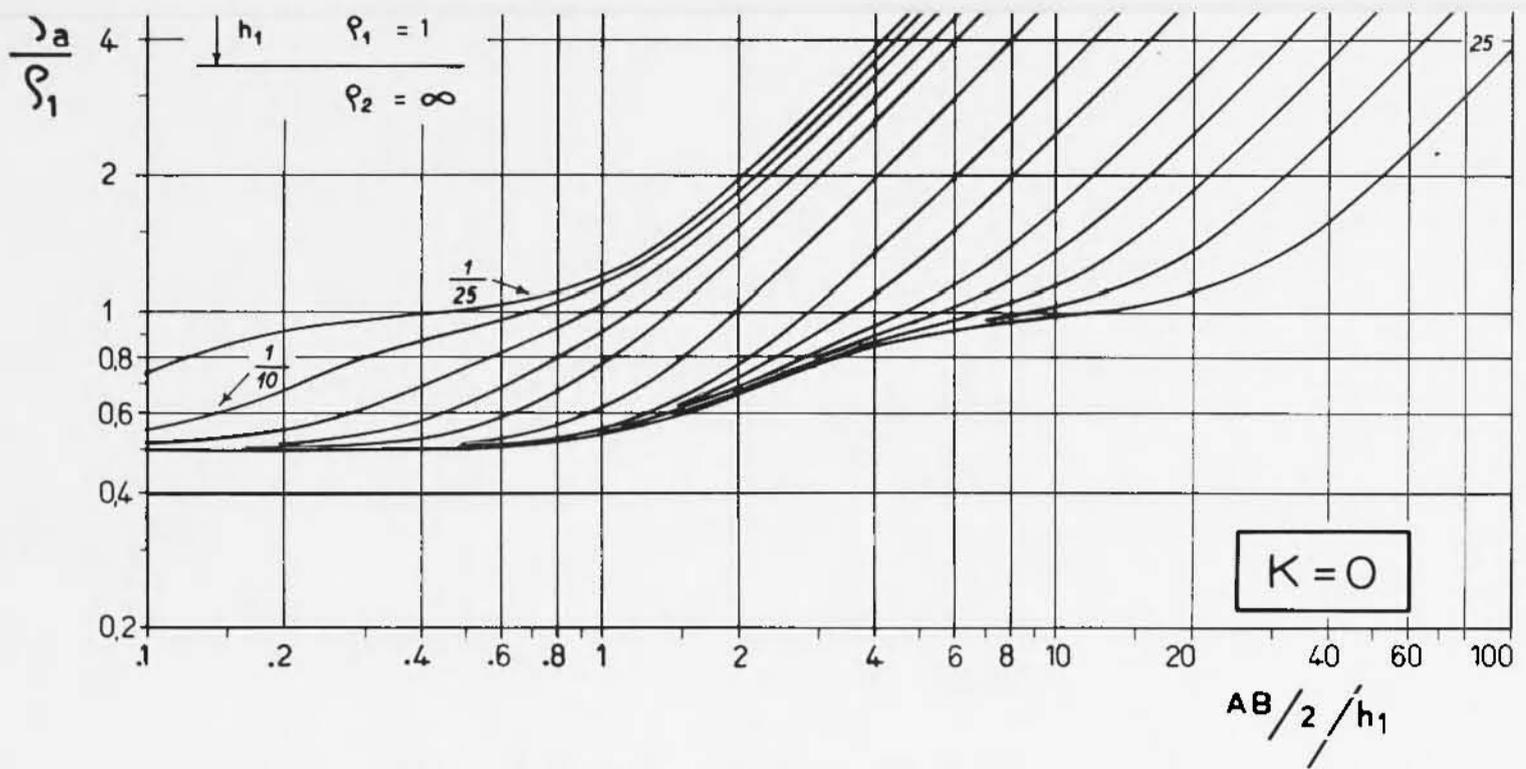


Fig. 4 - Curve teoriche per due strati ricoperti da uno strato d'acqua con elettrodi poggianti sul fondo nel caso di $\rho_w/\rho_1 = 1$ ($K_w = 0$) e $\rho_2 = \infty$.

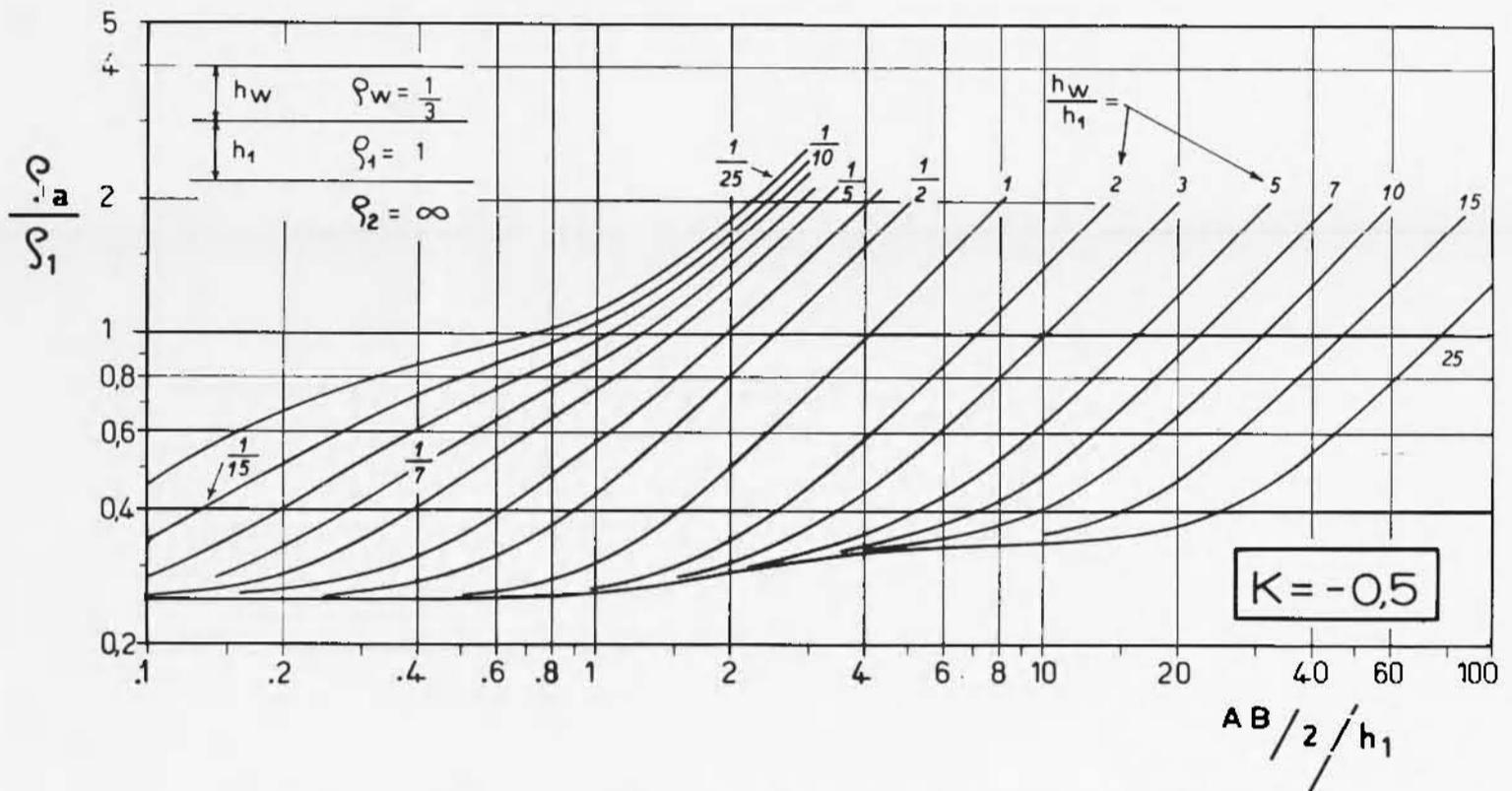


Fig. 5 - Curve teoriche per due strati ricoperti da uno strato d'acqua con elettrodi poggianti sul fondo nel caso di $\rho_w/\rho_1 = 1/3$ ($K_w = -0,5$) e $\rho_2 = \infty$.

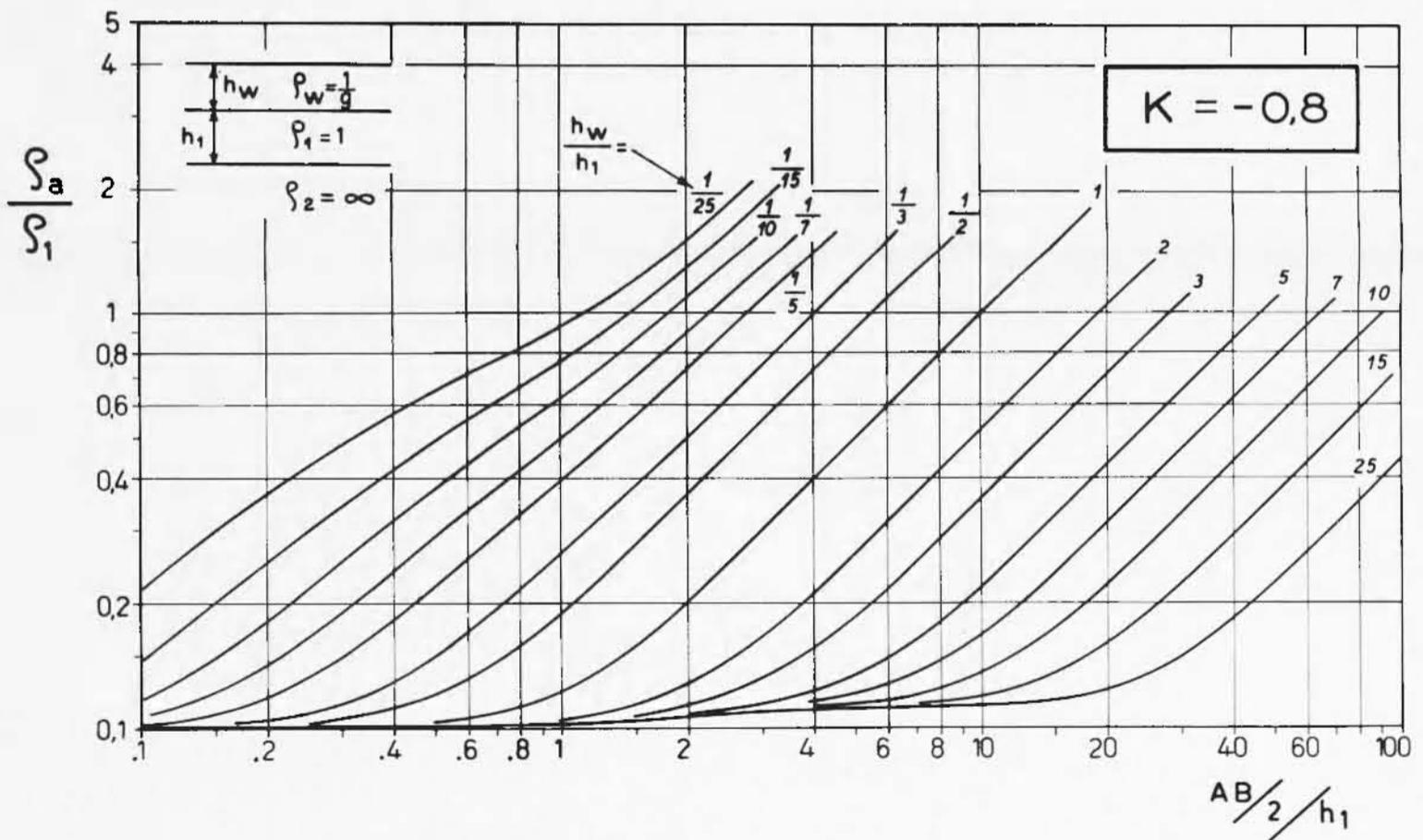


Fig. 6 - Curve teoriche per due strati ricoperti da uno strato d'acqua con elettrodi poggianti sul fondo nel caso di $\rho_w/\rho_1 = 1/9$ ($K_w = -0,8$) e $\rho_2 = \infty$.

resistivo; prendendo in esame (fig. 7) le due curve teoriche corrispondenti a sondaggi elettrici eseguiti in superficie e sul fondo, si nota che la presenza dello strato a 15 ohm.m non è evidente nella curva **A** relativa ad un sondaggio sulla superficie del lago, mentre lo è nella curva **B** corrispondente a misure sul fondo.

3. - APPLICAZIONE AD UN CASO REALE

Le curve sopra riportate sono state utilizzate per l'interpretazione dei risultati di un rilievo effettuato sul lago di Ventina nei pressi di Piediluco (Terni).

Come si è detto l'acqua ha uno spessore massimo dell'ordine di 10 m ed una resistività (determinata sia con misure in loco sia su campioni prelevati a varie profondità) di 35 ohm.m. Si è utilizzata l'apparecchiatura a corrente commutata a 10 Hz descritta in una precedente nota (2).

L'uso di tale apparecchiatura, se semplificava l'esecuzione delle misure (in quanto eliminava gli effetti di polarizzazione degli elet-

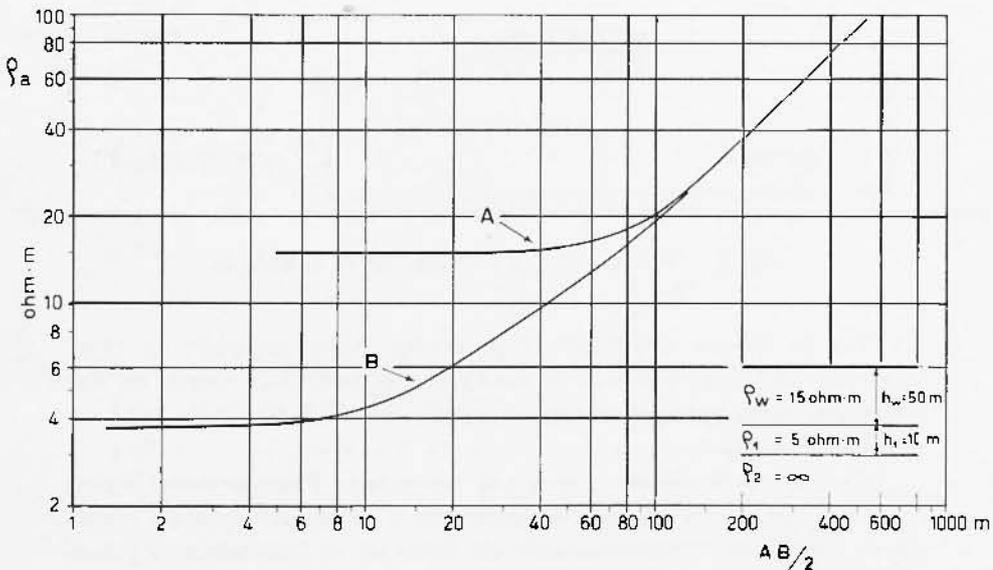


Fig. 7 - Confronto tra due curve teoriche, una (**A**) relativa ad elettrodi in superficie, l'altra (**B**) relativa ad elettrodi poggianti sul fondo nel caso indicato in figura.

trodi), aveva come inconveniente la necessità di dover considerare le mutue induzioni tra circuito energizzante e circuito di misura.

Per diminuire al massimo tali mutue induzioni ed assicurare un sufficientemente accurato posizionamento degli elettrodi alle varie distanze elettrodiche, si operava nel seguente modo:

Si stendeva dapprima un filo di nailon della lunghezza di 240 m sorretto da galleggianti ed ancorato alle estremità; al centro della stessa e parallelamente ad essa veniva posato sul fondo un tubo (vedi fig. 8) poco flessibile opportunamente zavorrato della lunghezza di 20 m, sul quale erano stati fissati anelli di rame in corrispondenza delle varie distanze elettrodiche. I quattro anelli centrali, utilizzati come coppie di elettrodi di potenziali ($MN = 1$ e 2 m), erano collegati a cavi che, fuoriuscendo dal centro del tubo, giungevano alla barca centrale sulla quale erano installati gli apparecchi di misura; gli altri anelli (funzionanti come elettrodi di corrente per le prime misure e come elettrodi di potenziale per le maggiori distanze elettrodiche) erano collegati a cavi che uscivano dalla estremità del tubo, risalivano verticalmente, e, poggiando su piccole boe, giungevano anch'essi alla barca centrale.

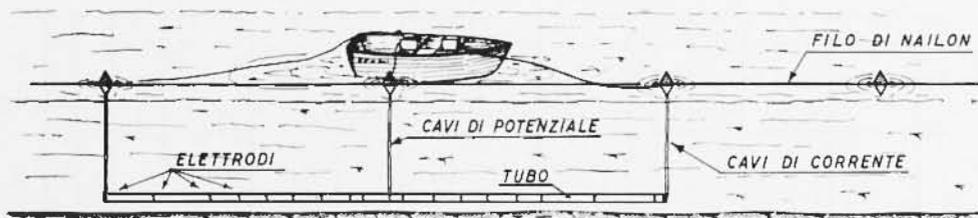


Fig. 8 - Schema operativo adottato in campagna.

Per le misure a distanze elettrodiche $AB/2$ superiori ai 10 m, venivano utilizzati elettrodi di corrente che venivano calati, da due altre barche, in corrispondenza di segnali posti sul filo steso sulla superficie del lago.

Furono fatte alcune prove per controllare l'entità della mutua induzione tra i due circuiti, energizzanti e di misura, entro l'acqua, prove effettuate cortocircuitando gli elettrodi di potenziale: i potenziali misurati nelle normali condizioni di utilizzazione del sistema sono sempre risultati trascurabili rispetto ai valori dei potenziali che si stabilivano nel terreno o più spesso addirittura inferiori ai normali

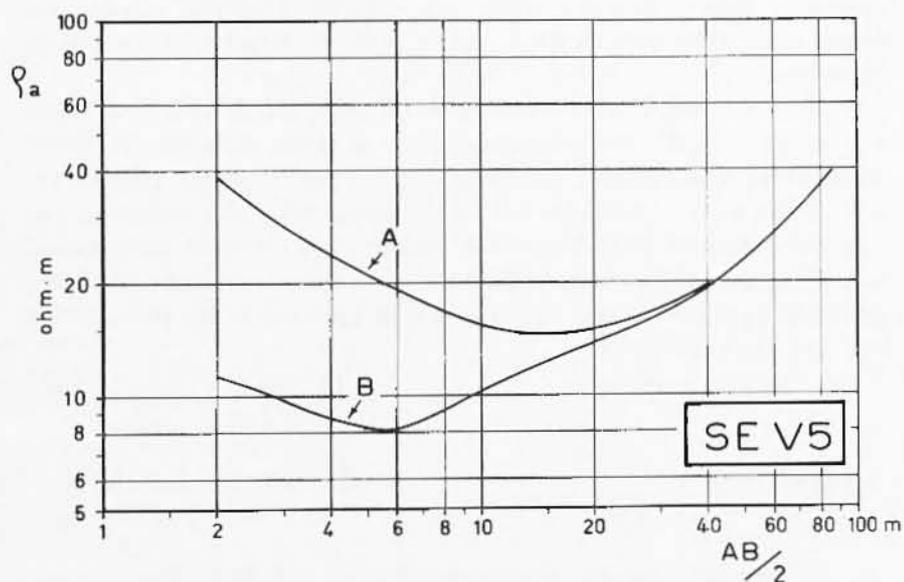
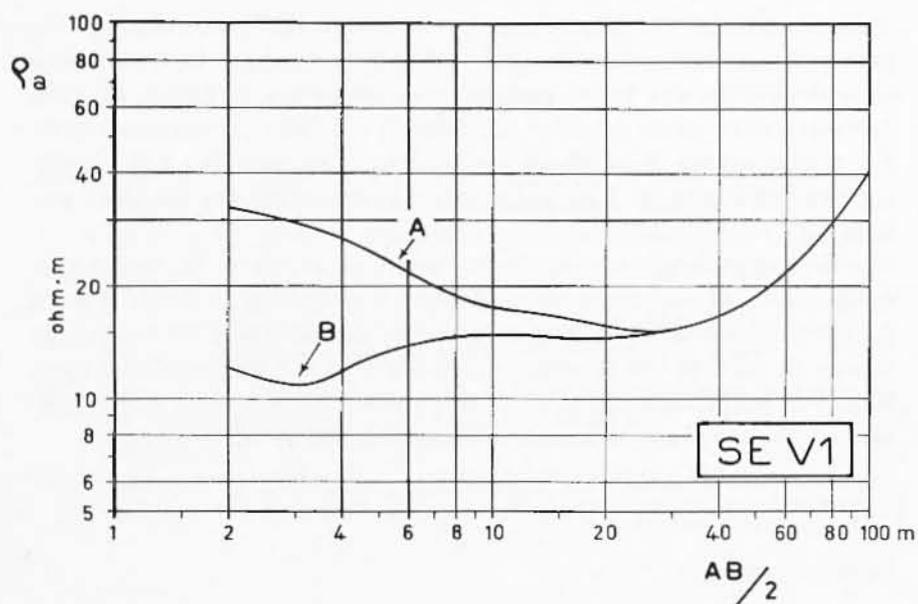


Fig. 9 - Esempi di curve rilevate in un'indagine effettuata in un lago; la curva A è relativa ad elettrodi galleggianti in superficie, la curva B ad elettrodi poggianti sul fondo.

disturbi esistenti ($\sim 0,3$ mV). Gli accorgimenti adottati hanno quindi permesso una buona riuscita della prospezione, sia per la accuratezza ed attendibilità dei valori misurati, sia anche per la buona rapidità dell'esecuzione delle misure. A titolo di esempio si riportano nella fig. 9 due coppie di sondaggi elettrici eseguiti, per ciascuna coppia, il primo sul fondo del lago e il secondo in superficie con elettrodi galleggianti.

Si riscontra nel sondaggio V1 fondo lago (curva **B**) una prima diminuzione di resistività nella parte più prossima al fondo seguita da un orizzonte leggermente più resistivo; nel sondaggio V5 fondo lago (curva **B**), si nota che il primo strato conduttivo è aumentato di spessore: tali particolarità non sono chiaramente visibili nelle curve relative ai sondaggi con elettrodi galleggianti (curve **A**).

CONCLUSIONI

L'esecuzione di sondaggi elettrici (e di misure di resistività in genere) in aree ricoperte d'acqua con elettrodi poggianti o infissi sul fondo può presentare vantaggi anche notevoli rispetto ai metodi di superficie.

In molti casi infatti strati relativamente sottili posti sul fondo o in prossimità di esso, possono sfuggire o essere difficilmente determinabili ad una indagine basata solo su misure effettuate sulla superficie dell'acqua. I sondaggi sul fondo permettono di ricostruire con maggior dettaglio l'andamento e la resistività dei terreni più prossimi all'acqua, portando un contributo notevole alla risoluzione di alcuni problemi geologico-tecnici (quali ad es. la presenza e l'entità di livelli argillosi impermeabili).

RINGRAZIAMENTI

Lo scrivente desidera ringraziare il Prof. Aquilina, Direttore dell'Istituto di Geofisica Mineraria, che ha reso possibile la ricerca, ed i colleghi E. Brizzolari per l'aiuto prestato per i calcoli delle curve e F. Di Fonzo e G. Latmiral per le prove in campagna.

BIBLIOGRAFIA

- (1) ACCERBONI E., MOSETTI F., 1966. - *Mesures de résistivité électrique in situ sur le fond de la mer.* « Boll. Geof. Teor. Appl. », VIII, 42.
- (2) BERNABINI M., 1965. - *Osservazioni sul comportamento di una apparecchiatura geoelettrica a corrente commutata per misure di resistività.* « Annali di Geofisica », XVIII, 4.
- (3) LATMIRAL G., 1964. - *Misure di resistività - Estensioni del metodo di Wenner - Parte I.* « Annali dell'I.U.N. » di Napoli, XXXII.
- (4) LATMIRAL G., MIRABILE L., 1964. - *Misure di resistività - Estensione del metodo di Wenner - Parte II.* « Annali dell'I.U.N. » di Napoli, XXXII.
- (5) MOONEY H. M., ORELLANA E., PICKETT H., TORNHEIM L., 1966. - *A resistivity computation method for earth models.* « Geophysics », XXXI, 1.