

LOG
66
1957

APPUNTI PRATICI SUI METODI DI CAROTAGGIO
ELETTRICO E RADIOATTIVO

I.- Generalità.

I logs elettrici misurano il potenziale spontaneo esistente naturalmente nei terreni e la resistività delle formazioni attraversate dalla perforazione.

La resistività di una formazione è una proprietà collegata alle caratteristiche mineralogiche della roccia, nonché al contenuto e composizione dei fluidi racchiusi nella formazione stessa.

I logs elettrici e radioattivi (i quali misurano la radioattività naturale e quella indotta delle rocce) permettono la soluzione, sia qualitativa che quantitativa, dei problemi collegati alla perforazione di un pozzo.

Premettiamo alcune definizioni e concetti generali:

La porosità di una roccia è definita dal rapporto fra volume dei pori e volume della roccia.

La saturatione in fluidi è data dal rapporto fra il volume dei pori occupati da un dato fluido e il volume totale dei pori.

La permeabilità definisce l'attitudine di un determinato mezzo a lasciarsi attraversare da un fluido, con maggiore o minore facilità.

Il fattore di formazione è espresso dal rapporto esistente fra la resistività di una formazione porosa satura di un dato elettrolita e la resistività dell'e-

lettrolita stesso.

In pratica, il fattore di formazione non dipende dalla resistività del fluido conduttivo che satura la roccia, ma dipende invece dalla porosità e da un fattore di "tortuosità" dei canalicoli conduttori della roccia.

In una sezione condotta normalmente all'asse di un pozzo troviamo i seguenti valori di resistività a partire dal centro del foro:

resistività del fango (si indica con R_m);

resistività del pannello (R_{mc});

resistività della formazione invasa (R_{xo});

resistività vera della formazione (R_t);

si ha poi: Resistività del filtrato del fango (R_{mf});

resistività dell'acqua di strato (R_w);

resistività media, fra resistività del fil-

trato e resistività dei fluidi di strato (R_i).

2.- Potenziale spontaneo.

La curva del PS è una registrazione dei potenziali che si stabiliscono naturalmente nel fango alle diverse profondità del pozzo; essa è la somma di due potenziali: elettrochimico ed elettrocinetico.

Normalmente il log PS consiste di una linea di base sulla destra (linea delle argille) che presenta escursioni sulla sinistra, in corrispondenza di strati per-

meabili (linea delle sabbie).

Con fanghi a bassa resistività (salini) la escursione della curva sarà inferiore al valore effettivo e, al limite, quando la resistività del fango sarà inferiore a quella dell'acqua di strato, la curva di PS sarà esattamente capovolta e si registreranno escursioni positive in corrispondenza di letti permeabili.

Sulla curva PS influisce poi, notevolmente, lo spessore degli strati; si ha infatti che i valori delle ampiezze delle escursioni in corrispondenza di strati permeabili sono praticamente uguali a quelli desunti dai diagrammi di PS statico qualora lo spessore dello strato sabbioso sia maggiore del doppio del diametro del foro. Per spessori più piccoli si ha una riduzione nei valori delle escursioni negative del PS.

Il PS viene misurato in millivolt (mV.).

3.- Logs della resistività (Convenzionali).

Le curve della resistività vengono registrate inviando corrente elettrica nella formazione e misurando la resistività di questa mediante elettrodi calati in pozzo. Il fango di perforazione assicura il contatto elettrico fra gli elettrodi e la formazione.

L'unità di misura di resistività è l'ohm.m²/m.

Le sonde usate in pratica sono di due tipi: normale e laterale (o inversa).

Le curve normali sono distinte in "piccola normale" (con spaziatura degli elettrodi variante da 5" a 20"; ma generalmente di 16"); "grande normale" (con spaziatura da 20" a 7', generalmente di 64"); la "laterale" o "inversa" ha una spaziatura di parecchi piedi (normalmente 18' 8").

Il raggio di investigazione di una sonda dipende dalla spaziatura degli elettrodi; in un mezzo omogeneo il raggio di investigazione di una sonda normale è all'incirca uguale al doppio della sua spaziatura, intendendo con raggio di investigazione la distanza alla quale la caduta di potenziale ha raggiunto il 50% del suo valore totale V .

Resistività delle varie formazioni

Argille : ~~Le~~ formazioni tenere hanno resistività bassa e costante (pochi ohm /m); in argille compatte o in argille con acqua interstiziale relativamente dolce, la resistività sale fino a valori di 20 ohm /m.

Sabbie sciolte: la resistività della sabbia ad acqua salata è molto bassa, più bassa di quella delle argille (0,2 - 1 ohm /m).

Per sabbie ad olio la resistività può variare da pochi fino a 50 ohm/m; quando la sabbia ad olio contiene argille la resistività è molto bassa, anche per sabbie molto mineralizzate (1 - 2 ohm/m).

Arenarie : Il fattore di formazione (F) cresce per l'effetto del fattore di cementazione che riduce la porosità. La resistività in generale è più elevata della resistività delle sabbie sciolte. Per arenarie ad acqua : $R = 2-50 \text{ ohm/m}$. Per arenarie ad olio : $R = 200-1000 \text{ ohm/m}$.

Formazioni dure : Se sono assolutamente compatte, la resistività è infinita; se sono porose la resistività diminuisce, ma mantiene sempre valori elevati rispetto alle sabbie.

Con i logs normali della resistività non si ottengono buoni risultati in queste formazioni, altamente resistive, perchè la corrente elettrica inviata tende a concentrarsi nel pozzo, invece di penetrare nella formazione; si viene ad ottenere così una resistività apparente, proporzionale alla resistività del fango (R_m) e inversamente proporzionale alla superficie del foro.

Per le formazioni dure è stata costruita la sonda a calcare, la cui registrazione è indipendente dalla posizione della sonda e dallo spessore dello strato. Se il diametro del foro e la resistività del fango sono costanti, la resistività apparente registrata in cor-

rispondenza di uno strato omogeneo e di grande spessore sarà costante lungo tutto lo strato, escluso naturalmente in vicinanza dei confini dello strato.

Nel caso di una sottile intercalazione più conduttiva, la curva registrerà, in corrispondenza, una depressione simmetrica rispetto allo strato, assegnando uno spessore superiore al reale. Anche in questo tipo di logs, l'effetto della colonna di fango si fa sentire notevolmente e la R_a registrata sarà inferiore a R_t .

Esaminiamo ora qualche esempio di curve registrate con sonda normale e laterale in formazioni tenere.

a) Sonda normale, con strato più resistivo delle formazioni adiacenti:

- Se lo strato ha uno spessore superiore alla spaziatura degli elettrodi, l'escursione della curva registra uno spessore dello strato inferiore al reale;
- se lo strato ha spessore inferiore alla spaziatura, la curva classifica lo strato come conduttore, comunque elevata sia la sua resistività, poichè risente della influenza predominante del piccolo spessore dello strato; teoricamente la spaziatura dovrebbe quindi essere ridotta al minimo, ma d'altra parte ad una piccola spaziatura corrisponde un limitato raggio di investigazione e di conseguenza le misure vengono a risentire troppo dell'influenza del fango.

- Se la spaziatura corrisponde allo spessore dello strato, la curva registrata è piatta.
- b) Sonda normale, con strato meno resistivo delle formazioni adiacenti:
- è il caso inverso a quello presentato in precedenza; le curve registrate hanno andamento esattamente capovolto rispetto a quello del paragrafo a).
- c) Sonda laterale, con strato più resistivo delle formazioni adiacenti:
- Se lo spessore dello strato è maggiore della spaziatura, non si ha simmetria nelle escursioni: il punto di massima escursione si trova appena sopra il confine inferiore dello strato e lo spessore apparente registrato è molto inferiore allo spessore reale; è inferiore di una quantità corrispondente alla spaziatura degli elettrodi. La resistività apparente registrata in corrispondenza dell'escursione massima è superiore alla resistività vera R_t .
 - Se lo spessore dello strato è inferiore alla spaziatura, la resistività apparente, data dalla curva, è inferiore alla R_t reale. La curva, dopo aver registrato una escursione in corrispondenza dello strato resistivo, segna una zona di bassa resistività ("zona cieca") al di sotto dello strato, e quindi una seconda escursione, di ampiezza più limitata, o "Picco di riflessione", Quest'ultimo è posto ad una distanza dalla base dello strato, pari alla spaziatura degli elettrodi AC.

4. - Microlog.

Il microlog dà una registrazione della resistività, atta alla determinazione di letti permeabili, usando una sonda avente gli elettrodi con lieve spaziatura applicati direttamente alla parete del pozzo mediante un supporto isolante.

Il microlog trova migliore applicazione nelle zone dure e resistive, dove i logs convenzionali perdono in precisione nella definizione dei confini degli strati a causa dell'effetto bypassante della colonna di fango; il sistema misura la resistività media di un piccolo volume di terreno circostante e permette la identificazione e la delimitazione di strati permeabili anche molto sottili; esso permette inoltre di conoscere il fattore di formazione e la porosità di una formazione.

In pratica vengono usati in combinazione due sistemi di elettrodi, con spaziatura in genere di uno o due pollici:

Microinversa, sonda a raggio di investigazione minore;
micronormale, sonda a raggio più lungo.

Le determinazioni effettuate con la microinversa saranno influenzate dal pannello più delle determinazioni effettuate con la micronormale.

La differenza fra le due letture ottenute sulle due curve si dice separazione; questa sarà positiva nel caso che la micronormale dia una resistività apparente maggiore della microinversa; ciò si ha normalmente di

fronte a letti permeabili, in cui la resistività della zona invasa è maggiore della resistività del pannello, purchè il valore della resistività sia inferiore a 20 volte, circa, la resistività del fango.

Di fronte a formazioni impermeabili, la curva ha un andamento molto singolare per la non uniformità di spessore del pannello. Le separazioni possono essere positive o negative, ma di solito la resistività è molto alta, superiore a 20 volte R_m .

Nel caso esistano caverne, la sonda registra solamente la R_m (resistività del fango); le separazioni non dicono nulla e occorre quindi riportarsi al PS e alla calibratura.

5.- Microlaterolog.

Il microlaterolog serve a determinare il valore di R_{xo} (resistività della zona invasa) in qualsiasi tipo di formazione; la conoscenza di R_{xo} è indispensabile per il calcolo della resistività vera e per la saturazione percentuale di fluidi di uno strato.

Il sistema è costituito da un elettrodo centrale e da altri tre elettrodi concentrici; viene inviata una corrente normalmente alla parete del pozzo secondo un

fascio spesso circa due pollici.

Il pannello ha poca influenza sulla registrazione di questa curva, data la focalizzazione della corrente immessa nella formazione.

Il microlaterolog definisce con molta precisione i confini di strati molto sottili, avendo un potere risolvente molto elevato, fino a 5 cm. di spessore.

La resistività ottenuta dalla curva è molto vicina a R_{xo} se il pannello non è spesso; in ~~questo~~^{contrario} caso bisogna ricorrere alla tabelle di correzione.

6.- Laterolog.

E' utilmente applicato per determinare i valori della resistività in formazioni resistenti e per una esatta investigazione degli strati sottili.

Con questo metodo, basato sull'uso di dispositivi che permettono di inviare nelle formazioni fasci focalizzati di corrente di intensità costante e di spessore ben definito, l'influenza della colonna di fango viene completamente eliminata, come pure l'influenza delle formazioni adiacenti, purchè lo strato in osservazione abbia uno spessore superiore a quello del fascio di corrente.

La determinazione può essere influenzata dal diametro della zona invasa, dalla resistività del filtra

to del fango, in certi casi, come abbiamo detto, dallo spessore dello strato.

In pratica si può dire che, se il diametro della zona invasa non supera di 2 o 3 volte il diametro del pozzo, e se la resistività del filtrato è molto vicina (ma non superiore) alla resistività dell'acqua interstiziale della formazione, il valore della resistività dato dal log è molto vicino al valore della resistività reale della formazione.

E' quindi di grande importanza, quando si usano sonde a corrente focalizzata, che il tipo di fango scelto per la perforazione sia adatto a questi sistemi di log.

Il laterolog è molto adatto per fanghi salini, perchè si ottengono nette definizioni di strato e buoni valori di Rt. Più in generale esso è adatto per formazioni dure, poichè elimina l'effetto del fango e delle formazioni adiacenti.

Se la resistività del fango è troppo elevata, i valori della resistività del log dovranno essere corretti, purchè si conosca la resistività della zona invasa e la profondità di invasione.

E' comunque buona regola, per il laterolog, avere un fango a bassa acqua libera e operare non appena eseguita la perforazione, per evitare un aumento della zona di invasione.

In formazioni a bassa porosità la profondità della zona invasa, a parità di condizioni, è sempre molto più elevata che in formazioni molto porose.

Normalmente sono usati due tipi di sonde laterolog: Laterolog 7, a elettrodi puntiformi, e Laterolog 3, a elettrodi allungati.

7.- Log ad induzione.

Questo sistema non richiede alcun contatto elettrico con le formazioni da investigare e per questo è particolarmente adatto coi fanghi ad olio non conduttivi.

La sonda è costituita da alcune bobine emittenti, alle quali si invia una corrente alternata. Il campo magnetico prodotto da questa corrente induce a sua volta delle correnti di Foucault nel terreno circostante la sonda; queste correnti daranno luogo a un campo magnetico che induce una forza elettromotrice in una bobina ricevente.

Le correnti di Foucault indotte saranno proporzionali alla conduttività del terreno (misurata in mho/m).

Il log a induzione presenta vantaggi di una precisa delimitazione degli strati, di una esatta determinazione della resistività vera in strati sottili e non troppo resistivi e, infine, di poter essere usato in pozzi vuoti, in pozzi perforati con fanghi ad olio, o in pozzi perforati a gas.

Questo sistema è particolarmente adatto per terreni conduttivi, come per esempio in sabbie sciolte o in sabbie argillose.

8.- Log Gamma-ray.

Questo log misura per mezzo di una camera di ionizzazione, le variazioni della radioattività naturale delle formazioni attraversate dalla perforazione. Le variazioni del log corrispondono solitamente a cambiamenti litologici in maniera uguale al PS, dato che le argille sono generalmente più radioattive delle sabbie e dei calcari.

Quando il PS non dà risultati chiari, come avviene, per esempio, nei pozzi perforati con fanghi salati, si applica utilmente il gamma-ray in combinazione con il neutron-log, microlog, microlaterolog, che vengono influenzati poco dalla salinità del fango.

Anche nei pozzi con fanghi a olio e nei pozzi vuoti si usa in gamma-ray, per determinare la litologia delle formazioni, il neutron-log per localizzare le zone porose e l'induzione per le indicazioni sulla resistività delle formazioni.

Il gamma-ray può essere usato pure in pozzi tubati e può servire a determinare i punti da sparare nel casing.

La radioattività delle rocce sedimentarie più note varia secondo questi valori, espressi in "contenuto equivalente di radium in 10^{-12} gr/gr di roccia (praticamente μ g Ra - eq./ton):

Anidrite	0-2
Arenarie e calcari	1-10
Arenarie e calcari argillosi	3-14

Argille fini	5-20
Argille di origine organica, marina	10-80
Bentonite	7-30

Nei pozzi si hanno, solitamente, deflessioni variabili fra i 5 e i 20 $\mu\text{g Ra -eq./ton.}$

I valori del gamma-ray log non dipendono solo dalla radioattività, ma anche dal diametro del foro, dal peso del fango e dallo spessore del casing.

Le letture dovranno quindi essere corrette con le apposite tabelle.

In definitiva, il gamma-ray log servirà ad individuare le argille (massima radioattività), mentre non servirà a differenziare fra di loro le formazioni a debole radioattività, quali sabbie, calcari anidrite e dolomie.

9.- Neutron log.

La curva neutronica misura la radioattività indotta delle formazioni, che dipende essenzialmente dalla concentrazione in ioni idrogeno; poichè esiste una relazione sperimentale fra porosità e radioattività indotta, il neutron-log sarà modificato sia da variazioni del contenuto in idrogeno, sia da variazioni di porosità.

Tenuto in debito conto la presenza o meno del casing e,

fondamentalmente, il diametro del foro, il metodo in esame è il più adatto per il calcolo delle riserve.

La curva registra i "counts per secondo": basta leggere il valore in counts per avere la porosità, tenendo naturalmente conto del diametro del foro. L'interpretazione si fa con l'uso del diagramma apposito. Si ricordi che l'olio e l'acqua danno all'incirca le stesse deflessioni sulla curva del "neutron"; il gas si distingue invece a causa delle diminuzioni del contenuto di idrogeno.

E' da tener presente che la curva registra la porosità, non la permeabilità, per cui le argille risulteranno molte "porose". La presenza di argille nei calcari fa aumentare la "porosità" di questi.

La presenza di argilla può essere controllata sul gamma-ray.

La relazione fra "counts" e porosità è sperimentale; trattandosi di un campo nuovo, conviene quindi tararlo con il confronto con le porosità misurate in laboratorio, specialmente per quanto riguarda la scelta delle curve del diametro del foro.

Il neutron log può essere usato sia in foro scoperto che tubato; il tipo di fango non lo influenza considerevolmente; esso può essere usato per determinare l'indice di porosità, come pure per riconoscere formazioni a gas in formazioni pulite e uniformemente porose; la presenza di gas può essere suggerita da una bassa porosità del neutron

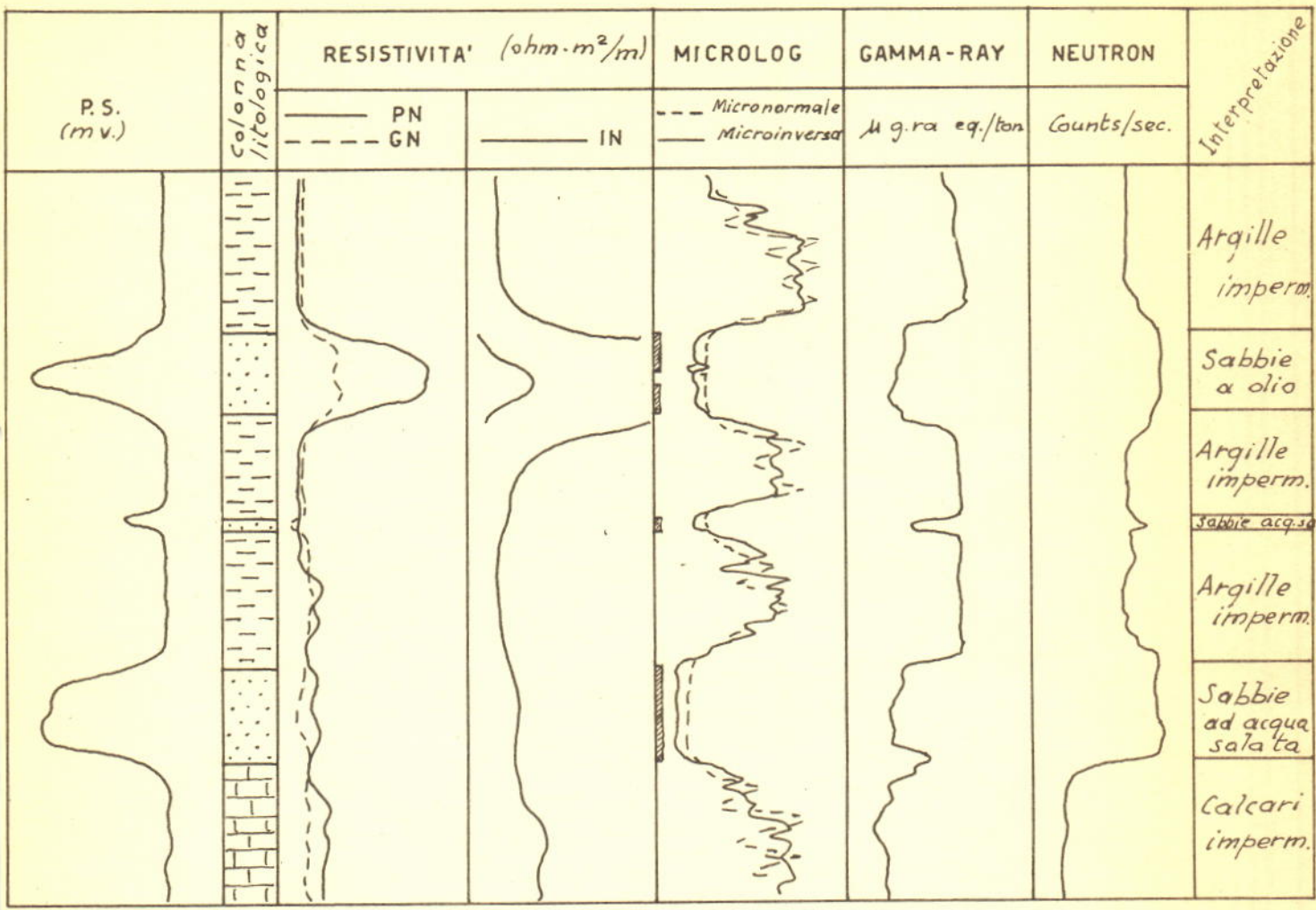
log, dove altri log o l'esame delle carote abbiano dato altri valori di porosità.

P.F. Barnaba

Gubbio, 16.4.1957

Appunti ricavati da:

- C. Sarchi : "Carotaggi elettrici e radioattivi".
Agip Mineraria - S. Donato M. febr. 1957
- G. Fattorossi: "Carotaggio neutronico"
Somicem - Pescara 4.3.1956
- G. Doll : "The microlog" - Journal Petr. Techn.-1950
- H. Guyod : "Electric, caliper and temperature logging"
The Oil Weekly - 1944-46
- Schlumberger: "Log Interpretation Charts" - 1955



↑ Linea sabbie
 ↑ Linea argille
 ↑ PNe GN accostate = argille
 ↑ alta resist. per olio
 ↑ Resist. > 30 Rm
 ↑ Argille
 ↑ Terreni ad alta porosità e argille

Esempio schematico e ideale di carotaggio elettrico e radioattivo.