

LOG
51A
1960

DOCUMENTO SCHLUBERGER N° 8

Spitaleri

INTRODUZIONE ALLO STUDIO DEI
CAROTAGGI ELETTRICI

Traduzione dall'inglese di H. Bagnone - C. Guarnieri
ad uso dei dipendenti del Servizio Geologico

S. Donato N. 1/6/1960

I N D I C E

INTRODUZIONE

Carotaggi.	Pag. 4
Classificazione dei metodi di resistività.	" 7
Attrezzatura di campagna.	" 9
Definizione di porosità, saturazione e permeabilità.	" 10

C A P I T O L O I °

RESISTIVITA' DELLE FORMAZIONI E CONCETTI

FONDAMENTALI DI INTERPRETAZIONE

A) Relazione fra resistività delle formazioni, salinità delle acque, struttura della roccia e contenuto in fluidi. . . .	Pag. 18
- Conduzione dell'elettricità attraverso le rocce. . . .	" 18
- Acqua di formazione.	" 19
- Relazioni della salinità dell'acqua con la salinità e la temperatura.	" 19
- Fattore di formazione.	" 22
- Relazioni fra resistività di formazione e saturaz. . . .	" 25
- Resistività e permeabilità delle formazioni	" 27
- Scala dei valori di resistività	
Classificazione delle formazioni.	" 27
B) Distribuzione dei fluidi e delle resistività di uno strato permeabile invaso dal filtrato del fango	" 29
C) Formazioni con porosità intergranulare uniforme.	"
- Strati contenenti solo acqua di formazione.	" 30
- Strati contenenti olio o gas ed acque.	" 31
- Fango di perforazione e pannello.	" 33

- La zona invasa	Fag.	33
- L'anello.	"	35
- La zona incontaminata.	"	36

D) Formazioni non uniformi e fessurate

a) Fattori da determinare per le interpretazioni quantitative dei carotaggi elettrici.	"	38
b) Raggio di investigazione.	"	42
c) Anisotropia delle formazioni sedimentarie	"	43

C A P I T O L O II°

POTENZIALE SPONTANEO (PS) NEI POZZI

Origine del PS	"	45
Potenziale di membrana	"	48
Potenziale di contatto di liquidi.	"	49
Circolazione delle correnti del PS	"	52
Il PS statico (formazioni pulite)	"	53
Effetti delle argille interstiziali sul PS		
Il PS pseudostatico.	"	55
Fattori che influenzano la forma e l'ampiezza dei "PEAKS" del PS	"	57
Formazioni tenere	"	58
Formazioni dure.	"	60
Determinazione di R_w dal log del PS.	"	62
Determinazione del PS statico.	"	63
R_w del PS statico.	"	65
Esempi pratici	"	68

C A P I T O L O III°

IL LOG INDUTTIVO

Generalità.	"	70
- Scale del log induttivo.	"	72
- Fattore geometrico	"	73

Interpretazione

- Localizzazione degli strati e determinazione dei loro confini.	"	77
- Influenza della colonna del fango	"	78
- Influenza dello spessore degli strati	"	79
- Influenza dell'invasione	"	82
- Esempi pratici	"	85
Conclusioni	"	87

CAPITOLO IV°

METODI CONVENZIONALI DI RESISTIVITA'

Nozioni generali

- Le sorgenti di corrente in un mezzo omogeneo ed isotropo.	"	89
- Il dispositivo normale.	"	89
- Il dispositivo "laterale" o inverso	"	91
- Resistività apparente	"	92
- Punti di misura e spaziatura per il dispositivo normale e laterale.	"	92
- Combinazione degli elettrodi per il carotaggio.	"	93

Interpretazione

- Proprietà dei dispositivi normali ed inversi (dati di laboratorio).	"	95
- Curve di scarto per la resistività	"	98
- Caratteristiche delle curve normali e inverse nelle serie argillo-sabbiose.	"	100
- Caratteristiche delle curve normali e laterali in formazioni dure.	"	102
- La sonda per calcari	"	104

CAPITOLO V°

IL LATEROLOG

Nozioni generali	Pag.	108
Interpretazione		
- Influenza dello spessore degli strati	"	111
- Influenza della zona invasa	"	113
- Esempi pratici	"	115
Conclusioni	"	116

CAPITOLO VI°

I MICRODISPOSITIVI

<u>Parte 1° - Il Microlog</u>	"	117
Nozioni generali	"	118
Identificazione delle diverse formazioni		
- Strati porosi e permeabili	"	120
- Zone compatte	"	122
- Argille	"	122
- Foro scavernato	"	123
- Esempi pratici	"	124
Determinazione di R_{200} dal Microlog	"	127
Conclusioni	"	128
<u>Parte 2° - Il Microlaterolog</u>		
Nozioni generali	"	130
Interpretazione ed applicazioni		
- Esempi pratici	"	134
Conclusioni	"	135

CAPITOLO VII°

CAROTAGGIO RADIOATTIVO

Introduzione

Natura e proprietà dei raggi gamma	"	136
--	---	-----

Parte 1° - Gamma Ray Logging - Nozioni generali

- Proprietà fondamentali ed usi	Pag. 138
- Raggi gamma naturali	" 139
- L'unità di radioattività	" 140
- Rivelazione dei raggi gamma naturali	" 140
- Fluttuazioni statistiche	" 142
- Operazioni di campagna	" 144
- Taratura	" 146

Interpretazione

- Distinzioni delle piccole escursioni reali dalle variazioni statistiche	" 147
- Forma della curva in corrispondenza delle superfici di strato.	" 148
- Esempi pratici	" 149
- Determinazione della radioattività vera. Curve di scarto.	" 150

Applicazioni	" 151
------------------------	-------

Parte 2° - "Neutron logging"

Nozioni generali

- Principio del metodo Gamma-Neutroni	" 154
- Operazioni di campagna.	" 157
- Taratura	" 158

Interpretazione

- Interpretazione qualitativa	" 159
- Influenza delle condizioni del foro. Carte di interpret." 160	
- Influenza dei confini di formazione e dello spessore degli strati	" 161
- Investigazione radiale	" 161

Applicazioni	" 163
------------------------	-------

CAPITOLO VIII°

SONIC - LOG

Nozioni generali

- Principio di funzionamento.	Pag. 166
- Equipaggiamento e tecnica di campagna	" 168
Interpretazione	" 168
- Esempi pratici.	" 170
Conclusioni	" 170

CAPITOLO IX°

APPLICAZIONI PRATICHE DEI LOGS ELETTRICI

RADIOATTIVI E SONICI

Introduzione	" 172
A) Localizzazione e delimitazione degli strati.	" 174
B) Correlazioni	" 177
C) Determinazioni di porosità	" 178
Principio di determinazione della porosità dei carotaggi elettrici.	" 178
1) Formazioni pulite	" 178
2) Formazioni argillose	" 179
Applicazioni del microlog	" 179
" del microlaterolog	" 181
" della sonda per calcari	" 181
" della Piccola Normale	" 182
" del metodo delle montagne zoccolosa	" 184
" del Neutro Log	" 185
" del Sonic Log	" 186
D) Determinazione della saturazione	" 187
- Formazioni pulite	" 187
- Formazioni argillose	" 189
- Interpretazione del log elettrico induttivo con l'uso della carta D-12	" 194

- Applicazione dei carotaggi convenzionali di resistività	Pag. 197
- Valori di saturazione ottenuti con il metodo delle Montagne Rocciose	" 199
- Registrazioni in fanghi salati.	" 200
E) Miscellanea	
- Determinazione del contatto olio/acqua.	" 202
- Determinazione del contatto gas/olio	" 203
- Indice di massima produttività in olio (in formazioni aventi porosità intergranulare)	" 203
- Valutazione della permeabilità	" 204
- Determinazione della profondità di invasione in strati ad acqua	" 205
- Ricerche di acqua	" 205
- Localizzazione di livelli di lignite e di carbone	" 206
- Localizzazione di strati radioattivi.	" 207
- Prospezioni in pozzi perforati a gas o ad olio.	" 207
- Determinazioni di profondità	" 208

C A P I T O L O X°

CAMPIONATURA DI PARETE

Introduzione	" 209
Carote	" 210
Fluidi	" 213
Tester di formazioni	" 213
Campionatore per fluidi	" 215
Applicazioni	" 215

C A P I T O L O XI°

LA MISURA CONTINUA DELLA INCLINAZIONE E DELLA DEVIAZIONE

Nozioni generali	" 217
Misure di inclinazione	" 219

Continuous Dipmeter

- Registratore continuo di pendenze
- Teleclinometro (C D M.T) " 223
- Registratore continuo di pendenze
- Poteclinometro (C D M - P) " 227
- Scelta degli intervalli da registrare " 230
- Interpretazione e precisione dei risultati. " 231
- Riassunto delle caratteristiche del "Dip-meter"
continuo. " 233

Applicazioni

- Misure di deviazione " 235

C A P I T O L O XII°

DIAMETRIA

- Il calibro convenzionale " 239
- Il microcaliper " 240

C A P I T O L O XIII°

TERMOMETRIE

- Introduzione " 242
- Attrezzatura e procedimento " 243
- Applicazioni " 243
 - Termometrie effettuate dopo la cementazione " 243
 - Localizzazione delle perdite di circolazione " 244
 - Prospezioni in pozzi produttivi a gas " 244
 - Applicazioni varie " 247

P R E F A Z I O N E

Il carotaggio elettrico fu introdotto nell'industria petrolifera oltre un secolo fa. Da allora molte tecniche di carotaggio, nuove e perfezionate, sono state sviluppate ed introdotte nell'uso generale.

Mentre la conoscenza dei carotaggi progrediva, la tecnica della interpretazione dei dati in funzione dei parametri del pozzo, si sviluppava sempre di più.

Oggi analisi dettagliate di carotaggi elettrici e radioattivi accuratamente selezionate ci danno modo di ottenere valori di saturazione e di porosità e indicazioni di permeabilità.

Sono stati scritti centinaia di opuscoli tecnici per descrivere i numerosi metodi di carotaggio, le loro applicazioni e le loro interpretazioni. Si ha così una letteratura sovrabbondante che però è spesso di poca utilità per il lettore. Di conseguenza si è sentita per lunghi anni la mancanza di una pratica rassegna di tutti i metodi di carotaggio.

Questo "Documento n° 8" della serie della Schlumberger ci offre una tale rassegna aggiornata. I vari servizi di carotaggio offerti dalla Schlumberger sono discussi in alcuni dettagli unitamente ai metodi essenziali di interpretazione.

Questa discussione è tenuta nel modo più semplice e più chiaro possibile e con l'introduzione solo della matematica indispensabile.

Si ^{va}spesa che questo documento sia un utile manuale per tutti coloro che nell'industria si interessano di carotaggi.

La bibliografia fornita alla fine di ogni capitolo sarà utile per i lettori interessati ad argomenti che vanno oltre lo scopo della presente pubblicazione.

Riferimento al " LOG INTERPRETATION CHART "

In questo documento si farà riferimento a varie carte di nomogrammi, identificati da una lettera maiuscola, un trattino ed un numero.

Es. A-6; Carta D-4; Nomogramma C-10; Nomogramma C-12 ecc.

Tali carte o nomogrammi sono contenuti nel libretto "Log interpretation charts" della "Schlumberger Well Surveying Corporation" disponibili, a richiesta, presso gli Schlumberger Headquarters in Houston, Texas.

INTRODUZIONE

0-1 - CAROTAGGIO

Per "Carotaggio" (Well Logging) si intende ogni operazione in cui alcuni dati caratteristici delle formazioni interessate da un sondaggio sono registrati in funzione della profondità.

Questa registrazione si chiama "log".

Il log di un pozzo, per esempio, può essere semplicemente un grafico in cui sono riportate sintetiche descrizioni di carote in corrispondenza delle profondità a cui queste carote sono state prese.

Un log può essere anche un diagramma in cui sono riportate rispetto alla profondità le varie caratteristiche di queste carote, come ad es. la porosità, la permeabilità, l'olio residuo ecc.

Il carotaggio elettrico è uno dei rami di carotaggio più importanti. Esso consiste essenzialmente nella registrazione della "resistività" (o della sua reciproca la "conduttività") delle formazioni del sottosuolo, e nella registrazione dei "potenziali spontanei" generati nel foro di sonda.

Il carotaggio elettrico è stato introdotto nell'industria petrolifera più di 25 anni fa, ed è stato accettato come uno dei mezzi più efficienti per la ricerca e per la produzione del petrolio e gas.

Altre importanti varietà dei carotaggi misurano la radioattività naturale delle formazioni (Gamma Ray Logging) e gli effetti secondari dovuti al bombardamento della formazione mediante neutroni (Neutron Logging).

Questo "carotaggio radioattivo" (Radioactivity Logging) è più recente e sebbene meno universalmente impiegato del carotaggio elettrico, si è dimostrato estremamente utile.

INDUCTION-ELECTRICAL LOG

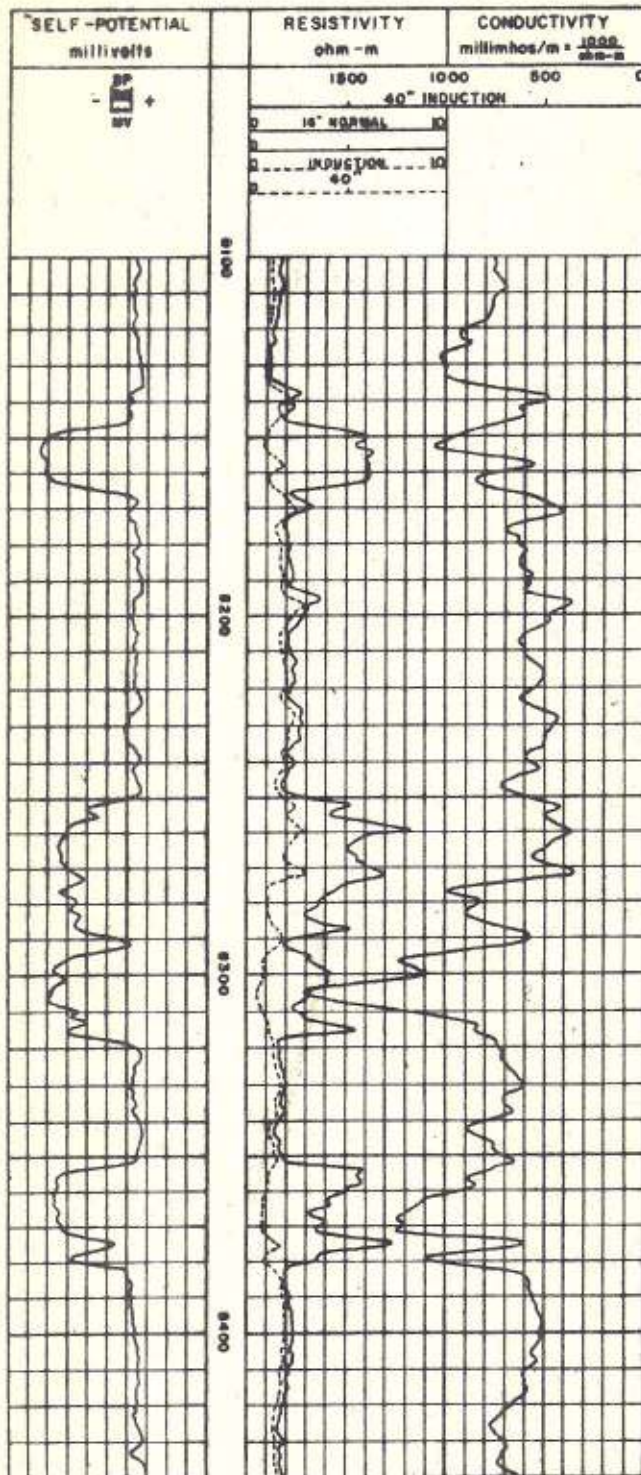


FIG. 0-1a

GAMMA RAY-NEUTRON LOG

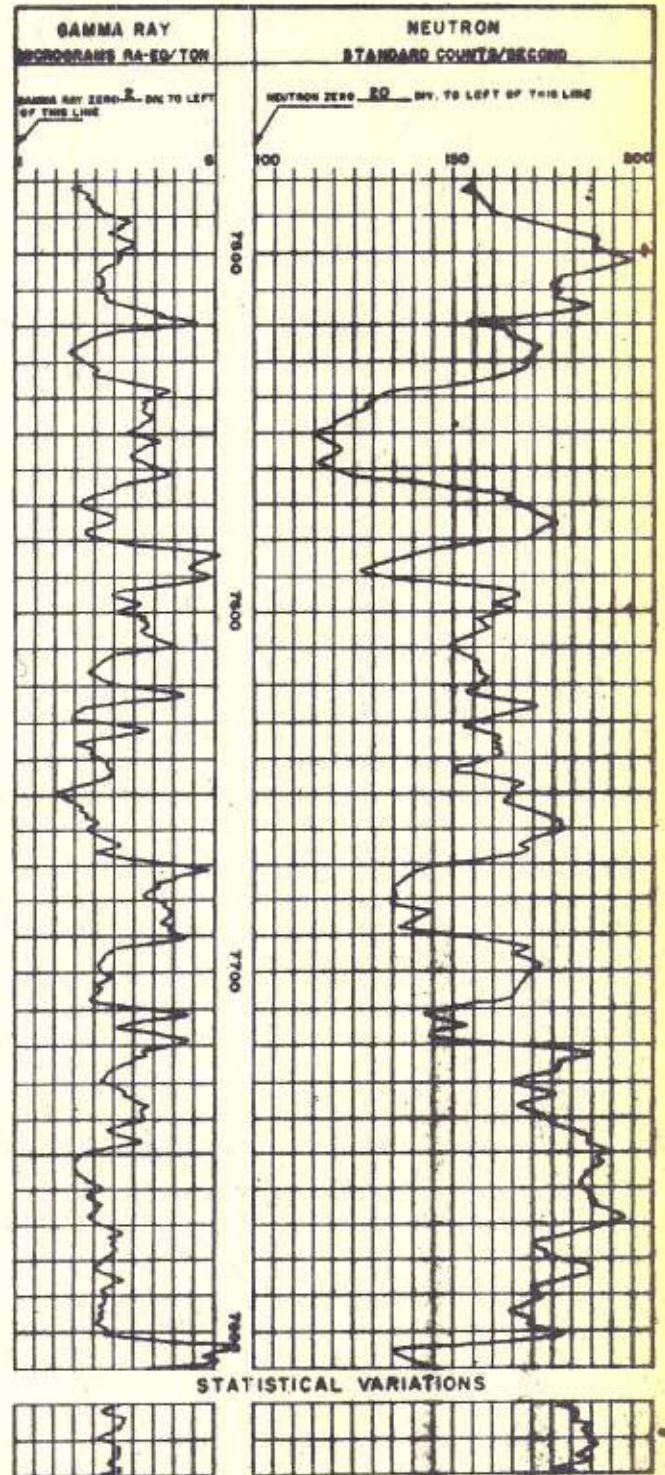


FIG. 0-1b

Di recente è stato adottato un nuovo tipo di carotaggio che dà la registrazione della velocità del suono attraverso le formazioni.

Con il carotaggio elettrico, radioattivo e sonico (log sonico) i corrispondenti parametri sono registrati in situ per mezzo di strumenti appositi introdotti nel pozzo e chiamati "sonde" e sono continuamente registrati in superficie.

Nel carotaggio elettrico e sonico le misure vengono effettuate solo nella parte non tubata del sondaggio. Con il carotaggio radioattivo le misure possono essere registrate anche nel foro tubato.

E' diventato pratica usuale, quando un pozzo è stato perforato, e a intervalli durante la perforazione, fare carotaggi elettrici o radioattivi per avere, prima possibile, una registrazione completa dei dati caratteristici delle formazioni interessate dal sondaggio.

Questa registrazione è di utilità immediata per la correlazione geologica degli strati, ed anche per il riconoscimento e la valutazione di eventuali orizzonti produttivi.

Le interpretazioni tratte dai carotaggi elettrici e/o radioattivi possono al tempo stesso essere integrate dai campioni delle formazioni prelevati dalle pareti del foro, o anche da ricerche di altro genere che possono essere praticate nei pozzi (prove di verticalità, misura della direzione d'inclinazione del pozzo, termometrie, prove di strato ecc.).

Allo stato presente della tecnica dei carotaggi elettrici in aggiunta alla curva del PS o del potenziale spontaneo, possono essere registrate molti altri tipi di curve di resistività o "logs". Questi logs corrispondono all'uso di diversi dispositivi per misurare la conduttività o la resistività e sono chiamati "log induttivo", "log convenzionale" (normale o laterale), "laterolog", "microlog", ecc.

Un moderno log elettrico tipico si presenta come è illustrato in fig. 0-1a; a sinistra si ha la curva del PS, a destra si hanno le curve di conduttività e di resistività per l'Induzione e per la Grande Normale.

Ciascuna curva presenta una serie di "peaks" (punte), escursioni e zone piatte, corrispondenti alle diverse formazioni attraversate dal sondaggio.

Come vedremo nei prossimi capitoli, i logs registrati con altri dispositivi di misura per la resistività hanno un andamento generale pressochè simile, nonostante che i metodi differiscano fra loro sostanzialmente, sia per quanto concerne i principi fondamentali, sia per la loro esecuzione.

La fig. 0-1b mostra un tipico log radioattivo, con la curva dei gamma-ray, a sinistra e la curva dei neutroni a destra.

0-2 - USO DEI LOGS

Le informazioni generali fornite dai logs sono essenzialmente le seguenti:

1) Differenziazione fra argille, rocce dure e strati permeabili. Delimitazione degli strati e correlazioni. In base a questi dati si può delineare l'andamento strutturale e si possono determinare gli spessori e le estensioni laterali delle riserve potenziali.

2) Nella maggior parte dei casi, discriminazione qualitativa fra strati impregnati di olio o di gas e strati impregnati di acqua, così pure ubicazioni del contatto acqua-olio.

Nei casi favorevoli, valutazione quantitativa della porosità e della saturazione in acqua. Di conseguenza i logs sono di grande aiuto per una accurata relazione degli intervalli su cui effettuare le prove

per la produzione e per il calcolo delle riserve.

Essi sono inoltre utili per la valutazione della produttività del pozzo.

Gli usi dei logs saranno descritti in modo più dettagliato nei seguenti capitoli.

0-3 - CLASSIFICAZIONE DEI METODI DI RESISTIVITA'

I metodi di resistività possono dividersi in due gruppi principali, secondo che le misure interessano un grande o piccolo volume di materiale.

-A- I sistemi di misura del primo gruppo possono talora servire per lo studio di un volume relativamente grande di materiale intorno al sondaggio da circa 10 a 100 piedi cubici (da 0,283 a 2,83 mc) o più.

I logs corrispondenti sono usati per la determinazione delle formazioni, per correlazioni e per l'analisi qualitativa e quantitativa delle riserve, in relazione alla saturazione in fluidi ed alla porosità.

Questo gruppo include il log induttivo ed i sistemi in cui si usano elettrodi (dispositivi convenzionali e i laterolog).

Il log induttivo si vale delle correnti indotte nelle formazioni circostanti alla sonda che è calata nel pozzo.

Per la particolare disposizione della bobina montata nella sonda, l'indagine è ristretta ad una sottile porzione orizzontale di formazione, di spessore limitato. Gli effetti della colonna del fango e degli strati adiacenti sono ridotti al minimo e, in molti casi, sono resi trascurabili.

Con l'equipaggiamento attuale il log induttivo dà i migliori risultati in formazioni incoerenti o moderatamente consolidate, perforate con fango dolce, ma è in genere più attendibile del log elettrico convenzionale anche nelle formazioni dure.

La combinazione del log induttivo, piccola normale e curva del PS viene ora usata sempre più frequentemente, con fango dolce, al posto del log convenzionale. Inoltre il metodo a induzione può essere usato in pozzi perforati con fango ad olio ed anche a secco.

I sistemi convenzionali (normali e laterali) impiegano elettrodi da cui la corrente elettrica fluisce nelle formazioni e fra cui viene misurato il potenziale.

Il pozzo deve contenere liquidi che permettano il passaggio della corrente (ad es. fango a base di acqua).

Il percorso della corrente usata per le misure non sottostà ad altre restrizioni all'infuori della disposizione degli elettrodi fra cui fluisce la corrente.

Di conseguenza le misure sono influenzate, non solo dalla presenza dello strato situato all'altezza del dispositivo di misure, ma anche dalla colonna del fango e, se lo spessore dello strato non è grande, dalle formazioni al di sopra e al di sotto dello strato stesso.

L'influenza relativa della colonna del fango e delle formazioni adiacenti dipende:

- a) dalla configurazione fisica del sistema di elettrodi;
- b) dalla configurazione geometrica e dalle rispettive resistività dei mezzi interessati dalle misure.

Quindi il sistema convenzionale non è conveniente per uno studio corretto di strati sottili, specialmente quando ci si trova in presenza di rocce dure in cui la differenza di resistività fra i diversi strati e/o fra le formazioni e il fango, è notevole.

Anche per il Laterolog si usano elettrodi, ma la corrente immessa nelle formazioni è costretta a passare in una porzione orizzontale di terreno, di spessore verticale limitato. Esso è quindi più adatto per lo studio di strati sottili.

Il Laterolog ha completamente sostituiti i sistemi convenzionali nelle formazioni dure perforate con fango molto salato.

-B- I sistemi del secondo gruppo sono progettati per lo studio di un piccolo volume di materiale (pochi pollici cubici) immediatamente dietro le pareti del pozzo ed in modo da eliminare praticamente gli effetti della colonna del fango sulle misure.

Con questi sistemi quindi la delimitazione degli strati è molto più accurata e molto più dettagliata che non con i dispositivi del primo gruppo, anche quando, con questi ultimi si usi un sistema di focalizzazione.

Con il " Microlog " le misure sono sensibilmente influenzate dalla presenza del pannello che rende possibile la localizzazione degli strati permeabili e l'esatta determinazione dei loro confini.

Con il " Microlaterolog " viene applicato un sistema di focalizzazione, in modo da rendere minima l'influenza del pannello, e anche da eliminarla del tutto quando il pannello sia abbastanza sottile.

In queste condizioni le misure danno valori molto precisi e uguali alla resistività della zona spazzata da filtrato del fango, dietro la ^{parete} parete del foro: questo fornisce dei dati per la determinazione del fattore di formazione e quindi della porosità.

Quando la porosità della formazione è abbastanza elevata, il fattore di formazione e la porosità possono anche essere determinati per mezzo del Microlog, con l'aiuto di appositi carte di correzione.

O-4 - ATTREZZATURA DA CAMPAGNA

L'autocarro Schlumberger contiene un grosso argano con del cavo, alcune sonde, l'equipaggiamento per servizi ausiliari, dei generatori di corrente alternata e corrente continua e un registratore automatico

fotografico in cui un meccanismo di movimento del film è accoppiato con gli ingranaggi di moto del cavo. Sugli autocarri vi è inoltre la possibilità di sviluppare e stampare rapidamente i film.

Le sonde variano dal semplice cilindro con applicati degli elettrodi piani, come nel caso del comune log elettrico, ad involucri contenenti complicate apparecchiature elettroniche chiuse in custodia a prova di pressione, per il log induttivo, il Gamma Ray, il log Neutronico e simili.

Il registratore contiene appositi galvanometri che riportano i loro spostamenti (proporzionali ai potenziali che misurano) su di una pellicola mobile, mediante raggi di luce riflessi dai loro specchietti.

Un "cambio" nel raccordo cavo-film permette una scelta di diverse scale di profondità. Cento piedi di foro possono essere registrati in 1", 2", 25" e, per il clinometro, 60" di film.

Durante la registrazione si usano 6 cavi conduttori corazzati con 9 galvanometri registratori.

Questa attrezzatura ha dato ottimi risultati alle più alte temperature ed alle più forti profondità dei pozzi sinora perforati.

Le sonde standard possono essere usate fino a diametri di circa 5" (cm. 12,70). Per fori più piccoli sono usate sonde speciali.

Inoltre, per il log neutronico e per il Gamma Ray, le sonde sono fatte in modo da poter scorrere anche dentro il tubing.

0-5 - DEFINIZIONI DI POROSITA', SATURAZIONE E PERMEABILITA'

La parte finale dell'introduzione sarà dedicata a definizioni abbastanza complete e discussioni di due dei parametri essenziali delle rocce serbatoio: porosità e saturazione in acqua (o in olio).

Queste sono proprietà che possono essere, in molti casi, determinate con metodi di carotaggio.

Sarà trattata anche la permeabilità, sebbene solo di rado, in casi particolarmente favorevoli, si possa determinarne l'effettivo valore mediante l'uso dei logs elettrici o radioattivi.

Porosità - È la frazione del volume totale di un campione che è occupata da pori o vuoti.

Una sostanza compatta, uniforme come un pezzo di vetro, ha porosità zero; una spugna ha invece un'alta porosità.

Si parla di porosità effettiva^{di} un campione quando i suoi pori o vuoti sono intercomunicanti in modo che un fluido può passare attraverso al campione stesso.

La porosità totale o porosità di volume di un campione comprende non solo i pori che sono intercomunicanti, ma anche quelli isolati, circondati da materiale cementante.

L'olio o il gas racchiuso in pori isolati non possono essere estratti nel corso di una normale produzione, e così sono inutilizzabili e privi di interesse commerciale. Perciò l'unica che interessa realmente misurare è la porosità effettiva, e nei seguenti capitoli, quando non sia altrimenti specificato, il termine "porosità" deve essere inteso nel senso di "porosità effettiva".

Le porosità delle formazioni del sottosuolo possono variare ampiamente. Calcari compatti, ed anidriti possono avere porosità praticamente nulla; arenarie ben consolidate, porosità dell'ordine del 10-15%; sabbie incoerenti fino al 30% di porosità e più. Scisti ed argille possono contenere liquidi per oltre il 40% del loro volume, ma i loro granuli sono così fini da rendere praticamente impossibile il flusso dei fluidi. In pratica quindi, i loro vuoti non sono intercomunicanti, e la loro porosità non è effettiva.

Le porosità si possono anche classificare secondo la disposizione fisica del materiale che circonda i pori.

Così in una sabbia pulita i pori sono costituiti dagli interstizi fra granulo e granulo; tale porosità si chiama "intergranulare" ed è insita nelle formazioni sabbiose sin dal tempo del loro deposito.

Porosità vacuolari e secondarie possono venire provocate, nelle rocce, dalla azione di acque di strato, in tempi posteriori alla sedimentazione. Ad es. acque di percolazione debolmente acide possono creare ed allargare pori e canali di comunicazione in formazioni calcaree e possono sciogliere conchiglie di piccoli crostacei, presenti negli strati, formando dei vuoti. Di contro, acque di percolazione ricche di minerale, possono formare dei depositi che isolano alcuni dei pori o dei canali presenti in una formazione, riducendone la porosità.

Un altro tipo importante di porosità secondaria dovuta ad azione di acqua di percolazione, risulta dalla sostituzione di calcite mediante dolomite. Acque ricche di sali di magnesio possono trasudare attraverso la calcite operando una graduale sostituzione del calcio col magnesio. Poiché la sostituzione avviene atomo per atomo, o molecola per molecola ed il volume della molecola di dolomite è minore di circa il 12% rispetto a quello della molecola di calcite, ne risulta una diminuzione in volume della roccia con un conseguente aumento del volume dei pori.

Una formazione può anche essere soggetta a sforzi che danno come risultato una rete di fratture o fessure che possono contenere dei fluidi. In genere, comunque, il volume effettivo delle fessure è piccolo e, se il materiale circostante è compatto, la formazione ha in genere una porosità effettiva bassa.

In realtà in un dato lasso di tempo possono aver luogo contemporaneamente più di uno dei processi suddetti, cosicchè la porosità di

una formazione può avere un'origine complessa. Nondimeno, qualunque sia la causa dei pori o vuoti o fessure e comunque essi siano collegati, la definizione di porosità effettiva rimane valida.

Riassumendo, la porosità è il rapporto fra il volume dei pori interconnettenti V_p e il volume totale del campione V . Essa è sempre minore dell'unità, e, essendo un rapporto, è adimensionale. Si esprime generalmente in percentuale ed il suo simbolo è il fi greco (ϕ). Così ϕ (in percentuale) = $100 \times V_p/V$.

Saturazione - La saturazione di una formazione è la frazione del suo volume dei pori effettivo che è occupata dal fluido considerato. Nella pratica dei logs elettrici si usa considerare liquido di saturazione l'acqua di formazione perché essa è una buona conduttrice della corrente elettrica. La saturazione in acqua, allora, è la frazione del volume dei pori contenente acqua di formazione. Se nei pori di una formazione non esiste che acqua, in essa si ha saturazione in acqua al 100%, cioè il volume dell'acqua uguaglia il volume dei pori.

In una roccia serbatoio esiste in molti casi una cosiddetta tavola d'acqua: essa è un livello al di sotto del quale la roccia è completamente impregnata d'acqua. Al di sopra di questo livello la saturazione in acqua decresce fino a raggiungere un valore minimo.

La saturazione in acqua di una formazione può variare dal 100% a valori molto piccoli, ma non è mai zero.

Per quanto una sabbia possa essere ricca in olio o gas, è sempre presente in essa una piccola quantità di acqua capillare che non può essere spiazzata dall'olio; così, anche in una sabbia siffatta, la saturazione in acqua non è mai zero.

Questa saturazione è in genere detta "irriducibile in acqua". Parimenti, da una sabbia impregnata d'olio è impossibile spiazzare tutto l'olio con i sistemi ordinari di produzione, ma ne ri sono

sempre una parte imprigionata nel volume dei pori e questa saturazione in olio è chiamata Saturazione Residuale in Olio (ROS).

Quando si effettua un carotaggio meccanico in una sabbia ad olio, la carota è soggetta ad invasione da parte del filtrato del fango. Poi durante il tragitto fino alla superficie, la pressione si riduce da alcune migliaia di P.S.I. (libbre per pollice quadrato) a quella atmosferica, i gas disciolti nell'olio si espandono e vanno perduti, come pure va perduta una parte dell'olio. Alla fine il contenuto in fluidi della carota, pur assomigliando a quello originario della formazione, ne è assolutamente diverso.

Queste considerazioni possono applicarsi anche alle carote di parete, prelevate nella formazione subito dietro la parete del pozzo, ed anche esse soggette ad invasione e decompressione.

Riassumendo, se V_w è il volume di acqua che occupa il volume dei pori V_p di un campione, la saturazione in acqua è V_w/V_p .

Se in una carota sono presenti acqua ed olio, la saturazione in olio è $(V_p - V_w)/V_p$, oppure $1 - V_w/V_p$.

La saturazione è adimensionale in quanto è un rapporto ed il suo simbolo è " S ".

Per specificare il tipo di saturazione considerata si usa un indice. Così S_w indica la saturazione in acqua; S_o la saturazione in olio, ed è $S_o = 1 - S_w$ se nei pori coesistono solo acqua ed olio.

La saturazione si esprime generalmente in percentuale; così è S_w (in percentuale) = $100 V_w/V_p$.

Permeabilità

È la misura della facilità con cui una formazione permette ai fluidi di attraversarla.

Per un dato campione di roccia e per ogni fluido omogeneo, la per-

neabilità sarà quindi una costante a condizione che il fluido non interagisca con la roccia stessa.

L'unità di permeabilità è il " darcy " (°) che è molto grande, cosicchè si usa in genere la sua millesima parte in millidarcy (md). Il simbolo della permeabilità è " K ".

Per essere completamente permeabile una roccia deve avere dei pori intercomunicanti, sia capillari, sia vere e proprie fratture. In sostanza deve avere della porosità effettiva.

Esistono delle relazioni, seppure non rigorose, fra i valori della porosità e quelli della permeabilità. A maggiore porosità in genere corrisponde maggiore permeabilità, ma questa è una regola che è ben lungi dall'esser sempre valida.

Alcune sabbie possono avere una grande porosità effettiva, ma i loro granuli possono essere così piccoli che i percorsi disponibili per i movimenti di fluidi all'interno delle sabbie stesse sono molto ristretti e tortuosi. La loro permeabilità allora può essere molto bassa.

Altre formazioni, come i calcari, possono essere costituiti da roccia compatta interessata da poche fessure, strette ma molto estese in profondità che possono venire incontrate dal foro di sonda.

La porosità di una siffatta formazione sarà sicuramente molto bassa, ma la permeabilità di una fessura può essere enorme. È stato infatti dimostrato (°°) che una fessura di 0,05 pollici ha una permeabilità equivalente a circa 550 piedi di sabbia di 1000 millidarcies di permeabilità.

(°) Un darcy è quella permeabilità che permette il flusso di un centimetro cubo al secondo di un fluido avente la viscosità di un centipoise attraverso un'area di un cm² sotto un gradiente di pressione di un'atmosfera per centimetro.

(°°) W.J. Baker: Flow in fissured formations - IV congresso mondiale del petrolio. Roma - Italia 1955.

Perciò i calcari fessurati possono avere porosità molto basse, unitamente a permeabilità altissime. Per permeabilità effettiva si intende la permeabilità di una formazione rispetto ad un fluido, in presenza di un altro fluido immiscibile col primo.

Esso non dipende solo dalla roccia, ma anche dalle proporzioni relative dei due (o più) fluidi presenti nei pori.

Supponiamo ad esempio che un campione di roccia contenga una miscela di olio e acqua in parti uguali e che da un lato di questo campione si immetta acqua sotto pressione. Dall'altro lato uscirà dapprima una miscela di olio e acqua, ma via via che l'olio viene spinto fuori, la saturazione in acqua del campione cresce e così pure accade per la sua permeabilità all'acqua.

Dopo un certo tempo non uscirà più olio dal campione, ma solo acqua. A questo punto la quantità di olio rimasto nei pori che non può essere rimosso dal flusso dell'acqua, costituisce la saturazione residua in olio. Inoltre a questo punto la permeabilità effettiva all'acqua del campione (K_w) diventa costante ed assume un valore minore della permeabilità del campione rispetto allo stesso fluido omogeneo.

Analogamente, date le stesse condizioni iniziali del campione già descritto, qualora vi si immetta da una estremità olio sotto pressione, la sua permeabilità effettiva all'olio aumenterà con la sua saturazione in olio. Ad un certo punto dal campione uscirà solo olio senza più traccia di acqua e l'acqua che allora sarà rimasta nel campione rappresenterà la saturazione irriducibile in acqua. La permeabilità effettiva all'olio del campione (K_o) diventerà ora una costante, avente un valore minore della permeabilità K rispetto allo stesso fluido omogeneo.

La permeabilità effettiva ha le stesse unità della permeabilità ed i fluidi considerati sono identificati dagli indici: "o" per olio, "w" per acqua, "g" per gas. Da cui si ha K_o ; K_w ; K_g .

La permeabilità relativa ad un particolare fluido, quando sono pre-

senza diversi fluidi, è il rapporto della permeabilità effettiva per quel fluido rispetto alla permeabilità del campione per lo stesso fluido omogeneo. In altre parole, la permeabilità relativa è uguale a k_w/k per l'acqua, k_o/k per l'olio. Appare evidente che la permeabilità relativa varia fra zero ed uno, in quanto si tratta di un rapporto è adimensionale ed è usualmente espresso in percentuale.

Queste dunque sono le definizioni dei termini principali di cui è necessario avere una chiara nozione. Ci sono molti altri simboli usati nei carotaggi elettrici che sono scritti necessariamente in forma abbreviata, come R_o , R_t , ecc.

Questi verranno definiti non appena avremo occasione di parlarne, nel prossimo capitolo e saranno inoltre riuniti, con le loro definizioni in una tabella alla fine della presente pubblicazione.

C A P I T O L O P R I M O

RESISTIVITA' DELLE FORMAZIONI E CONCETTI FONDAMENTALI D'INTERPRETAZIONE

- A -

Relazioni fra resistività delle formazioni, salinità delle acque, struttura della roccia e contenuto in fluido.

1 - 1 Conduzione dell'elettricità attraverso le rocce

L'elettricità può passare attraverso le formazioni del terreno grazie all'acqua mineralizzata (di formazione) che esse contengono.

Un'asserzione ovvia, ma tuttavia vera è che, tranne poche eccezioni come solfuri metallici, grafite, ecc, le rocce asciutte sono ottimi isolanti. Le eccezioni sono rare nella pratica dei campi petroliferi ed in questo testo non verranno prese in considerazione. Inoltre, durante le trivellazioni, è molto raro trovare rocce perfettamente asciutte. Perciò le formazioni del sottosuolo hanno una resistività finita e misurabile causata dall'acqua che esse contengono nei pori o assorbita nelle loro argille interstiziali.

Nel caso di formazioni pulite (prive di argille) le correnti che vi passano attraverso seguono le leggi della conduzione elettrolitica.

In ogni caso la resistività di una formazione dipenderà in gran parte dalla resistività dell'acqua presente in quella formazione, dalla quantità di tale acqua e dalla disposizione dei canalioli che la contengono.

La resistività (resistenza specifica) di una sostanza è la resistenza misurata fra le facce opposte di un cubo unitario della sostanza in esame, ad una data temperatura.

Nei lavori di carotaggio elettrico è stato ^{scelta} scelto come unità di lunghezza il metro, cosicchè l'unità di resistività risulta essere l'ohm-metro²/metro o, più semplicemente ohm-metro abbreviato: ohm-m.

1 - 2 - Acque di formazione

Le acque contenute nei pori degli strati interessati da un sondaggio possono variare secondo la posizione geografica, la profondità e l'età geologica.

Le acque di strato poco profonde sono in genere dolci, spesso adoperate per gli usi domestici e la loro resistività è relativamente alta. Esse possono inoltre contenere notevoli quantitativi di sali di calcio e magnesio che le rendono "dure". Man mano che si fanno sondaggi sempre più profondi, le acque incontrate nelle formazioni diventano sempre più salate, sebbene ciò non avvenga mai in modo regolare ed uniforme.

Molti fattori possono influenzare la salinità delle acque di formazione profonde ad esempio la salinità dei mari presenti all'atto della sedimentazione, la vicinanza di antiche foci con le loro acque meno salate in aumento di concentrazione da percolazione quando i sedimenti erano ancora freschi, ecc.

La resistività delle acque di strato può raggiungere valori da 20 a 50 ohm-m e oltre, a temperatura ambiente, mentre le acque molto salate incontrate in perforazioni profonde possono avere resistività molto basse: fino a 0,4 ohm-m a 75°F (23,9 °C), corrispondenti a saturazione completa.

1 - 3 - Relazioni della resistività dell'acqua con la salinità e la temperatura

1)" La resistività di un elettrolito decresce con l'aumentare della

quantità di prodotti chimici in esso contenuti".

Le acque di formazione e il fango di perforazione contengono in genere soluzioni di diversi prodotti chimici. La conduttività elettrica di queste soluzioni a una data temperatura varieranno secondo la concentrazione e la natura dei prodotti chimici, fra cui, però, nella maggior parte dei casi, predomina il cloruro di sodio.

Perciò è spesso sufficiente usare le carte di conversione (fig. 1-1) per ottenere i valori di resistività da quelli di concentrazione. Se oltre il cloruro di sodio sono presenti anche altri prodotti chimici in misura relativamente grande, è consigliabile convertire le quantità di tali prodotti chimici nei loro pesi equivalenti di cloruro di sodio.^(*)

La concentrazione equivalente espressa in parti per milione (p.p.m) o grani per gallone, va aggiunta alla concentrazione di cloruro di sodio e la resistività va trovata per la concentrazione totale usando la fig. 1-1.

2)" La resistività di un elettrolito decresce all'aumentare della temperatura". Questo è di grande importanza nei carotaggi elettrici perchè è noto che la temperatura nella terra cresce con l'aumentare della profondità. E' spesso necessario confrontare la resistività del fango di perforazione, che è stata misurata alla temperatura di superficie, con quella della formazione, misurata, nei pozzi profondi, a temperatura ben superiore.

(*) Nota: per dettagli su questo calcolo vedi: H.G. Dunlap and H.E. Hawthorne: The calculation of Water Resistivities from Chemical Analysis - Journal of Petroleum Technology, Vol. 3, N° 3, Marzo 1951. Vedi anche " Log Interpretation Charts" pag. A-5.

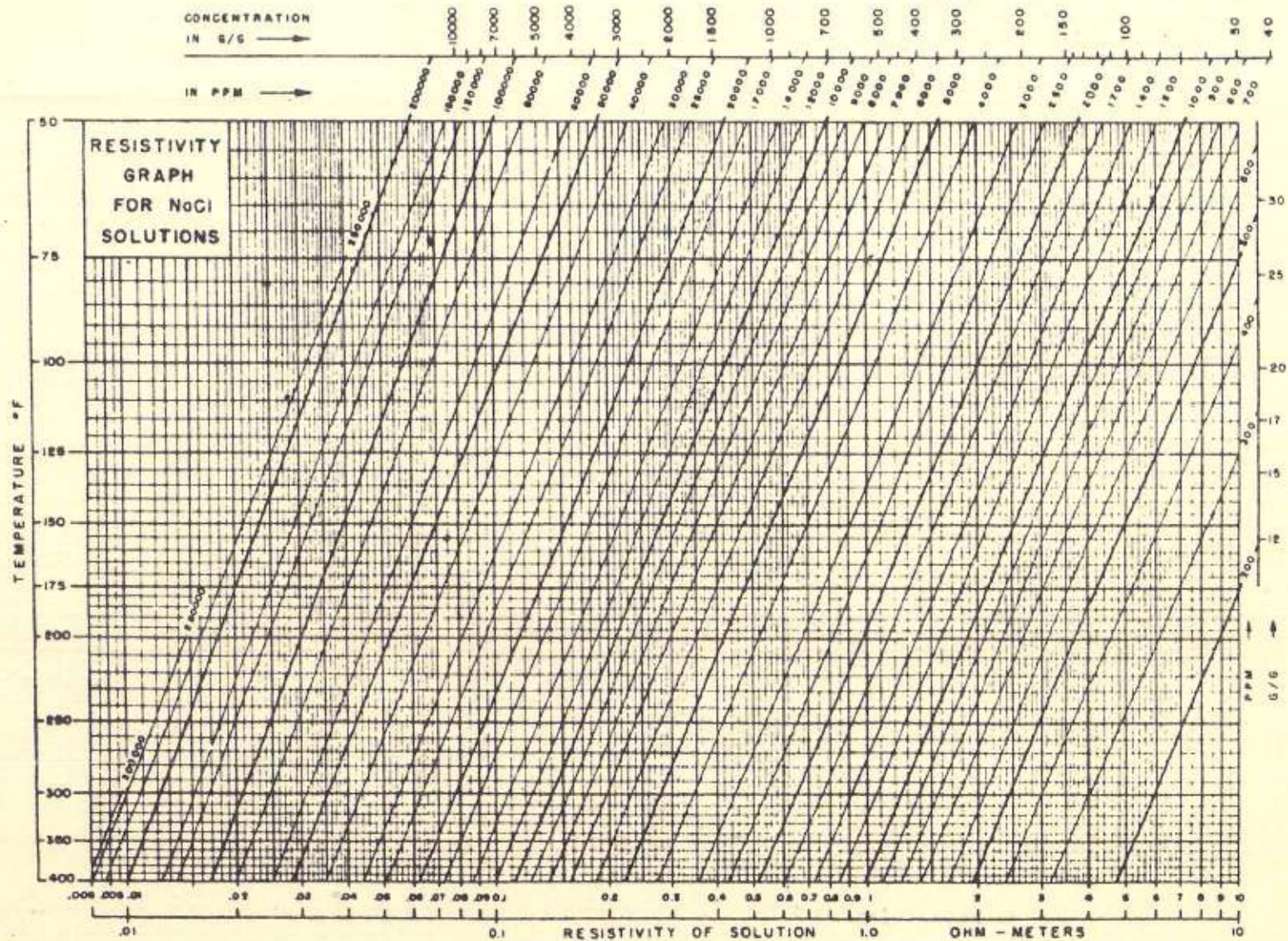


FIG. 1-1 ANDAMENTO DELLA RESISTIVITA' IN FUNZIONE DELLA CONCENTRAZIONE IN CLORURO DI SODIO AL VARIARE DELLA TEMPERATURA.

Evidentemente i due valori di resistività non possono essere confrontati senza riportarli ai valori che si sarebbero osservati ad una stessa temperatura.

Questa conversione può essere compiuta, con sufficiente approssimazione, per mezzo della tavola di fig. 1-1, che comprende per le soluzioni di cloruro di sodio, i dati quantitativi delle due leggi generali suesposte.

Per esempio, usando la carta, se il fango di perforazione ha una resistività misurata di 1,0 ohm-m a 75°F, la sua resistività corretta per 300°F sarebbe 0,25 ohm-m. (°)

E' pratica comune nei carotaggi elettrici misurare la temperatura di fondo pozzo con un termometro a massiac contenuto nel corpo della sonda. Il valore letto sul termometro non dà la temperatura della formazione, ma quella del fango al tempo in cui la sonda ha raggiunto il fondo del pozzo.

(°) Il risultato può essere determinato dalla tabella cercando l'intersezione dell'ordinata corrispondente a 1,0 ohm-m con l'ascissa corrispondente a 75°F. Questa intersezione cade sulla diagonale corrispondente a 5.500 p.p.m di cloruro di sodio.

Muovendosi lungo questa diagonale fino alla intersezione con la ascissa corrispondente a 300°F, si vede che questa intersezione cade sull'ascissa corrispondente a 0,25 ohm-m.

1 - 4 - Fattore di formazione

Supponiamo che una formazione pulita (non argillosa) sia completamente satura di acqua di resistività R_w , e che la sua resistività sia R_o . Allora il rapporto R_o/R_w sarà una costante qualunque sia il valore di R_w .

Questa costante si chiama "fattore di resistività di formazione" chiamato comunemente "fattore di formazione"; è indicato con "F" ed è definito dall'equazione:

$$F = R_o/R_w \quad (1-1)$$

Il fattore di formazione F dipende dalla struttura della formazione. Se i vuoti all'interno della formazione avessero la forma di cannelli cilindrici paralleli, R_o sarebbe inversamente proporzionale alla porosità ϕ . Tuttavia a causa delle diverse forme e dimensioni dei granuli di minerale e della presenza del materiale cementante, una corrente elettrica che attraversi la formazione è costretta a seguire percorsi tortuosi.

La sezione trasversale di questi percorsi può variare rapidamente da valori relativamente grandi nei pori a valori molto piccoli negli intervalli che uniscono i pori gli uni agli altri.

Sono state fatte migliaia di determinazioni di laboratorio su migliaia di campioni e si è trovato che il fattore di resistività di una formazione pulita si può riportare alla sua porosità mediante una semplice formula empirica della forma:

$$F = \frac{a}{\phi^m} \quad (1 - 2)$$

in cui " a " ed " m " sono delle costanti.

Ad " a " ed " m " sono stati assegnati diversi valori da vari sperimentatori, ma i grafici risultanti di F in funzione di ϕ per formazioni con porosità intergranulare, non sono molto diversi fra loro.

Nella costruzione dei grafici e monogrammi usati nelle "Schlumberger Log interpretation charts" è stata adottata la formula proposta da W.O. Winsauer ed altri. (°)

$$F = \frac{0,62}{\mu^{2,15}} \quad 1-3$$

Una delle prime formule proposta da G.E. Archie, era:

$$F = \frac{1}{\mu^2} \quad 1-4$$

che fornisce dati particolarmente buoni per formazioni ben consolidate, tipo arenarie e calcari.

(°) W.O. Winsauer, H.M. Shearin, P.H. Masson, W. Williams:
Resistivity of Brine Saturated Sands in Relation to Porosity
Geometry.

AAPG Bulletin, Vol. 36, N° 2, Feb. 1952.

Ora, sia per formazioni consolidate che inconsolidate, considerando i risultati dei numerosi dati raccolti, la formula:

$$F = \frac{0,81}{\beta^2} \quad (1-5)$$

fornisce un'ottima approssimazione ed ha il vantaggio di semplificare i calcoli.

Molto spesso i calcari contengono vuoti uniti fra loro da fessure che aggiungono la loro porosità a quella della roccia. Quando gli spazi fra i vuoti e le fessure sono abbastanza piccola si può usare l'equazione (1-4) valida nei casi di sabbie o calcari aventi solo porosità granulari. Tuttavia a volte è conveniente nell'interpretazione usare valori di m maggiori di 2. Questi valori si determinano con osservazioni locali. (°)

Nelle formazioni argillose, le argille, sia depositate in lamine sottili, sia disperse nei pori, costituiscono una parte della roccia madre che è conduttrice di elettricità. (A volte il termine descrittivo "conduttori solidi" sebbene non esattamente appropriato dal punto di vista scientifico è usato per designare queste argille interstiziali); inoltre le argille a causa delle piccolissime dimensioni dei loro pori non possono essere permeate da fluidi: in altre parole le argille influiscono sulla resistività della formazione, ma non contribuiscono alla sua porosità effettiva.

Il contributo relativo della rete argillosa alla resistività della formazione cambia con la resistività dell'acqua libera nei pori e così accade per il fattore di formazione.

(°) p.es. G.E. Archie: Classification of Carbonate Reservoir Rocks and Petrophysical Considerations AAPG bulletin, Vol. 36, N° 2 Febb. 1952.

Più bassa è la resistività dell'acqua, più piccola è l'influenza relativa delle argille e maggiore è il fattore di formazione. Per valori di resistività dell'acqua salata inferiori a un certo limite, che per molte sabbie argillose si aggira sugli 0,1 ohm-m a temperatura ambiente, il fattore di formazione diviene praticamente costante, come se la conducibilità della rete argillosa fosse trascurabile rispetto a quella dell'acqua. Il fattore di formazione misurato in queste condizioni è chiamato "fattore di formazione limite".

Il "fattore di formazione limite" si riporta approssimativamente alla porosità effettiva in quanto è il fattore di formazione di una sabbia pulita.

1 - 5 - Relazioni fra resistività di formazione e saturazione

La presenza di olio e gas, isolanti, nei pori di una roccia, insieme all'acqua di strato, influenzerà ovviamente la resistività di una formazione che sarà in tal caso funzione delle quantità relative di idrocarburi ed acqua che essa contiene.

La saturazione in acqua (S_w) in una roccia serbatoio dipende da molti fattori: caratteristiche della roccia (porosità, permeabilità, area della superficie dei granuli...), caratteristiche dei fluidi presenti (viscosità, densità...) ed inoltre dalla quota della parte della roccia serbatoio considerata, rispetto al livello a cui la roccia stessa contiene solo acqua (tavola d'acqua). A questo riguardo i valori della saturazione in acqua, con l'aumentare della quota nella roccia serbatoio ^{diminuisce} depressocono dal 100% al livello della tavola d'acqua ad un valore minimo al top del giacimento.

Come abbiamo già detto prima, questo valore minimo non si riduce mai a zero. Così la resistività di una roccia permeabile può rag-

giungere valori estremamente alti (diverse migliaia di ohm in casi da bassa porosità e di bassa saturazione in acqua), ma non è mai infinita.

Per il caso di "formazioni sostanzialmente pulite" la relazione fra la resistività della formazione e saturazione in acqua può essere espressa dalla seguente equazione empirica (°) ottenuta come risultato di numerose osservazioni:

$$S_w = \left(\frac{R_o}{R_t} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1-5)$$

S_w = saturazione in acqua della formazione

R_t = resistività della formazione (contenente idrocarburi ed acqua di formazione con saturazione in acqua S_w)

R_o = resistività della stessa formazione quando fosse completamente satura della stessa acqua ($S_w = 1$).

n = esponente determinato empiricamente.

Il rapporto R_t / R_o è a volte designato come "indice di resistività" I di conseguenza $S_w = I^{-1/n}$.

Nell'equazione (1-6), R_o può essere sostituito da $F \cdot R_v$ (dall'equazione (1-1) e così si può scrivere:

$$S_w = \left(\frac{R_o}{R_t} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{F \cdot R_v}{R_t} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1-7)$$

(°) G.E. Archie The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics - Petroleum Technology, Vol. 5, 1942.

L'esponente "n" varia approssimativamente fra 1,7 e 2,2 a seconda del tipo di formazione. L'esperienza mostra che prendendo $n = 2$ si ha in genere una sufficiente ^{approssimazione} approssimazione.

L'equazione (1-7) si può quindi leggere:

$$S_w = \left(\frac{R_o}{R_t} \right)^2 = \left(\frac{F_o R_w}{R_t} \right)^2 \quad (1-8)$$

La relazione fra resistività di formazione e saturazione in acqua è più complessa quando le formazioni contengono scisti o argille, a causa dell'ulteriore conduttività dovuta alla rete argillosa. Questo aspetto sarà discusso nel cap. 9 (Paragr. 9-15).

1 - 6 - Resistività e permeabilità delle formazioni

Sembra che non ci siano formule semplici, empiriche o no, che mettano in relazione la resistività con la permeabilità. In alcuni casi particolari, tuttavia, si può ricavare un ordine di grandezza approssimato per la permeabilità ^{di} dei carotaggi elettrici, e questo sarà discusso più ampiamente nel Cap. 9 (Paragr. 9-23).

Questo non significa che mediante i carotaggi elettrici non si riesca a distinguere gli strati permeabili da quelli impermeabili. Alcuni dei sistemi di carotaggio (PS, Microlog,) ci permettono di localizzare e definire con grande cura gli strati permeabili, ma essi non ci permettono di dire se la permeabilità sia una frazione ed un migliaio di millidarcy.

1 - 7 - Scala dei valori di resistività - classificazione delle formazioni

Si è visto che le resistività delle formazioni possono variare sensibilmente con la resistività dell'acqua nei pori, con il tipo di roccia (espresso mediante il suo fattore di formazione), e,

nel caso di formazioni contenenti idrocarburi, con l'acqua di saturazione.

Argille e scisti, che sono formazioni porose e praticamente impervie, sono spesso molto uniformi per tutta la loro estensione. Esse sono impregnate di acqua capillare avente salinità costante e generalmente alta. Di conseguenza la loro resistività è relativamente bassa e praticamente costante per larghi tratti.

Rocce compatte ed impervie come gesso, salgemma, anidrite, formazioni calcaree compatte ed alcuni carboni, hanno un'alta resistività a causa della minima quantità di acqua interstiziale contenuta.

La resistività di formazioni porose e permeabili quali sono le sabbie, hanno un vasto campo di variabilità in quanto dipendono dai fluidi in esse contenuti. Questi valori di resistività possono essere bassi se le formazioni sono impregnate di acqua salata oppure molto alti se esse contengono grandi quantità di olio e di gas e poca acqua.

Con riferimento alle rocce serbatoio che s'incontrano nei campi petroliferi è possibile considerare tre gruppi generali che differiscono fra loro per le caratteristiche di resistività.

- a) Formazioni tenere - principalmente serie argillo-sabbiose debolmente consolidate; porosità delle sabbie superiore al 25%, porosità granulare, spesso con sottili alternanze di straterelli duri. Le resistività variano da 0,3 ohm-m per sabbie impregnate di acqua salata a pochi ohm-m per sabbie sature di olio.
- b) Formazioni intermedie - principalmente arenarie, frequentemente anche calcari e/o doloniti; moderatamente consolidate; porosità della roccia serbatoio intorno al 15-25%. In genere porosità granulare. Interstratificate da argilloscisti e molto spesso da rocce compatte.

Campo di resistività: da 1 ohm-m a circa 50-100 ohm-m.

c) Formazioni dure - principalmente calcari e/o doloniti; anche arenarie consolidate. Consistono per la maggior parte in rocce compatte contenenti zone permeabili e porose, con sottili intercalazioni argilloscistose. Perosità delle rocce serbatoio al di sotto del 15%. Per lo più le zone porose e permeabili contengono fessure e vuoti. Campo di resistività da 2-3 ohm a diverse centinaia. Naturalmente la classificazione di cui sopra è alquanto arbitraria e fra i tre gruppi di formazioni non esiste una netta separazione. Inoltre in molti casi, in una stessa regione si possono incontrare formazioni di tutti e tre i tipi.

- 8 -

DISTRIBUZIONE DEI FLUIDI E DELLA RESISTIVITA' IN UNO STRATO
PER EABILE INVASO DAL FILTRATO DEL FANGO

1 - 8 - Per un'ulteriore comprensione dei dati forniti dai metodi di misura e per l'interpretazione dei rispettivi logs è essenziale un metodo dei processi d'invasione.

In genere il fango di perforazione in un foro di sonda è condizionato in modo che la pressione idrostatica che esso esercita sulle pareti del pozzo supera la pressione naturale della formazione.

In queste condizioni il fango filtra negli strati ~~impermeabili~~.[?] Nel far ciò le particelle solide associate con il liquido filtrante si depositano sulla parete dello strato permeabile formando un "pannello" che tende ad impedire e ridurre ulteriori infiltrazioni di liquido. La composizione, lo spessore e la permeabilità del pannello dipendono principalmente dalla natura del fango e dalle condizioni di perforazione piuttosto che dalla formazione.

Discuteremo ora il processo d'invasione ed i suoi effetti per due principali tipi di formazioni: quelle aventi porosità intergranulare piuttosto uniforme e quelle aventi porosità non uniforme o da fessure.

1 - FORMAZIONI CON POROSITÀ INTERGRANULARE UNIFORME

1 - 9 - Strati contenenti solo acqua di formazione

Se la formazione è impregnata d'acqua al 100%, l'acqua originaria viene scacciata dal filtrato del fango. Se si esclude il caso di permeabilità verticale molto alta (che sarà trattato nel paragr. 1-12) l'effetto della differenza di densità fra i due tipi di acqua è trascurabile e l'invasione in senso orizzontale raggiunge lo stesso grado a tutti i livelli. Subito dietro la parete del foro lo spiazzamento dell'acqua di formazione da parte del filtrato del fango è praticamente completo. Questa regione a cui ci si riferisce come alla "zona spiazzata" si estende in genere fino a una distanza di almeno 3" (cm. 7,62) dalla parete del foro, eccetto il caso di invasione molto debole che sarà spiegato alla fine del paragr. 1-12. A maggiore distanza dalla parete del foro la formazione non è stata raggiunta dal filtrato e i pori sono riempiti dall'acqua originale. La zona di transizione fra la regione di completo spiazzamento e la zona incontaminata è più o meno estesa, secondo le caratteristiche della formazione e la velocità d'invasione.

La figura 1-2a mostra schematicamente una sezione orizzontale attraverso uno strato permeabile interessato da un sondaggio.

Le indicazioni di resistività in parentesi sono quelle usate per indicare la resistività delle zone o dei mezzi indicati. La fig. 1-2b mostra un "profilo" di resistività corrispondente alle condizioni mostrate in fig. 1-2a.

SEZIONE ORIZZONTALE ATTRAVERSO UNO STRATO PERMEABILE AD ACQUA

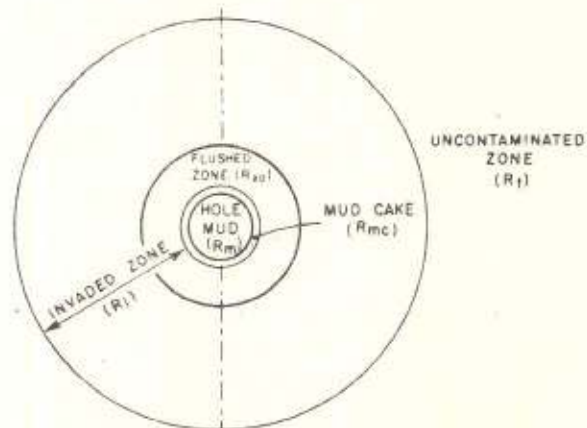


Fig. 1-2a

DISTRIBUZIONE RADIALE DEI VALORI DELLA RESISTIVITA' ($R_{mf} \gg R_w$)

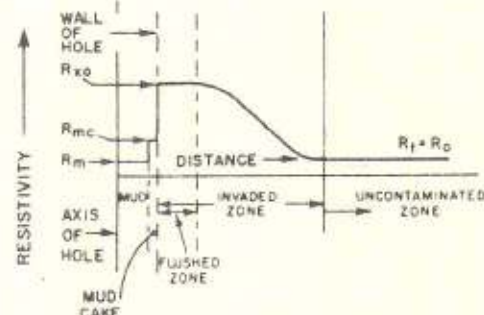


Fig. 1-2b

FIG. 1-2a SCHEMA DI UNA SEZIONE ORIZZONTALE DI UNO STRATO PERMEABILE ATTRAVERSATO DA UN POZZO.
LE ESPRESSIONI TRA PARENTESI SONO LE SOLE USATE PER INDICARE LA RESISTIVITA' DI DETERMINATE ZONE

FIG. 1-2b LA FIGURA MOSTRA L'ANDAMENTO DELLA RESISTIVITA' RELATIVAMENTE ALLE CONDIZIONI DELLA FIG. 1-2a
L'ASCISSE RAPPRESENTA LA DISTANZA DALL'ASSE DEL FORO DEL POZZO; L'ORDINATA IL VALORE DELLA RESISTIVITA'.

Le ascisse rappresentano distanze dall'asse del foro; le ordinate i valori della resistività.

1 - 10 - Strati contenenti olio o gas ed acqua

Quando le formazioni contengono idrocarburi il processo d'invasione è più complesso. La distribuzione dei fluidi dietro la parete del pozzo è funzione di molti fattori: della struttura della roccia, del grado di filtrazione, delle densità e delle viscosità relative dei fluidi, di forze capillari.

Quando la saturazione iniziale in acqua è bassa, (meno di circa il 50%), un fatto importante è l'esistenza di una regione che contiene solo acqua di formazione ed un po' d'olio residuo. (°) Questa regione è a forma di anello (°°) intorno al foro e ad una certa distanza da esso. La fig. 1-3a è una sezione orizzontale schematica attraverso uno strato impregnato di olio con i simboli simili a quelli di fig. 1-2a. E' da notare che l'anello si trova immediatamente dentro la zona incontaminata. La formazione di questo anello si può spiegare approssimativamente come segue: il filtrato del fango penetra nella formazione radialmente spostando rapidamente su di un fronte circolare l'acqua di formazione e l'olio suscettibili di spostamento. Per gli strati che hanno una saturazione in olio piuttosto grande, la permeabilità relativa all'olio è sensibilmente maggiore di quella all'acqua.

(°) W.H. Campbell and J.L. Martin: Displacement logging - A. New exploratory Tool. Journal of Petroleum Technology, Vol. 7, N° 12 Dic. 1955.

(°°) Questa zona sarà indicata in futuro come "Anello" per semplificare la terminologia.

SEZIONE ORIZZONTALE
 ATTRAVERSO UNO STRATO
 PERMEABILE AD OLIO
 ($S_w \ll 60\%$)

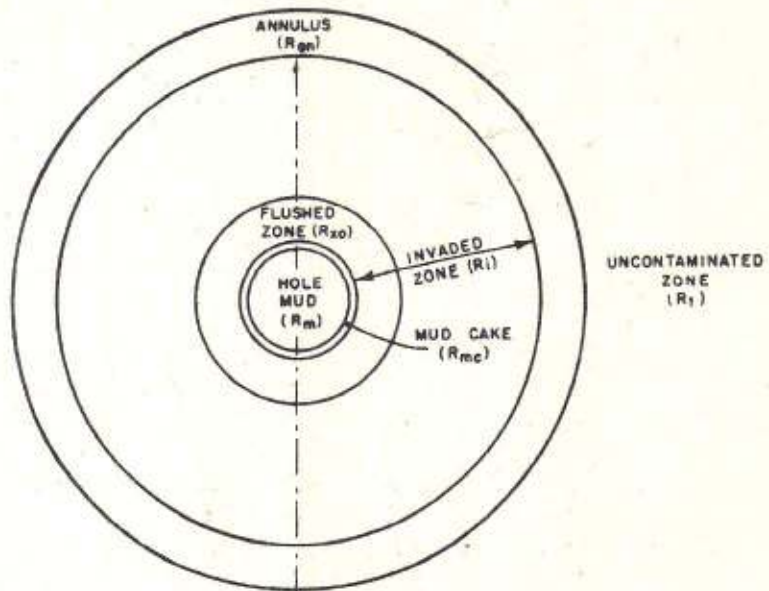


Fig. 1-3a

DISTRIBUZIONE RADIALE DEI FLUIDI
 IN VICINANZA DEL FORO DEL POZZO
 (QUALITATIVA)

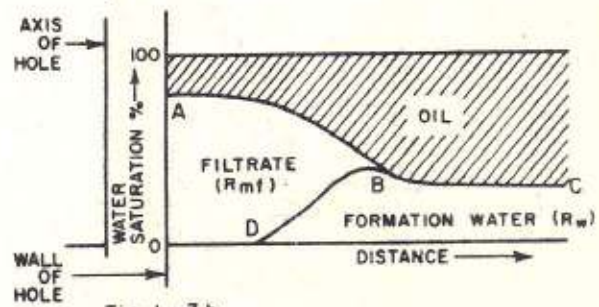


Fig. 1-3b

DISTRIBUZIONE RADIALE DEI VALORI
 DI RESISTIVITA' ($R_{mf} \gg R_w$)

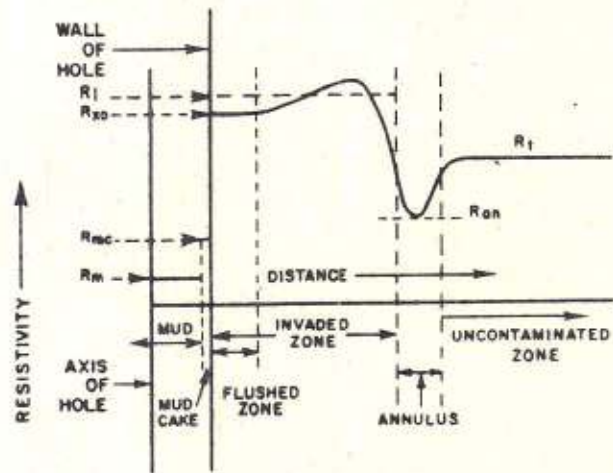


Fig. 1-3c

FIG. 1-3a

3b

3c

Perciò l'olio si muove più rapidamente rispetto all'acqua lasciando dietro di sé una zona arricchita in acqua di formazione. Questo flusso è estremamente piccolo se paragonato con il volume del giacimento, e la saturazione nella zona incontaminata rimane essenzialmente indisturbata. (°)

Nella fig. 1-3b è riportato un diagramma qualitativo della distribuzione dei fluidi nel caso di una formazione impregnata d'olio. In ascisse sono riportate le distanze dal pozzo ed in ordinate la saturazione in acqua. Il profilo A B C rappresenta la saturazione in acqua (filtrato più acqua di formazione) in funzione della distanza radiale. La curva B D non indica una separazione fra due diverse fasi ma semplicemente le proporzioni di ciascun componente.

A questa distribuzione di fluidi corrisponde una distribuzione radiale di resistività, o profilo di resistività, come è indicato qualitativamente in fig. 1-3c. Questa curva è stata tracciata per un basso valore di S_w , minore del 50%, e per un alto rapporto K_{mf}/K_w . Questo può essere confrontato con la fig. 1-2b che dà la distribuzione radiale della resistività nel caso di una formazione impregnata di acqua al 100%.

(°) Sembra verosimile che l'esistenza di un anello ben definito sia un fenomeno transitorio dovuto ad effetti di diffusione, pressione capillare, gravità, ecc. Tuttavia l'esperienza sembra dimostrare che l'anello è spesso presente anche al tempo in cui vengono effettuati i carotaggi.

1 - 11 - Fango di perforazione e pannello

Il fango di perforazione è un mezzo omogeneo di resistività R_m . Lo spessore del pannello varia in genere da $1/8''$ a $1''$ (da mm 3,175 a cm. 2,54). Per fanghi normali a base di acqua, la resistività del pannello, R_{mc} , è in genere uguale ad una o due volte la resistività del fango (R_m). Questa variazione può essere notevolmente maggiore nel caso di fanghi ad emulsione d'olio, o ad alta salinità, o ad alta densità.

1 - 12 - La zona invasa

a) Se lo strato è impregnato d'acqua, i pori, nella zona spiazzata, sono completamente riempiti dal filtrato del fango. (Sembra che le poche particelle di fango che si depositano sui pori della formazione che costituiscono la parete del foro abbiano un'influenza trascurabile).

La resistività R_{xo} , della zona spiazzata in una formazione "pulita", è allora uguale al prodotto $F \cdot R_{mf}$, dove F è il fattore di formazione, ed R_{mf} la resistività del filtrato del fango.

Gli strati impregnati d'olio, d'altra parte, tratterranno una certa quantità d'olio residuo che non può essere spiazzato dal filtrato del fango. I loro pori, nella zona spiazzata, conterranno filtrato del fango ed olio residuo. La resistività R_{xo} della zona spiazzata, sarà legata al fattore di formazione, ad R_{mf} , ed alla saturazione in "acqua" (filtrato del fango), dalla seguente relazione:

$$S_{xo} = \left(\frac{F \cdot R_{mf}}{R_{xo}} \right)^{1/2} \quad (1-9)$$

che deriva dall'equazione (1-8). Notare che è $S_{xo} = (1-ROS)$, essendo ROS la saturazione in olio residuo della zona spiazzata.

b) La distribuzione dei fluidi nella sezione invasa, al di là della zona spiazzata, e di conseguenza la sua resistività, varia con la distanza dell'asse del pozzo. Non se ne conosce però esattamente la distribuzione. La fig. 1-3c mostra la resistività in aumento, ma essa potrebbe anche decrescere, in quanto dipende dalla proporzione, nei pori, dell'olio, del filtrato e dell'acqua di formazione.

È ovvio che non si può definire esattamente la profondità della zona invasa, ma conviene introdurre un fattore " D_1 " chiamato "di-^{equivalente elettrica}metro elettricamente equivalente di invasione". D_1 corrisponde approssimativamente al diametro di un cilindro la cui superficie è situata a metà della zona di transizione, fra la zona spiazzata e l'anello. (Caso in cui il valore di S_w è basso). È possibile immaginare un mezzo fittizio di diametro D_1 e resistività costante R_1 , avente lo stesso effetto della zona invasa sulle misure effettuate nel sondaggio. R_1 è quindi una specie di resistività media della zona invasa.

La profondità dell'invasione è molto variabile. Dipende dall'attitudine del fango a formare il pannello (perdita d'acqua); dalla differenza di pressione fra la colonna del fango e la formazione; dal periodo di tempo trascorso dalla perforazione degli strati; dalla porosità della formazione, dalla proporzione dei fluidi (acqua, olio, gas) presenti nei pori, dalla reazione di eventuale argilla interstiziale con il filtrato del fango, ecc.

Come regola generale, a parità delle altre condizioni, quanto maggiore è la porosità, tanto minore è la profondità dell'invasione. Se D_1 è espressa in funzione del diametro del foro " d ", si può dire che, con i fanghi normalmente usati, D_1 supera raramente $2d$ nelle sabbie ad alta porosità, ma può superare $5d$ ed anche $10d$ in

formazioni a bassa porosità come arenarie consolidate o calcari.

L'invasione può essere estremamente debole e spesso trascurabile nei casi di bassa perdita d'acqua o di fanghi a base d'olio e nelle formazioni impregnate di gas.

E' stato inoltre osservato che nelle sabbie impregnate di acqua aventi una forte permeabilità verticale, la profondità di invasione è notevolmente bassa - spesso anche minore della distanza di 3" che più sopra è stata considerata come corrispondente alla zona spiazzata, - eccettuata la zona immediatamente sottostante al confine superiore della formazione. Questa circostanza, che si presenta di frequente, ad esempio, nella Costa del Golfo, è dovuta ad una separazione verticale che è il risultato della differenza di peso specifico fra il filtrato del fango e l'acqua di formazione. (°)

Non c'è ragione di supporre che la stessa separazione di liquidi non si verifichi anche negli strati impregnati d'olio ad alta permeabilità verticale, sebbene in questo caso il fenomeno non si riscontri con chiarezza nei carotaggi elettrici.

1 - 13 - L'anello

L'estensione in senso radiale e la resistività dell'anello sono ancora oggetto di ricerche, sia matematiche che sperimentali.

Le analisi matematiche già disponibili, sebbene incomplete e forse a volte troppo semplificate (in particolare sono stati trascurati nei calcoli gli effetti della gravità e delle forze capillari), ci

(°) Vedi H. G. Doll: Invasion Process in High Permeability Sands; The Petroleum Engineer, Jan. 1955.

hanno tuttavia permesso di giungere ad alcuni risultati fondamentali:

a) La depressione della curva di resistività di fig. 1-3c si apre e si appiattisce all'aumentare del valore di S_w . Infine, per valori della saturazione iniziale in acqua superiori al 60% circa, non c'è più praticamente alcuna traccia di anello, ed il profilo ha una forma simile a quello della fig. 1-2b, che corrisponde al 100% della saturazione iniziale in acqua.

b) A parità delle altre condizioni il rapporto della resistività media della zona invasa rispetto a quella dell'anello dipende direttamente da R_{mf}/R_w .

c) Il rapporto dello spessore dell'anello rispetto al diametro di invasione, aumenta debolmente all'aumentare del diametro d'invasione. Con i comuni valori di D_1 , questo rapporto varia fra il 15% ed il 25%.

Altri calcoli hanno mostrato che la presenza dell'anello ha un effetto praticamente trascurabile sui dati dei metodi di carotaggio ad elettrodi (carotaggio normale, laterale, e laterolog). Gli effetti sul Log Induttivo possono essere apprezzabili, come vedremo più oltre nel Cap. 3.

1 - 14 - La zona incontaminata

La resistività della zona incontaminata della formazione, oltre la zona invasa, è chiamata resistività vera R_t .

Per formazioni "pulite" l'acqua di saturazione nella zona incontaminata è data dall'equazione (1-8) ripetuta qui sotto:

$$S_w = \left(\frac{F R_w}{R_t} \right)^{1/2} \quad (1-8)$$

da cui:

$$R_t = \frac{F R_w}{S_w^2} \quad (1 - 10)$$

In fig. 1-3c, R_t ha un valore minore di R_{zo} . Questo è quanto si verifica nella maggior parte dei casi.

In genere R_{mf} ha un ordine di grandezza da 10 a 25 volte maggiore di R_w . Per una saturazione in acqua del 30%, ad esempio, R_t è uguale a $F \cdot R_w / (0,3)^2 = 10 \cdot F \cdot R_w$; Ma R_{zo} è come minimo uguale ad $F \cdot R_{mf}$ perchè l'effetto della saturazione residua in olio è quello di aumentare il valore). Perciò è $R_{zo} > F \cdot 10 \cdot R_w$ se R_{mf} è solo 10 volte maggiore di R_w . Così è $R_{zo} > R_t$ come è mostrato in fig. 1-3c.

L'inverso, naturalmente, accade se S_w è molto piccolo, o se R_{mf} non è molto maggiore o è minore di R_w (formazioni ad acqua dolci o fanghi salati.)

2. Caso di formazioni non uniformi o fessurate

1 - 15 - In caso di rapide variazioni verticali di permeabilità, i raggi della zona invasa e dell'anello variano con il valore della permeabilità ed anche con la proporzione acqua-idrocarburi. La distribuzione dei fluidi influisce sulle misure come se ci fossero ampie zone di transizione fra la zona invasa e l'anello e fra l'anello e la parte incontaminata.

In caso di formazioni fessurate, la permeabilità dovuta alle fessure è molto spesso enorme, molto maggiore di quella del materiale circostante.

Supponiamo che una formazione sia composta di materiale avente permeabilità molto bassa, interessato da una rete di fessure grosso modo parallele. Il filtrato del fango penetra facilmente nelle

fessure, e giunge ad una distanza relativamente grande, portando con sé gran parte dei fluidi originali di formazione (olio ed acqua di formazione). D'altra parte, la penetrazione del filtrato nel materiale stesso non fessurato, attraverso le pareti del pozzo, è molto piccola. Può essere sufficiente per la formazione del pannello, ma non riuscirà a spiazzare molto olio. Inoltre, una parte del fango che ha invaso le fessure riuscirà a permeare il materiale circostante, ma la quantità sarà estremamente piccola fino ad una distanza sufficiente dalla parete, dove l'area delle fessure è maggiore.

Poiché il volume effettivo delle fessure è piccolo in confronto al volume totale della formazione, solo una piccola parte dei fluidi che originariamente riempivano i pori viene spiazzata. Ne risulta che R_{xo} è poco diverso da R_t , ed il rapporto R_{xo}/R_{mf} non rappresenta più il fattore di formazione.

Se il materiale della formazione è diviso in blocchi da fessure orizzontali e verticali, ciascun blocco è circondato dal fango ed i fluidi all'interno del blocco non hanno modo di uscire. In questo caso il filtrato del fango non può penetrare nel blocco: non vi si forma sopra il pannello ed il materiale della formazione rimane del tutto incontaminato.

- C -

FATTORI DA DETERMINARSI PER LE INTERPRETAZIONI QUANTITATIVE DEI CAROTAGGI ELETTRICI

1 - 16 - Le caratteristiche delle formazioni che possono essere desunte dalle analisi quantitative dei carotaggi elettrici sono essenzialmente porosità e saturazione. Rivedremo ora le equazioni fondamentali che legano queste caratteristiche delle formazioni ai dati elettrici ricavati dai logs:

1) Formazioni "pulite"

a) POROSITA'

L'equazione (1-9) può essere scritta:

$$\frac{1}{\sqrt{F}} = \sqrt{\frac{R_{mf}}{R_{xo}}} \frac{1}{S_{xo}}$$

ma dall'equazione (1-4) si ha: $1/\sqrt{F} = \bar{\alpha}$ quindi l'equazione (1-9) diventa:

$$\bar{\alpha} = \sqrt{\frac{R_{mf}}{R_{xo}}} \frac{1}{S_{xo}} \quad (1-11)$$

Se si preferisce l'equazione (1-5), ($\bar{\alpha} = 0,9/\sqrt{F}$) il secondo membro dell'equazione (1-11) viene moltiplicato per 0,9.

R_{mf} può essere misurato da un campione del filtrato prelevato dal fango. R_{xo} può essere ricavato in genere dalla lettura del Microlog o del Microlaterolog, supposto che la zona spiazzata si spinga almeno 3 o 4 pollici (8-10 cm.) all'interno della parete del pozzo; supposto cioè che la profondità d'invasione non sia troppo piccola. Per quanto riguarda S_{xo} , si può assumere in genere un valore appropriato. Secondo le misure fatte su campioni presi con fango a base di acqua, la saturazione residua in olio (ROS) sembra che vari nella maggior parte dei casi fra il 15% e il 25%, con un valore medio di circa il 20%. Perciò, in assenza di migliori informazioni, si può assumere per S_{xo} il valore 0,8, senza commettere gravi errori.

Questo valore di S_{xo} è approssimativamente vero per formazioni con porosità intergranulare, permeabilità abbastanza alta ed uniforme, e contenenti olio leggero (Alta gravità API). D'altra parte,

formazioni che hanno permeabilità minore ed irregolare, e contenenti olio pesante, trattengono ancora una notevole quantità d'olio dopo essere state invase. In tali condizioni il valore di S_{zo} può essere molto minore, anche 0,6 invece che 0,8 come si è detto sopra.

b) saturazione

La soluzione dell'equazione (1-8) per la saturazione in acqua S_w , richiede la conoscenza del fattore di formazione F , della resistività dell'acqua di formazione R_w , e della resistività della zona incontaminata R_f .

Il valore R_w si può ottenere dalle misure effettuate sui campioni dell'acqua di formazione, dalle analisi chimiche dell'acqua, dalla curva del potenziale spontaneo o dai valori delle tabelle di R_w .

R_f si ottiene usando metodi di carotaggio a largo raggio di investigazione e correggendo, se necessario, i dati, mediante l'uso di apposite tabelle. A questo proposito è bene tener presente che i sistemi di carotaggio elettrico sono congegnati in modo che quando la sonda è circondata da un mezzo omogeneo, isotropo e di grandezza infinita, la registrazione del valore della resistività è uguale alla resistività del mezzo.

In pratica, gli strumenti sono circondati da elementi di resistività e dimensioni diverse; la colonna del fango, la zona invasa, gli strati adiacenti, ecc. Pertanto il valore di resistività che viene registrato da una sonda in corrispondenza di un dato strato, sarà una specie di media chiamata "resistività apparente", avente per simbolo " R_a " che può essere diversa dalla resistenza vera dello strato. Questa resistività apparente deve essere corretta dagli effetti perturbatori dovuti alla colonna del fango, allo spessore degli strati per ottenere R_f .

A volte si può ricavare F dalle misure sulle carote, oppure può

essere ottenute dal Neutron Log (Cap. 7) o dal Sonic Log (Cap. 8).
 A volte può anche accadere che l'ordine di grandezza di F può essere dedotto da esperienze locali e dall'esame dei dati disponibili sul giacimento in studio.

Questo è possibile in modo particolare per stratificazioni caratteristiche piuttosto uniformi, cosa che si verifica spesso in molte sabbie.

Un buon valore approssimato di F si può ottenere in molti casi dal Microlog e dal Microlaterolog, mediante l'uso dell'equazione (1-11). In questo caso si può ottenere la saturazione in acqua combinando fra loro le equazioni (1-8) e (1-9); cioè:

$$S_w = S_{xo} \left(\frac{R_{xo}}{R_{mf}} \cdot \frac{R_w}{R_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-12)$$

L'uso di questa equazione (come quello dell'equazione (1-11)), richiede che il valore di S_{xo} sia noto oppure sia ricavabile con sufficiente approssimazione.

2) Sabbie argillose

Ricavare i valori della porosità e della saturazione è più complicato nel caso di formazioni contenenti argilla interstiziale. Questo verrà illustrato nel Cap. 9 - paragr. 9-6 e 9-15. È importante, però stabilire fin d'ora, che l'interpretazione dei logs, anche nel caso di sabbie argillose si fonda sulla conoscenza dei fattori R_{mf} , R_w , R_{xo} ed R_t , più un fattore addizionale: il P.S. pseudo-statico, che sarà definito nel Cap. 2 - paragr. 2-10.

1 - 17 - Ciò che si è detto sopra mostra che i fattori essenziali su cui si basa l'interpretazione, per quanto riguarda la saturazione e la porosità sono R_{mf} , R_w , R_{xo} ed R_t . Nel capitolo che tratta i vari sistemi di carotaggio vedremo come si possono ricavare R_{xo} ed

R_1 dalla lettura dei carotaggi, e vedremo anche come ci possano essere in certe condizioni delle incertezze nella determinazione di questi fattori. In pratica, comunque, l'esatta conoscenza di R_{20} ed R_1 non è indispensabile per una interpretazione abbastanza corretta dei carotaggi; per esempio, con i metodi moderni del carotaggio elettrico ed induttivo, il procedimento di determinazione pratica si basa direttamente sul rapporto delle letture della piccola normale e del log induttivo. Inoltre, in terreni duri, per mezzo del carotaggio elettrico convenzionale, si possono ottenere utili informazioni sull'ordine di grandezza dei valori della saturazione e della porosità per forti spessori, per mezzo di un calcolo approssimato che comprende la resistività media R_1 della zona invasa, invece di R_{20} . Questa procedura verrà spiegata più dettagliatamente nel Cap. 9.

- D -

RAGGIO DI INVESTIGAZIONE

Il termine "raggio di investigazione" è applicato frequentemente ai vari sistemi di misura della resistività. Con esso si vuole intendere l'estensione radiale del volume compreso nella misura. Questo raggio può essere definito abbastanza chiaramente nel caso in cui la sonda sia circondata da un mezzo infinito, isotropo ed omogeneo. Si potrebbe dire, per esempio, che il raggio di investigazione della sonda ad induzione è il raggio di un cilindro, coassiale con la sonda, che contribuisce per il 90% a fornire i dati misurati. In realtà, però, tale definizione diventa più complessa perchè il volume del materiale compreso nella misura, per una data sonda, dipende dalla disposizione geometrica e dalle resistività dei vari mezzi circostanti (colonna del fango, zona invasa, zona incontami-

vate, formazioni adiacenti). Il raggio di investigazione, inoltre, non è un parametro costante per ogni sonda, ma varia con la posizione della sonda stessa.

Ulteriori discussioni sui raggi di investigazione dei diversi tipi di sonda verranno fatte nei seguenti capitoli.

- N -

ANISOTROPIA DELLE FORMAZIONI SEDIMENTARIE

1 - 19 - In molti strati, il piano di giacitura è particolarmente favorevole al passaggio della corrente. Questo perché molti cristalli di minerali hanno una forma appiattita ed allungata (mica, gofino, ecc.), ed al tempo della sedimentazione essi hanno preso spontaneamente un'orientazione parallela alla sedimentazione. Inoltre gli interstizi, nelle formazioni, sono per lo più paralleli alla stratificazione, e la corrente passa con maggior facilità lungo questi interstizi che sono saturi di acqua mineralizzata.

Per ciò tali strati non posseggono la stessa resistività in tutte le direzioni, ma sono anisotropi. Questo fenomeno si verifica in massima parte nelle argille e negli scisti.

Inoltre, nei carotaggi elettrici, le distanze fra gli elettrodi delle sonde, anche in quelle per i microlog, sono grandi abbastanza perché il volume interessato dalla misura includa molto spesso diversi strati con proprietà fisiche differenti, e quindi con differenti resistività, come, ad esempio alternanze di scisti sottili e straterelli duri. La corrente passa più facilmente lungo gli strati che perpendicolarmente ad essi. Ci si può trovare così di fronte ad un altro genere di anisotropia che può essere chiamata anisotropia macroscopica. Infine ambedue i generi di anisotropia possono coesistere ed influenzare con i loro effetti la resistività apparente.

Se da una formazione si taglia un campione cilindrico con l'asse parallelo al piano di stratificazione e con un volume sufficientemente grande rispetto allo spessore di ogni singolo strato, la resistività di questo campione, misurata con una corrente che fluisce lungo il suo asse, viene chiamata resistività "longitudinale" od "orizzontale" e si indica con un R_H .

Se un analogo cilindro viene tagliato da una formazione con l'asse perpendicolare ai piani di giacitura, la resistività misurata con una corrente che fluisce lungo il suo asse, viene chiamata resistività "trasversale" o "verticale" e viene indicata con R_V . (Sono stati scelti i termini verticale ed orizzontale perché nei logs elettrici si opera come se gli strati fossero orizzontali. Questa semplificazione è lecita in pratica, eccettuato nei casi in cui gli strati hanno una pendenza molto forte.)

La resistività verticale R_V , è naturalmente sempre maggiore della resistività longitudinale R_H . Il rapporto $\sqrt{R_V/R_H}$, è chiamato per definizione coefficiente di anisotropia, ed indicato col simbolo λ .

I calcoli e le esperienze pratiche sul terreno mostrano che quei dispositivi che non sono influenzati dalla presenza del foro registrano la resistività orizzontale R_H . Questo è il caso del log induttivo, del laterolog e dell'inversa quando il rapporto R_V/R_H è basso o comunque non eccessivamente alto. A causa dell'influenza del foro di sonda la piccola normale, e, per un'estensione minore, la grande normale, registrano valori che sono maggiori di R_H . Si è osservato in particolare che con il log elettrico induttivo, (combinazione del log induttivo, piccola normale e P.S) i valori delle resistività registrati dal log induttivo al livello degli strati argillosi, sono generalmente più bassi di quelli registrati dalla piccola normale.

C A P I T O L O S E C O N D O

P O T E N Z I A L E S P O N T A N E O (P S) N E I P O Z Z I

2 - 1 - Il potenziale spontaneo PS è stato più volte ricordato nell'introduzione e nel Cap. 1°. La curva del PS è una registrazione delle differenze di potenziale spontaneo che si generano fra un elettrodo di superficie ed un elettrodo nella colonna del fange, conduttivo, quando quest'ultimo elettrodo si trova in corrispondenza di differenti formazioni. Gli elettrodi sono di materiale relativamente stabile: piombo, ed ogni differenza di potenziale costante fra l'elettrodo di superficie e quello nel pozzo può essere controbilanciata da un voltaggio regolabile mediante un circuito potenziometrico. Dato che l'elettrodo di superficie rimane fermo, il suo potenziale è costante; così il log del PS è la registrazione della variazione del potenziale dell'elettrodo calato nel pozzo. La fig. 2-1 mostra un semplice circuito per la misura del potenziale spontaneo. In essa non è disegnato il potenziometro.

Nella curva del PS, le differenze di potenziale si contano positivamente da sinistra a destra.

In genere è possibile riconoscere nella curva del PS una linea di base abbastanza ben definita, corrispondente alla sezione delle argille e situata, sul film registrato, nella parte destra della colonna del potenziale spontaneo. Gli spostamenti di questa linea di base verso sinistra (cioè in senso negativo) indicano in genere strati permeabili, come ad esempio sabbie. Sebbene la curva del PS indichi le zone permeabili non c'è diretta relazione fra la grandezza dello spostamento del PS e la permeabilità o la porosità dello strato.

2 - 2 - Le caratteristiche della curva del PS, come vedremo più

oltre in questo capitolo, dipendono in gran parte dal fango di perforazione e dalle formazioni incontrate.

In generale, a meno che il fango non sia a base d'olio o a base d'acqua, ma praticamente saturo di sale, si può ottenere una buona curva del potenziale spontaneo da cui è possibile:

- a) Localizzare gli strati permeabili
- b) Stabilire i loro confini (eccetto i casi in cui le formazioni sono troppo resistive).
- c) Correlare tali strati.
- d) Ottenere buoni valori per R_w , cioè per la resistività dell'acqua di formazione.

ORIGINE DEL POTENZIALE SPONTANEO

2 - 3 - Dato che l'elettrodo di superficie rimane ad uno stesso potenziale costante, le variazioni di differenza di potenziale che sono registrate sul log del PS sono dovute a variazioni di potenziale nell'elettrodo calato nel pozzo. Queste variazioni di potenziale nel pozzo sono causate da differenze ohmiche di potenziale nella colonna del fango dovute a correnti circolanti intorno alle zone di contatto fra gli strati permeabili, le argille adiacenti e la colonna del fango. Le correnti che percorrono circuiti chiusi sono prodotte essenzialmente da forze elettromotrici (f.e.m) di origine elettrochimica che si sviluppano nei punti di contatto del fango di perforazione (o del suo filtrato) con l'acqua di formazione nei pori degli strati permeabili, e attraverso le argille adiacenti.

Un altro fenomeno che può provocare il sorgere di una f.e.m at-

traverse il pannello in corrispondenza di uno strato permeabile e l'elettrofiltrazione. Il filtrato del fango nel passare attraverso il pannello tende a produrre una f.e.m. positiva in direzione del flusso che si aggiunge alla f.e.m. elettrochimica. Una lunga esperienza pratica ha mostrato che nella maggior parte dei casi questo effetto addizionale è relativamente piccolo ed in pratica trascurabile. Infatti secondo recenti esperienze (°) la f.e.m. attraverso il pannello può essere abbastanza grande, ma viene in gran parte annullata dalla f.e.m. di elettrofiltrazione che si genera attraverso le argille adiacenti.

Perciò da questo paragrafo in poi non sarà più trattato l'effetto di elettrofiltrazione ma verrà considerato solo il fenomeno elettrochimico.

2 - 4 - La seguente discussione, dal paragrafo 2-4 al paragrafo 2-9 si riferisce a sabbie pulite. La fig. 2-2 mostra una sabbia pulita fra due strati di argilla, attraversati da un sondaggio contenente fango conduttivo (a base d'acqua). Nella parte inferiore della figura sono tracciate schematicamente le correnti del PS le quali circolano in questo senso:

fango/filtrato del fango/acqua di formazione/argilla/fango.
 In effetti la f.e.m. dell'anello: fango/filtrato del fango sembra che sia praticamente nulla perchè sebbene le resistività del fango e del suo filtrato possono differire, le loro attività elettrochimiche dovrebbero in genere essere le stesse.

La catena suddetta può quindi essere suddivisa in due parti per

(°) M. Gondouin and C. Scala: Streaming Potential and the S.P.
 Log. ADME, Dallas Meeting, Oct. 1957.

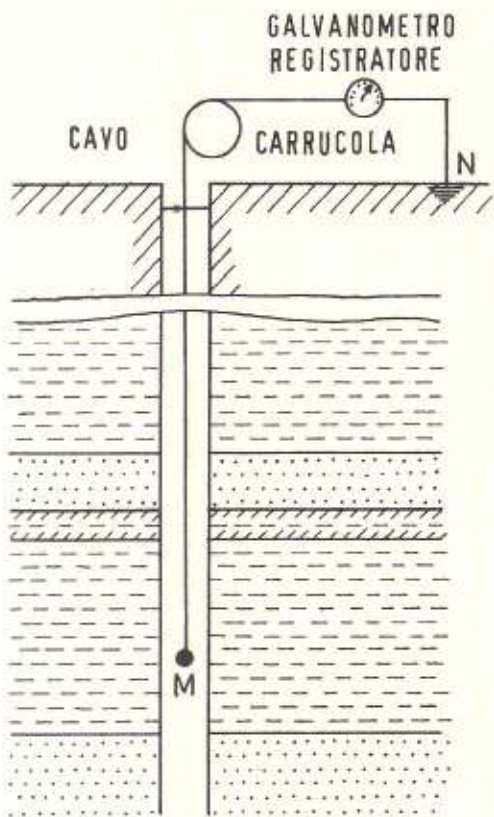
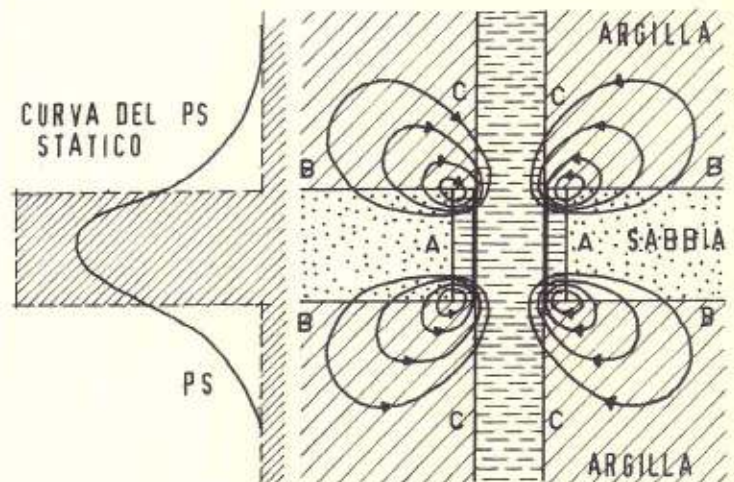
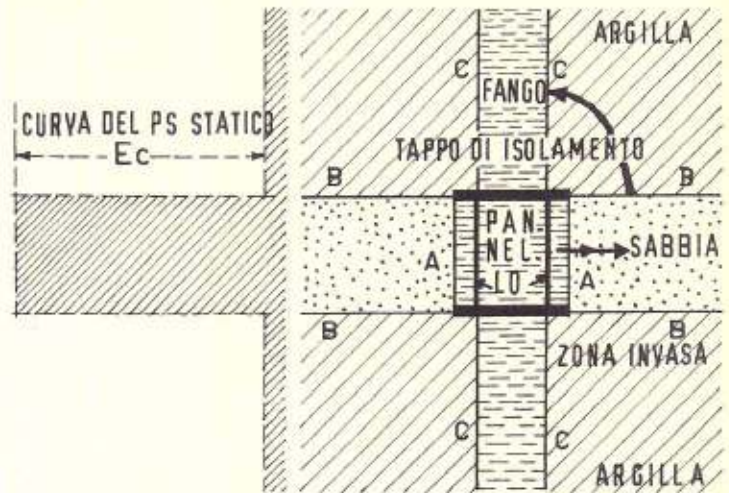


FIG. 2-1 CIRCUITO SCHEMATICO PER LA REGISTRAZIONE DEL PS.



----- CURVA DEL PS STATICO --- POTENZIALE CALCOLATO IN FANGO QUANDO LA CIRCOLAZIONE DELLE CORRENTI DEL PS VIENE IMPEDITA.

————— REGISTRAZIONE DEL PS CALCOLATO IN FANGO QUANDO LE CORRENTI DEL PS SONO LIBERE DI CIRCOLARE.

FIG. 2-2 SCHEMA DELL'ANDAMENTO DEL POTENZIALE E DELLE LINEE DI CORRENTE ALL'INTERNO ED ATTORNO A UNO STRATO PERMEABILE.

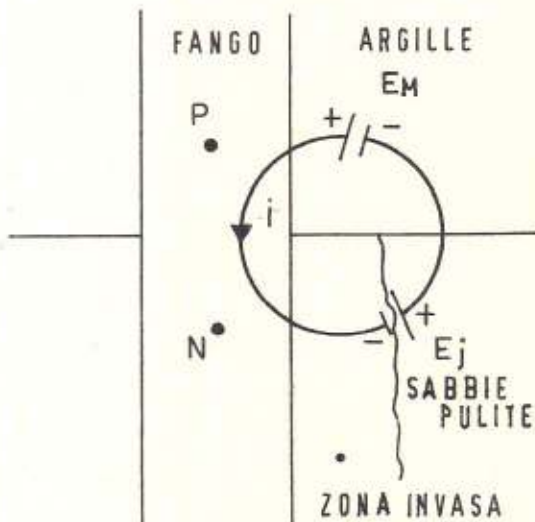


FIG. 2-3 SCHEMA DELLE CORRENTI DEL PS DOVUTE AL POTENZIALE DI MEMBRANA (E_M) E A QUELLO DI CONTATTO FRA LIQUIDI (E_j).

un esame più accurato. Una parte è:

acqua di formazione/argilla/fango, e questa parte dà origine al "potenziale di membrana" E_M .

La seconda parte è:

filtrato del fango/acqua di formazione, e questa parte determina il potenziale da contatto di liquidi E_f .

La f.e.m. totale di tutta la catena risulta così dalla somma algebrica $E_M + E_f$, e questa f.e.m. totale " E_G " è la f.e.m. che genera la corrente del PS.

Esamineremo nei prossimi paragrafi il modo in cui E_M ed E_f vengono generate.

2 - 5 - Potenziale di membrana

Un esame della fig. 2-3 rivela che E_M è la f.e.m. fra due diversi elettroliti (acqua di formazione e fango), separati da argilla. Si può anche supporre che l'acqua di formazione sia una soluzione salina con concentrazione sempre maggiore del fango. Supponiamo inoltre come si verifica nella maggior parte dei casi, che ambedue gli elettroliti siano costituiti essenzialmente da soluzione di cloruro di sodio.

Le argille sono costituite da piani di atomi di alluminio, silicio ed ossigeno. Naturalmente possono essere presenti anche altri atomi, ma il fatto importante è che la struttura dell'argilla è tale che gli orli dei piani sono costituiti da atomi negativi di ossigeno. A causa di ciò la struttura ha carica prevalentemente negativa, quindi attrarrà e permetterà il passaggio di ioni positivi (ad es. sodio), ma respingerà ed impedirà il passaggio di quelli negativi, (cloro).

Le argille si comportano come un " setaccio " di ioni: lasciano passare gli ioni sodio, ma non gli ioni cloro.

Quando uno strato di argilla separa due soluzioni di cloruro di sodio di diversa concentrazione, gli ioni sodio di ambo le soluzioni possono migrare attraverso l'argilla, ma il numero di tali ioni che passano da una soluzione all'altra, dipenderà dal numero di ioni sodio presenti in ciascuna delle due soluzioni. Sarà maggiore il passaggio dalla soluzione più concentrata (C_1) che non da quella a concentrazione minore (C_2). Ne risulta che la zona di contatto fra l'argilla e la soluzione più debole (C_2) acquisterà carica positiva, mentre la soluzione più concentrata (C_1) verrà ad acquistare carica prevalentemente negativa. Così esisterà attraverso lo strato di argilla una differenza di potenziale o f.e.m., e questa verrà ad essere proprio il potenziale di membrana E_M .

Nel caso ora considerato occorrono solo pochi minuti per stabilire una condizione di equilibrio in cui, se il circuito è aperto, si ha una più netta migrazione di ioni. Se il circuito viene chiuso, allora la migrazione degli ioni riprende, e per quantità molto piccole di soluzione, la concentrazione tende ad uguagliarsi ed E_M tende a sparire solo dopo un tempo assai grande. In effetti, nel terreno, il circuito è sempre chiuso attraverso la colonna del fango e le formazioni adiacenti. I volumi delle soluzioni, però, sono molto grandi e la corrente dovuta alla migrazione degli ioni è molto piccola (dell'ordine dei milliampere), perciò le cose stanno come se nelle due soluzioni non si verificasse alcuna migrazione di ioni ed in pratica non si ha nessuna variazione di E_M . Lo stesso si può dire per il potenziale da contatto di liquidi, che verrà preso in esame nel prossimo paragrafo.

2 - 6 - Potenziale da contatto di liquidi (diffusione)

Questo potenziale appare, negli strati permeabili, al contatto fra il filtrato del fango e l'acqua di formazione. Ha un'origine un

po' più complessa di E_M , ma grosso modo possiamo figurarcene nel modo seguente:

Supponiamo ancora che l'acqua di formazione ed il filtrato del fango siano soluzioni di cloruro di sodio aventi rispettivamente concentrazioni C_1 e C_2 , con $C_1 > C_2$. È evidente che essi sono ora in diretto contatto l'una con l'altro. Sia gli ioni sodio che gli ioni cloro possono ora passare liberamente da una soluzione all'altra, in quanto non c'è niente che separi le due soluzioni.

In quanto è $C_1 > C_2$, si avrà una netta migrazione degli ioni, sia di sodio che di cloro, dalla soluzione più concentrata a quella più diluita.

Comunque lo ione sodio ha dimensioni maggiori ed ha una forte affinità per l'acqua, mentre lo ione cloro è più piccolo ed ha una minore affinità per l'acqua, perciò gli ioni cloro si spostano con velocità maggiore degli ioni sodio. Il risultato è che la soluzione più debole si carica di segno negativo, quella più forte di segno positivo e la differenza di potenziale risultante è la f.e.m. E_J , cioè il potenziale da contatto di liquidi.

Questo potenziale da contatto di liquidi raggiunge un valore minore di quello che avrebbe il potenziale di membrana per la stessa soluzione, perchè qui possono migrare sia gli ioni cloro che gli ioni sodio. È solo l'eccesso degli ioni cloro sugli ioni sodio che determina il potenziale E_J . In pratica E_J è circa un quinto di E_M per le soluzioni di cloruro di sodio.

2 - 7. La fig. 2-3 mostra schematicamente la parte alta di uno strato di sabbia pulita, ricoperto di argilla, con il foro di sonda a sinistra ed una piccola zona invasa presente nella sabbia. Le f.e.m. E_M ed E_J sono rappresentate come minuscole batterie, con le polarità disposte come abbiamo detto in precedenza ($C_w > C_{mf}$, oppure $R_w < R_{mf}$).

Questa f.e.m. produce la corrente "i" del P.S. che fluisce nella sabbia, attraverso l'argilla, nel foro di sonda ritorna di nuovo nella sabbia. La caduta ohmica di potenziale corrispondente alla circolazione della corrente lungo tutto il percorso, è uguale ad E_c .

Nel punto "P", nella colonna del fango, in corrispondenza della argilla, il potenziale sarà positivo rispetto a quello del punto "B", in corrispondenza della sabbia. Dato che gli spostamenti del P.S. si leggono rispetto alla linea base delle argille, ne deriva che gli spostamenti che si ottengono in corrispondenza degli strati permeabili (sabbie), saranno negativi.

Si può dimostrare termodinamicamente che per soluzioni ideali oppure anche relativamente diluite di cloruro di sodio, E_M ed E_J , sono legate alle rispettive concentrazioni dalle seguenti equazioni:

$$E_M = K_1 \log_{10} \frac{C_w}{C_{mf}} \quad (2-1)$$

$$E_J = K_2 \log_{10} \frac{C_w}{C_{mf}} \quad (2-2)$$

in cui C_w e C_{mf} sono rispettivamente le concentrazioni dell'acqua di formazione e del filtrato del fango, e K_1 e K_2 sono coefficienti di cui entra a far parte, insieme con altri fattori, la temperatura assoluta.

Per soluzioni reali, invece delle concentrazioni (C_w e C_{mf}) si dovrebbero usare le attività chimiche (a_w ed a_{mf}) delle soluzioni. Inoltre si può stabilire una certa temperatura, ad es. 75° F (23.9 °C) per fissare i valori di K_1 e K_2 . Così, per soluzioni reali di cloruro di sodio, a 75° F, si ha per qualsiasi concentrazione:

$$E_M = 59 \log_{10} \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (2-3)$$

$$E_j = 12 \log_{10} \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (2-4)$$

in cui a_w ed a_{mf} sono rispettivamente le attività chimiche dell'acqua di formazione e del filtrato del fango (a 75 °F), ed E_M ed E_j sono espressi in millivolts.

La f.e.m. totale E_o è la somma di E_M ed E_j :

$$E_o = 71 \log_{10} \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (2-5)$$

L'equazione 2-5 ha carattere generale purchè, sia l'acqua di formazione, sia il filtrato del fango siano essenzialmente soluzioni di cloruro di sodio, a qualsiasi concentrazione, a 75 °F.

Le attività chimiche di soluzione sono strettamente legate alle resistività. All'interno di una vasta gamma di valori le attività delle soluzioni di cloruro di sodio sono inversamente proporzionali alle loro attività, così, ai fini pratici, al rapporto a_w/a_{mf} si può sostituire il rapporto R_{mf}/R_w . Questo fornisce le basi per la determinazione della resistività dell'acqua di formazione dalla curva del P.S. Questo punto verrà discusso con maggior dettaglio nel paragrafo 2-15.

CIRCOLAZIONE DELLE CORRENTI DEL P.S.

2-8. La parte inferiore della fig. 2-2 mostra schematicamente la circolazione delle correnti del P.S. intorno alle zone di contatto fra il fango, la zona invasa, la sabbia impregnata d'acqua, l'argilla ed ancora il fango, come è indicato, ancor più schematicamente in fig. 2 - 3. Ciascuna linea rappresenta una linea di flusso della corrente. Ciascuna corrente attraversa necessariamente le tre zone di confine A, B, C. Nei casi normali, quando l'acqua di formazione è

più salata del fango, E_c è positivo e le correnti circolano nella direzione indicata dalle frecce. La differenza di potenziale fra un punto generico nella colonna del fango, in corrispondenza delle sabbie ed un altro punto in corrispondenza delle argille, è negativo come è già stato ricordato nel paragrafo 2-7, con riferimento alla fig. 2-3.

Lungo il suo percorso la corrente del P.S. deve aprirsi la strada attraverso una serie di resistenze, sia nel terreno che nel fango. Lungo una linea chiusa di flusso di corrente, la caduta ohmica di potenziale complessiva è necessariamente uguale alla somma algebrica delle f.e.m. incontrate.

Inoltre, dato che il valore del flusso di corrente è costante lungo tutto il suo percorso, la caduta di potenziale varia secondo la resistenza della sezione attraverso la quale passa la corrente. Questo significa che la caduta totale di potenziale (che è uguale alla somma delle f.e.m.), viene divisa, fra le diverse formazioni ed il fango, in proporzione alle resistenze incontrate dalla corrente in ciascun mezzo. Di conseguenza, la caduta di potenziale nel fango di perforazione, ci dà la misura solo di una parte della f.e.m. totale però, in genere, di gran parte della stessa, perchè la resistenza elettrica offerta dal fango è molto maggiore di quella offerta dalle formazioni.

IL P.S. STATICO (FORMAZIONI PULITE)

2-9. E' conveniente usare una rappresentazione ideale in cui si suppone che delle piastre isolanti, disposte come è mostrato nella parte alta della fig. 2-2, impediscano alle correnti del P.S. di circolare. In queste condizioni, il valore del potenziale in ogni singolo mezzo limitato dalle piastre suddette, sarà costante. Co-

unque il potenziale stesso varierà da mezzo a mezzo, e la differenza di potenziale nei diversi mezzi sarà uguale alla f.e.m. che esiste nelle diverse zone di contatto.

Se si potesse fare una registrazione del potenziale in questo caso ideale, si otterrebbe un log come quello rappresentato a tratteggio nella parte sinistra della fig. 2-2. Un tale diagramma, tracciato per il caso in cui non si ha flusso di corrente, o in altri termini in condizioni statiche, si chiama "Diagramma del P.S. statico". La differenza dei potenziali nel fango, fra le due piastre e fuori, si chiama "P.S. statico" (P.S.S.) dello strato ed è uguale a $-E_c$. Ma E_c dall'equazione 2-5 risulta uguale a $K \log_{10} \frac{a_w}{a_{mf}}$ (in cui $K = 71$ a 75° F.). Quindi per soluzioni di NaCl:

$$\text{P.S.S.} = -K \log_{10} \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (2-6)$$

La f.e.m. totale che genera la corrente del P.S. ed il P.S.S. può variare da un sondaggio all'altro perchè le salinità del fango e/o delle formazioni sono sensibilmente diverse. In un dato pozzo comunque, per gli stessi tipi di formazioni e per valori della profondità aventi lo stesso ordine di grandezza, c'è una netta tendenza delle f.e.m. ad assumere gli stessi valori per tutti gli strati. Le sabbie ad acqua dolce e ad alta salinità daranno "peaks" (escursioni) rispettivamente di piccola e grande ampiezza. La polarità del peak può essere anche invertita quando l'acqua nella sabbia ha una salinità inferiore a quella del fango.

Strati permeabili con diversa porosità o con diverse dimensioni dei granuli, se tutti gli altri fattori rimangono invariati, danno luogo a f.e.m. uguali. Le f.e.m. sono inoltre indipendenti dalla permeabilità anche quando questa raggiunge valori di frazioni di millidarcy.

EFFETTI DELLE ARGILLE INTERSTIZIALI SUL P.S.

IL P.S. PSEUDOSTATICO

2-10. La presenza di argille, con la loro carica prevalentemente negativa, in uno strato permeabile, riduce la migrazione degli ioni cloro carichi negativamente e favorisce quella degli ioni sodio carichi positivamente. Così il potenziale di contatto di liquidi viene ridotto e con l'aumento della percentuale di argilla nello strato E_j può diventare zero, nel qual caso $E_c = E_M$. Un ulteriore aumento del contenuto di argilla nella sabbia provoca un aumento di E_j in senso opposto rispetto ad E_M . Così l'effetto dell'argilla interstiziale è quello di ridurre la f.e.m. totale E_c ($E_c = E_M + E_j$). Al limite, per un contenuto in argilla del 100 %, $E_j = -E_M$, ed E_c diventa zero; cioè la "sabbia" è ora costituita unicamente da argilla e indistinguibile quindi dalle argille circostanti.

Supponendo ancora che le correnti del P.S. siano sbarrate dalle piastre isolanti poste all'altezza delle facce di strato, la differenza dei potenziali nel fango, fra le piastre e fuori, viene chiamata "P.S. pseudostatico" (P.S.P.).

Per valori rispettivamente uguali delle attività del fango e dell'acqua di formazione, il P.S. pseudostatico di una sabbia argillosa è minore del P.S. statico di una sabbia pulita. Il rapporto P.S.P./P.S.S. viene chiamato fattore di riduzione e viene indicato col simbolo " α ". Il fattore di riduzione dipende dalla quantità e dalla natura dell'argilla interstiziale.

La presenza di olio in una sabbia argillosa tende ad aumentare l'effetto dell'argilla in quanto l'olio tende a costringere i movimenti di migrazione degli ioni sodio e cloro lungo percorsi che

sono più vicini alle superfici argillose cariche negativamente. Così la diffusione attraverso una rete argillosa nella sabbia ^{di olio} diventa relativamente più importante che in una sabbia ad acqua.

A parità di tutte le altre condizioni, il P.S.P. di una sabbia ad olio sarà quindi minore di quello di una sabbia ad acqua. (°)

Per le stesse ragioni, se due sabbie, ambedue impregnate d'acqua al 100 %, contengono la stessa quantità dello stesso tipo di argilla per unità di volume, e se le attività chimiche del fango e dell'acqua di formazione sono le stesse, la sabbia con porosità minore, mostrerà pure un minore PSP. In formazioni a bassa porosità è sufficiente una piccola quantità di argilla per ridurre sensibilmente le deflessioni del P.S. Inoltre il P.S.P. di sabbie ad alta porosità imbevute d'acqua, è praticamente uguale al P.S.S., finché il contenuto in argilla rimane abbastanza basso, ad es. di poche unità per cento.

Lo stesso effetto può essere descritto considerando che il P.S.P. dipende dalla resistività della formazione. In una formazione, fermi restando tutti gli altri parametri, a maggiore resistività corrisponde un minore P.S.P.

(°) A questo riguardo è stato dimostrato in laboratorio che, per un materiale siliceo, pulito, impregnato d'acqua ed a grana molto fine, contenente soluzioni ad alta resistività, si verifica una debole riduzione del P.S. quando le dimensioni dei pori sono così piccole e/o la saturazione in olio è così grande che la conducibilità della superficie della roccia non è più trascurabile. Questo effetto però, anche nelle condizioni più sfavorevoli può forse provocare nel P.S. una riduzione solo di pochi millivolts.

Cfr. J.K. Kerver and C.L. Prokop: Effect of the Presence of Hydrocarbons on Well Logging Potentials. SPE of AIME, Los Angeles Meeting, Oct. 1957.

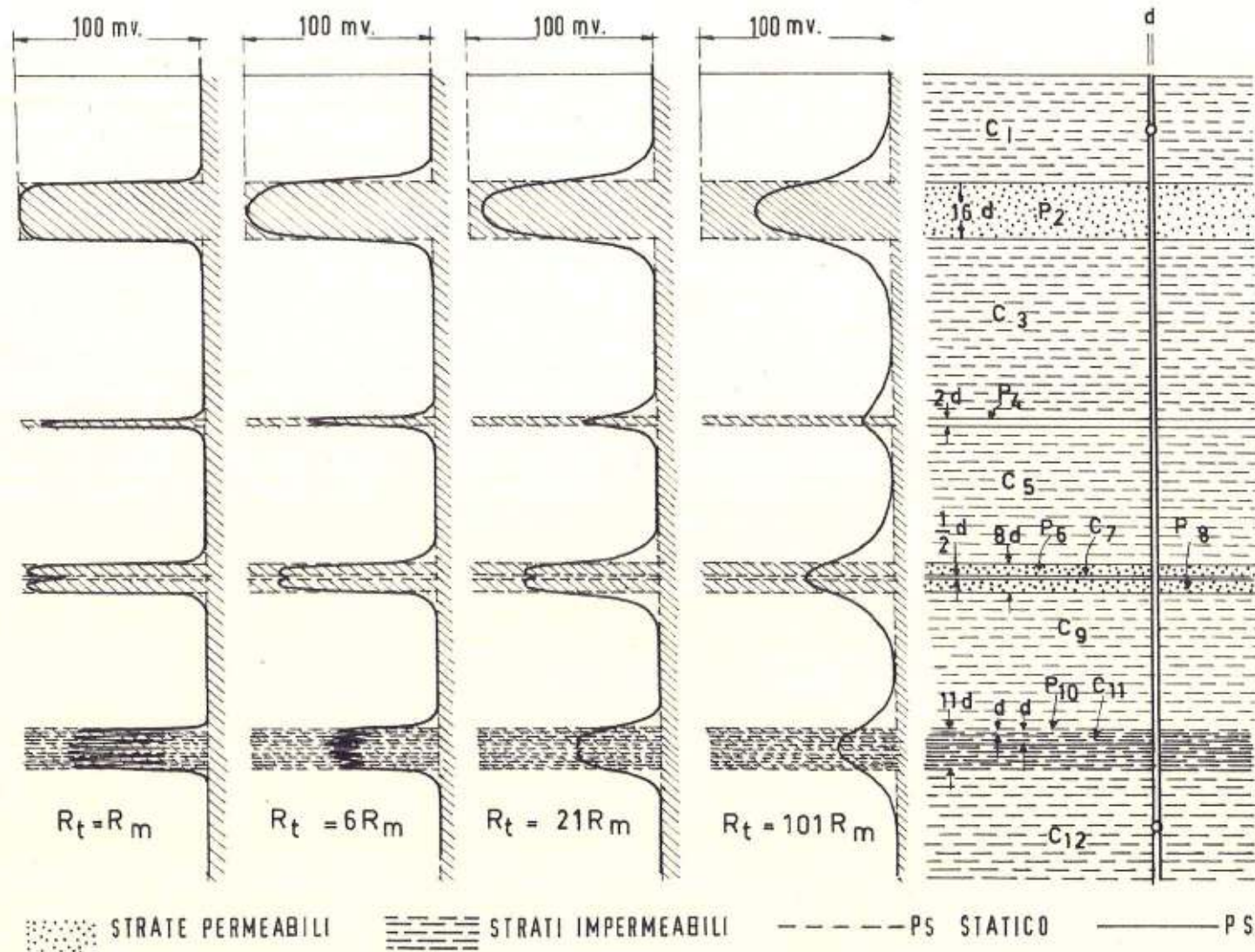


FIG. 2-4 COMPARAZIONE DELLE CURVE DEL PS PER DIFFERENTI VALORI DEL RAPPORTO R_t/R_m .

FATTORI CHE INFLUENZANO LA FORMA E L'AMPIEZZA DEI "PEAKS" DEL P.S.

2-11. Come è indicato in fig. 2-2, le correnti circolano nel fango, non solo di fronte alla formazione permeabile, ma anche a breve distanza dai suoi confini. Ne risulta che, sebbene nel diagramma del P.S. statico i limiti dello strato permeabile siano indicati da un salto brusco, il log del P.S. mostra un cambiamento graduale nel potenziale, che si estende lungo il pozzo, oltre i confini dello strato.

Uno studio della circolazione della corrente mostra che i confini dello strato sono situati all'altezza dei punti di flesso della curva del P.S. Questo ci offre la possibilità di determinare lo spessore degli strati dalla curva del P.S.

Il log del P.S. registra solo quella parte di caduta di potenziale che si verifica nel fango, perciò l'ampiezza del peak del log del P.S. si avvicina all'ampiezza del P.S. statico (o del P.S.P. nel caso di formazioni argillose), solo quando la resistenza offerta alla corrente dallo strato in esame e delle formazioni adiacenti è trascurabile rispetto alla resistenza del fango nel pozzo.

Questo risultato viene raggiunto quando lo strato è sufficientemente spesso.

L'ampiezza del peak nel log registrato in corrispondenza di un dato strato, dipende naturalmente dai valori del P.S.S. in formazioni pulite o dal P.S.P. in formazioni argillose. Inoltre la forma e l'ampiezza delle escursioni possono venire influenzate dai seguenti fattori:

- Spessore dello strato.
- Resistività dello strato, delle formazioni circostanti e del fango.

- Diametro del pozzo.
- Profondità dell'invasione.

Il log del P.S. può inoltre venire influenzato dalla mancanza di omogeneità da parte del fango: un cambiamento della salinità del fango, ad un certo livello, si manifesta con un salto, a quel livello, nella linea base delle argille. Si è trovato però, in pratica, che questi cambiamenti di salinità sono molto rari.

Il modo in cui i fattori sopra elencati influenzano il PS, verrà spiegato in primo luogo per il caso di strati permeabili intercalati ad argille, come è mostrato in fig. 2-2. In questo caso le resistività degli strati permeabili sono in genere leggermente superiori o all'incirca uguali a quelle delle argille. Questo caso è tipico delle cosiddette "formazioni tenere", come serie di sabbie ed argille. Il caso di formazioni dure sarà discusso più oltre.

2-12. Formazioni tenere

a) - Calcoli teorici ed esperienza di campagna hanno dimostrato che l'ampiezza delle escursioni del P.S. è praticamente uguale a quella del PS statico (in caso di sabbia pulita) ed a quella del PS pseudostatico (in caso di sabbia argillosa), quando gli strati permeabili sono spessi e quando le resistività delle formazioni non sono troppo grandi in confronto a quella del fango. Inoltre, in questo caso, la curva del P.S. definisce i limiti dello strato con grande precisione.

L'ampiezza dell'elongazione è minore del P.S. statico e del P.S. pseudostatico nel caso di strati sottili, e quanto più sottile è lo strato, tanto minore è l'escursione.

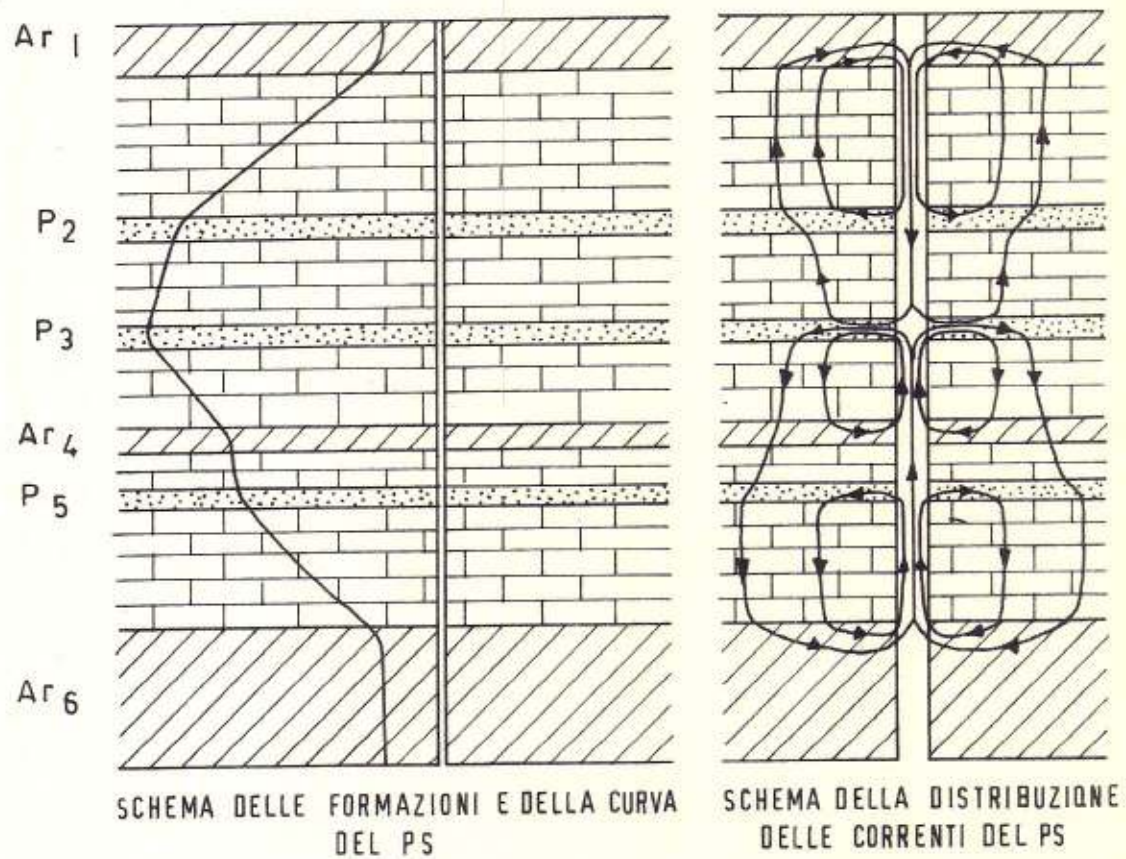
b) - D'altra parte, quando la resistività della formazione R_t è considerevolmente maggiore di quella del fango R_m , le curve del P.S. sono arrotondate, i confini sono marcati con meno accuratezza e, a parità delle altre condizioni, l'ampiezza del peak è minore di quando il rapporto R_t/R_m è vicino ad 1.

La fig. 2-4 illustra teoricamente l'influenza dello spessore degli strati e della resistività delle formazioni. A scopo di paragone si è supposto che il P.S. statico fosse lo stesso per tutti gli strati permeabili, ed uguale a -100 mv. Inoltre, per semplificare i calcoli, si è supposto che la profondità di invasione negli strati permeabili, fosse abbastanza debole da essere trascurata.

La fig. 2-4 mostra inoltre che l'anomalia del P.S. si spinge assai oltre i confini dello strato quando R_t/R_m è grande e, quanto maggiore è R_t , tanto più sensibile è questo effetto.

Appare evidente che la salinità del fango ha un effetto predominante sulla curva del P.S. - La salinità delle acque di formazione è in genere molto alta, cosicchè, se il fango è molto salato, anche i potenziali elettrochimici sono molto bassi. Inoltre, quanto più bassa è la resistività del fango rispetto alla resistività della formazione, tanto più ampia è l'estensione dell'escursione al di sopra ed al di sotto degli strati permeabili. Si osserva inoltre che il log del P.S. presenta escursioni molto piccole e risulta quasi piatto quando il pozzo contiene fango avente alta conducibilità. Nel caso di acque relativamente dolci, un fango conduttivo può dare peaks invertiti (escursioni rivolte verso il lato positivo), qualora la sua resistività sia abbastanza bassa.

Le curve in fig. 2-4 si riferiscono a strati successivi aventi valori di resistività uguali o molto simili. In pratica questo caso non è sempre verificato, e la resistività di strati successivi può




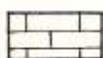

-  ARGILLE (IMPERM. E RELATIVAMENTE CONDUTTIVE)
-  FORMAZIONE COMPATTA (RESISTIVITA' ELEVATA)
-  FORMAZIONE PERMEABILE (RELATIVAMENTE PERMEABILE)

FIG. 2-5 RAPPRESENT. SCHEMATICA DELL'ANDAMENTO DEL PS IN FORMAZIONE AD ELEVATA RESISTIVITA'

essere anche molto diversa, come ad esempio quando delle argille sono intercalate da sabbie impregnate d'olio. In tal caso la curva del P.S. appare più arrotondata nella formazione più resistiva che nell'altra. Le posizioni dei punti di flesso cambieranno a seconda dei peaks, ma esse continueranno a segnare i confini degli strati.

c) - Un aumento del diametro del foro influisce all'incirca come un aumento nel rapporto R_t/R_m . Esso tende cioè ad arrotondare le escursioni sul log del P.S. ed a ridurre l'ampiezza dei peaks in corrispondenza degli strati.

d) - Gli strati permeabili in genere sono invasi dal filtrato del fango. Come è indicato in fig. 2-2, una frazione delle linee di corrente del P.S. passa direttamente dall'argilla nella zona invasa senza penetrare nella colonna del fango. Ne risulta quindi che la presenza della zona invasa ha un effetto sul log del P.S. simile a quello di un aumento del diametro del foro. I peaks sono quindi più ampi che non nel caso in cui non si ha invasione.

2-13. Formazioni dure

Tali formazioni hanno in genere alta resistività, se si accettano i due seguenti tipi di zone conduttive:

a) - Strati permeabili, sia impregnati di olio che di acqua, che sono conduttivi a causa dell'acqua capillare (in genere ad alta salinità), presente nei loro pori.

b) - Argille, che sono impermeabili.

Gli strati permeabili, in genere, non sono adiacenti alle argille, ma ne sono separati da formazioni compatte.

La fig. 2-5 mostra un'alternanza di strati permeabili, strati compatti ed argille. Vi è rappresentata in modo molto schematico la circolazione delle correnti del P.S.

Le correnti del P.S., che sono generate dalle diverse f.e.m., fluiscono nelle sezioni permeabili. Per attraversare le formazioni dure adiacenti, che offrono una forte resistività, queste correnti sono costrette a penetrare in profondità nello strato permeabile in modo da avere a disposizione una sezione trasversale di roccia abbastanza larga. (*) Da lì è più facile per le correnti del P.S. continuare il loro cammino nelle formazioni dure attraverso la larga sezione trasversale piuttosto che convergere rapidamente verso il foro. Esse continuano così finché incontrano gli strati conduttivi di argilla impermeabile attraverso i quali esse possono ritornare al fango del pozzo e, attraverso il fango, allo strato permeabile, completando così il circuito. Esse non possono ritornare al fango attraverso strati permeabili adiacenti perché vi incontrano f.e.m. che le ostacolano. Se accade che il primo strato produttivo che esse trovano è permeabile, si limitano ad attraversarlo, fino a raggiungere gli strati argillosi. Questo è il caso delle correnti che entrano nello strato P_3 . Quelle che fluiscono verso l'alto, devono attraversare lo strato permeabile P_2 per raggiungere l'argilla Sh_1 ; quelle che fluiscono verso il basso, in parte ritornano al pozzo attraverso l'argilla Sh_6 . Sembra che questa sia la causa per cui i peaks corrispondenti alle zone permeabili si allargano al di sopra ed al di sotto di queste zone in maniera apparentemente anormale ed è impossibile determinare con cura i confini delle zone permeabili mediante il log del P.S.

Lungo il pozzo, in corrispondenza di una data formazione dura, le correnti del P.S. rimangono praticamente costanti. Ciò significa che

(*) È noto infatti che la resistenza di un mezzo, espressa dalla formula $R = P \frac{l}{S}$ varia, per valori costanti della resistenza specifica P , S in ragione inversa della sezione S del mezzo stesso. (N.d.T.).

anche la caduta di potenziale per unità di lunghezza del pozzo è pure costante, e dà luogo così ad una pendenza costante nel log del P.S., come è mostrato dalle parti in linea retta del log del P.S. in fig. 2-5. Al livello di ciascuno strato conduttivo una parte della corrente del P.S. entra ed esce dalla colonna del fango, modificando così la pendenza del log del P.S. Per esempio, la pendenza del log del P.S. cambia al livello dello strato P_2 perchè parte della corrente lascia il pozzo e fluisce nello strato.

Come regola generale, in formazioni dure, gli strati permeabili, nel log del P.S., sono caratterizzati da cambiamenti della pendenza o "curvature" che hanno la convessità rivolta verso il lato negativo del log. Le argille sono caratterizzate da curvature con la convessità rivolta verso la parte positiva del log. Le formazioni ad alta resistività corrispondono a parti praticamente rette del log del P.S.

Le indicazioni date nel paragrafo 2-12, comma b) riguardanti gli effetti della salinità del fango, possono applicarsi ugualmente bene nel caso di formazioni dure.

DETERMINAZIONE DI R_w DAL LOG DEL P.S.

La conoscenza di R_w viene usata essenzialmente per la determinazione della saturazione in acqua, per mezzo dell'equazione :

$$S_w = \left(\frac{F R_w}{R_t} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{cfr. Cap. 1, Paragr. 1-5})$$

Come è stato già spiegato nei paragrafi 2-7 e 2-9, le resistività e le attività delle soluzioni sono legate fra loro. Inoltre il rapporto delle attività del filtrato del fango e dell'acqua di formazione

determina nella maggior parte dei casi l'ampiezza del P.S. statico. Il primo passo quindi, per ottenere $R_{\frac{W}{S}}$, è quello di determinare il P.S. statico.

2-14. Determinazione del P.S. statico

Il valore del P.S. statico viene misurato rispetto alla "linea di base delle argille" (linea di riferimento) che può essere tracciata lungo l'orlo positivo della curva. In genere la linea delle argille è una linea retta verticale. (°) La fig. 2-6 mostra un esempio tipico di linea delle argille lungo una sezione di una formazione argillo-sabbiosa.

E' conveniente inoltre tracciare una linea simile lungo l'orlo estremo negativo della curva, in corrispondenza degli strati permeabili. Questa è la "linea delle sabbie", che in genere è parallela alla linea delle argille, almeno per tratti apprezzabili del log.

E' molto probabile che per tutti gli strati in cui i peaks del P.S. raggiungono la linea delle sabbie ci si trovi in presenza delle seguenti condizioni: a) la resistenza dell'acqua di formazione è praticamente la stessa; b) gli strati sono praticamente privi di materiali argillosi; c) l'ampiezza delle escursioni è uguale al P.S. statico.

Per gli altri strati, le ampiezze delle escursioni, contate a partire dalla linea di base delle argille, sono in genere minori

(°) Esperienza di campagna hanno mostrato che in certe regioni ci possono essere cambiamenti nella linea di base delle argille. A volte questi cambiamenti si trovano sistematicamente agli stessi posti nella colonna geologica e possono essere usati come punti repere.

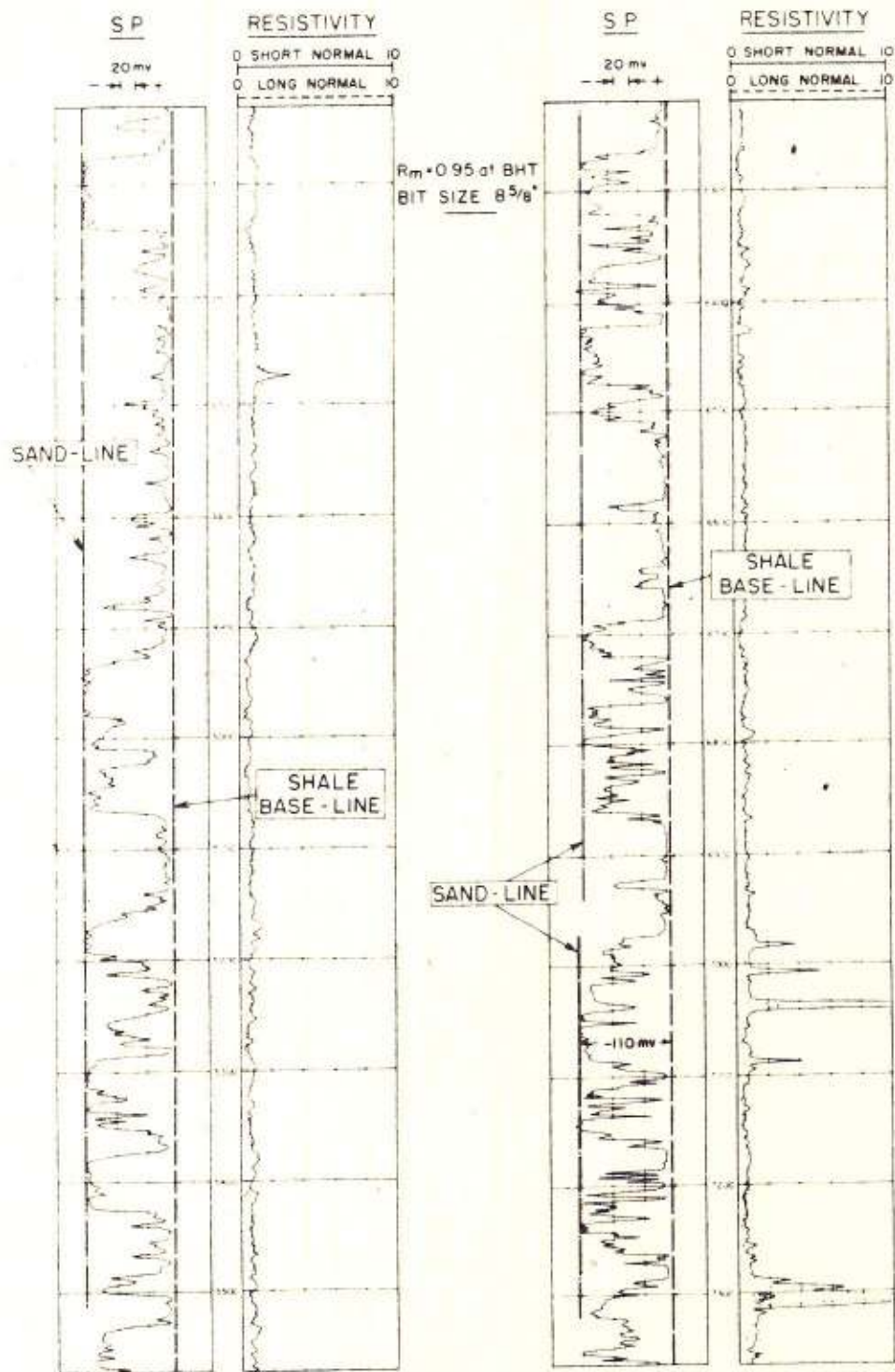


FIG. 2-6 ESEMPIO DI CURVA DEL PS IN TERRENI ARGILLO - SABBIOSI

della differenza fra le letture fatte alla linea delle sabbie e quelle fatte alla linea delle argille, (cioè del P.S. Statico). Questo può essere dovuto all'effetto della distribuzione geometrica dei mezzi situati lungo il percorso della corrente del P.S. (effetti dello spessore degli strati, del pozzo, dell'invasione), come è stato spiegato nei paragrafi 2-11, 2-12, 2-13. La riduzione dell'ampiezza dell'oscursione può anche rispecchiare la presenza di apprezzabili quantità di argilla interstiziale nelle sabbie, (paragr. 2-10).

Sono state fatte ricerche di laboratorio, usando una rete resistiva, per determinare gli effetti sul P.S. della disposizione geometrica e della resistività dei mezzi, ed inoltre per calcolare le correzioni dovute a questi fattori. I risultati verranno pubblicati fra pochi mesi. (°) La fig. 2-7 ad esempio, mostra alcuni dati relativi ad una formazione di spessore $e = 10d$ (10 volte il diametro del pozzo), diametro d'invasione $D_1 = 2,05d$, $\mu_s = R_m$, per diversi valori di R_t/R_s ed R_1/R_m . Sembra che sia necessaria la conoscenza di tutti questi fattori per determinare l'esatto rapporto fra il P.S. misurato ed il P.S. Statico. Ci si può aspettare che l'applicazione dei sistemi di misura di resistività possa permettere la determinazione di questi fattori, almeno nei casi più favorevoli. Frattanto si possono fare delle correzioni approssimate per mezzo di carte empiriche semplificate, come la carta A-8.

(°) Qui si fa riferimento anche ad un'altra serie di risultati, che appaiono nel lavoro di A.E. Worthington ed R.F. Meldau, pubblicato mentre il presente fascicolo era in corso di stampa. V. bibliografia alla fine di questo capitolo.

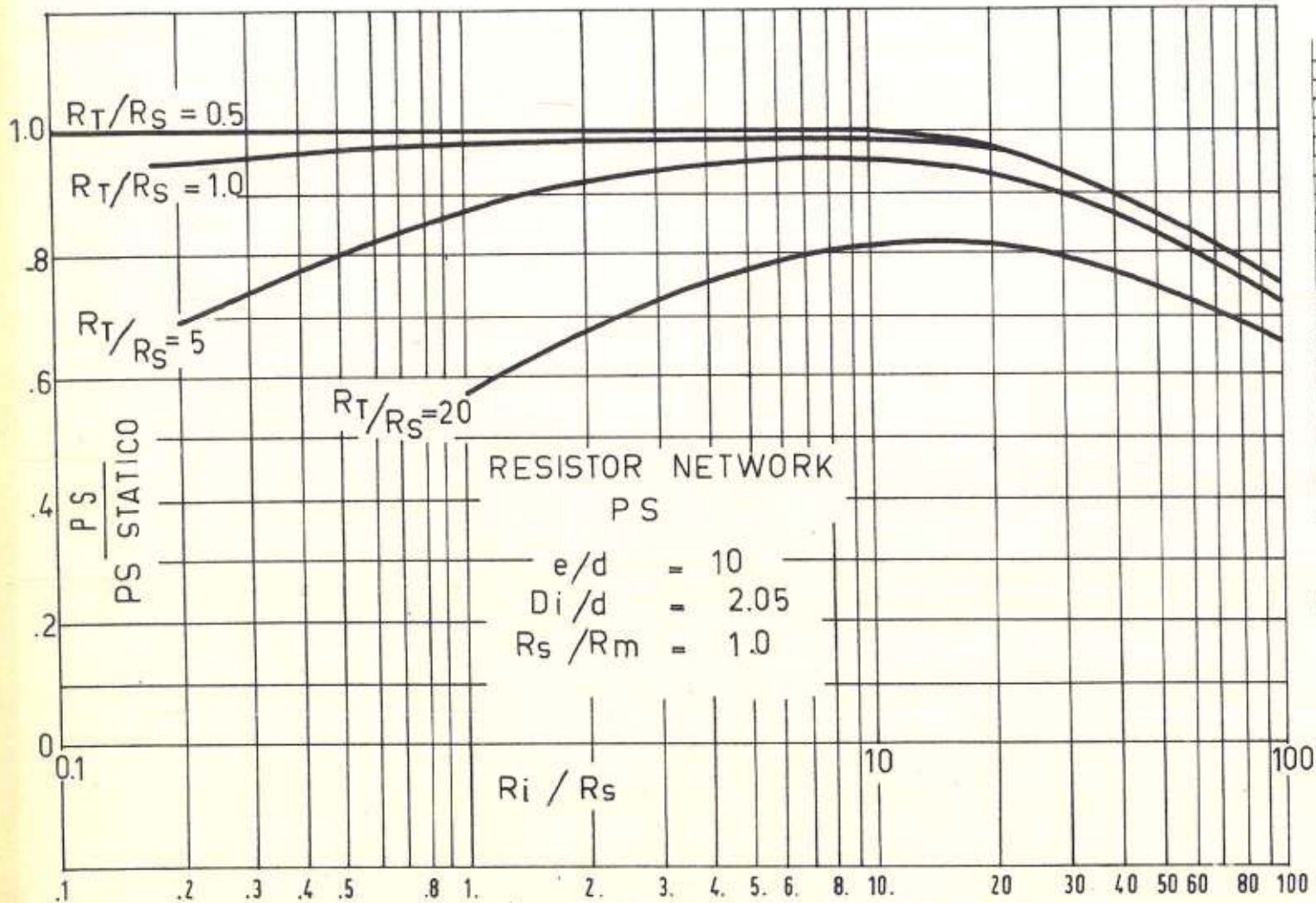


FIG. 2-7 SEPARAZIONE DELLE CURVE DEL PS PER UNO STRATO DI SPESSORE $10d$ CON RELATIVI PARAMETRI

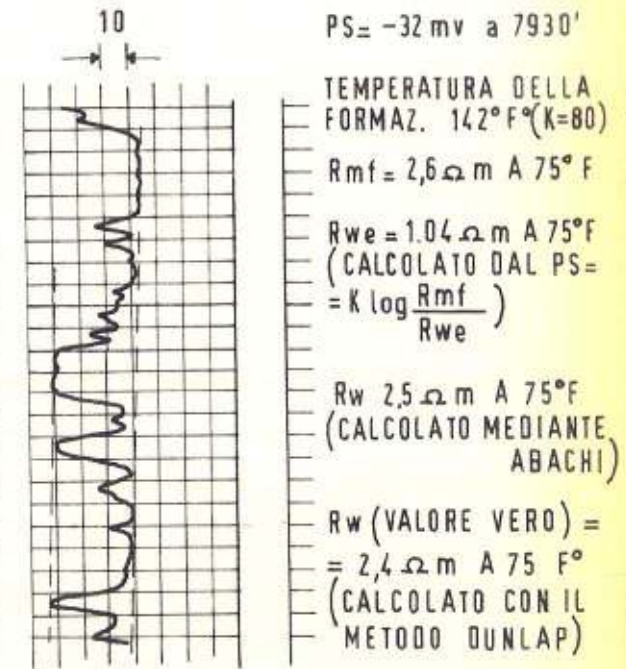


FIG 2-8 ESEMPIO DI FORMAZIONE AD ACQUA DOLCE

Quando un "peak" del PS, dopo la correzione per i suoi fattori (o senza correzioni, se è di uno spessore piuttosto forte), è abbastanza piccolo rispetto al PS Statico; significa in genere che lo strato è una sabbia argillosa. (Un tale effetto può essere prodotto da un cambiamento nella salinità dell'acqua di formazione, ma ciò si verifica piuttosto raramente). L'ampiezza del "peak" del PS, dopo la correzione, se questa è necessaria, dà il valore del PS pseudostatico (P.S.P.) per le sabbie argillose.

Esperienze di campagna hanno mostrato che in formazioni di resistività moderata, come in serie argillo-sabbiose, (ad es. nella Costa del Golfo), la correzione da portare è molto piccola, e in prima approssimazione può essere trascurata quando lo spessore degli strati è superiore a circa 5' o 6'.

In formazioni dure lo spessore limite può essere molto maggiore; comunque lo spessore limite comprende le rocce compatte che possono separare lo strato permeabile dalle argille più vicine. Perciò anche se lo strato permeabile è molto sottile, si può ottenere ugualmente il PS statico purchè lo spessore fra lo strato in esame e le argille più vicine sia abbastanza grande.

2 - 15 : R_w del PS Statico (*)

a) - Fango regolare.

Supponiamo all'inizio che il fango non contenga gesso o cloruro di calcio. Questo è il caso più comune. Secondo i dati disponibili fino ad oggi, tale fango, per quanto riguarda il PS si comporta in genere come una soluzione di cloruro di sodio puro.

(*) Una discussione più dettagliata si può trovare nel lavoro di Gondouin ed all.

Anche le acque di formazione ad alta salinità si comportano in genere come soluzioni di cloruro di sodio perchè la concentrazione degli altri sali è relativamente bassa ed il loro effetto è trascurabile.

In queste condizioni, il P.S. Statico, come si è visto nel paragrafo 2-9, è espresso dall'equazione:

$$\text{P.S.S.} = -K \log 10 \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (2 - 6)$$

Quando la salinità dell'acqua di formazione è relativamente bassa, l'effetto degli altri sali, e particolarmente degli ioni bivalenti Ca ed Mg, diviene importante. L'equazione 2-6 non è più applicabile e deve essere sostituita da una più complessa.

In ogni caso, è stato trovato che il P.S.S può essere convenientemente espresso mediante la formula:

$$\text{P.S.S.} = -K \log 10 \frac{R_{mf}}{R_{we}} \quad (2 - 7)$$

in cui R_{we} è una "resistività equivalente".

Per acque che sono essenzialmente soluzioni di cloruro di sodio, con resistività fra 0,08 e 0,3 ohm-m a 75°F, R_{we} non è molto diverso da R_w . Per soluzioni di cloruro di sodio più concentrate, o per formazioni ad acqua dolce, (resistività maggiore di 0,3 ohm-m a 75°F), che contengono in genere quantità relativamente grandi di ioni di calcio e magnesio, R_w differisce da R_{we} . Comunque R_w può essere ricavato da R_{we} in entrambi i casi, mediante l'uso della carta A-12. Per alte concentrazioni (R_w minore di 0,08 ohm-m a 75°F), le curve vengono tracciate mediante la conoscenza delle relazioni fra resistività e attività. Per le formazioni ad acque

dolci (R_w maggiore di 0,3 ohm-m a 75°F), le curve sono state ricavate da studi statistici di acque di formazione compiuti su campi di tutto il mondo. Questi tratti empirici delle curve presentano qualche incertezza e forse dovrebbero essere corrette per le diverse località, secondo le caratteristiche di ciascun campo, sebbene non si siano mai trovate serie differenze in centinaia di controlli fatti fino ad oggi sui logs.

Il procedimento per la determinazione di R_w è quindi la seguente:

1) - Si ottiene il valore della resistività equivalente R_{we} dall'equazione (2-7), mediante la Carta A-10.

Il valore (di entrata) di R_{mf} viene ricavato direttamente mediante misure sui campioni di fango, usando un'appropriata filtro-pressa. Se non sono disponibili misure dirette può essere ottenuto, in prima approssimazione, dalla Carta A-4.

Il valore di K viene scelto corrispondente alla temperatura di formazione (Carta A-10). Il P.S.S viene ricavato dal log.

2) - Il valore corrispondente di R_w viene ricavato dal valore di R_{we} per mezzo della Carta A-12.

La seconda operazione è superflua per acque con resistività fra 0,08 e 0,3 ohm-m a 75°F: in questo caso dalla Carta A-10 si legge direttamente il valore di R_w .

N o t a - Quando la resistività del fango è molto bassa, (meno di circa 0,08 ohm-m), può risultare anche utile trasformare R_{mf} in una "resistività equivalente" R_{mfe} per mezzo della Carta A-12, prima di usare la Carta A-10.

b) - Fanghi a base di gesso e fanghi al cloruro di calcio.

Secondo le esperienze disponibili fino ad ora, questi fanghi sono gli unici a contenere sali solubili di Ca e Mg. (Nonostante

il loro nome di fanghi calcici contengono solo quantità trascurabili di ioni calcio, in quanto il calcio è in prevalenza disperso in forma solida).

In questo caso non è possibile determinare una resistività equivalente del filtrato del fango per mezzo della carta 1-12; questa carta è valida solo per soluzioni di cloruro di sodio ed acque di formazione contenenti ioni Ca e Mg. Il calcolo di R_w dal PS richiede la conoscenza dell'attività del fango. È stato recentemente costruito uno strumento che rende possibile una facile misura dell'attività equivalente di campioni di filtrato del fango dovuta a cationi di sodio. Da questa misura si può ottenere R_w mediante un semplice procedimento che sarà descritto in una prossima pubblicazione.

2 - 16 - Esempio pratico

Il seguente esempio illustra il procedimento per trovare R_w per una sabbia contenente acqua di formazione abbastanza dolce con contenuto apprezzabile in calcio e magnesio. Questo esempio si riferisce ad un pozzo in Venezuela.

La fig. 2-8 mostra il PS della sabbia in questione da 7920' a 7940'. Questo strato è abbastanza spesso, cosicché il PS può essere assunto uguale al PS letto sul log, che è 32 mv. La temperatura di formazione era 142°F per cui è $K = 80$.

Si sa che il fango era essenzialmente una soluzione di cloruro di sodio, ed R.m.f, misurata era 2,6 ohm-m a 75°F o 1,4 ohm-m a 142°F. (Carta A-6). Usando la Carta A-10, il rapporto R_{mf}/R_{we} è 2,5 per PS = 32 mv a $K = 80$ a 142°F. Perciò $R_{we} = R_{mf}/2,5 = 1,4/2,5 = 0,56$ ohm-m. La carta A-12 dà $R_w = 1,3$ ohm-m per $R_{we} = 0,56$ ohm-m, ambedue a 142°F. A scopo di paragone, R_w a 75°F (corrispon-

dente a 1,3 ohm-m a 142°F) è 2,5 ohm-m. (Carta A-6).

Erano disponibili accurate analisi delle acque di queste sabbie, ed il metodo Dunlap ha dato per la loro resistività 2,4 ohm-m a 75°F.

Da quanto sopra esposto dovrebbe esser chiaro che la ricerca di R_w è solo uno degli scopi principali dell'analisi quantitativa del PS. Se sono disponibili accurate analisi dell'acqua o misure di resistività sui campioni dell'acqua stessa non c'è scopo cercar di ottenere R_w dal PS eccetto forse per controllo. Questo perchè tutti i possibili valori di resistività dell'acqua di formazione ottenute da misure dirette o calcolate da analisi chimiche sono estremamente preziose per la corretta interpretazione dei logs circa la loro saturazione in fluidi.

C A P I T O L O T E R Z O

LOG INDUTTIVO

GENERALITA'

3 - 1 - Il log induttivo, come è stato indicato nell'introduzione è un metodo che misura la conduttività (reciproco della resistività) delle formazioni per mezzo di correnti alternate indotte. Dato che questo è un metodo ad induzione, invece che elettrodi vengono usati avvolgimenti isolati per inviare correnti nelle formazioni ed il pozzo può contenere qualsiasi fluido: fango a base d'acqua, fango a base d'olio, gas o aria (pozzo vuoto), però non deve essere tubato.

Il log induttivo venne introdotto nel 1946 per il carotaggio di pozzi perforati con fango a base d'olio e presto divenne un metodo standard per questo genere di operazioni.

Il suo uso nei pozzi perforati con fango a base d'acqua ebbe inizio più tardi (1952) quando si riscontrò la sua superiorità nei migliori casi sul log elettrico convenzionale.

Il vantaggio del log induttivo consiste nella sua migliore possibilità di studiare strati sottili, dovuta alle sue proprietà di focalizzazione ed al suo maggior raggio d'azione. La combinazione del log induttivo della normale a 16" e della curva del PS, chiamata comunemente "log elettrico/induttivo" è il metodo di carotaggio elettrico più usato con fanghi dolci.

3 - 2 - La fig. 3-1 mostra schematicamente un semplice dispositivo di log a induzione in cui una bobina trasmittente e una ricevente sono avvolte coassialmente su un supporto cilindrico isolante. La distanza fra i due avvolgimenti, indicata in fig. con "L" è chia-

mata "Spaziatura". Il punto di misura è a metà fra i due avvolgimenti.

Una corrente alternata di grandezza e frequenza costante viene mandata da un oscillatore alla bobina trasmittente. Il campo magnetico dovuto a questa corrente induce "circuiti di corrente" (*) nella formazione circostante alla sonda. Queste correnti, hanno un loro campo magnetico che induce nella bobina ricevente una f.e.m. detta "segnale". L'intensità della corrente indotta nella formazione è proporzionale alla sua conduttività. Ne segue che anche il segnale indotto nella bobina ricevente è proporzionale alla conduttività della formazione, cioè inversamente proporzionale alla sua resistività. I segnali vengono amplificati, trasformati in corrente continua, e quindi trasmessi alle apparecchiature di registrazione in superficie.

Ogni accoppiamento fra la bobina trasmittente e quella ricevente è equilibrato. In un mezzo avente conduttività zero, come per esempio quando la sonda è sospesa nell'aria, lontano da materiali conduttivi, lo strumento darà registrazione zero.

Oltre due avvolgimenti principali (trasmittente e ricevente) questa apparecchiatura contiene molte altre bobine. Le caratteristiche degli avvolgimenti principali e degli altri, la loro distribuzione e le loro rispettive posizioni, sono tali da rendere minima l'influenza esercitata sulle misure della colonna del fango e delle formazioni situate al di sopra e al di sotto dello strumento. Tali sonde sono dette "sonde focalizzanti".

Lo strumento di uso comune al tempo in cui scriviamo è la sonda 5FF40. Questa designazione significa: un totale di 5 avvolgimenti ed una distanza (spaziatura) di 40" fra gli avvolgimenti principali.

(*) In affetti correnti di Foucault dette anche "correnti parassite".

Questo strumento permette inoltre la registrazione simultanea della curva del PS e della normale da 16". Uno strumento precedente, la sonda 5FF27, è ancora in uso per operazioni particolari. Questa sonda ha un potere separatore leggermente superiore e un raggio d'azione nettamente inferiore della 5FF40. L'attuale dispositivo per il log ad induzione offre una registrazione dettagliata e accurata delle formazioni per una vasta gamma di valori di conduttività. La precisione è eccellente per valori di conduttività superiori ai 20 mmo/m (valori di resistività inferiori a 50 ohm-m) ed è accettabile per valori di conduttività inferiori (fino a 5 mmo/m). Oltre a questo limite il log induttivo continua a registrare variazioni nelle formazioni ma con minore esattezza.

3 - 3 - Scale del log induttivo

Dato che la conduttività è il reciproco della resistività ($\sigma = 1/R$) e dato che l'unità di resistività nei logs elettrici è l'ohm-m (Cap. 1, paragr. 1), l'unità naturale di conduttività per i cartaggi sarà 1/ohm-m ossia il "mho/m". Comunque, se si usasse il mho/m, tutti i valori di resistività maggiori di un ohm-m, dovrebbero venire espressi con frazioni decimali. Per evitare ciò viene usata la millesima parte del mho, e le letture del log induttivo sono espresse in millimho/metro (mmo/m). Così formazioni aventi resistività di 10, 100 o 1000 ohm-m avranno rispettivamente conduttività di 100, 10 e 1 mmo/m.

Un log induttivo ha una curva di conduttività sul lato destro, ed una curva di resistività nella parte centrale.

La scala di conduttività è lineare. Lo zero della conduttività, corrispondente a resistività infinita, è posto su una linea nella parte destra del film. Al crescere della conduttività (e quindi al decrescere della resistività), la curva si sposta verso sinistra.

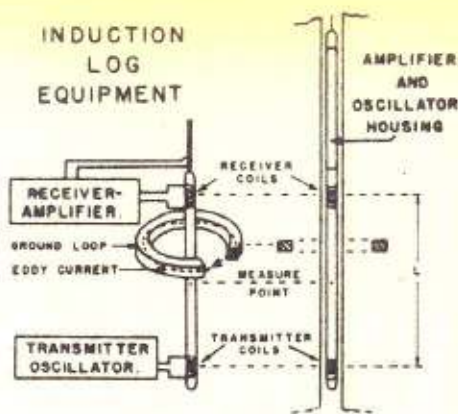
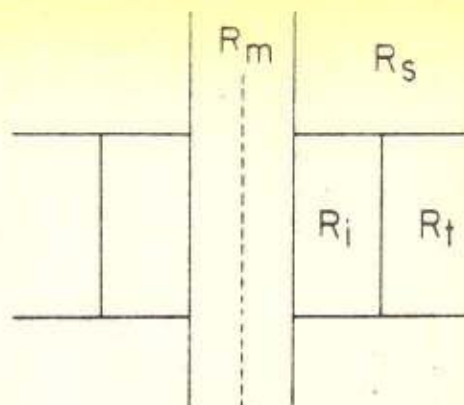


FIG. 3-1 APPARECCHIATURA PER L'INDUCTION LOG



$$\frac{1}{R_d} = \frac{G_m}{R_m} + \frac{G_i}{R_i} + \frac{G_t}{R_t} + \frac{G_s}{R_s}$$

FIG. 3-2

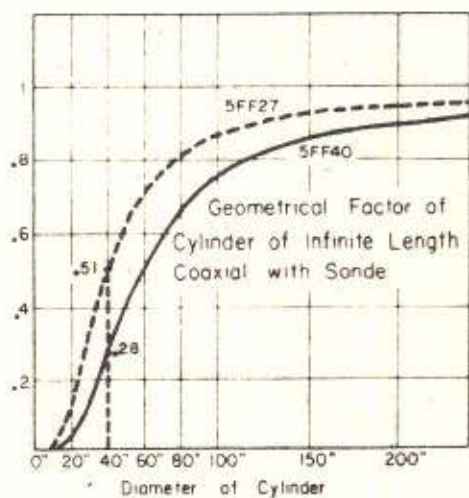


FIG. 3-3 CARATTERISTICHE RADIALI DELLE SONDE AD INDUZIONE 5FF27 E 5FF40 (CALCOLATE).

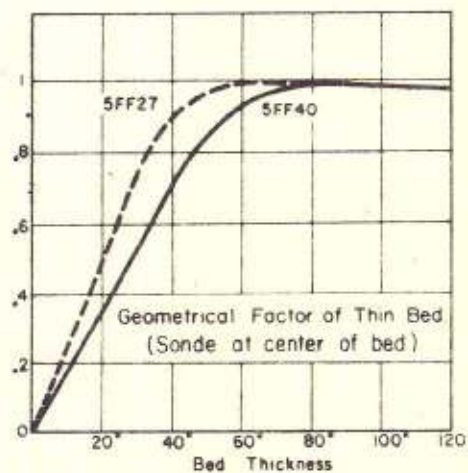
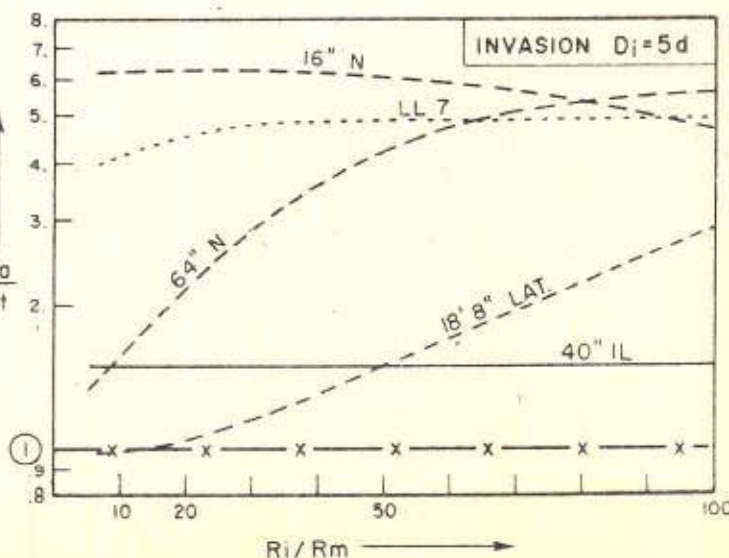


FIG. 3-4 CARATTERISTICHE VERTICALI DELLE SONDE 5FF27 E 5FF40 (CALCOLATE).

FIG. 3-6
 RISPOSTA DEI VARI DISPOSITIVI IN STRATI SPESSI AD ACQUA CON DIAMETRO DI INVASIONE = 5D ($R_i/R_t = 10$) CALCOLATI E DATI DI LABORATORIO.



La scala, riferita alla resistività da destra a sinistra, è iperbolica. I valori bassi delle resistività vengono esaltati, quelli alti vengono mitigati.

La curva di resistività è una curva "reciproca", registrata contemporaneamente a quella di conduttività. Questa curva registra gli stessi valori, ma con una scala di resistività lineare. Questo rende possibile un più facile confronto fra il log induttivo, il log della piccola normale ed altri logs convenzionali di resistività.

Conformemente al linguaggio usato in pratica, nella seguente discussione, sarà usato frequentemente il termine "resistività" piuttosto di "conduttività".

3 - 4 - Fattore geometrico

Con il log induttivo i dati forniti dagli strumenti possono essere calcolati automaticamente, supponendo che i mezzi interessati dalle misure siano separati da piani orizzontali e superficie cilindriche, coassiali con la sonda centrata nel foro. In effetti questo modello dà un'ottima rappresentazione della distribuzione dei mezzi nel sottosuolo qualora le pendenze di strato siano abbastanza piccole. I calcoli sono relativamente facili quando le mutue induzioni fra i circuiti di corrente nel suolo, cioè l' "effetto pelle" (*) sono trascurabili.

Tali calcoli dimostrano che ciascun mezzo compreso nelle misure di resistività date dal log induttivo contribuisce ad una parte del segnale proporzionale al prodotto della sua conduttività per un fat-

(*) Questo effetto pelle non deve essere confuso con quello che indica la caduta di pressione addizionale in una formazione produttiva dovuta all'alterazione della permeabilità in vicinanza del pozzo provocata dalla trivellazione e dalle altre operazioni eseguite.

tore geometrico "G" che dipende solo dalla geometria del mezzo. Questi fattori G sono frazioni e la loro somma, per tutto lo spazio, è uguale all'unità.

La fig. 3-2 mostra una rappresentazione schematica di uno strato permeabile, avente resistività R_m con una zona invasa, di resistività R_i , compresa fra le formazioni adiacenti, di resistività R_s , ed interessato da un foro di sonda contenente fango con resistività R_t . Ciascuno di questi mezzi avrà il proprio fattore geometrico (dipendente dalla sua geometria), rispettivamente G_t , G_s , G_m (*)

La conduttività apparente, C_a , come viene indicata dal log induttivo quando la sonda è in corrispondenza da uno strato permeabile, sarà: $C_a = C_m G_m + C_i G_i + C_s G_s + C_t G_t$ e la somma di $G_m + G_i + G_s + G_t$ sarà uguale ad 1. Considerando la resistività si avrebbe:

$$\frac{1}{R_a} = \frac{C_m}{R_m} + \frac{C_i}{R_i} + \frac{C_s}{R_s} + \frac{C_t}{R_t} \quad (3-1)$$

In pratica il valore di R_i può essere preso uguale alla resistività della zona spiazzata, R_{xo} , misurata dal Microlog, dal Microlaterol o ricavata dal Neutron log.

Nei prossimi paragrafi vedremo come la registrazione può venire modificata quando l'effetto pelle non è più trascurabile.

3-5 - Indagini caratteristiche del Log Induttivo

Le "caratteristiche radiali" possono essere definite come rappresentative del fattore geometrico del mezzo contenuto in un cilindro coassiale con l'asse del foro, quando il diametro di questo cilindro aumenta da zero all'infinito.

(*) Per semplicità questo schema non include l'anello dell'acqua di formazione (capitolo 1, paragrafo 1-8). Ciò significa supporre che la saturazione in acqua dello strato sia all'incirca maggiore del 50 %.

La fig. 3-3 mostra il diagramma di tale fattore geometrico in funzione del diametro del cilindro, sia per la sonda 5FF27 che per la 5FF40. Essa mostra inoltre che il fattore geometrico per un cilindro di 10" di diametro è estremamente piccolo; perciò la parte del segnale proveniente dalla colonna del fango è sempre relativamente piccola, a meno che il fango non sia molto salato o le formazioni molto resistive.

Per queste caratteristiche radiali si suppone che il cilindro sia infinitamente lungo cioè che gli strati siano di uno spessore infinito e non vi siano quindi strati adiacenti. Così trascurando l'effetto del fango e degli strati adiacenti l'equazione 3-1 si riduce a :

$$\frac{1}{R_a} = \frac{G_i}{R_i} + \frac{G_t}{R_t} \quad (3-2)$$

in cui ora è $G_i + G_t = 1$.

Si può considerare un caso pratico e si possono paragonare i risultati, cioè le resistività apparenti registrate da due diverse sonde:

$$\text{Siano : } D_i = 40'' \quad R_i = 20 \quad R_t = 5.$$

Dalla fig. 3-3. Per un cilindro di diametro di 40" è $G_i = 0,51$ per la sonda 5FF27 e 0,28 per la 5FF40.

Considerando per prima la sonda 5FF27 si trova $G_t = (1 - 0,51) = 0,49$. Perciò :

$$\frac{1}{R_a} = \frac{0,51}{20} + \frac{0,49}{5} \quad \text{cioè } R_a = 6,3 \text{ ohm-m.}$$

Per la 5FF40:

$$\frac{1}{R_a} = \frac{0,28}{20} + \frac{0,72}{5} \quad \text{cioè } R_a = 6,3 \text{ ohm-m.}$$

È evidente che il contributo relativo alla zona incontaminata è maggiore per la 5FF40 che non per la 5FF27. Ciò significa che la prima ha un "raggio di investigazione" maggiore, cioè registra valori di R_t , più vicini alla realtà (6,3 invece di 5,0) che non l'altra (8,1 invece di 5,0). L'effetto pelle non causa nella registrazione cambiamenti molto forti delle caratteristiche radiali rispetto a quelle ottenute tenendo conto del fattore geometrico. L'effetto pelle si può anche trascurare quando siano verificate le seguenti condizioni :

R_t maggiore di 1 ohm-m se l'invasione è moderata (R_i non superiore a 5d).

R_t maggiore di 2-3 ohm-m se l'invasione è abbastanza profonda. Queste condizioni si sono verificate in pratica nella maggior parte dei casi.

Le caratteristiche verticali rappresentano il fattore geometrico di uno strato orizzontale quando la sonda è posta al centro dello strato e lo spessore dello strato stesso aumenta da zero ad infinito.

La fig. 3-4 mostra il diagramma del fattore geometrico per i due tipi di sonda in funzione dello spessore dello strato. Si vede immediatamente che per un dato spessore dello strato il fattore è maggiore per la sonda 5FF27 che non per la 5FF40. Ciò significa che la sonda 5FF27 risente dell'influenza delle formazioni adiacenti in misura minore della 5FF40; essa ha cioè miglior "potere risolvante verticale".

Quando si prende in considerazione l'effetto pelle i dati del Log Induttivo, per strati di spessore finito, possono essere sensibilmente diversi da quelli ottenuti mediante il fattore geometrico. Il parametro importante in questo caso è la resistività R_g delle

formazioni adiacenti. Quando R_g è minore di circa 15 ohm-m il contributo effettivo delle formazioni adiacenti calcolato tenendo conto dell'effetto pelle è molto minore dello stesso valore calcolato senza il medesimo effetto. Ciò può essere espresso dicendo che l'effetto "migliora" le proprietà di focalizzazione dell'apparecchiatura del Log Induttivo.

I N T E R P R E T A Z I O N E

3-6 - Localizzazione degli strati e determinazione dei loro confini

Grazie alle sue caratteristiche di focalizzazione il Log induttivo ha un ottimo potere risolvete. Esso praticamente non presenta alcuna distorsione spuria in corrispondenza di strati sottili; a questo riguardo esso presenta un netto vantaggio rispetto ai dispositivi convenzionali di resistività, principalmente rispetto alla grande normale ed alla laterale, come vedremo nel prossimo capitolo.

Le profondità delle faccie superiori ed inferiori di strato, vengono determinate con grande cura dai punti, sulle curve di conduttività corrispondenti a:

$$1/2 (\sigma_2 + \sigma_3) \quad (3-3)$$

in cui σ_2 (= $1/R_2$) è la conduttività letta al centro dello strato, e σ_3 (= $1/R_3$) la conduttività delle formazioni adiacenti. Si può ottenere una buona delimitazione degli strati per spessori fino a circa 2'. Inoltre la scala iperbolica della resistività esalta i piccoli dettagli nelle variazioni delle caratteristiche di formazione e nei contatti olio-acqua, specialmente quando le resistività delle formazioni non sono troppe elevate.

3-7 - Effetti della colonna del fango

Il segnale di conduttività dovuto alla colonna del fango aumenta con le dimensioni del foro e con il diminuire della resistività del fango. In altre parole il fattore G_m/R_m nell'eq. (3-1) aumenta all'aumentare di G_m o al diminuire di R_m .

Inoltre la proporzione del segnale totale dovuta alla colonna del fango aumenta col crescere della resistività della formazione.

Supponendo per semplicità che la formazione non sia invasa e sia abbastanza spessa perchè l'effetto delle formazioni adiacenti sia trascurabile, l'eq. 3-1 che dà il valore della resistività apparente può essere scritta:

$$\frac{1}{R_a} = \frac{G_m}{R_m} + \frac{G_t}{R_t} \quad (3-4)$$

Appare evidente da questa equazione che, a parità di condizioni di resistività e di dimensioni del foro, tanto maggiore è la resistività R_t tanto minore è il rapporto G_t/R_t , e tanto maggiore l'effetto relativo della colonna del fango.

In pratica, comunque, con la sonda 5FF40, per i comuni diametri dei pozzi, (10" o meno), e per fango comune, (R_m maggiore di 0,5 ohm-m) si può trascurare l'effetto del foro quando la sonda è centrata nel pozzo. A questo proposito, insieme alle sonde più recenti vengono forniti appositi dispositivi di centraggio. Nei logs registrati senza centralizzatori la sonda giace lungo la parete ed il segnale dovuto al foro diviene relativamente importante quando la formazione ha una resistività di circa 20 ohm-m. Questo effetto comunque può essere corretto mediante apposite carte. (°)

J.L. Dumanoir, L.P. Tixier and H. Martin: Interpretation of the induction Electrical Log in Fresh Mud. Journal of Petroleum Technology, Vol. 9, N° 7, July 1957 (Fig. 5).

Mel caso di fango salato, il segnale dovuto al foro diviene molto grande, specialmente se la sonda non è centrata. L'uso del log induttivo non è consigliabile quando la resistività del fango è inferiore a 0,2 ohm-m alla temperatura del pozzo (alla massima profondità) a meno che le resistività della formazione da misurare siano molto basse, come, ad esempio, alcuni diaspri del Mid Continent.

Nei pozzi con ³ ~~4~~ a base di ^{alic} ~~fango~~, le correzioni per eliminare l'effetto della colonna del fango sono in genere trascurabili; se si eccettua il caso, del resto molto raro, di imponenti scavernamenti.

3 - 8 - Effetto dello spessore degli strati

Le misure fatte al livello di un dato strato con il log induttivo sono in genere molto meno influenzate dalla presenza delle formazioni adiacenti che non quelle eseguite con i dispositivi convenzionali di resistività. A questo fa eccezione la piccola normale (Cap. 4), quando le resistività delle formazioni sono moderate o basse. In questo caso la risoluzione verticale della Piccola Normale è paragonabile a quella del log induttivo.

L'influenza delle formazioni adiacenti sul segnale della conduttività apparente dato dal Log Induttivo quando la sonda è al livello dello strato in esame, dipende in gran parte dalla loro resistività R_g . Questo perchè le correnti indotte nel suolo tendono a circolare attraverso i mezzi aventi minore resistività. Se R_g è maggiore di R_f , l'effetto delle formazioni adiacenti è relativamente piccolo. Calcoli ed esperienze hanno dimostrato che in questo caso, per strati di spessore superiori ai 4', con la 5FF40, le misure sono praticamente prive di influenze esterne. Per strati più sottili vengono operate lievi e semplici correzioni.

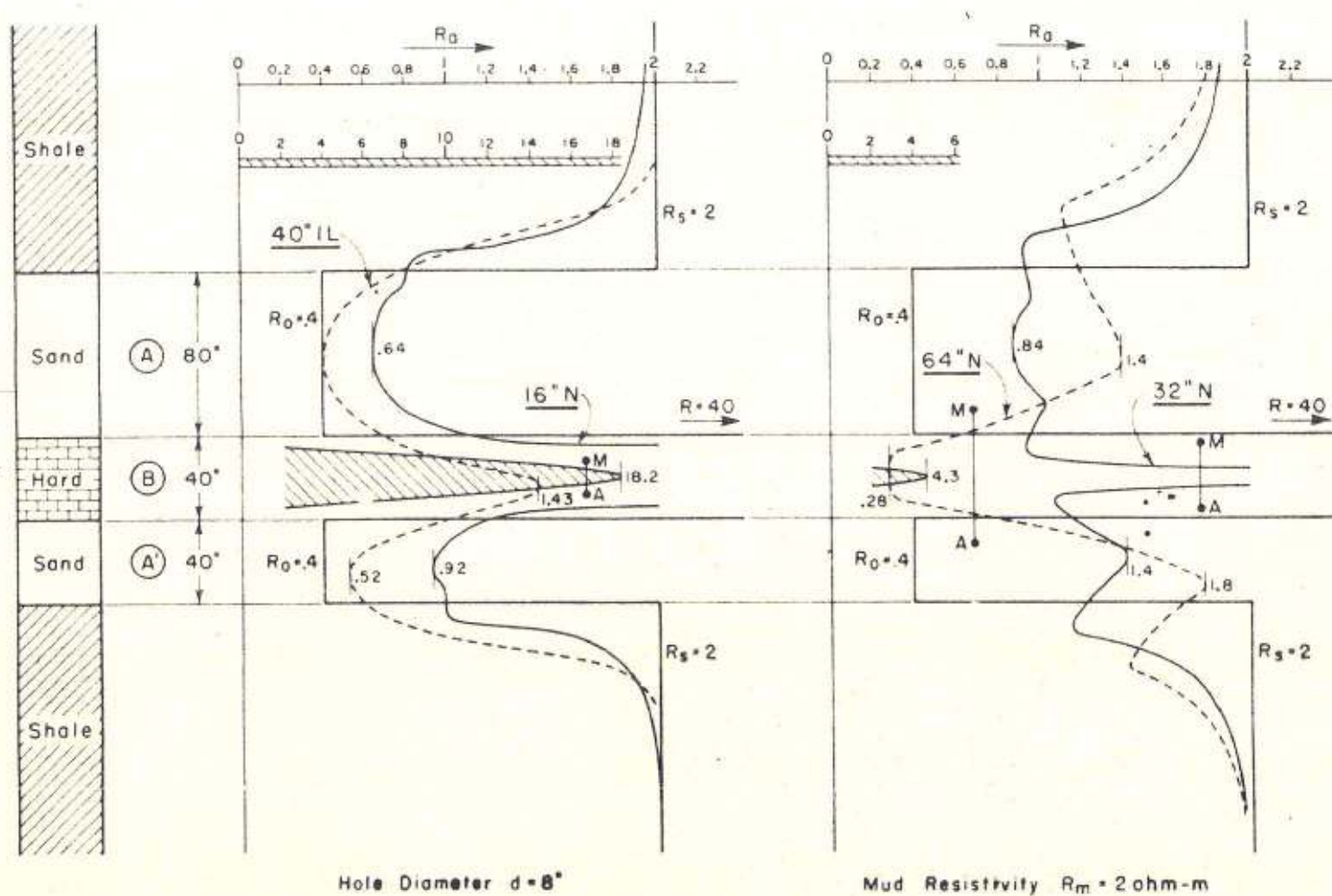


FIG. 3-5 CURVE 40" INDUCTION LOG E NORMALI REGISTRATE IN UNO STRATO AD ACQUA INTERROTTO DA UN LIVELLO CALCREO (INVASIONE TRASCURABILE).

INDUCTION LOG : CALCOLATO
 CURVE NORMALI : DETERMINE IN LABORATORIO

Se le formazioni adiacenti hanno resistività inferiore a quella dello strato, in esame, le correnti indotte tendono a circolare in esse e la loro influenza su R_a diviene più sensibile. Ciò nonostante, quando R_g è solo leggermente inferiore ad R_t , l'influenza delle formazioni adiacenti non è troppo importante; può essere considerata trascurabile quando si opera con sonde tipo 5FF40 se il rapporto R_a/R_g non è maggiore di circa 10 e se si hanno strati più spessi di 6 piedi. Ma quando R_g è notevolmente minore di R_t , l'influenza delle formazioni adiacenti può diventare sensibile. Questa influenza può essere corretta mediante apposite carte. (*)

Il Log Induttivo non si adatta bene per rivelare straterelli duri e sottili, quali ad es. strati di lignite, che possono essere utili come livelli repere per correlazioni, mentre tali strati sono particolarmente rilevabili nelle curve laterali e nel Microlog.

D'altra parte, quando tali straterelli sono adiacenti ed interstratificati a formazioni porose e permeabili quali possono essere le sabbie, le letture del Log Induttivo, fatte al livello degli intervalli porosi non sono influenzate sensibilmente dalla presenza di questi straterelli sottili. Questo è in netto contrasto con le forti deformazioni che tali strati provocano con i sistemi convenzionali.

Questo importante fatto viene illustrato in fig. 3-5 che mostra il Log Induttivo (calcolato), ed in alcune curve normali, con diverse spaziature (registrate in laboratorio), per il seguente modello di formazione.

Uno strato conduttivo avente uno spessore totale di 160" è diviso in due sezioni A ed A' di spessori rispettivamente uguali ad 80" e 40" da uno strato duro B avente 40" di spessore.

(*) Vedi nota a pag. 78 Fig. 6.

La resistività della parte conduttiva è 40 ohm-m. Le sezioni A ed A' possono rappresentare due sabbie impregnate d'acqua, che hanno subito una trascurabile invasione.

La resistività delle formazioni adiacenti è $R_g = 2$ ohm-m. Il foro ha un diametro di 8", e la resistività del fango è $R_m = 2$ ohm-m. Nella parte sinistra sono riportate la curva normale di 16" ed il Log Induttivo, nella parte destra la curva normale di 32" e quella di 64".

La normale da 16" ed il Log Induttivo danno la determinazione più accurata di tutti i confini. La lettura del Log Induttivo ci dà il valore esatto della resistività (0,4 ohm-m) all'altezza della parte A, ed un valore leggermente superiore in corrispondenza della parte A' (0,52 ohm-m). La sezione B dà origine ad un piccolo peak di resistività: 1,43.

La Piccola Normale dà letture di 0,64 e 0,92 in corrispondenza rispettivamente di A ed A', e dà un acuto peak di resistività in corrispondenza di B (18,2).

Con la normale di 32" la determinazione dei confini dello strato è quasi altrettanto esatta con il Log Induttivo e con la normale di 16". La sezione B, il cui spessore è leggermente superiore alla spaziatura, corrisponde ad un peak ben marcato e molto sottile, ma di resistività relativamente bassa (4,3). Le letture al livello di A ed A' sono 0,84 e 1,4 rispettivamente, contro un valore effettivo di resistività di 0,4.

La curva di 64" dà invece un rappresentazione completamente falsa. La sezione B, che è molto resistiva, corrisponde ad un forte minimo di resistività: 0,28. Le sezioni A ed A', che sono conduttive, corrispondono a due massimi di resistività: 1,4 ed 1,8.

I valori letti sulle curve normali di 32" e 64" in corrispondenza delle sabbie A ed A' sono molte volte maggiori della resistività vera. Se l'interpretazione fosse basata sulla lettura dei logs della normale di 32" o di 64", se ne dedurrebbe erroneamente che questi strati contengono idrocarburi. Le letture del Log Induttivo sono uguali e molto prossime alla vera resistività delle sabbie e la loro interpretazione è corretta.

La registrazione dell'interesa non è riportata in figura, tuttavia la presenza di una sezione sottile e dura come B, apparirebbe molto visibile sulla curva e sarebbe accompagnata da una "zona cieca" estesa oltre 15" sotto la sottile sezione resistiva.

(*)

3 - 9 - Effetti dell'invasione

Si è visto che la colonna del fango e le formazioni adiacenti hanno una influenza relativamente bassa o anche trascurabile sul Log Induttivo. Lo scostamento della lettura del Log Induttivo rispetto ai valori della resistività vera è dovuto principalmente alla presenza di una profonda invasione.

Prendiamo in considerazione solo il caso del fango dolce, perché nel caso del fango salato è preferibile non usare il Log Induttivo. (paragr. 3-7).

a) - Formazioni impregnate d'acqua

In genere R_{mf} è maggiore di R_w , e di conseguenza la resistività della zona invasa è maggiore della resistività vera. In questo caso la maggior parte delle correnti indotte tende a passare nella zona incontaminata ed il contributo di quest'ultima al segnale totale è grande. Quando D_1 non supera $3d$, la lettura del Log Induttivo è praticamente uguale ad R_t . Tali condizioni di verifica-

(*) Vedi Cap. 4, paragr. 8.

no di solito in quelle regioni in cui predominano sabbie ad alta porosità, ad esempio la Costa del Golfo e/o quando si usano fanghi a bassa acqua libera. Anche quando si hanno invasioni più profonde il contributo dato da R_t alla misura è sempre molto elevato. Come risultato il Log Induttivo trova buon impiego nella individuazione di strati impregnati d'acqua.

La fig. 3-6 mostra un confronto fra i dati del Log Induttivo di 40", le normali di 16" e 64", l'inversa di 19' e il Laterolog "7" (cap. 5), per strati impregnati d'acqua di notevole spessore invasi fino ad un diametro di $5d$ (dove d è il diametro del foro). Il rapporto R_a/R_t è riportato in ordinate; R_i/R_m in ascisse. In questo caso R_i è stato preso uguale a $10 R_t$, $d = 8"$. Il risultato del Log Induttivo è stato calcolato usando il suo fattore geometrico, trascurando l'effetto "pelle" (vedi paragr. 3-4), ed apportando le correzioni per l'influenza del foro quando queste erano necessarie (alti valori di R_i/R_m). I risultati delle normali, dell'inversa e del Laterolog sono stati ottenuti dalle rispettive curve di partenza per strati di spessore infinito. Uno strumento perfetto per registrazione di resistività dovrebbe fornire una lettura del tipo $R_a = R_t$; (cioè $R_a/R_t = 1$) per tutti i valori di R_i/R_m .

Questa condizione viene approssimativamente realizzata dal risultato del Log Induttivo di 40" che è praticamente indipendente da R_i/R_m . La rappresentazione della laterale è migliore per valori di R_i/R_m minore di circa 50 (porosità maggiore di circa 13%).

Così per formazioni molto spesse di media porosità che sono profondamente invase (come il Lower Wilcox della Costa del Golfo) l'inversa è migliore del Log Induttivo di 40" per l'individuazione di sabbie impregnate d'acqua. Comunque, nel Log Induttivo, ci si può render conto dell'influenza dell'invasione, mediante l'osservazione della piccola normale, almeno finché D_i non è maggiore di $10d$. Ne risulta che non c'è ambiguità nella localizzazione di simili strati impregnati d'acqua con il Log Induttivo.

b) - Formazioni impregnate d'olio.

Se una formazione impregnata d'olio contiene una grande quantità di acqua interstiziale, cioè se S_w è maggiore di circa il 60%, R_z è molto spesso sensibilmente più basso di R_{XO} e non si ha formazione di anello. (Cap. 1, paragr. 1-8). Di conseguenza le conclusioni sono le stesse che per le formazioni impregnate d'acqua.

Per saturazioni in acqua inferiori, diventa necessario prendere in considerazione l'effetto dell'anello. Sono stati fatti dei calcoli per stabilire questo effetto, prendendo come base le determinazioni matematiche della distribuzione dei fluidi e delle resistività, già discusse precedentemente. L'effetto è stato determinato per vari valori numerici dei fattori interessati (acqua di saturazione iniziale, raggio d'invasione, R_{mf}/R_w).

E' stato trovato che con il Log Induttivo di 40", la presenza dell'anello non ha praticamente alcuna influenza quando il diametro d'invasione non supera valori dell'ordine di $2d$. Per tale diametro d'invasione, anche la stessa zona invasa ha un'influenza trascurabile. Di conseguenza il Log Induttivo dà direttamente i valori di R_t senza bisogno di correzione. Per invasioni più profonde, ferme restando tutte le altre condizioni, l'effetto dell'anello aumenta e raggiunge un massimo quando D_i è uguale a circa 4 o 5d, poi decresce molto lentamente all'aumentare dei valori di D_i .

c) - L'effetto dell'invasione può essere preso in considerazione determinando la saturazione per mezzo di una carta d'interpretazione (D-12) che include come elemento ausiliario le letture della piccola normale. Questo punto verrà discusso ulteriormente nel cap. 9 - paragr. 9-16.

Inoltre, come è già stato detto nel cap. 1-paragr. 1-13, R_{XO} è generalmente maggiore di R_t ; ed R_{an} , la resistività dell'anello, è sempre minore di R_t . Come risultato, gli effetti dell'invasione e dell'anello tendono a compensarsi l'un l'altro. Infatti la compensazione, in certe regioni è tale che le letture del Log Induttivo possono essere prese ai fini pratici, uguali ai valori di R_t . Se questo sia possibile o no, può essere stabilito solo dopo una serie di esperienze sul terreno.

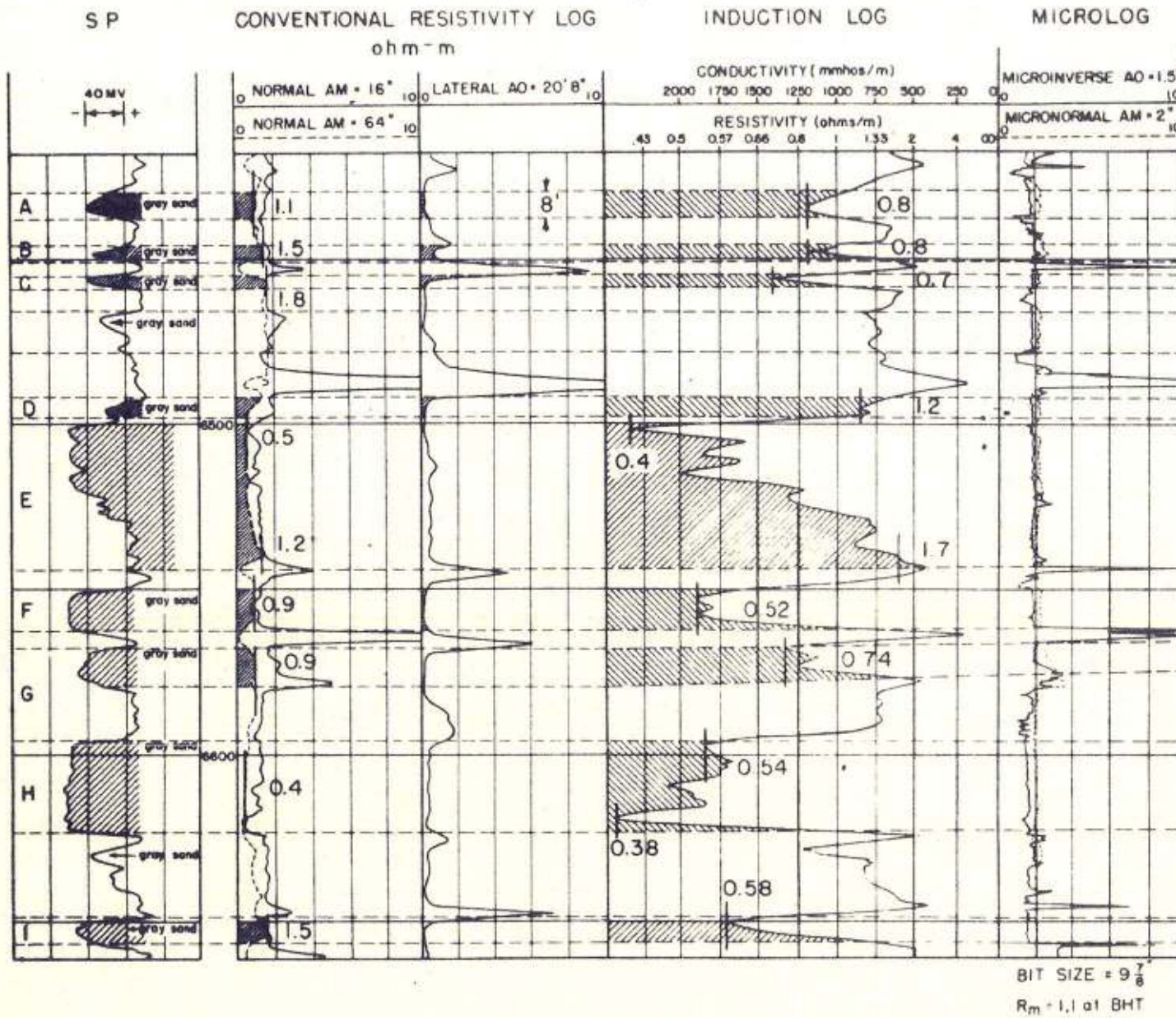


FIG 3-7 LOG CONVENZIONALE, INDUCTION LOG E MICROLOG IN UNA SERIE SABBIOSO-ARGILLOSA

3 - 10 - Esempi pratici

Nella seguente discussione si farà riferimento ad alcune curve di resistività ottenute con dispositivi elettrici, che verranno descritte nel Cap. 4. I confronti dei Logs Induttivi con le curve di resistività ottenute con i comuni sistemi ad elettrodi, indicano chiaramente la superiorità dei primi rispetto ai secondi.

La fig. 3-7 è una carta composta che mostra il Log Induttivo, i logs convenzionali di resistività ed il Microlog, registrati in serie argillo-sabbiose incoerenti, con poche intercalazioni di straterelli duri. (Costa del Golfo).

La possibilità del Log Induttivo di indicare variazioni di resistività in zone molto conduttive è chiaramente indicata nelle sezioni E ed H della figura.

Nell'esempio viene inoltre chiaramente illustrata la buona approssimazione data dal Log Induttivo rispetto alla vera resistività di formazione, particolarmente in corrispondenza di straterelli sottili. Considerando lo strato A, lo spessore del quale, secondo il Microlog è circa 8", è chiaro che la lettura della grande normale 1,1 ohm-m, è influenzata dalle formazioni adiacenti più resistive (argille con resistività da 1,5 a 1,8). La lettura della Piccola Normale è alquanto più alta a causa della presenza di una zona invasa, più resistiva della zona incontaminata (la resistività del fango è 1,1 ohm-m alla temperatura del pozzo). Per quanto riguarda la curva dell'inversa lo strato A è situato nella sua "zona cieca", (°) dovuta alla presenza dello straterello resistivo sovrastante e la lettura è troppo bassa (meno di 0,5). Infine non c'è dubbio che la lettura del Log Induttivo, 0,8 ohm-m, sia il valore più vicino a quello reale.

Negli intervalli B e C, la curva della grande normale è distorta dalla presenza dello straterello fortemente resistivo intersposto. Dato che lo spessore di questo strato è minore della spaziatura degli elet-

(°) Il significato di questi termini e queste osservazioni saranno resi più chiari nel prossimo capitolo (4).

trodi, la curva a questa altezza presenta una depressione (^o), e le resistività registrate immediatamente al di sopra ed al di sotto, e cioè in corrispondenza degli strati in esame B e C, sono falsamente aumentate. La grande normale ci dà per i due strati, rispettivamente 1,5 ed 1,8 ohm-m, mentre il Log Induttivo, che praticamente non viene influenzato dalla presenza degli strati duri, dà 0,8 e 0,7 ohm-m.

Inoltre la curva piccola normale è influenzata dall'invasione, e lo strato C è situato nella zona cieca dell'inversa.

Analoghe considerazioni possono venir fatte per gli strati sottili della sezione, come D - F - G - I.

Le rocce serbatoio, in formazioni di questo tipo, sono costituite molto spesso da sabbie sporche, e la differenza fra la loro resistività e quella delle sabbie impregnate di gas o di olio non è molto grande. I buoni strati produttivi hanno in genere una resistività vera molto bassa. Perciò è importante per una corretta analisi quantitativa che la resistività vera venga determinata con gran cura. La discussione di cui sopra mette in evidenza il fatto che quando gli strati sono sottili la precisione necessaria può essere ottenuta solo con il Log Induttivo.

La fig. 3-8 mostra dei logs registrati in corrispondenza di sabbie interstratificate con formazioni relativamente impermeabili ed argille (Cretaceo inferiore-Mississippi). La differenza principale fra questo esempio ed il precedente è che la maggior parte delle sabbie sono più consolidate e la proporzione dei materiali impermeabili è notevolmente maggiore. Questo è indicato chiaramente dal confronto dei due Microlog.

La zona B, ad esempio, è una sabbia di 7° situata fra due formazioni aventi resistività sensibilmente maggiore. Di conseguenza la grande normale dà 3,7 ohm-m contro gli 1,7 ohm-m del Log Induttivo.

(^o) V. nota a pag. 85

L'inversa mostra un aumento costante dal top alla base dello strato, come si verifica in genere al di sotto di una formazione resistiva, fino a raggiungere un minimo di 4,2 ohm-m. Osservazioni analoghe si possono fare per le altre sabbie. Le letture del Log Induttivo sono sistematicamente più basse di quelle date dalla grande normale, essenzialmente a causa dell'effetto dovuto allo spessore degli strati ed anche, probabilmente, all'invasione.

L'effetto dell'invasione può essere osservato su larghi spessori come A (28') in cui la presenza delle formazioni adiacenti ha poco effetto sulle letture della normale. Qui la piccola normale raggiunge un valore minimo di 2 ohm-m e la grande normale di 1 ohm-m. L'effetto dell'invasione è minore nel Log Induttivo che dà valori fino a 0,66 ohm-m. Le letture dell'inversa sono disturbate dalla presenza di due strati resistivi posti immediatamente sopra ed all'interno della zona A.

CONCLUSIONI

3-11. Il Log Induttivo è il miglior metodo per lo studio della resistività vera delle formazioni, in particolare per strati sottili, in pozzi perforati con fanghi relativamente dolci, a condizione che le resistività da misurare non siano eccessivamente alte. (Si ottiene un'eccellente precisione fino a 50 ohm-m, ed una precisione discreta fino a 200 ohm-m).

a) La combinazione del Log Induttivo, della normale da 16" e della curva del P.S. costituisce il miglior procedimento disponibile, oggi, per i carotaggi in fanghi dolci. Le principali limitazioni, in questa combinazione, vengono dalla deficienza della

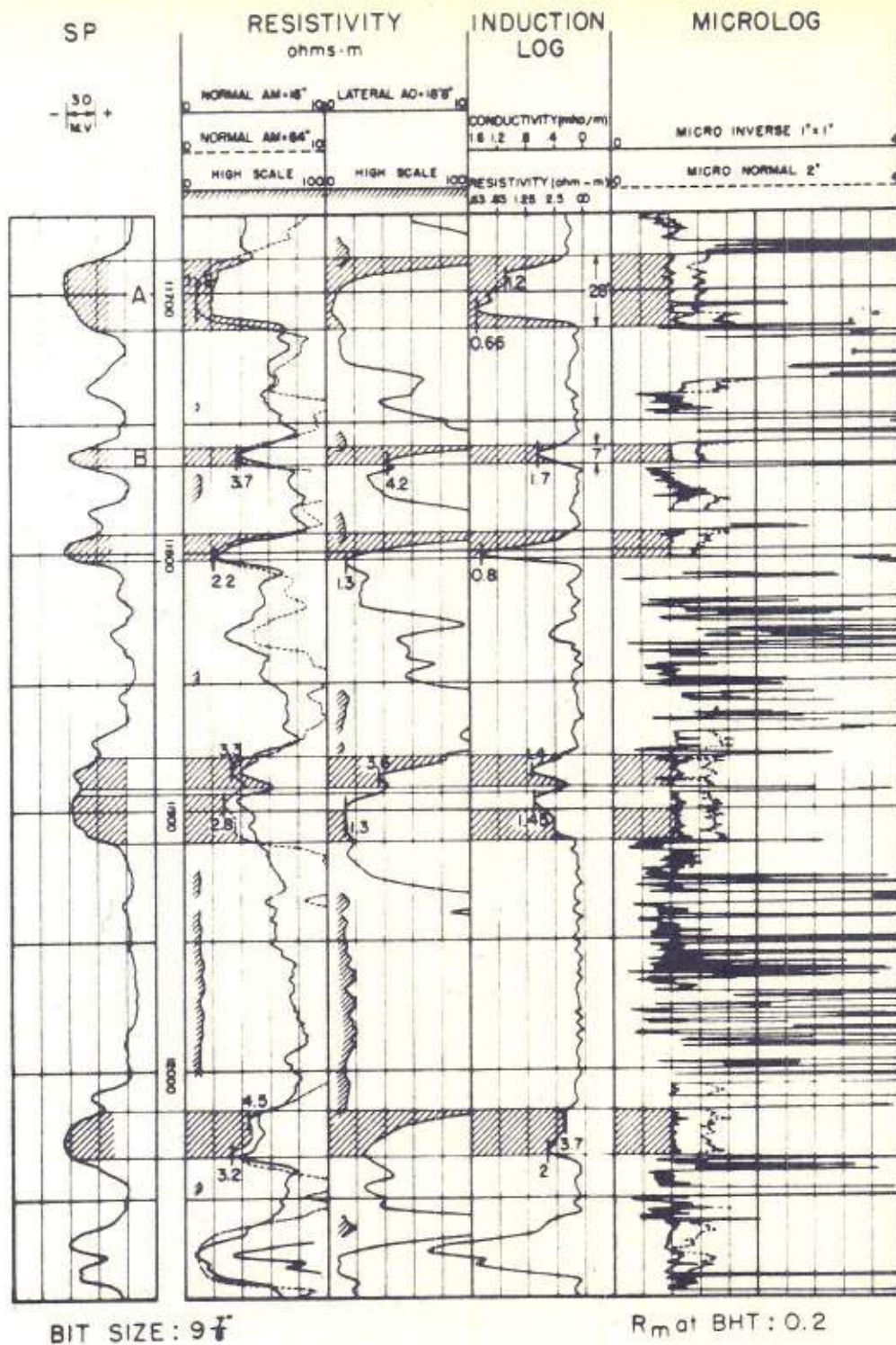


FIG. 3-8 INDUCTION LOG IN UNA SERIE DI SABBIE, FORMAZIONI COMPATTE ED ARGILLE.

normale di 16" quando gli strati sono troppo sottili e quando la loro resistività sono troppo in contrasto con quelle degli strati adiacenti. Tali combinazioni si incontrano in genere dove prevalgono formazioni consolidate. Queste formazioni, comunque, sono quelle in cui anche gli altri logs convenzionali di resistività vengono maggiormente influenzati e non riescono a fornire dati attendibili, cosicchè, nonostante le sue limitazioni, il Log Elettrico-Induttivo rimane quello più accurato. E' logico attendersi ulteriori miglioramenti dall'uso del Laterolog come sistema addizionale in luogo della piccola normale. E' infatti in fase di sviluppo la sonda combinata Log Induttivo - Laterolog.

b) Il Log Induttivo continua a rimanere il metodo migliore per operazioni in pozzi vuoti o pozzi perforati con fango a base d'olio, possibilmente in combinazione con una curva addizionale registrata con elettrodi raschianti e con il log radioattivo.

Nel cap. 9 verrà discusso l'uso del Log Induttivo per la valutazione della saturazione delle rocce serbatoio.

C A P I T O L O Q U A R T O

METODI CONVENZIONALI DI RESISTIVITA'

NOZIONI GENERALI.

4-1. I metodi di carotaggio elettrico che impiegano elettrodi, da cui la corrente viene immessa nelle formazioni e mediante i quali vengono misurati i potenziali, dovrebbero essere usati solo nei pozzi contenenti fango conduttivo. Tale fango è a base di acqua e è un fango ad emulsione d'olio, in cui la fase acquosa è continua. A volte vengono usati speciali elettrodi "raschianti" per ottenere il contatto con le formazioni quando il pozzo contiene fango a base d'olio. Tali logs "raschianti" non sono in genere attendibili dal punto di vista quantitativo a causa dell'incerto contatto fra gli elettrodi e le formazioni. Il Log Induttivo, che oggi viene usato in genere coi fanghi a base d'olio, viene a volte integrato mediante un log "raschiante".

4-2. Le sorgenti di corrente in un mezzo omogeneo ed isotropo

Se fosse possibile far passare una corrente elettrica da un elettrodo puntiforme A, completamente circondato da un mezzo infinito omogeneo e isotropo ed un altro elettrodo B infinitamente distante, allora la corrente emessa dall'elettrodo ne fluirebbe radialmente in tutte le direzioni. La fig. 4-1, mostra una tale disposizione e lo schema delle correnti. In questo caso le superfici equipotenziali che circondano l'elettrodo nel mezzo, saranno sfere aventi per centro l'elettrodo di corrente A.

4-3. Il dispositivo normale

Con l'apparecchiatura già descritta nel precedente paragrafo, supponiamo di avere un altro elettrodo puntiforme M situato vicino

FIG. 5-3
 COMPARAZIONE SCHEMATICA
 DELLA DISTRIBUZIONE DELLE
 LINEE DI CORRENTE PER UN
 DISPOSITIVO NORMALE (SINI-
 STRA) E PER UN LATEROLOG
 (DESTRA) IN CORRISPONDE
 NZA DI UN SOTTILE LIVELLO RE-
 SISTIVO.

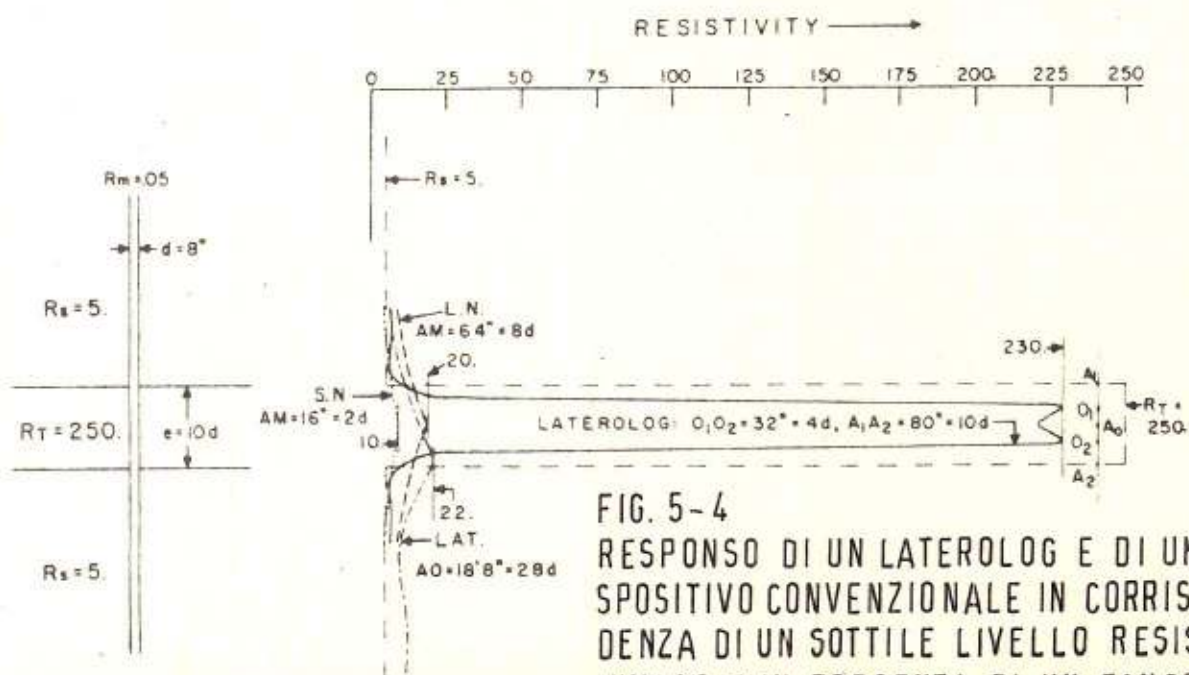
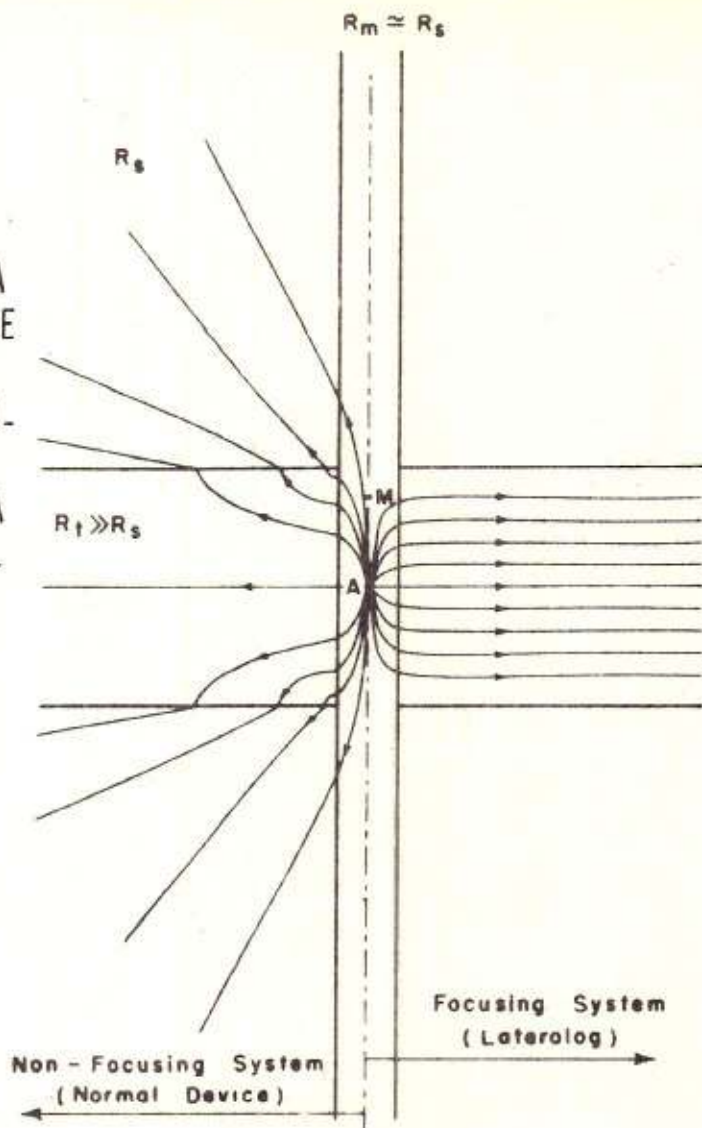


FIG. 5-4
 RISPONSO DI UN LATEROLOG E DI UN DI-
 SPOSITIVO CONVENZIONALE IN CORRISPON-
 DENZA DI UN SOTTILE LIVELLO RESISTIVO
 INVASO E IN PRESENZA DI UN FANGO MOL-
 TO SALATO.

all'elettrodo di corrente nel mezzo omogeneo ed isotropo. Allora esso si troverà sulla sfera equipotenziale avente il raggio uguale alla distanza fra A ed M, cioè raggio AM. Immaginiamo inoltre che questo elettrodo sia collegato, attraverso un galvanometro, ad un elettrodo N, situato a distanza infinita, avente potenziale zero. Il galvanometro subirà allora uno spostamento proporzionale al potenziale della sfera di raggio AM.

Si può dimostrare in questo caso che la resistività R del mezzo omogeneo isotropo è data dall'equazione:

$$R = K \frac{\Delta V}{I} \quad (4-1)$$

in cui I è l'intensità di corrente, ΔV la differenza di potenziale fra M ed N, K un coefficiente che dipende solo dalla distanza fra gli elettrodi.

Questo è il principio su cui si basano le misure di resistività del "sistema normale".

La fig. 4-2a mostra il dispositivo normale, con gli elettrodi A ed M calati nel pozzo e gli elettrodi B ed N in superficie, considerabile per gli scopi pratici, a distanza infinita da A ed M).

La fig. 4-2b mostra il circuito usato in pratica. Disponendo l'elettrodo N nel foro vengono eliminati alcuni effetti di induzione e di capacità dovuti al cavo conduttore. L'elettrodo N è posto a distanza considerevole da A ed M, cosicchè MN è maggiore di dodici volte AM. Questo approssima la "distanza infinita" elettrica, eccetto per i casi in cui si ha a che fare con formazioni molto spesse ed aventi resistività molto alta (Cap. 4-11). L'equazione (4-1) viene applicata anche in questo caso, però il valore di K è alquanto diverso in quanto tiene conto dell'effetto di N posto a distanza finita.

4-4 . Il dispositivo "Laterale" o Inverso

La fig. 4-3 illustra il principio del dispositivo Inverso. La corrente viene immessa dagli elettrodi A e B, ma ora viene misurata la d.d.p. fra gli elettrodi M ed N. La distanza fra M ed N è piccola in confronto alla loro distanza da A.

In questo dispositivo Inverso viene registrata la d.d.p. $\Delta V'$ fra due sfere equipotenziali passanti rispettivamente per M ed N. Supponendo di essere in presenza di elettrodi puntiformi situati in un mezzo omogeneo ed isotropo di resistività R, con una corrente immessa I' , R è data dall'equazione:

$$R = \frac{K' \Delta V'}{I'} \quad (4-2)$$

in cui K' è il coefficiente laterale della sonda che dipende ancora solo dalla distanza fra gli elettrodi.

La fig. 4-3b mostra il circuito effettivamente usato in pratica. Tutti gli elettrodi sono nel pozzo, ma N è molto lontano da A, B ed M. Per ragioni pratiche gli elettrodi di corrente e gli elettrodi di misura sono stati scambiati fra loro secondo il principio delle reciprocità. Questo principio, provato matematicamente e sperimentalmente, può essere enunciato come segue: "Se, in un sistema di quattro

elettrodi, 1 - 2 - 3 e 4, disposti in qualsiasi maniera, si ottiene una differenza di potenziale ΔV fra 1 e 2, dovuta ad una corrente I passante fra 3 e 4, si otterrà la stessa d.d.p. ΔV fra 3 e 4 se si farà passare la stessa corrente I fra gli elettrodi 1 e 2".

4-5. Resistività apparente

Le condizioni poste per ricavare le equazioni (4-1) e (4-2) non sono in pratica mai verificate.

In primo luogo gli elettrodi non sono mai puntiformi, ma sono elettrodi di piombo aventi lunghezza e diametro di alcuni pellici. Questa inosservanza delle ipotesi, comunque, non è importante perché la distanza che separa gli elettrodi è molto grande in confronto alle loro dimensioni. In secondo luogo l'apparecchiatura nel pezzo, non è circondata da un mezzo omogeneo infinitamente esteso, e il valore misurato è la "resistività apparente" che è in genere diversa dalla resistività vera, (V. Cap. I Paragrafo 1-15).

Per definizione, la resistività apparente è uguale a $K \Delta V / I$ per la normale o $K' \Delta V' / I'$ per l'inversa.

In pratica, nei carotaggi, la corrente viene presa essenzialmente costante e vengono registrate le variazioni di ΔV al variare della profondità. Date che per ogni apparecchiatura K ed I sono costanti, il galvanometro può essere tarato in modo da dare direttamente la resistività apparente.

4-6. Punti di misura e spaziatura per il dispositivo normale e per quello inverso.

Secondo il principio di reciprocità, (Paragrafo 4-4), gli elettrodi A ed M possono essere scambiati fra loro e la curva registrata rimane la stessa (eccetto nel caso di formazioni molto resitive in cui l'influenza dell'elettrodo N , come è stato detto nel paragr. 4-3, non è più trascurabile).

La distanza AM si chiama "spaziatura" e il punto di mezzo fra A ed M è il "punto di misura".

Il punto di misura per il dispositivo inverso (Fig. 4-3a), è in "O" a metà fra M ed N , e la spaziatura è la distanza AO . In pratica AO è

circa 19 piedi (m. 5,80) ed MW circa 32 pollici (cm. 80).

4-7. Combinazioni degli elettrodi per il caretaggio.

La posizione degli elettrodi che costituiscono una sonda è in relazione con le proprietà generali della sonda stessa. Un dispositivo, in quanto dipende dalla distribuzione degli elettrodi, può ad esempio rivelare settili straterelli, ma non dare una rappresentazione esatta degli strati molto spessi; un altro, che permette la valutazione del contenuto in fluido, può non essere adatto per localizzare i confini delle formazioni.

Ai tempi delle prime applicazioni dei caretaggi elettrici, si usava un unico dispositivo per misurare la resistività. Più tardi si trovò che era meglio impiegare insieme tre diverse disposizioni di elettrodi in modo che le curve di resistività dessero una rappresentazione quanto più completa possibile di tutte le formazioni incontrate nel pozzo.

In molti casi le curve di resistività del Log convenzionale vengono in genere registrate rispettivamente con un dispositivo di piccola normale (AM = da 16" a 18"), con uno di grande normale (AM = 54") o come nell'area costiera del Pacifico, con uno di piccola inversa (AO = 6" - 9") e uno di grande inversa (AO = 18" 8"). In alcune regioni, come per esempio nel bacino Permiano (Texas Occ. e Nuovo Messico), la piccola normale è ridotta a 10", ed invece della grande normale fa uso la sonda per calcari" (descritta più avanti).

Dal punto di vista dell'aumento del raggio d'azione, questi dispositivi di caretaggio possono essere classificati come segue:

- raggio breve : piccola normale - sonda per calcari
- raggio medio : grande normale - piccola inversa
- raggio ampio : grande inversa.

Si può dire in genere che la piccola normale è utile per individuare i confini di strato, ma viene fortemente influenzata dall'invasione, cioè che essa di solito non fornisce misure di resistività vera.

Il fatto che essa rispecchia abbastanza fedelmente la resistività

della zona invasa, la rende un mezzo molto utile per valutare gli effetti dell'invasione sulle registrazioni degli altri dispositivi (grande normale e inversa). Essa è stata inoltre usata in passato per la valutazione del fattore di formazione in rocce dure. La grande normale non è molto adatta per individuare i confini di strato, ma è molto efficiente per determinare R_3 negli strati spessi. L'inversa non è molto adatta per una individuazione accurata degli strati ma in genere determina meglio degli altri dispositivi, i sottili strati relativi. Essa è abbastanza utile per le determinazioni di R_t nel caso di invasione molto profonda purchè gli strati siano molto spessi ed abbastanza omogenei.

Questa combinazione di tre curve registrate con tre diversi dispositivi, non è sufficiente in genere a dare tutte le informazioni desiderate, specialmente in rocce dure. Considerazioni teoriche ed esperienze pratiche hanno dimostrato che l'uso di una o di molte altre spaziatrici del tipo convenzionale in aggiunta a quelle standard non è di molto aiuto. Per ottenere informazioni più complete ed accurate dai metodi di carotaggio e lettrice si richiede l'uso di nuovi dispositivi, - Log induttive in fanghi dolci, laterolog in fanghi salati. E' divenuta ora pratica comune integrare questi logs (convenzionali e nuovi) con il microlog o con il microlog relog

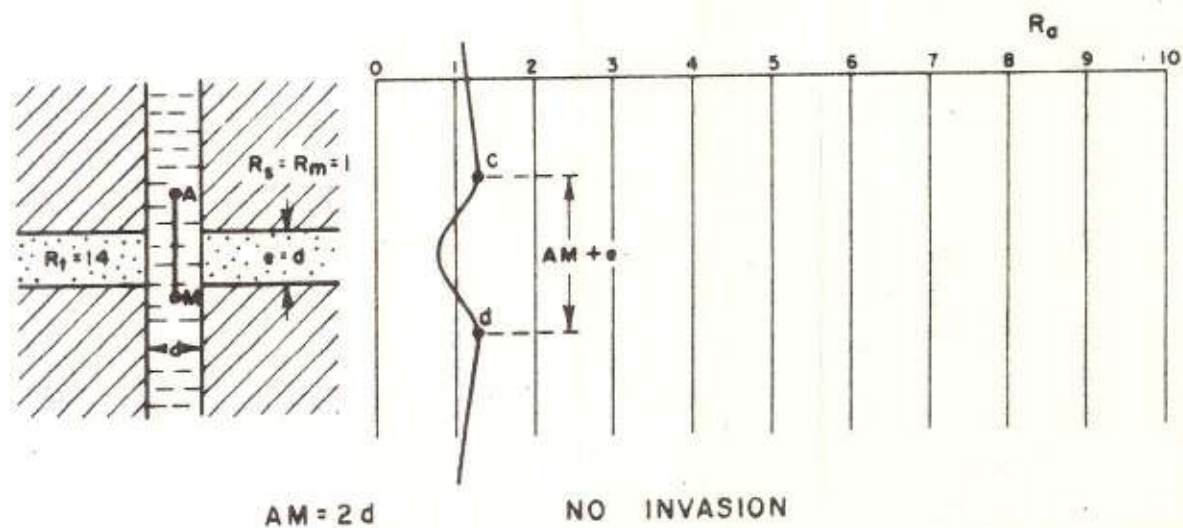
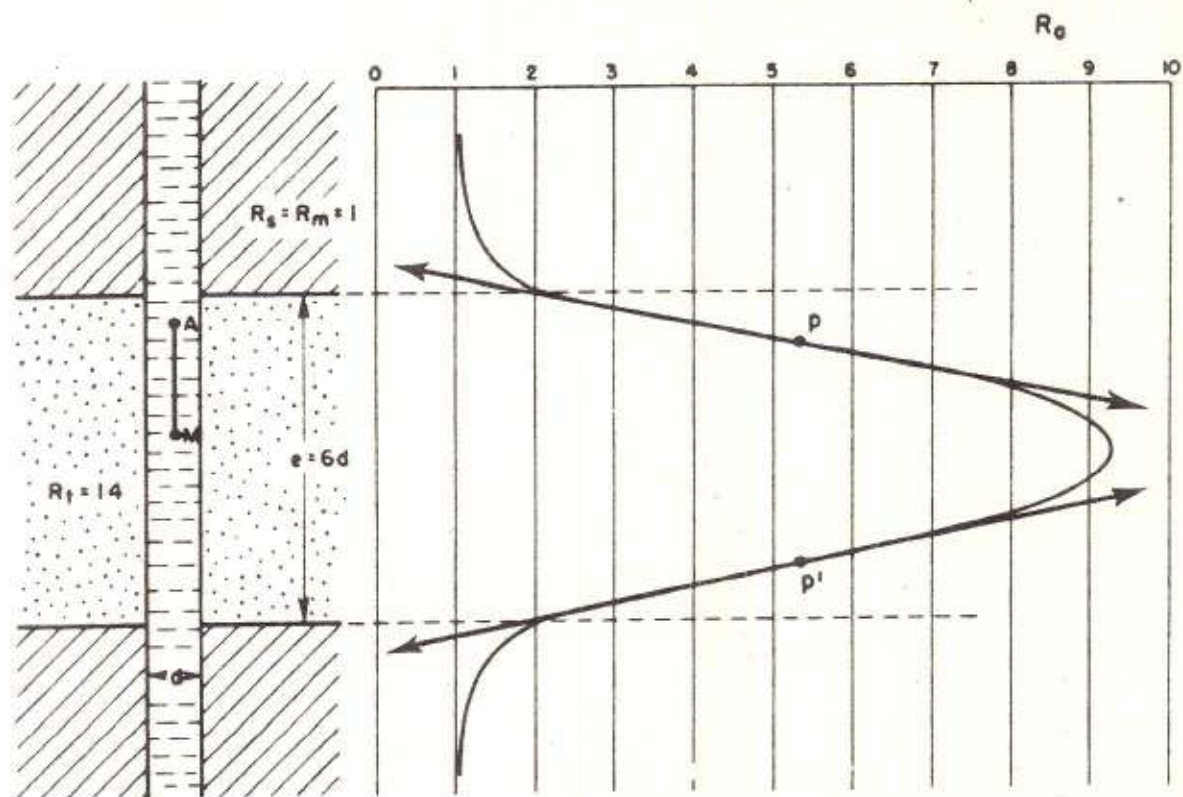


FIG. 4-4 ANDAMENTO DELLE CURVE NORMALI PER UNO STRATO SPESSE (IN ALTO) E SOTTILE (IN BASSO) PIU' RESISTIVO DELLE FORMAZIONI ADIACENTI. ASSENZA DI INVASIONE (DATI DI LABORATORIO)

I N T E R P R E T A Z I O N E

4-8. Alcune proprietà dei dispositivi normali e inversi (dati di laboratorio).

La fig. 4-4 mostra le curve registrate in laboratorio con i dispositivi normali nel caso di strati aventi resistività omogenea compresi fra strati di bassa resistività.

E' evidente che le curve sono asimmetriche rispetto al piano centrale dello strato. Come si è visto nel paragrafo 4-6, si otterrebbero ancora queste stesse curve effettuando la registrazione con M al di sopra di A invece che con A al di sopra di M.

La parte superiore della figura mostra il caso di uno strato con spessore maggiore della spaziatura (potenza dello strato = $6d$, spaziatura $AM = 2d$; $d =$ diametro del foro). I confini di strato non sono indicati nettamente nel log di resistività, ma tendono a venire arrotondati dall'influenza del foro. Lo spessore dello strato, indicato dalla distanza fra i due punti di flesso P e P' sulla curva, è minore rispetto allo spessore effettivo, di una quantità totale uguale alla spaziatura. L'errore nel definire i confini degli strati spessi, è piccolo per curve normali di spaziatura limitata e questa è una delle ragioni per cui viene registrata anche una piccola normale. Dovrebbe ricordarsi comunque che le curve normali tendono a diminuire lo spessore degli strati resistivi di una quantità uguale alla spaziatura. Parimenti esse tendono ad aumentare lo spessore degli strati conduttivi di una quantità uguale alla distanza fra gli elettrodi.

La parte inferiore della figura mostra il caso di uno strato resistivo di spessore inferiore alla spaziatura. Questo caso è caratterizzato da una depressione in corrispondenza dello strato e da due piccoli peaks, simmetrici c e d, da ciascun lato della depressione.

Questo mostra quale è lo svantaggio principale del dispositivo normale: strati che hanno spessore minore della spaziatura e che sono più resistivi delle formazioni circostanti, sono indicati sui logs come se fossero conduttivi e tanto più essi sono resistivi, tanto più sembrano conduttivi.

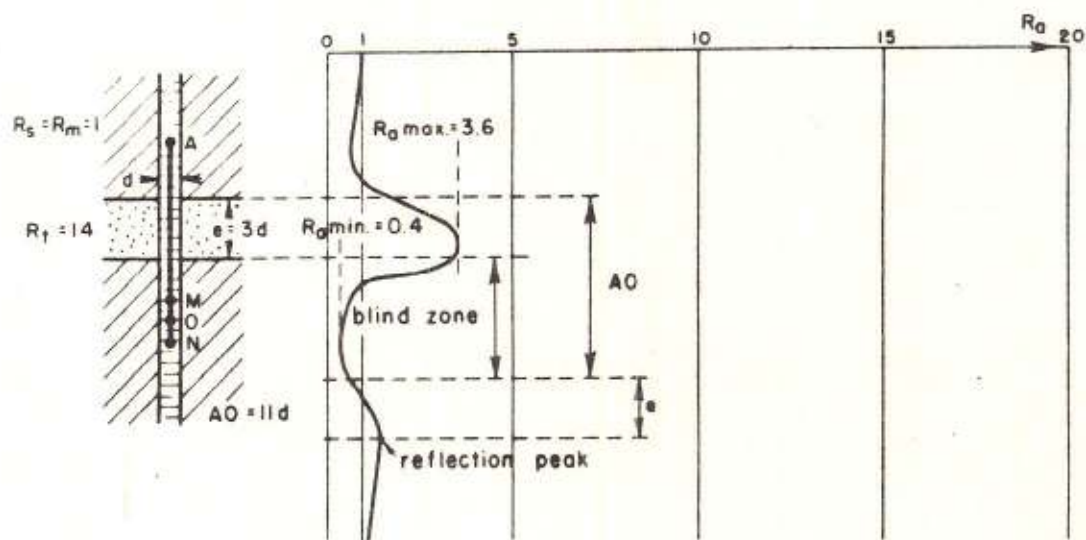
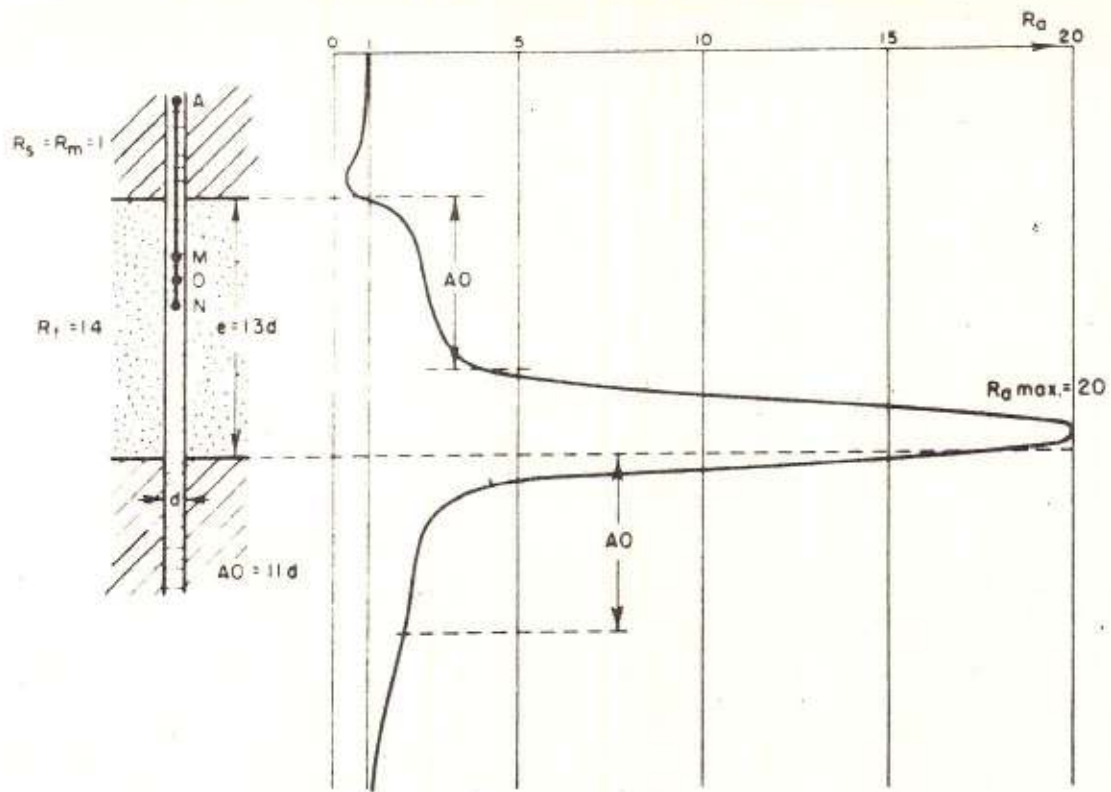
In fig. 4-5 sono mostrate le curve corrispondenti per il dispositivo inverso.

In contrasto con le curve registrate mediante le sonde normali, le curve laterali non sono simmetriche rispetto al piano centrale dello strato, e la loro forma è notevolmente più complessa. Come nel caso precedente, nelle curve, le zone di transizione corrispondenti ai confini delle formazioni, sono arrotondate a causa dell'influenza del foro.

Nel caso di uno strato avente spessore maggiore della spaziatura, il confine dello strato non è ben marcato sull'inversa e lo strato sembra spostato più in basso. L'ampiezza dello spostamento è circa uguale alla spaziatura.

La parte inferiore della fig. 4-5 corrisponde al caso di uno strato resistivo con spessore minore della spaziatura. Lo strato viene indicato da un brusco aumento della resistività apparente che però è ancora minore della resistività vera. Al di sopra dello strato si osserva una leggera depressione, ma ciò che colpisce di più è la presenza di una zona di bassa resistività al di sotto dello strato, seguita da un secondo peak più piccolo situato sotto il limite inferiore di strato ad una distanza uguale alla spaziatura. Questo peak secondario è chiamato "peak di riflessione", e la zona di resistività apparente molto bassa viene chiamata "zona cieca". La zona cieca corrisponde all'intervallo durante il quale lo strato resistivo è situato fra l'elettrodo di corrente e quello di misura.

L'inversa è utile per la localizzazione di strati piccoli e molto



NO INVASION

FIG. 4-5 ANDAMENTO DELLE CURVE LATERALI PER UNO STRATO SPESSO (IN ALTO) E SOTTILE (IN BASSO) PIU' RESISTIVO DELLE FORMAZIONI ADIACENTI. ASSENZA DI INVASIONE (DATI DI LABOR.).

resistivi, sebbene l'interpretazione possa essere difficile nel caso in cui siano presenti diversi strati resistivi molto vicini fra loro. Alcuni di questi strati possono non essere individuati ed i peaks di riflessione possono essere interpretati come piccoli strati resistivi realmente esistenti nella formazione.

Nel caso di uno strato resistivo il cui spessore è all'incirca uguale alla spaziatura (spessore critico) la curva è quasi completamente appiattita.

Analoghe considerazioni sono possibili per le curve laterali registrate per strati più conduttivi delle formazioni circostanti. Se lo strato è spesso o sottile la forma della curva è asimmetrica e le anomalie vengono riportate più in basso oltre il confine inferiore. L'aumento apparente di spessore è all'incirca uguale ad AO .

La fig. 4-6 mostra come si presenta l'inversa per due strati conduttivi aventi rispettivamente spessori di 40" e 13". La linea a tratto unito corrisponde ai dati effettivamente misurati, la linea tratteggiata mostra qualitativamente il modo in cui le curve raggiungono la loro resistività apparente negli strati resistivi adiacenti. Per questi esempi i valori scelti per le varie resistività, come è indicato nella figura, sono: $R_t = 10$, $R_s = 50$, $R_m = 0,5$. Il diametro del foro è di 8" e non vi è invasione. In queste condizioni la resistività apparente indicata dall'inversa nelle formazioni adiacenti di spessore infinito, aventi resistività di 50 ohm-m, sarebbe di circa 80-90 ohm-m (v. Documento n° 7 pag. 19). È da notare che in ogni caso lo strato conduttivo ha uno spessore apparente maggiore di quello reale di una quantità uguale all'ampiezza della spaziatura. Questo aumento viene registrato al di sotto della faccia inferiore dello strato conduttivo. Ulteriori dettagli sulle curve laterali si possono trovare nell'opuscolo "Lateral Curves ($AO = 18'8''$) for Thin Non-Invaded Beds", pubblicato dalla Schlumberger (Settembre 1955).

4-9. Curve di scarto per la resistività

Sono state calcolate delle curve di scarto per la resistività che danno le relazioni fra la resistività vera dello strato e la resistività apparente registrata dai dispositivi convenzionali. Questi calcoli hanno preso in considerazione l'influenza della spaziatura degli elettrodi, del foro, dell'invasione e delle formazioni adiacenti e sono state pubblicate nei documenti Schlumberger n° 3 - 4 e 7.

Tutte le curve, per strati di spessore infinito (normali e laterali) sono state raggruppate nel Documento Schlumberger n° 7. Le curve per strati di spessore finito (sole per il dispositivo normale e per il caso di $R_t > R_s$), sono pubblicate sul Documento n° 3. Negli stessi Documenti, e nel Documento n° 4 (Interpretation Handbook for Resistivity Logs) si possono trovare le spiegazioni delle caratteristiche di queste curve e le loro applicazioni ai problemi pratici.

Via via che gli strati in esame diventano più sottili, diventa sempre più vano cercare di ottenere la loro resistività vera dalle curve di scarto; le influenze delle formazioni adiacenti diventano così grandi che le curve hanno un potere risolvente molto piccolo.

Per gli scopi di interpretazione pratica, si possono porre dei limiti allo spessore degli strati perchè sia lecito considerarli "Infinitamente" spessi. Questi limiti dipenderanno dalla spaziatura del particolare sistema e dalle resistività dello strato, delle formazioni adiacenti e del fango.

Così, per valori moderati della resistività, tali spessori di strato possono essere approssimativamente determinati, in 10 piedi per la piccola normale (A.M. = 16"); 25 piedi per la grande normale (A.M. = 64"), e sensibilmente di più per l'inversa di 18"8" (il cui response, paragr. 4-8) non è troppo esatto).

Le curve sono utili per la determinazione di R_t per gli strati di notevole spessore purchè sia approssimativamente noto il valore

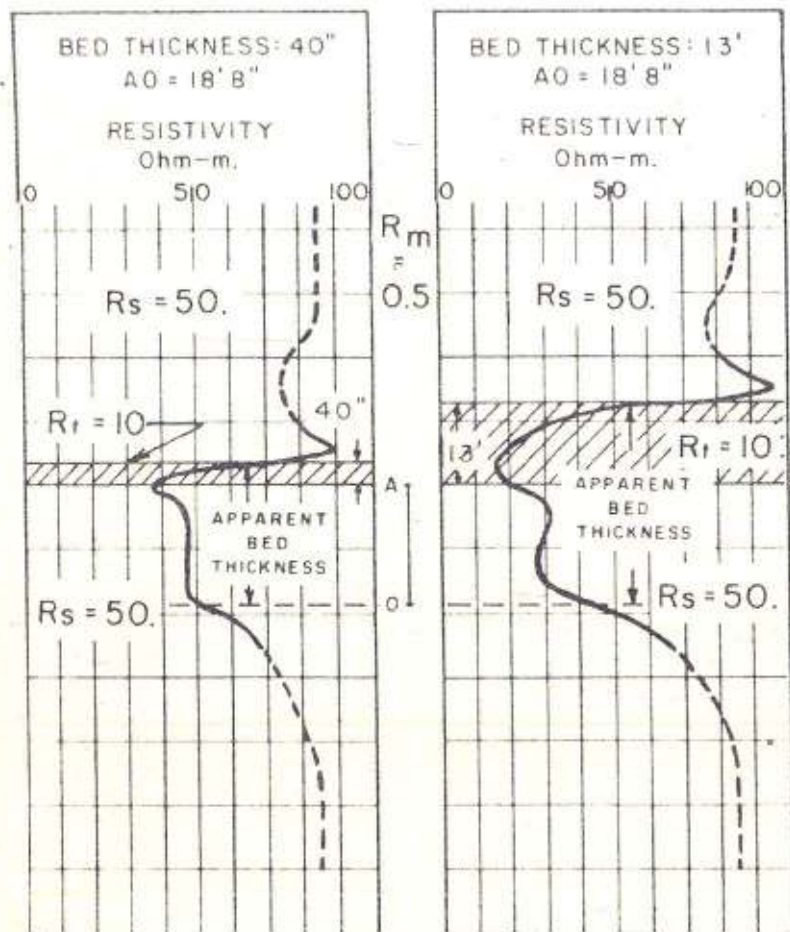


FIG. 4-6 ANDAMENTO DELLA CURVA LATERALE PER STRATI SOTTILI, PIU CONDUTTIVI DEGLI ADIACENTI. ASSENZA DI INVASIONE — (DATI DI LABORATORIO).

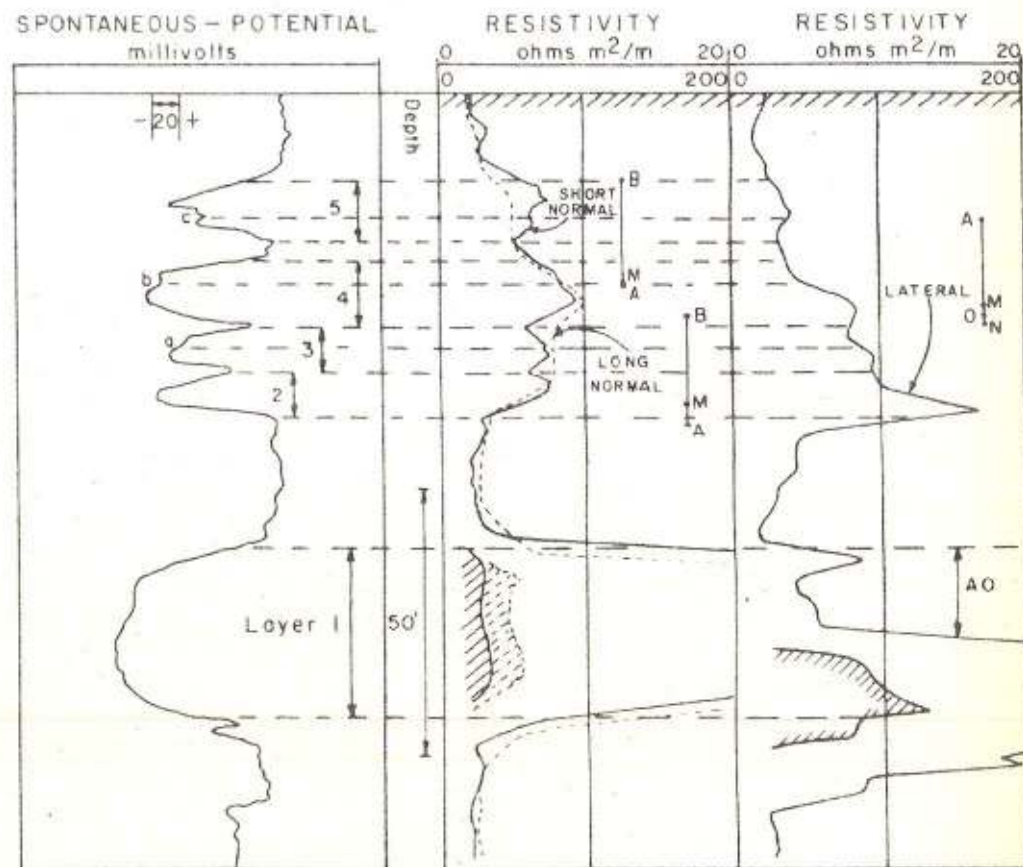


FIG. 4-7 REGISTRAZIONE DI UN LOG CONVENZIONALE IN SERIE ARGILLO-SABBIOSE

da prendere per R_1 (in prima approssimazione R_1 può essere preso uguale al valore di R_{xo} fornito dal Microlog e dal Microlaterolog) e purchè sia possibile formulare delle ipotesi fondate circa la profondità dell'invasione. In genere, il merito delle curve di scarto consiste nel fatto che esse forniscono il mezzo di stabilire l'influenza, sulla resistività apparente, dei rispettivi fattori interessati e di determinare il responso dei vari dispositivi di misura per ogni particolare condizione.

Supponiamo per esempio che, secondo le informazioni disponibili sulle caratteristiche di un reservoir in una data regione, si possano prendere come parametri i seguenti valori approssimati: $R_m = 1$, $R_1 = 100$, R_t variabile da 5 a 200 per saturazioni in acqua comprese fra il 100 % ed il 15 % (questi valori corrispondono alle condizioni medie trovate in molte zone con rocce dure), $AO = 18.8''$, $D_1 = 80''$. Supposto che la formazione sia molto spessa le curve di scarto mostrano che il dispositivo laterale darebbe resistività apparenti comprese fra 40 e 300. In altre parole il dispositivo laterale dà registrazioni non troppe discoste da R_t nel caso di formazioni impregnate d'olio, ma molto più alte nel caso di formazioni ad acqua.

Si potrebbe concludere che il dispositivo laterale in questo caso porterebbe ad interpretazioni troppo ottimistiche circa la saturazione.

Supponiamo ora che il fango sia più conduttivo, per esempio $R_m = 0.1$ il che corrisponde, a parità di tutte le altre condizioni, ad un valore per R_1 di circa 10. Le curve di scarto mostrano che il dispositivo laterale darebbe rispettivamente 10 e 150 invece di 5 e 200. In questo caso le resistività apparenti sono molto più vicine ai valori reali.

Questi esempi illustrano il fatto che fanghi troppo resistivi non sono favorevoli ad una interpretazione corretta dei logs di resistività convenzionali.

D'altra parte non sono desiderabili neppure i fanghi troppo conduttivi, perchè i log₁₀ della normale e del P.S. in questo caso sarebbero ridotti a linee quasi piatte. Le curve di scarto e le esperienze di campagna mostrano che la resistività optimum del fango dovrebbe essere all'incirca da due a 4 volte la resistività dell'acqua di formazione. In aggiunta alle suddette curve di scarto, sono disponibili anche delle curve che offrono, per i dati della normale da 16", delle correzioni approssimate, tenendo conto del foro e dello spessore degli strati (Carte B-12 e B-13). Queste carte sono state ricavate da una lunga serie di determinazioni.

4-10. Caratteristiche delle curve normali e inverse nelle serie argillose-sabbiose.

Le figg. 4-7 e 4-8 mostrano i tratti di registrazioni convenzionali eseguite in formazioni tenere (serie argillo-sabbiose). La curva del P.S. è registrata nella banda n° 1, a sinistra. Nella banda centrale (n° 2) sono riportate le due curve normali; la piccola normale (linea unita) con la spaziatura AM = 16" e la grande normale (curva tratteggiata) con AM = 64". L'inversa (AO = 18'8") infine è registrata nella banda n° 3 a destra. Nelle zone a formazioni tenere, come ad esempio nella Costa del Golfo, le curve si presentano in genere in questo modo.

In fig. 4-7 la scala delle resistività (per l'ampiezza di una banda) è di 20 ohm-m. Per le zone resistive quando il galvanometro va fuori scala, entra in scala, alla sinistra della traccia, un altro galvanometro la cui sensibilità è 1/10 di quella del galvanometro precedente. Quest'ultimo galvanometro registra così resistività fino a 200 ohm-m e la sua curva è indicata, in figura, con ombreggiatura.

Lo strato 1 di fig. 4-7 dà un buon esempio di comportamento delle varie curve in corrispondenza di uno strato abbastanza potente, più

resistivo delle formazioni adiacenti. Ambedue le sonde normali danno luogo a curve abbastanza simmetriche. L'inversa, in corrispondenza dello strato 1, è abbassata rispetto alla parte alta dello strato di un intervallo corrispondente alla spaziatura. La curva quindi subisce un brusco aumento fino a raggiungere un alto valore di resistività apparente. Il massimo viene raggiunto a una distanza molto breve al di sopra del limite inferiore dello strato e la curva ritorna approssimativamente alla linea delle argille ad una distanza, al di sotto del letto dello strato, uguale alla spaziatura.

Nella parte superiore della fig. 4-7 il log del P.S. mostra quattro inflessioni negative principali (2 - 3 - 4 e 5), in corrispondenza di 4 strati permeabili, con alcune depressioni minori (a, b, c) sulla cresta delle inflessioni, che stanno ad indicare sottili strati di argilla all'interno di questi strati permeabili.

Lo spessore medio di ciascuno strato permeabile è maggiore della spaziatura della piccola normale e questa curva fa una buona distinzione fra gli strati, sebbene i sottili straterelli a, b e c siano debolmente marcati. Per la grande normale, lo spessore degli strati permeabili è circa lo stesso della spaziatura della sonda. La curva risultante è quindi arrotondata e non è possibile fare alcuna distinzione fra i singoli strati (eccettuato per lo strato 4 che è più spesso degli altri).

Per quanto riguarda l'inversa, lo spessore di ciascuno strato e le distanze tra gli strati, sono così piccoli in confronto alla spaziatura che la curva registra approssimativamente ciò che si leggerebbe in corrispondenza di un singolo strato omogeneo con uno spessore uguale allo spessore totale ed una resistività uguale alla media delle resistività dei diversi strati.

La fig. 4-8 mostra dei sottili strati resistivi in formazioni conduttive. Nella parte superiore si ha un unico strato resistivo che è indicato sull'inversa da un caratteristico peak e da una zona

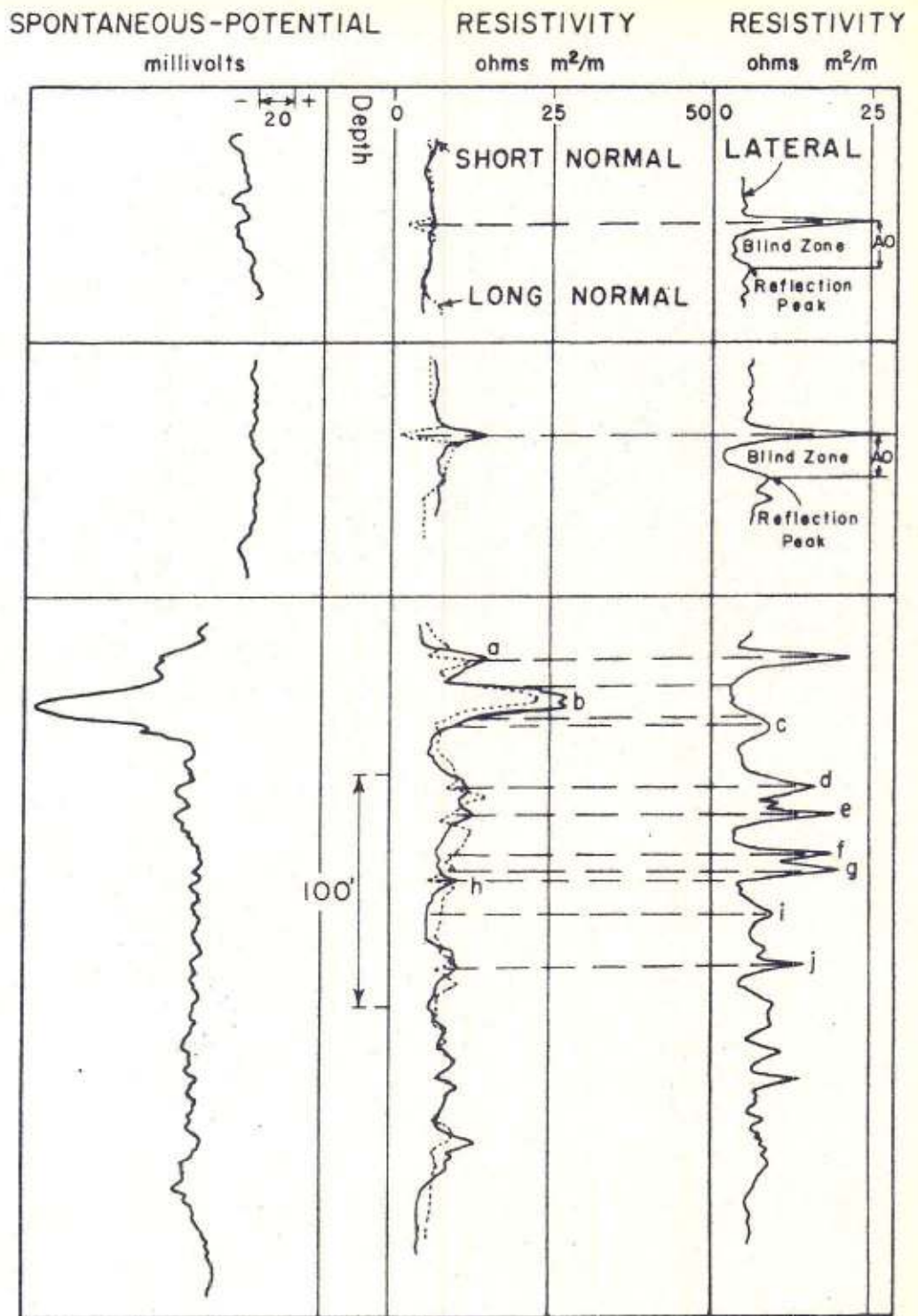


FIG. 4-8 RESPONSI DI DISPOSITIVI CONVENZIONALI IN PROFILI ARGILLOSI CON INTERCALATI SOTTILI LIVELLI RESISTIVI.

cieca, sulla grande normale da una depressione abbastanza marcata e sulla piccola normale da una depressione molto debole. Lo spessore dello strato evidentemente è leggermente minore della spaziatura della piccola normale.

Lo strato resistivo della parte mediana della fig. 4-8 ha uno spessore leggermente maggiore come è indicato dal fatto che la piccola normale mostra un peak. Esso ha tuttavia spessore minore della spaziatura della grande normale.

La parte inferiore della fig. 4-8 mostra come una serie di piccoli strati resistivi a breve distanza uno dall'altro possano complicare l'interpretazione. La depressione dell'inversa in corrispondenza dello strato permeabile "b" può essere dovuta al fatto che essa cade nella zona circa dello strato resistivo "a" e può anche essere dovuta allo spessore dello strato "b" che è approssimativamente uguale alla spaziatura della laterale. Più in basso ambedue le curve normali mostrano una serie di depressioni e rientranze che non potrebbero essere facilmente interpretate senza l'aiuto dell'inversa. Queste mostrano dei peaks definiti come c, d, e, f, g, e j. Il peak è ovviamente un peak di riflessione corrispondente allo strato resistivo g in quanto esso è situato a distanza AO dallo strato g medesimo. Il peak h che si nota sulla piccola normale corrisponde ad una depressione, e non appare sull'inversa in quanto cade sulla zona circa dello strato resistivo g.

4-11. Caratteristiche delle curve normali e laterali in formazioni dure

La fig. 4-9 mostra per mezzo di un esempio qualitativo alcune caratteristiche tipiche delle curve normali e inverse in corrispondenza di una formazione spessa e fortemente resistiva, come può essere un calcare, contenente zone porose più conduttive.

Per comprendere il comportamento di queste curve è conveniente ricordare che in corrispondenza di una formazione altamente resistiva, la corrente proveniente dall'elettrodo A è quasi completamente confi-

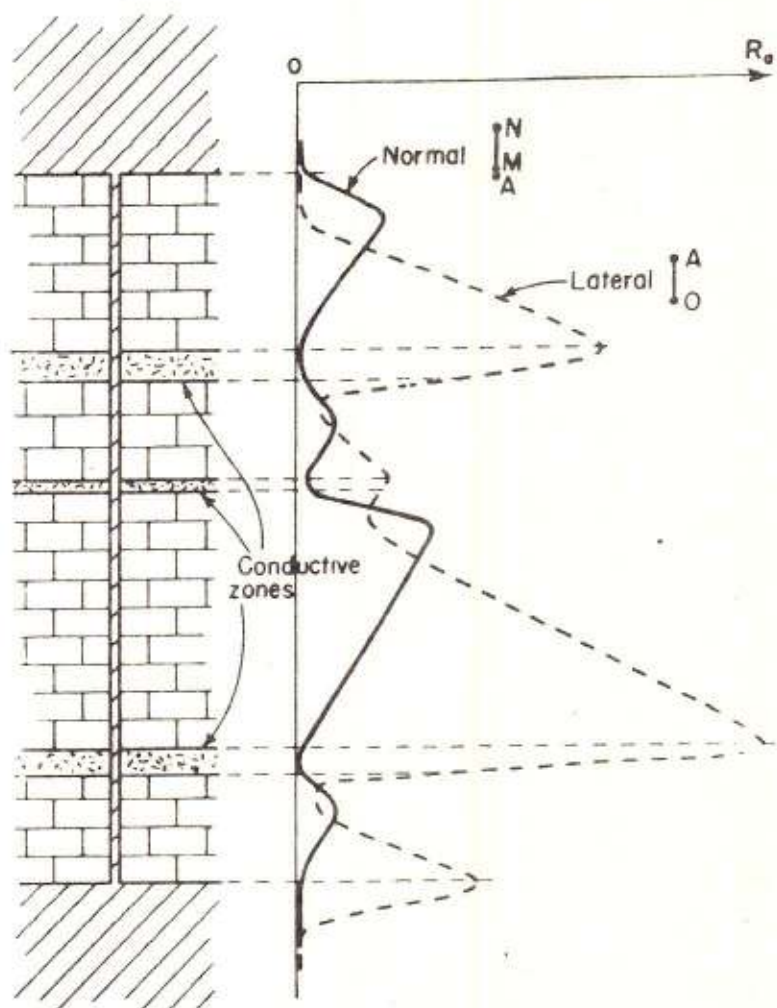


FIG. 4-9 RESPONSO DI CURVE NORMALI E LATERALI NEL
 CASO DI FORMAZIONI CALCAREE (DIAGRAMMA
 QUALITATIVO).

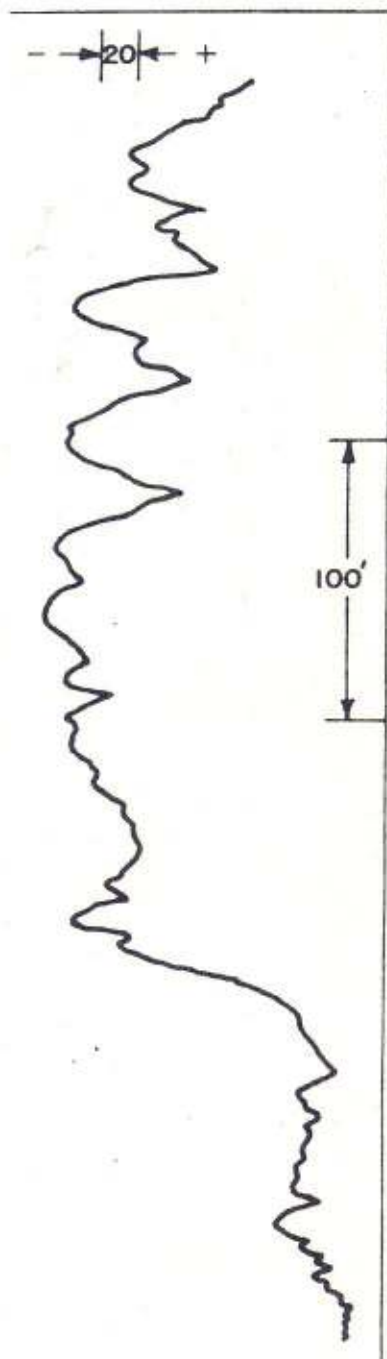
nata nel pozzo; parte di essa fluisce in alto e parte in basso dividendosi in parti inversamente proporzionali alle resistenze dei due percorsi. La resistenza di ciascun percorso viene determinata principalmente dalla resistenza della colonna del fango nel foro fra l'elettrodo di corrente e il più vicino strato conduttivo in quella direzione. Una volta che la corrente ha raggiunto lo strato conduttivo, essa trova, in relazione allo spessore e alla conducibilità dello strato, una resistenza relativamente bassa per uscire dal foro.

Questo è il motivo per cui i dispositivi laterali che hanno gli elettrodi M ed N al di sotto degli elettrodi di corrente registrano una curva asimmetrica e spostata verso il basso. Quanto più profondo è il dispositivo nello strato resistivo, tanto più grande è la proporzione della corrente che fluisce verso il basso dall'elettrodo A e quindi tanto più grande è la caduta di potenziale nel fango misurata fra gli elettrodi M ed N. La resistività apparente corrispondente a questa caduta di potenziale verrà così a dipendere in gran parte dalle dimensioni del pozzo, dalla resistività del fango e dalla posizione dell'apparecchio rispetto ai confini della zona molto resistiva.

L'aspetto asimmetrico della curva normale viene spiegato in modo analogo per la disposizione a tre elettrodi, precedentemente illustrata, in cui gli elettrodi M ed N si trovano sopra l'elettrodo di corrente. Non appena tutti e tre gli elettrodi sono all'interno della formazione dura, l'elettrodo superiore non si trova più a potenziale vicino allo zero, come dovrebbe essere in teoria per le curve normali ed il dispositivo misura la caduta di potenziale dovuta al flusso di corrente nel fango fra M ed N.

Si è visto così che il dispositivo a tre elettrodi dà in formazioni dure una curva asimmetrica e la direzione dell'ingressamento varia a seconda che gli elettrodi di misura sono al di sopra o al di sotto degli elettrodi di corrente. Lungo questa asimmetria si può vedere

SPONTANEOUS POTENTIAL
millivolts



RESISTIVITY
ohms m²/m

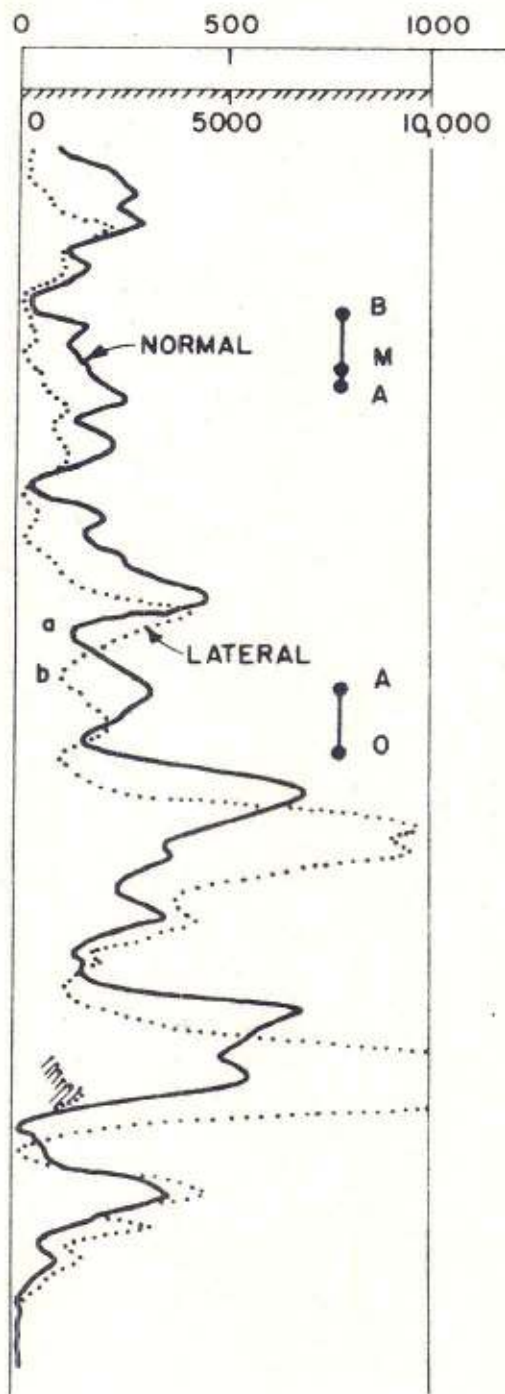


FIG. 4-10 RESPONSO DI UN DISPOSITIVO NORMALE STANDARD
 E LATERALE IN FORMAZIONI CALCAREE.

dalla figura che per la laterale le posizioni di minimo sono spostate in basso in modo abbastanza sensibile rispetto alle esatte profondità degli strati conduttivi. Per la normale si nota invece un leggero spostamento dei minimi verso l'alto. Questo può provocare che il massimo di una curva incontri il minimo dell'altra.

Inoltre le depressioni lette sulla curva normale in corrispondenza di strati conduttivi, sono molto dolci e considerevolmente più ampie dello spessore degli strati. Infine i confini delle formazioni calcaree sono marcati molto debolmente in modo da rendere praticamente possibile determinazioni accurate.

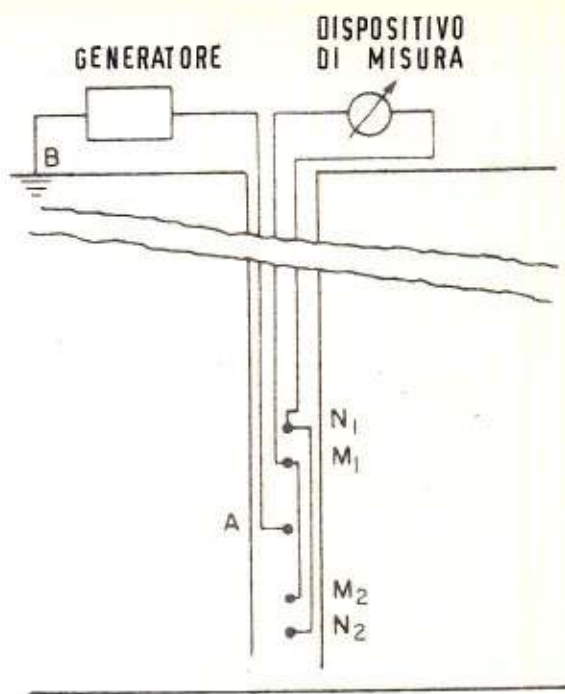
Se si usa un dispositivo normale a due elettrodi o un dispositivo normale in cui l'elettrodo superiore è molto lontano dagli altri due, in modo da trovarsi sempre al di fuori dello strato molto resistivo, la curva tende ad essere simmetrica ma ai confini della formazione essa è ancora arrotondata e indefinita e la resistività apparente misurata dipende dalla distanza del dispositivo dai confini delle formazioni.

La fig. 4-10 mostra un esempio di formazioni spesse e molto resistive contenenti diverse zone conduttive in cui sono stati effettuati logs normali e laterali. Questo esempio può essere facilmente confrontato col diagramma schematico di fig. 4-9. Sono da notare in modo particolare le depressioni a e b rispettivamente sulla normale e sulla inversa. E' difficile localizzare esattamente gli strati corrispondenti.

I DISPOSITIVI PER CALCARI

4-12. Allo scopo di ottenere logs più chiari e più semplici in formazioni dure è stata studiata la sonda per calcari.

La fig. 4-11 mostra schematicamente il principio di questo dispositivo. La corrente passa fra un elettrodo A, nella sonda, e un elettro-



Basic Circuit

FIG. 4 - 11 SCHEMA DI UNA SONDA A CALCARE

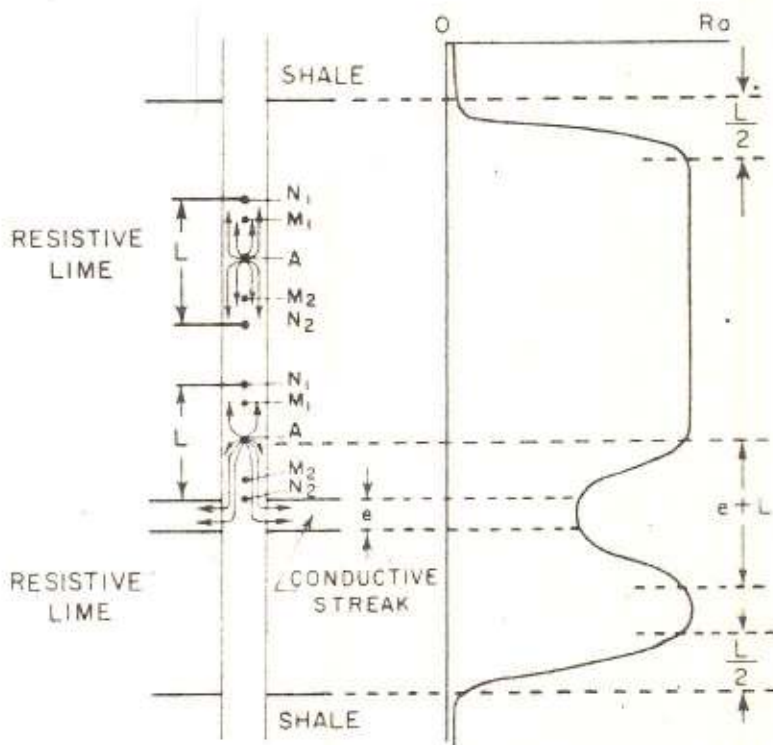


FIG 4-12 SCHEMA DEL PRINCIPIO DELLA SONDA A CALCARE

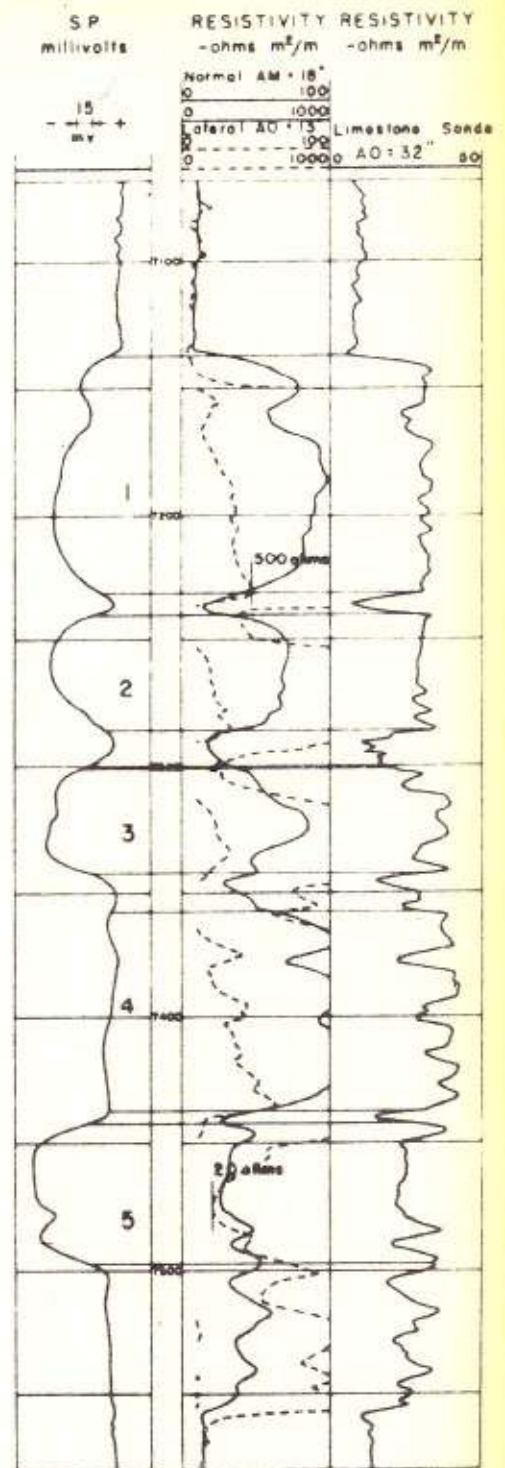


FIG. 4-13 RESPONS0 DI UNA SONDA CONVENZIONALE E DI UNA A CALCARE IN FORMAZIONI COMPATTE

do di superficie B. Due paia di elettrodi di misura, $M_1 N_1$ ed $M_2 N_2$, sono montati sulla sonda simmetricamente rispetto ad A, in modo tale che la distanza AM_1 (uguale AM_2). Inoltre, M_1 ed M_2 (ed N_1 e N_2) sono cortocircuitati fra loro mediante tratti di filo di rame isolato in modo che M_1 ed M_2 sono sempre allo stesso potenziale, e così è per N_1 ed N_2 .

Questa apparecchiatura è immediatamente riconoscibile come un dispositivo laterale doppio simmetrico. Le spazature usate in pratica sono : AM_1 (o AM_2) = 30 pollici; $M_1 N_1$ (o $M_2 N_2$) = 4 pollici. Così la AO è 32 pollici. I principi di funzionamento, nelle sonde per calcari sono i seguenti :

Supponiamo dapprima che il dispositivo si trovi in corrispondenza di una formazione molto spessa e dura, così resistiva che tutte le correnti siano costrette a passare nel fango del pozzo, il quale ha diametro uniforme. In queste condizioni si può dimostrare che la resistività apparente registrata dalla sonda per calcari è costante fintanto che i suoi elettrodi sono all'interno dello strato resistivo, (parte superiore della fig. 4-12). Inoltre il valore di R_a dipenderà soltanto dalle dimensioni del pozzo e dalla resistività del fango. Il valore massimo di R_a sarà:

$$R_a = 8 R_m \frac{AM \cdot AN}{(de)^2}$$

in cui R_m è la resistività del fango, AM ed AN sono le rispettive distanze fra gli elettrodi e "de" è l'effettivo diametro del pozzo. L'unico posto in cui la corrente può passare al di là della sonda è l'anello cilindrico di fango fra la sonda e la parete del foro. Questo anello avrebbe un diametro effettivo (se fosse cilindrico), di $d^2 - S^2$ in cui d è il diametro del foro e S il diametro della sonda, e così è $de^2 = d^2 - S^2$.

La fig. 4-12, nella parte inferiore, mostra cosa accade quando la sonda per calcari incontra uno strato conduttivo. Appena un elettrodo esterno (N_1 ed N_2) si trova in corrispondenza del confine fra uno strato resistivo ed uno conduttivo, una parte della corrente penetra nella formazione, riducendo la caduta I_r fra gli elettrodi di misura e la lettura di R_a comincia a diminuire. Quando la sonda è al centro dello strato conduttivo, la massima parte della corrente fluisce nello strato, mentre una minima parte produce la caduta di potenziale I_r fra M_1 ed N_1 (o M_2 ed N_2) ed R_a mostrerà un valore minimo. Lo spessore apparente dello strato conduttivo sarà dato così dalla sua attuale potenza più la distanza fra N_1 ed N_2 nella sonda per calcari.

Da questa discussione appare abbastanza ovvio che la sonda per calcari è di poca utilità per determinare valori di resistività vera in quanto viene molto influenzata dalla colonna del fango. La sua possibilità di individuare e delimitare strati conduttivi (e quindi permeabili) seppure maggiore di quella degli altri sistemi convenzionali, è superata considerevolmente dal Microlog e dal Microlaterolog che vedremo più tardi. In effetti la sua caratteristica più importante è l'aiuto che essa offre nelle determinazioni di porosità, come verrà spiegato nel capitolo 9.

La fig. 4-13 è un esempio di applicazione di sonda per calcari.

La resistività media apparente, registrata con la sonda per calcari non varia molto e rimane inferiore a 50 ohm-m mentre l'inversa mostra resistività superiori ai 500 ohm-m.

Secondo la curva del P.S. quattro strati abbastanza potenti, 1 - 2 - 3 e 5, appaiono permeabili e la zona 4 impermeabile. La curva della sonda per calcari contiene molti peaks acuti e delle depressioni che mostrano come ciascun strato include numerose sezioni impermeabili, zone permeabili ed anche straterelli di argilla. Alcune delle depressioni si possono facilmente riferire ad argille mediante

l'aiuto del P.S., ad esempio quelle fra le sezioni 1 e 2 o fra le sezioni 2 e 3, ma nella maggior parte dei casi è difficile distinguere le zone permeabili dalle argille.

CAPITOLO QUINTO

IL LATEROLOG

NOZIONI GENERALI.

5-1. Il Laterolog è un metodo per misure di resistività. Mediante l'uso di elettrodi la corrente viene immessa nelle formazioni in una sezione di spessore determinato, in modo che la misura viene ad interessare una porzione di terreno di spessore verticale limitato e praticamente non è influenzata dalla colonna del fango. Questi risultati vengono raggiunti mediante un'appropriata disposizione degli elettrodi ed un sistema automatico di controllo.

I vantaggi principali del Laterolog sul log convenzionale sono i seguenti :

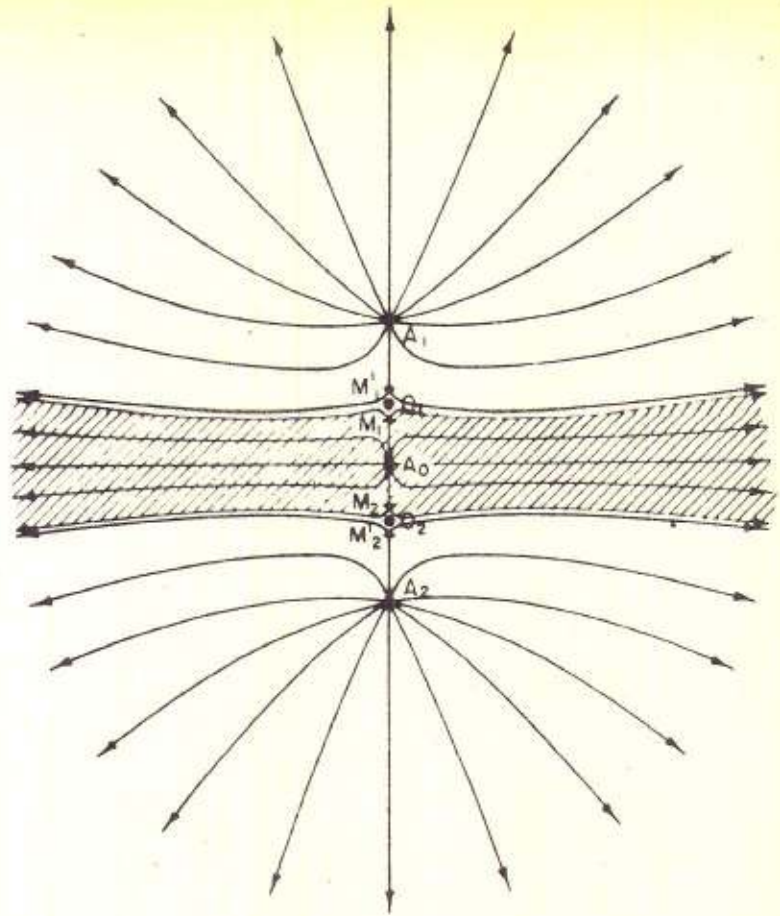
- 1°) Maggiore distinzione fra i diversi strati e definizione più accurata dei loro confini.
- 2°) Approssimazione maggiore della resistività vera degli strati sottili, specie nel caso di formazioni perforate con fango ad alta salinità.

Questo metodo fu introdotto per la prima volta nella pratica nel 1949 ed ha portato ad un notevole miglioramento nei carotaggi di rocce ad alta resistività, come ad esempio calcari, arenarie consolidate ecc., in cui il log elettrico convenzionale è sensibilmente handicappato dall'effetto di by-pass della colonna del fango. Il Laterolog inoltre è utile per il carotaggio di strati sottili, in formazioni di resistività bassa o moderata quando il fango di perforazione è molto salato.

5-2. Nella pratica sono in uso due tipi di dispositivi di Laterolog: il Laterolog 7 e il Laterolog 3.

Il Laterolog 7 usa piccoli elettrodi come è rappresentato schematicamente in fig. 5-1. Il dispositivo comprende un elettrodo A_c e

FIG 5-1
 DISTRIBUZIONE DELLE LINEE
 DI CORRENTE IN UN MEZZO O-
 MOGENEO.
 (LA ZONA TRATTEGGIATA RAP-
 PRESENTA L'AREA DI MISURA
 DELLA CORRENTE).



Laterolog 7

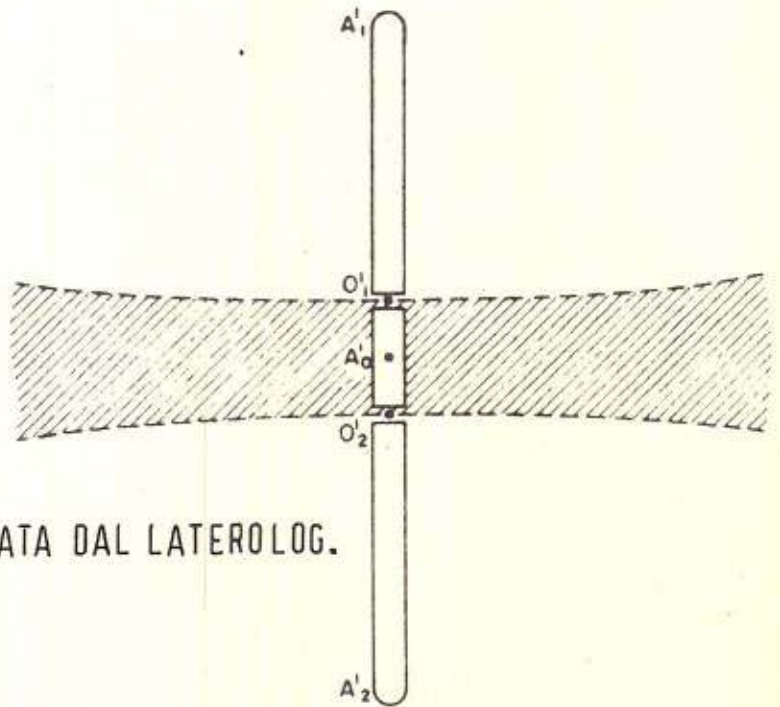


FIG. 5-2
 SCHEMA DELLA ZONA INVESTIGATA DAL LATEROLOG.

Laterolog 3

tre paia di elettrodi, M_1 e M_2 , M'_1 ed M'_2 , A_1 ed A_2 disposti simmetricamente rispetto ad A_0 . Gli elettrodi di uno stesso paio sono cortocircuitati tra loro. Una corrente di intensità costante viene immessa attraverso l'elettrodo A_0 . Vengono mandate inoltre delle correnti addizionali della stessa polarità attraverso gli elettrodi ausiliari A_1 e A_2 . L'intensità di queste correnti viene di continuo regolata automaticamente in modo tale che la differenza di potenziale fra le copie di elettrodi cortocircuitati $M_1 - M_2$ ed $M'_1 - M'_2$ viene mantenuta praticamente uguale a zero. Viene quindi misurato il potenziale di ognuno di questi quattro elettrodi. La resistività apparente misurata con il dispositivo è proporzionale al valore di questo potenziale e ad un coefficiente di taratura che dipende dalla distanza fra gli elettrodi.

In questa disposizione, la corrente uscente da A_0 non può fluire in alto oltre il punto di mezzo fra gli elettrodi M_1 ed M'_1 , nè in basso oltre il punto di mezzo fra gli elettrodi M_2 ed M'_2 , come se nel pozzo, a questo livello fosse posti dei diaframmi isolanti. Di conseguenza la distanza che questa corrente percorre attraverso il fango è molto breve e la colonna del fango ha un'influenza molto piccola sulle misure, eccetto nel caso di profondi scavernamenti. Inoltre le condizioni create dal sistema di controllo sono tali che le correnti uscenti da A_0 si comportano come se il diaframma isolante si estendesse orizzontalmente ad una certa distanza dal pozzo. La corrente è perciò obbligata a fluire approssimativamente all'interno di una sottile striscia orizzontale di formazione il cui spessore è circa uguale alla distanza che separa O_1 , punto di mezzo di M_1 , M'_1 da O_2 , punto di mezzo di M_2 , M'_2 . Per la maggior parte degli apparecchi oggi in uso, O_1 , O_2 è uguale a 32". In altre parole la lamina di corrente è larga 32".

Il Laterolog 3 usa elettrodi allungati, come è mostrato schematicamente in figura 5-2, e dispone dello stesso apparato di controllo automatico del Laterolog 7. Anche qui la corrente uscente dall'elettrodo centrale A'_0 è costretta a passare all'interno di una sottile striscia orizzontale di formazione il cui spessore è circa uguale alla distanza fra i punti O'_1 e O'_2 posti alla metà della distanza che separa l'elettrodo centrale dagli elettrodi ausiliari. Le spaziature del Laterolog 3 normalmente usate, danno fasci di 12" e 24", sebbene quando è necessario un maggior dettaglio si usino sonde che danno fasci di 6".

Se la distanza $O_1 O_2$ nel Laterolog 7 e $O'_1 O'_2$ nel Laterolog 3 fossero uguali, gli spessori di questi fasci di corrente sarebbero uguali in ambedue i casi ed i due dispositivi avrebbero un potere risolvante verticale simile.

D'altra parte il Laterolog 3 ha dei lunghi elettrodi di potenza situati da ambo le parti dell'elettrodo centrale. La presenza di tali corpi metallici nel foro impedisce la registrazione simultanea di una buona curva del P.S. al livello della sonda e di altre curve di resistività che richiedono elettrodi piccoli. Ma il Laterolog 3 può essere facilmente combinato con il dispositivo del gamma ray per registrazioni simultanee dei corrispondenti loga.

INTERPRETAZIONE

5-3. Influenza dello spessore degli strati

A causa del suo sistema di focalizzazione, il Laterolog viene impiegato, a preferenza dei dispositivi convenzionali, per lo studio degli strati sottili. Per dimostrare ciò, verranno confrontate le curve registrate con il Laterolog e con un dispositivo convenzionale, per il caso di uno strato sottile, non invaso, di alta resistività R_1 , compreso fra potenti formazioni di bassa resistività R_2 . Lo spessore dello strato resistivo è leggermente maggiore della banda di corrente del Laterolog.

La figura 5-3 illustra un caso simile. Essa è divisa in due parti da una linea verticale a tratto e punto che coincide con l'asse del pozzo. Un elettrodo di potenza "A" si trova sull'asse all'altezza della metà dello strato. La distribuzione delle correnti che fluiscono dall'elettrodo A senza nessun sistema di focalizzazione (caso dei dispositivi normali) è rappresentata qualitativamente nella parte sinistra della figura. Nella parte destra, invece, viene mostrata la distribuzione delle correnti, corrispondente all'uso del sistema di focalizzazione del Laterolog.

La resistività apparente è proporzionale alla caduta di potenziale fra un elettrodo di misura M, vicino all'elettrodo di potenza A, e l'infinito; di conseguenza essa è proporzionale anche alla resistenza fra la superficie equipotenziale passante per M e l'infinito.

Nel caso dei dispositivi normali (parte sinistra della fig. 5-3) le linee di corrente divergono da A in tutte le direzioni e vengono attratte in alto ed in basso dalle formazioni adiacenti più conduttive.

La resistenza offerta dallo strato resistivo alla corrente viene quindi in gran parte cortocircuitata e la resistività apparente letta in corrispondenza dello strato è molto inferiore rispetto alla resistività vera. Con il Laterolog, invece (parte a destra della fig. 5-3),

tutte le linee di corrente fluiscono all'interno dei confini dello strato fino a grande distanza dal pozzo. Così la resistenza fra la superficie equipotenziale passante per M e l'infinito (e di conseguenza il potenziale in M) viene a dipendere direttamente dalla resistività dello strato. La resistività apparente registrata è così molto più vicina alla resistività vera dello strato.

Attualmente non sembra possibile un esatto calcolo delle resistività registrate con un dispositivo per il laterolog in corrispondenza di strati di spessore infinite e per determinare i valori corrispondenti sono stati usati modelli di laboratorio.

La figura 5-4 mostra un esempio tipo di curva registrata in laboratorio in corrispondenza di uno strato sottile non invaso, più resistive delle formazioni adiacenti ed interessato da un foro di sonda riempito con fango a bassa resistività.

In questa figura il diametro del foro, d , viene preso uguale ad 8", lo spessore dello strato "e" è uguale a 10 volte il diametro del foro, cioè 80". La spaziatura del dispositivo del laterolog è $O_1 O_2 = 4d$, cioè 32", con $A_1 A_2 = 2,5$ volte $O_1 O_2$, cioè 80". La resistività dello strato, R_t , viene presa uguale a 250 Ohm-m; la resistività del fango, R_m è 0,05 Ohm-m e la resistività delle formazioni adiacenti, R_s , è 5 Ohm-m.

Nella figura sono riportate per confronto anche una piccola normale, $AM = 23$ (16"), una grande normale, $AM = 84$ (64") ed un'inversa, $AO = 284$ (18° 8").

La figura 5-4 mostra chiaramente che il laterolog indica i confini dello strato più nettamente dei dispositivi convenzionali. Inoltre la resistività apparente letta sul laterolog in corrispondenza del piano centrale dello strato è uguale a 230 Ohm-m, contro i 250 Ohm-m effettivi, mentre i dispositivi convenzionali mostrano dei massimi rispettivamente di circa 10,20 e 22 Ohm-m.

5-4. Influenza della zona invasa

La resistività registrata dal dispositivo del Laterolog è proporzionale alla caduta di potenziale fra l'elettrodo di misura ed un elettrodo a distanza infinita. Nel caso di strati permeabili, la corrente, prima di raggiungere la zona incontaminata, deve attraversare la zona invasa. Quando l'invasione è profonda, come si verifica in genere nelle formazioni dure, l'influenza della zona invasa sulla resistività apparente può avere un'importanza non trascurabile. È necessario quindi correggere le letture tenendo conto dell'influenza dell'invasione per ottenere resistività vera.

Per il caso di strati spessi sono state calcolate delle curve di scarto che danno i valori della resistività vera in corrispondenza delle resistività apparenti lette sul Laterolog 7, per vari diametri d'invasione D_i e varie resistività della zona invasa, R_{zo} , (documento Schlumberger n° 6).

I risultati calcolati possono essere riassunti in poche e semplici formule che offrono una rapida correzione delle letture per l'influenza dell'invasione :

$$\text{Per } D_i = 20'' : R_t = 1,25 R_a - 0,25 R_{zo}$$

$$\text{Per } D_i = 40'' : R_t = 1,66 R_a - 0,76 R_{zo}$$

$$\text{Per } D_i = 80'' : R_t = 2,50 R_a - 1,50 R_{zo}$$

Calcoli approssimati, esperienze pratiche, dati forniti da reti resistive indicano che per tutte le applicazioni pratiche queste formule possono essere applicate anche per il Laterolog 3 in uso corrente.

Nelle formule precedenti, R_{zo} può essere ottenuto dal Microlog o dal Microlaterolog, oppure ricavato dal Neutron Log. I valori di D_i sono stati ricavati da esperienze locali (vedi capitolo 9 - paragrafo 9-24).

Dato che R_{xo} ed R_t sono rispettivamente proporzionali ad R_{af} ed R_w , l'influenza della zona invasa dipende direttamente dal valore del rapporto R_{mf}/R_w .

Quando R_{mf}/R_w è grande (fango dolce ed acqua di formazione ad alta salinità), R_{xo} per strati impregnati d'acqua è sensibilmente maggiore di R_t ed è circa uguale ad R_t nel caso di strati impregnati d'olio. Se l'invasione è profonda, la maggior parte della resistenza offerta al passaggio della corrente è situata nella zona invasa; il Laterolog può dare circa gli stessi valori in ciascun tipo di strato. Così può non essere possibile distinguere le zone ad acqua da quelle ad olio.

Quando R_{mf}/R_w è piccolo (fango dolce ed acque di formazione pure dolci, oppure fango salato ed acque salate), R_{xo} è quasi uguale ad R_t , nel caso di strati impregnati di acqua, ed è minore di R_t in casi di strati ad olio. Il contributo della zona invasa è relativamente meno importante in questo caso (R_{mf}/R_w piccolo) ed il Laterolog può prontamente distinguere le zone ad olio da quelle ad acqua.

Il Laterolog quindi è largamente impiegato in quelle regioni in cui vengono usati comunemente fanghi salati, ad esempio dove s'incontrano formazioni dure. Queste condizioni sono estremamente sfavorevoli per l'impiego del carotaggio convenzionale.

Questo non significa comunque che con il Laterolog si richiedano fanghi saturi di sale. Tali fanghi hanno delle caratteristiche indesiderabili, fra le quali la più importante è quella di ridurre il PS ad una linea quasi retta e quindi priva di valore per localizzare gli strati permeabili. Tenendo conto di tutti i fattori, la resistività ottima del fango dovrebbe essere da 2 a 4 volte quella dell'acqua di formazione. Infatti, questa regola vale per tutti i Logs elettrici, eccetto quello induttivo.

Pensiamo valga la pena ricordare ancora (come nel capitolo 5-2) che

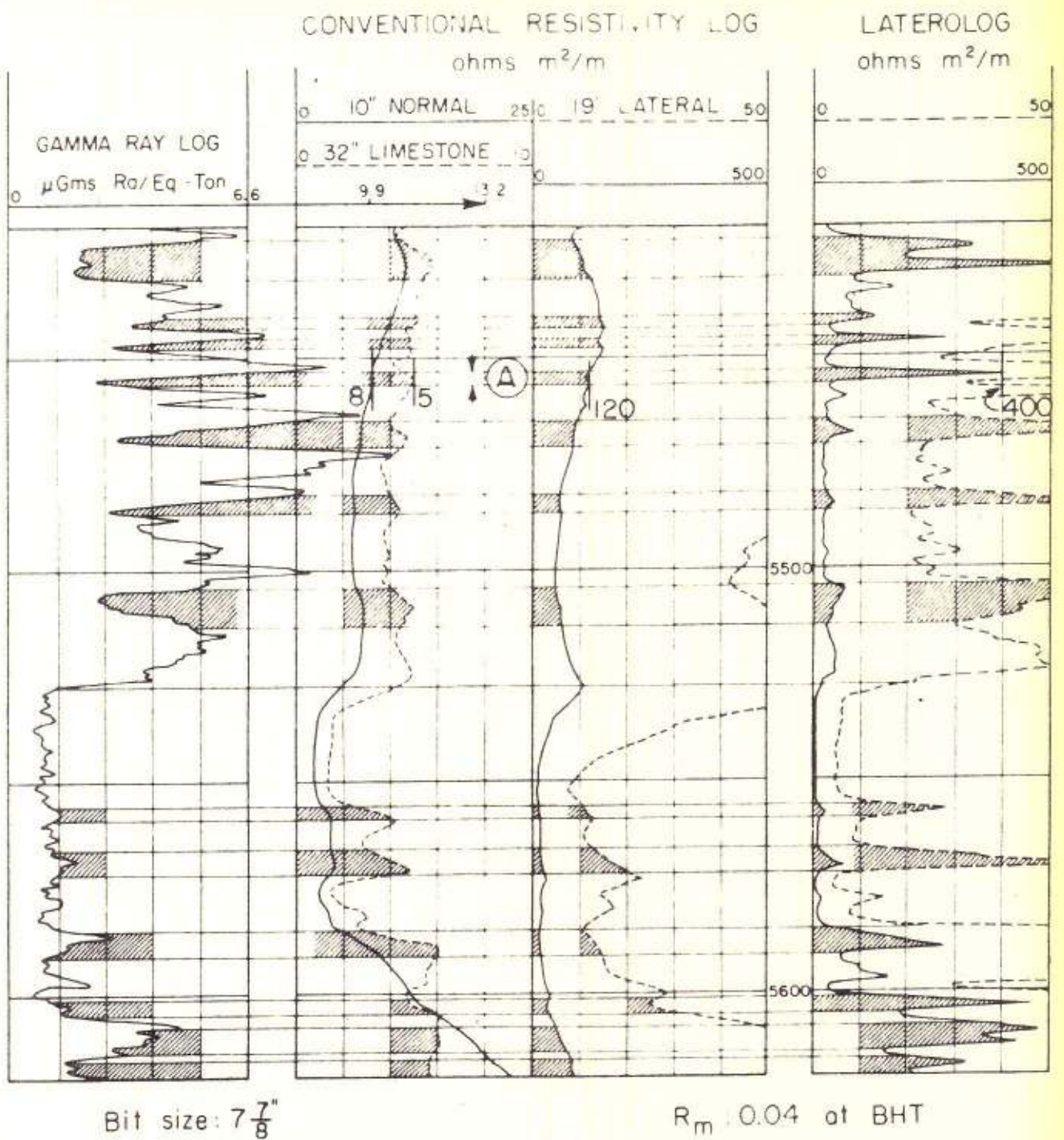


FIG. 5-5 COMPARAZIONE TRA UN CAROTTAGGIO CONVENZIONALE E GAMMA RAY LOG IN FORMAZIONI CALCAREE (FANGO SALATO).

La stessa colonna del fango ha pochissima influenza sulle misure fatte con il Laterolog, eccetto nei casi di profondi scavernamenti che però sono rari nelle formazioni dure in cui il Laterolog viene per lo più usato.

5-5. Esempi pratici

La figura 5-5 mostra un Laterolog registrato in una formazione calcarea perforata con fango saturo di sale (Texas occidentale).

La figura riporta anche, per confronto, le curve di resistività registrate con i sistemi convenzionali ed il Gamma Ray Log.

Una caratteristica che appare subito evidente nella figura è la considerevole differenza di ampiezza delle resistività registrate con i vari dispositivi.

Le resistività registrate con la piccola normale e con la sonda per calcari sono molto basse, in genere minori di circa 10 Ohm-m, perché il raggio d'azione di questi dispositivi è piccolo e l'effetto di bypass della colonna del fango è particolarmente sensibile. Di contro, si ottengono resistività dell'ordine dei 150 Ohm-m mediante dispositivo laterale (il cui raggio d'azione è molto grande) ed anche con il Laterolog.

Molti dettagli, chiaramente indicati dal Laterolog, non si riscontrano sulla curva della sonda per calcari nonostante il fatto che la scala di resistività sia in quest'ultima 5 volte più sensibile di quella usata per il Laterolog.

Si osservano, sia su ambedue le curve laterali che sul Laterolog, netti contrasti di resistività e la forma delle due curve è sensibilmente differente. Il confronto fra le due curve dimostra chiaramente

quanto la prima sia alterata per l'effetto della colonna del fango. In particolare, le curve laterali non sono adatte per mettere in evidenza straterelli altamente resistivi, come ad esempio A, in corrispondenza del quale invece si riscontrano netti peaks sul Laterolog.

CONCLUSIONI

5-6. Il laterolog è molto indicato per eseguire carotaggi in formazioni dure, dove esso è essenziale per la delimitazione degli strati, per correlazioni e per calcoli delle riserve.

Il Laterolog dà i migliori risultati quando il rapporto R_{mf}/R_w è piccolo (minore di 4).

- a) Il Laterolog si dimostra quindi eccellente nelle regioni in cui i pozzi sono perforati con fango molto salato. In tali regioni i Log convenzionali di resistività sono stati sostituiti dalle tecniche di operazioni in fanghi salati che consistono in Gamma Ray Log, Laterolog, Microlaterolog e/o Neutron Log (vedi capitolo 9 - par. 9-19). Il Log Sonic (Cap. 8), da poco in uso, promette di essere una importante aggiunta a queste tecniche per le determinazioni di porosità.
- b) Il Laterolog è particolarmente consigliabile in caso di formazioni contenenti acque relativamente dolci perforate con fango pure abbastanza dolce. In tali regioni, inoltre, esso fornisce la migliore approssimazione per il valore di R_t e per le interpretazioni quantitative, se effettuato unitamente al Log induttivo ed al Microlog. Nei casi in cui il rapporto R_{mf}/R_w è relativamente grande, il Laterolog viene utilmente usato in aggiunta ai Log convenzionali: Log induttivo e Microlog. In tali casi, comunque, per la determinazione della resistività vera deve essere tenuto in maggior conto il Log induttivo.

CAPITOLO SESTO

I MICRODISPOSITIVI

I microdispositivi, come è già stato detto nell'introduzione, paragrafo 03-8, vengono usati per misurare le resistività di piccoli volumi di formazioni immediatamente dietro la parete del foro. Essi appartengono a due tipi generali: quelli non focalizzati (Microlog) e quelli focalizzati (Microlaterolog). Dato che le loro caratteristiche differiscono sostanzialmente sotto diversi aspetti, in questo capitolo verranno discussi separatamente.

PARTE I* - IL MICROLOG

6-1. È stato visto nel capitolo 2 (par. 2-12, 2-13) che, quando le formazioni hanno una resistività molto maggiore di quella del fango (come succede ad esempio nei campi a calcari), il Log del PS rivela in genere la presenza di strati permeabili ma non ci definisce con cura i loro confini, specie se questi strati sono abbastanza piccoli.

Il Microlog è stato sviluppato, agli inizi, per determinare gli strati permeabili in quelle regioni in cui il Log del PS da solo non dava una risposta soddisfacente, cioè dove si aveva prevalenza di formazioni dure e ben consolidate. Ora esso costituisce un componente indispensabile delle tecniche standard di carteggio elettrico in quelle regioni.

Il Microlog inoltre è molto utile nelle formazioni moderatamente consolidate, come ad esempio in serie argille-sabbiose per una dettagliata rappresentazione degli strati e per un'accurata determinazione quantitativa delle sabbie.

Nelle formazioni tenere e debolmente consolidate, il Microlog è uno dei dispositivi che può essere usato per determinare il fattore di formazione.

NOZIONI GENERALI

6-2. Un Microlog è un Log di resistività registrato mediante elettrodi montati a breve distanza l'uno dall'altro su di un cuscinetto isolante che viene mantenuto aderente alla parete del pozzo. In queste condizioni, il sistema misura la resistività media del piccolo volume di materiale che si trova direttamente di fronte al cuscinetto e che quindi è elettricamente protetto dall'azione di by-pass del fango.

Il dispositivo per il Microlog (Fig. 6-1a) è costituito essenzialmente da un cuscinetto di gomma che viene pressato contro la parete del pozzo e che porta inseriti sulla superficie esterna degli elettrodi a forma di bettoni. Gli elettrodi sono in genere al livello della superficie di gomma o leggermente arretrati.

Il cuscinetto è montato su un braccio di una guida a molla, il cui scopo è quello di far sì che la pressione applicata al cuscinetto sia praticamente indipendente dal diametro del foro, purché questo rimanga entro certi limiti. Per le guide a molla ora in uso questi limiti sono rispettivamente $4\frac{1}{2}$ " e 16". Il cuscinetto di gomma aderisce alla parete del foro per un'area abbastanza grande attorno agli elettrodi; questo, a causa della sua forma e della pressione esercitata su di essa.

In questo dispositivo, a metà del cuscinetto, sono situati 3 elettrodi lungo una linea verticale, distanziati fra di loro di 1". Vengono fatte due misure di resistività inviando una corrente di intensità nota attraverso l'elettrodo A e registrando la differenza di potenziale provocata da questa corrente, sia fra gli elettrodi M_1 ed M_2 , sia fra l'elettrodo M_2 ed un elettrodo di riferimento alla superficie. Queste combinazioni (AM_1M_2) ed (AM_2 -superficie) sono chiamate in genere rispettivamente "microinversa" e "micronormale".

Il volume del materiale interessato dalla misura è minore per la microinversa che per la micronormale; cioè la microinversa ha un "raggio di investigazione" minore.

La maggior parte delle sonde comprende anche un secondo cuscinetto identico e diametralmente opposto al primo. La distanza fra le facce esterne dei due cuscinetti viene di centimo registrata unitamente al Microlog, fornendo in tal modo il cosiddetto "Microcaliper Log" che dà una registrazione dettagliata del diametro del foro. Il Microcaliper Log è molto accurato e può registrare variazioni del diametro del foro fino ad $1/8''$.

Durante la discesa nel pozzo le due braccia del Microlog vengono tenute chiuse per facilitare la discesa. In genere si usa effettuare una misura di resistività durante la discesa. In queste condizioni gli elettrodi sono in genere ad una certa distanza dalle pareti del foro ed i valori misurati vengono fortemente influenzati dalla colonna del fango e, quando la distanza è sufficientemente grande, come nei casi di scavamento, essi vengono esclusivamente influenzate dalla colonna del fango. Questo Log integrativo rende possibile la determinazione della resistività del fango alle condizioni di fondo pozzo. Dopo che la sonda ha raggiunto il fondo, le molle vengono liberate mediante un appropriato meccanismo, per cui i cuscinetti aderiscono alle pareti del foro e le misure del Microlog vengono effettuate, come al solito, durante la risalita.

L'apparecchio più recente è la microsonda potenziata, in cui i cuscinetti sono montati su articolazioni a parallelogramma, tenute contro le pareti del foro da molle a spirale e richiamate contro il corpo della sonda mediante un motore elettrico. Questo strumento è mostrato in figura 6-1b.

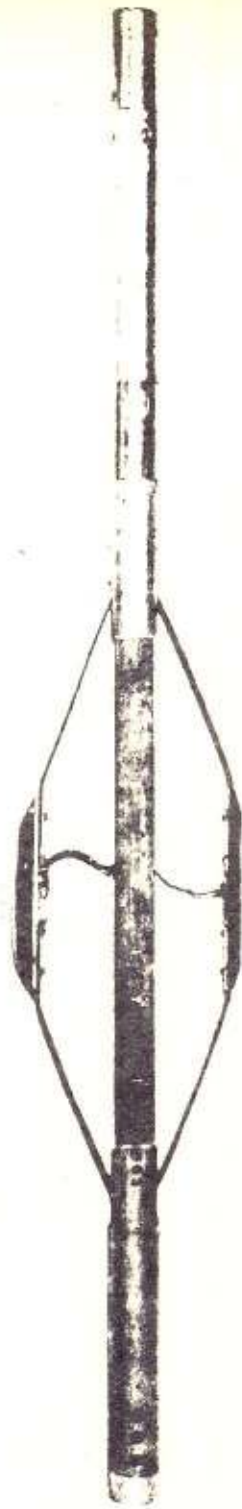


FIG. 6-1a

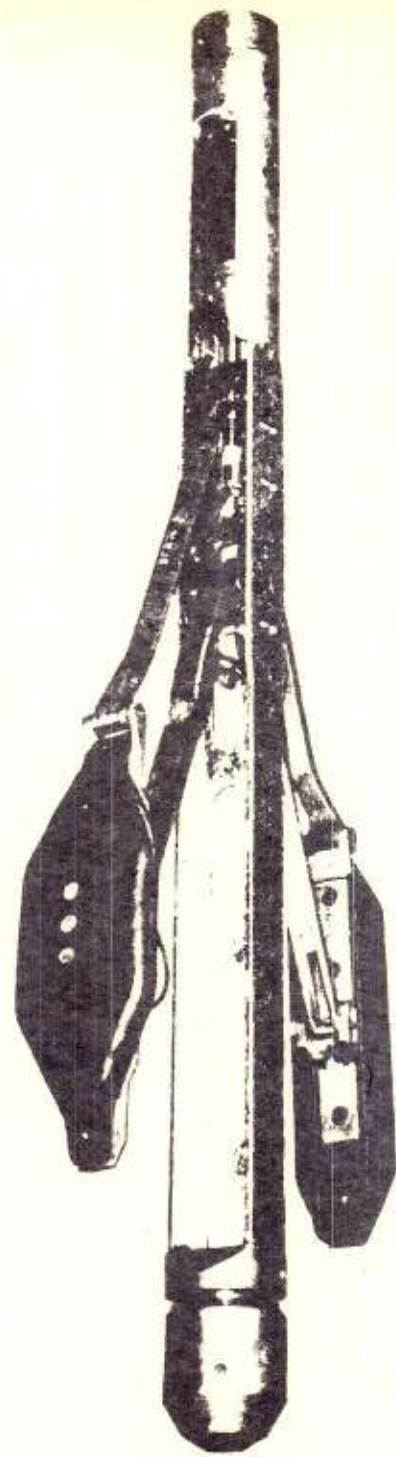


FIG. 6-1b

FIG. 6-1a SONDA PER IL MICROLOG CON GLI ELETTRODI

FIG. 6-1b MICROSONDA CHE HA SOSTITUITO IL DISPOSITIVO DI FIG. 6-1a

IDENTIFICAZIONE DELLE DIVERSE FORMAZIONI

6-3. Strati porosi e permeabili

- a) Quando il cuscinetto si trova in corrispondenza di uno strato poroso e permeabile, il pannello rappresenta una parte non trascurabile del volume interessato dalla misura. La resistività del pannello è in genere uguale ad una o due volte la resistività del fango. Il rimanente volume fa parte della formazione e, secondo le esperienze di laboratorio, si estende fino ad una distanza di circa 3" dalla parete del foro. Nella maggior parte dei casi i fluidi che erano originariamente presenti in questa parte della formazione sono stati spiazzati quasi completamente dal filtrato del fango, eccetto nei casi in cui l'invasione è molto debole. Così la resistività della zona spiazzata si ricollega direttamente a quella del filtrato del fango. La resistività misurata in corrispondenza di uno strato poroso e permeabile è quindi una media ponderata delle resistività del pannello e della zona spiazzata, che non supera di molto la resistività del fango a meno che il pannello non sia molto sottile ed allo stesso tempo il fattore di formazione dello strato sia molto grande. I massimi valori di resistività misurati in corrispondenza di strati porosi e permeabili raggiungono 15 o 20 volte la resistività del fango, seppure tali valori si riscontrino raramente in pratica.
- b) A causa del suo piccolo raggio d'azione, la microinversa viene influenzata dal pannello più della micronormale. I valori letti con le due diverse disposizioni di elettrodi sono quindi generalmente diversi. La differenza fra le due letture viene chiamata "separazione". Se, come avviene nella maggior parte dei casi, la resistività della zona spiazzata è maggiore di quella del pannello, la micronormale dà

una resistività apparente maggiore della microinversa e si dice che la separazione è "positiva". Di conseguenza i criteri per l'interpretazione degli strati porosi e permeabili sono per lo più i seguenti :

- Valori di resistività relativamente bassi, non superiori a 20 volte la resistività del fango.
- Separazione positiva fra la microinversa e la micronormale.

- c) Questa regola della "separazione positiva" non è valida quando il pannello è molto sottile, cosa che si verifica di regola con i fanghi ad alta salinità. In questo caso la separazione è praticamente trascurabile. Un'altra eccezione si verifica quando l'invasione è molto debole e la formazione è impregnata di acqua salata. La profondità dell'invasione può essere così piccola che il volume di materiale interessato dalle misure di resistività comprende una parte della formazione oltre la zona spazzata. In queste condizioni il pannello è più resistivo delle formazioni immediatamente retrostanti ed i valori registrati dalla micronormale sono inferiori di quelli della microinversa; in altre parole, la separazione è negativa. Si verifica in genere una debole invasione quando si usa del fango con bassi valori di acqua libera e quando la porosità e la permeabilità delle formazioni non sono troppo basse. Una debole invasione di ha inoltre, qualunque sia il tipo di fango usato, quando la permeabilità verticale e la porosità sono molto alte, come si verifica in pratica in molte località della Costa del Golfo (cap. 1 - par. 1-12).
- d) Si può aggiungere che l'effetto del pannello tende a livellare le letture di resistività in modo che le curve non mostrino mai brusche variazioni in corrispondenza di uno strato permeabile anche se il fattore di formazione cambia sensibilmente all'interno dello strato.
- e) I criteri suddetti si applicano non solo alle formazioni che hanno

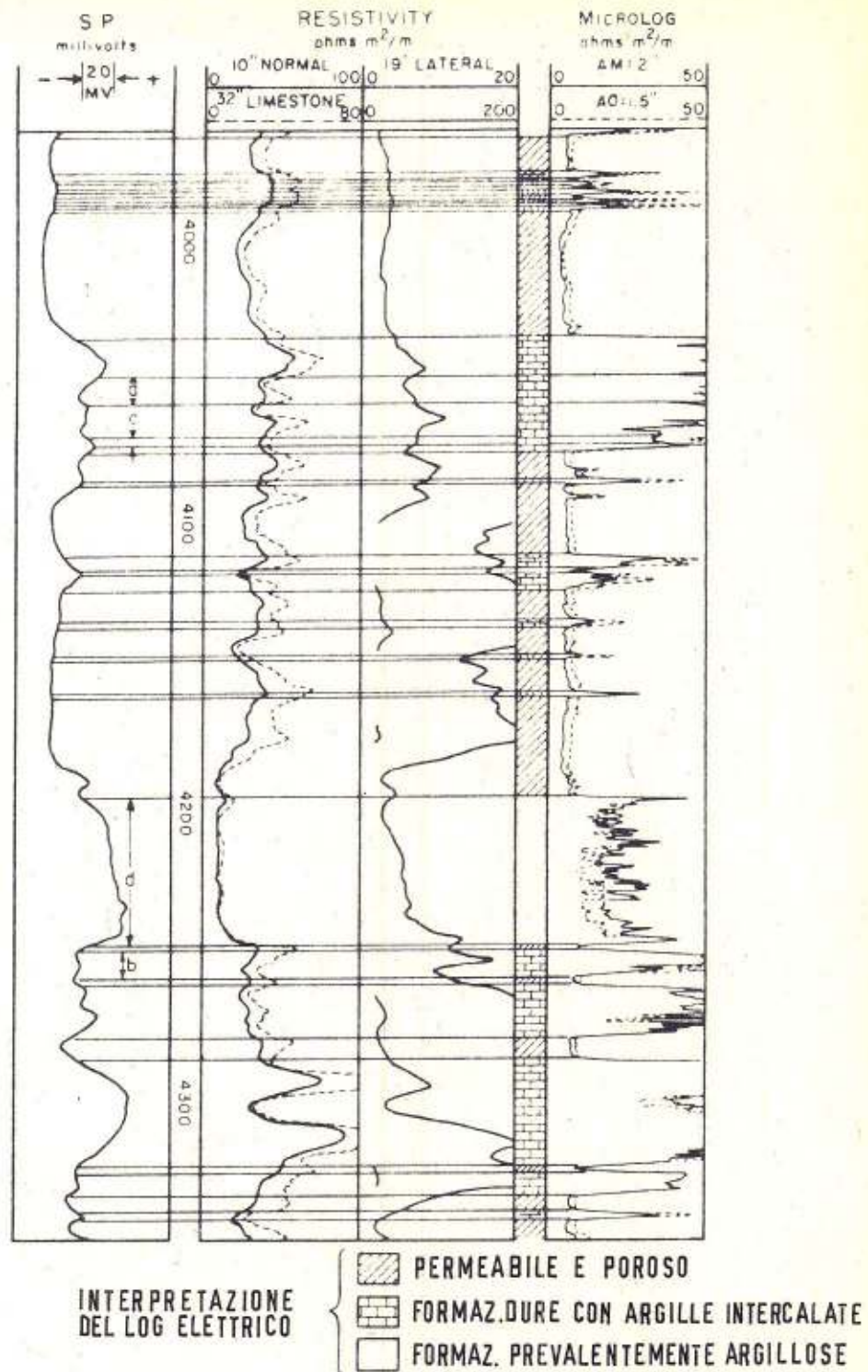


FIG. 6-2. ESEMPIO DI MICROLOG IN UNA FORMAZIONE CALCAREA — TEXAS OCCIDENTALE

porosità granulare, ma anche a quelli con porosità secondaria consistente in una sottile rete di vuoti e fessure.

- f) Quanto sopra è stato detto mostra che il Microlog può individuare gli strati permeabili anche se la permeabilità è molto bassa, purché questa sia sufficiente per permettere la formazione del pannello (cioè fino ad una frazione di md). Uno strato può essere indicato come permeabile dal Microlog anche quando la sua permeabilità è troppo bassa perché esso risulti commercialmente produttivo ed anche quando essa non permette alcun genere di produzione.

6-4. Zone compatte

In questo caso il sistema di elettrodi è separato dalla formazione solo da una sottile pellicola di fango avente in media uno spessore di circa $1/16''$ o anche meno. Di conseguenza i valori registrati dal Microlog sono molto alti, almeno uguali a 20 volte la resistività del fango. Lo spessore della pellicola del fango non è costante perché la parete del pozzo non è perfettamente liscia. La possibilità della corrente di fluire attraverso la colonna del fango può essere maggiore o minore a seconda della regolarità delle pareti del pozzo. Ne risulta che le curve presentano frequentemente bruschi peaks e depressioni e la separazione può essere positiva o negativa.

6-5. Argille

Quando non ci sono scavarnamenti, nelle argille il cuscinetto è ancora separato dalla formazione mediante una sottile pellicola di fango. La lettura è uguale, e più spesso minore, della resistività delle argille. La separazione può essere negativa, zero, o debolmen-

te positiva. Questo comportamento del Microlog in corrispondenza di argille non è stato completamente spiegato, sebbene le esperienze abbiano mostrato che la separazione negativa è dovuta in parte alla anisotropia delle argille.

In pratica, quando un'argilla mostra separazione positiva, può essere confusa con uno strato permeabile. È quindi necessario usare altre curve per eliminare questa incertezza. In molti casi sono sufficienti la curva del PS e/o la curva del Gamma Ray. Molto spesso, comunque, specie nel caso di formazioni dure, queste curve, in corrispondenza di strati molto sottili, non danno indicazioni abbastanza chiare. Il Microcaliper è in genere molto utile in quanto una diminuzione del diametro del foro corrisponde generalmente alla presenza di un pannello abbastanza spesso e quindi di uno strato permeabile.

6-6. Foro con scavernamenti

È facile incontrare tratti di foro con scavernamenti negli strati di argilla. Questo però può verificarsi anche in altri tipi di formazioni, comprese le rocce dure. Nel caso di pozzi scavernati il cuscinetto in genere non aderisce alle pareti. Per scavernamenti profondi le due letture sono uguali alla resistività del fango. Il fatto che le curve del Microlog registrino una resistività uguale o molto vicina a quella del fango, è in genere un'indicazione abbastanza probante della presenza di scavernamenti. In molti casi, comunque, l'interpretazione è tutt'altro che facile: se lo scavernamento non è troppo profondo, le letture possono venire influenzate anche dalle formazioni e, dato che il fango in genere è meno resistivo delle formazioni, si osserva una separazione positiva. È quindi possibile anche in

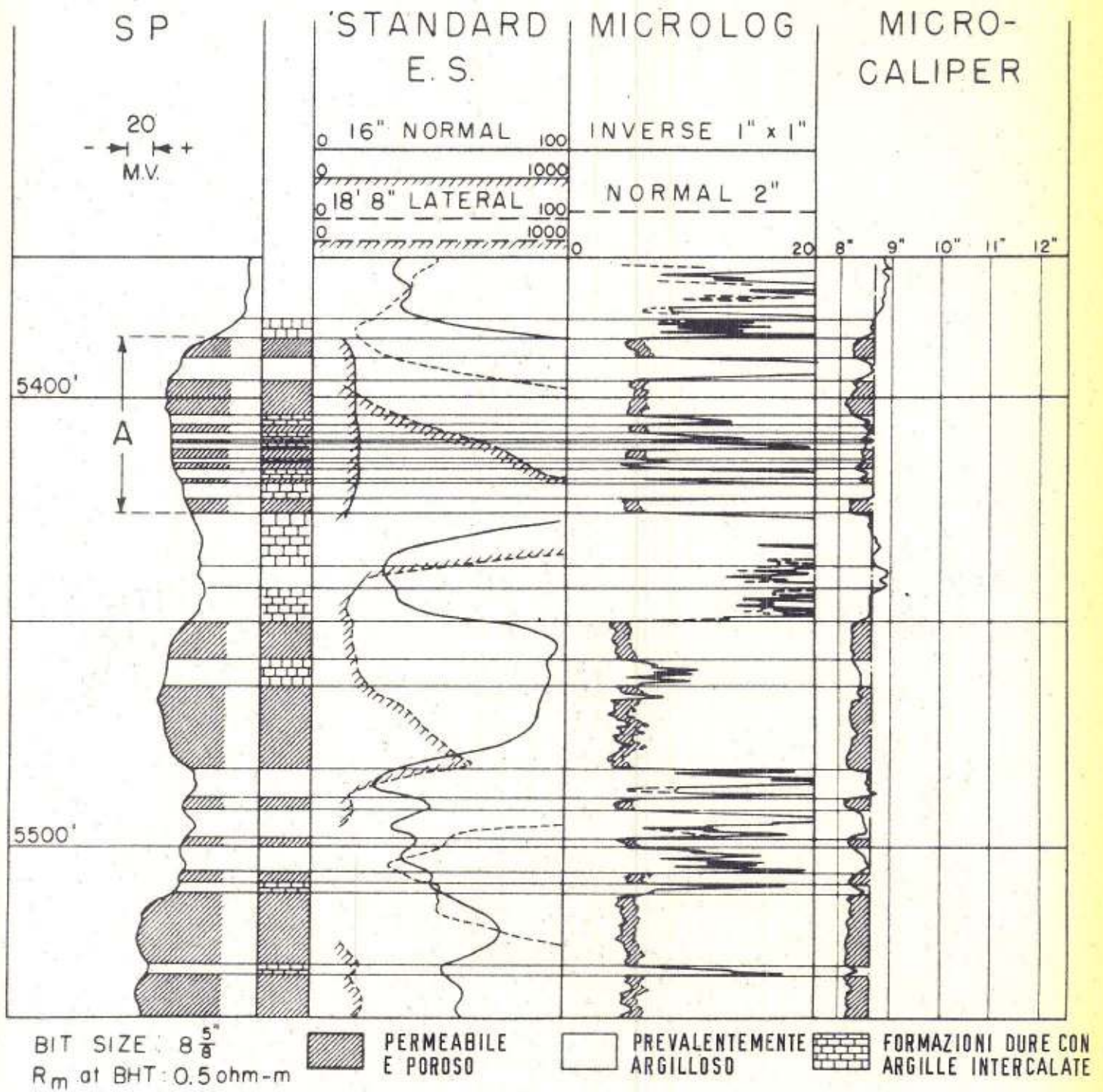


FIG. 6-3 ESEMPIO DI MICROLOG E MICROCALIPER IN FORMAZIONI CALCAREE

questo caso far confusione con gli strati permeabili. Come nel caso precedente si può eliminare questa incertezza con l'aiuto della curva del PS e/o con quella del Gamma Ray, oppure, meglio ancora con l'aiuto del Microcaliper.

6-7. Esempi pratici

a) Formazioni dure - La figura 6-2 mostra un tratto che comprende per lo più calcari e dolomiti del Permiano (Texas occidentale). Le diverse zone permeabili sono indicate chiaramente sul Microlog da resistività basse con separazione positiva. E' ovvio che i numerosi peaks corrispondono a sezioni compatte. Si vedono inoltre alcuni strati di argilla caratterizzati da basse resistività, assenza di separazione e spostamenti della curva del PS verso il lato positivo.

Alcune forti anomalie della curva del PS, che potrebbero essere attribuite a formazioni permeabili, corrispondono, in effetti, a strati indicati dal Microlog come compatti (vedi per esempio la sezione a). La porosità di questi strati, sebbene indicata dal Microlog come molto bassa, è comunque abbastanza grande da permettere la circolazione delle correnti del PS.

D'altra parte si notano deflessioni della curva del PS verso il lato positivo, in corrispondenza di strati indicati come compatti dal Microlog. In effetti è probabile che dei sottilissimi strati di argilla siano intercalati a formazioni dure e che diano origine a questi spostamenti positivi della curva del PS. Questo è chiaramente evidente nei tratti come "c" e "d", in cui il Microlog presenta una serie di ondulazioni molto acute che indicano chiaramente una stratificazione di argille e calcari. Del materiale argilloso, inoltre, può essere mischiato con il calcare, cosa che si

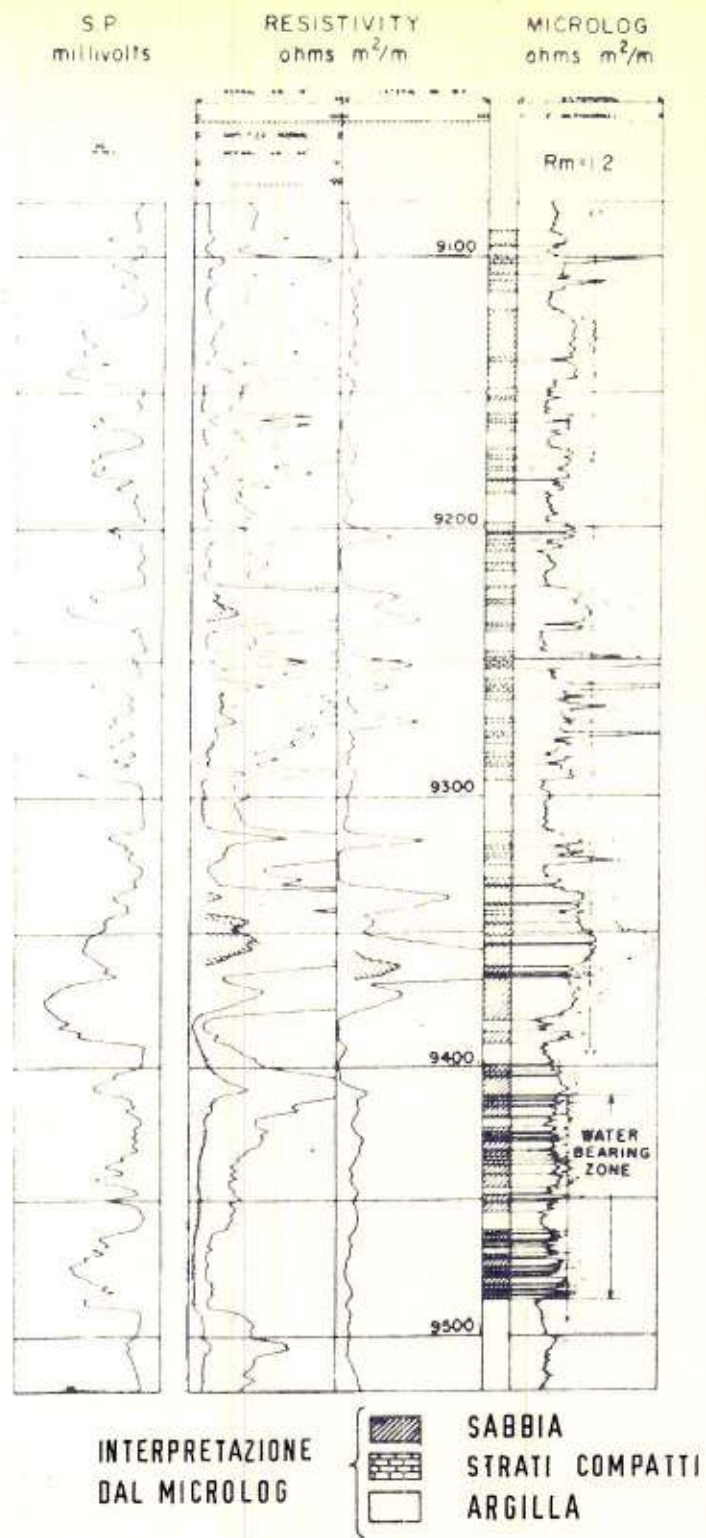


FIG. 6-4 MICROLOG IN FORMAZIONI TENERE — GULF COAST.

traduce in uno spostamento del PS verso il lato positivo.

La figura 6-3 mostra un altro esempio comprendente anche il Mi crocaliper Log. Un intervallo come "A", ad esempio, viene in genere interpretato come permeabile in accordo con la curva del PS. Il Microlog mostra infatti che esso è composto da straterelli settili permeabili ed impermeabili alternati. L'esatta definizione dei confini di ogni singolo strato rende possibile la determinazione dello spessore totale potenzialmente produttivo. Ogni sezione indicata come permeabile dal Microlog è confermata dal Microcaliper Log che mostra una diminuzione del diametro del foro corrispondente alla presenza del pannello.

b) Serie argillo-sabbiosa - La figura 6-4 mostra un esempio di un Log elettrico convenzionale e di un Microlog in formazioni argillo-sabbiose (Costa del Golfo). Vi sono illustrati tre tipi di formazioni con limiti ben definiti :

- Le argille sono indicate da bassi valori del Microlog con valori minimi di separazione fra le due curve (le laminazioni di argilla e sabbia sono inoltre caratterizzate da interruzioni nelle microcurve).
- Le sabbie inconsolidate sono indicate da letture alquanto più alte delle argille, in genere con separazione positiva fra le curve.
- Straterelli consolidati corrispondono ad alti valori del Microlog. Tali strati hanno una permeabilità molto bassa e devono essere eliminati nella valutazione del pay.

E' da notare la differenza in ampiezza delle resistività registrate con la Micronormale da 2" in corrispondenza di strati ad olio e ad acqua salata. In questo pozzo il livello dell'acqua è stato trovato a circa 9400'. Al di sopra di questa profondità la lettura media della micronormale da 2" in corrispondenza di strati sabbiosi è 2,7 Ohm-m. Al di sotto la media delle letture è di solo 2 Ohm-m. L'esperienza mo

stra che questo si verifica assai di frequente. Quando le caratteristiche fisiche e la salinità delle acque sono approssimativamente costanti, si possono osservare delle differenze sul Microlog di una data serie sabbiosa in dipendenza del suo contenuto in acqua e in olio. La differenza è dovuta al fatto che l'olio non viene completamente spiazzato dal filtrato del fango, cosa che si traduce in valori di resistività relativamente alti nella zona spiazzata. Nell'esempio in questione questa differenza può essere anche causata da una minima profondità di invasione in modo che le letture vengano influenzate dalla parte non invasa della formazione.

Casi di invasione molto deboli si osservano frequentemente in sabbie inconsolidate. La figura 6-5 mostra il comportamento dei Log_s, in particolare del Microlog, in un'alternanza di argille con sabbie aventi alta porosità e permeabilità. Le sabbie in questo esempio sono impregnate di acqua salata. Il fango di perforazione è sensibilmente più dolce dell'acqua di formazione.

La parte A, per esempio, può essere divisa in due parti, a e b, secondo le curve di resistività ed il Microlog. Nella sottosezione b sia la grande che la piccola normale indicano un'invasione più profonda.

Questo è confermato dai valori maggiori che si osservano nel Microlog e dalla separazione positiva.

Simili considerazioni possono farsi per le altre zone permeabili. Nella sezione B ci troviamo in condizioni leggermente diverse (comunque la curva della piccola normale rimane più alta di quella della grande normale): in essa, infatti, si vede che l'invasione non è così debole come nel caso dello strato A, ad esempio nella parte alta. Di conseguenza, la separazione fra le curve del Microlog invece di essere negativa è leggermente positiva.

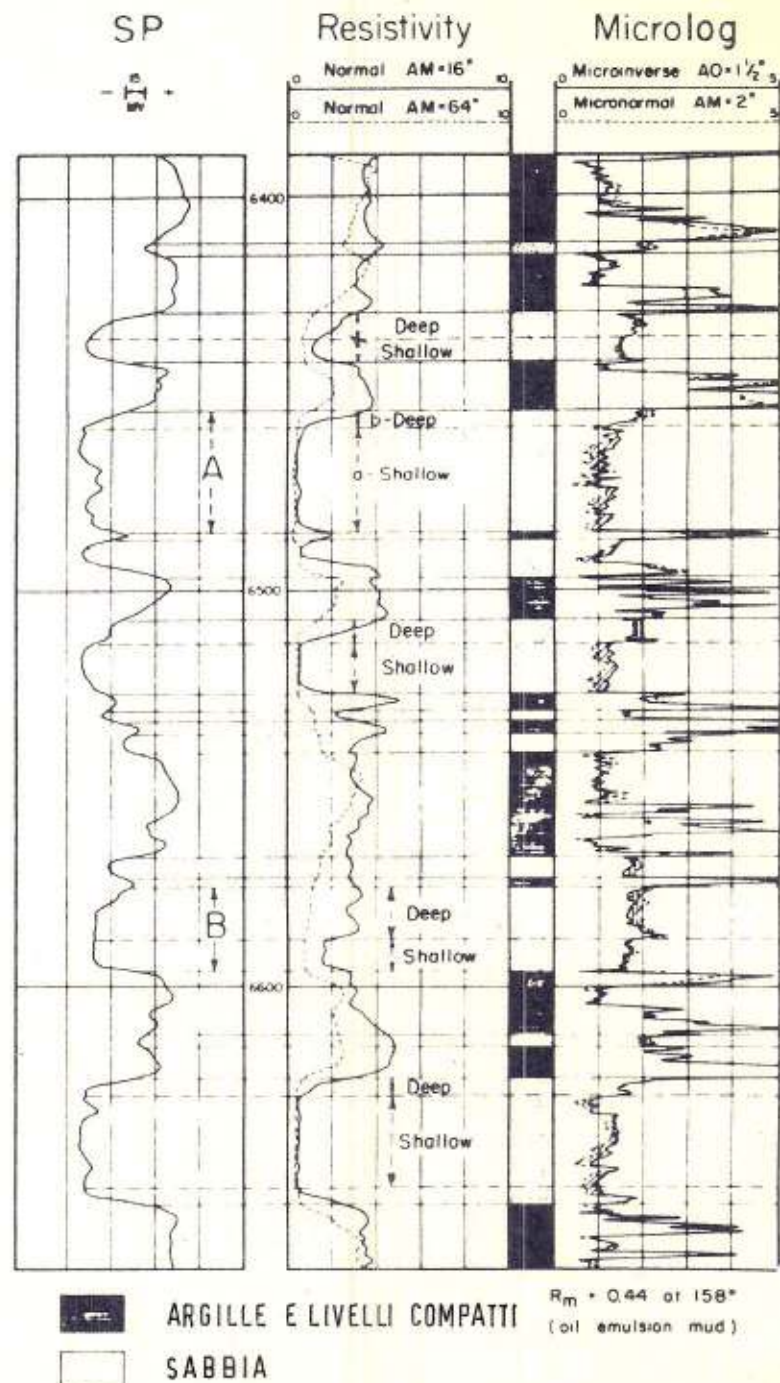


FIG. 6-5 MICROLOG IN SERIE ARGILLO-SABBIOSA. LE SABBIE AD ACQUA SALATA PRESENTANO PICCOLA INVASIONE

DETERMINAZIONE DI R_{xo} DAL MICROLOG

6-8. Mediante misure eseguite in laboratorio sono state preparate delle tabelle che permettono la determinazione della resistività della zona spazzata R_{xo} dalla resistività apparente registrata dalla microinversa e dalla micronormale, quando siano note le resistività del filtrato del fango (R_{mf}) e del pannello (R_{mc}). Questi due parametri possono essere misurati direttamente da un campione del fango o, meno accuratamente, trovati mediante l'aiuto delle curve di "valore medio" per particolari valori della resistività del fango (Carta A-4).

I Micrologs effettuati con l'equipaggiamento attuale (cuscinetti idraulici) vengono interpretati mediante la Carta C-4. Questa carta dà i valori di R_{xo}/R_{mc} e lo spessore del pannello, ma per ogni serie di valori di R_1 , " x_1 ", R_{mc} e di R_2 , " x_2 ", R_{mc} (in cui R_1 , " x_1 " e R_2 , " x_2 " sono le letture rispettivamente della microinversa e della micronormale). Moltiplicando R_{xo}/R_{mc} per R_{mc}/R_{mf} si ha R_{xo}/R_{mf} , da cui si può ottenere il fattore di formazione F e quindi la porosità ϕ per formazioni pulite (non argillose), purché la saturazione in olio sia nota o, comunque, venga ricavata (Carta C-12). Un esempio di interpretazione di Microlog si può trovare nel Cap. 9, par. 9-7.

Un esame della carta C-4 mostra che il potere risolvante del Microlog decresce rapidamente per valori grandi di R_{xo}/R_{mc} (corrispondenti a formazioni dure aventi porosità bassa). In altre parole, il Microlog è indicato per la determinazione di R_{xo} solo in formazioni aventi alta e media porosità. Il limite inferiore di porosità è circa il 15%. Nelle formazioni dure si ottengono migliori risultati con il Microlaterolog (vedi seconda parte di questo capitolo).

Il Nomogramma C-10 è equivalente alla Carta C-4 e può essere usato in sua vece per determinare R_{xo} .

E' disponibile anche un altro Nomogramma (Carta C-8) per il calcolo di R_{zo} dai Micrologs effettuati con i cuscinetti tipo "D", ora quasi ovunque sostituiti dai cuscinetti idraulici.

Il Nomogramma C-6 dà i valori di t_{mc} per Micrologs effettuati sia con cuscinetti tipo "D" che con quelli idraulici.

Infine i Micrologs effettuati con i cuscinetti tipo "D" possono essere interpretati mediante le carte del Documento Schlumberger n° 5.

I valori che compaiono in queste carte sono $R_1'' x_1''$ ed R_2'' invece di $R_1'' x_1''/R_{mc}$ ed R_2''/R_{mc} , cosicchè il documento contiene necessariamente un gran numero di carte per differenti valori di R_{mc} . D'altra parte il Nomogramma C-8 e quella parte del Nomogramma C-6 corrispondente ai cuscinetti di tipo "D", sono ricavati dalle stesse prove di laboratorio da cui sono derivate le carte del Documento 5 e sono quindi praticamente equivalenti.

CONCLUSIONI

6-9. A causa della piccolissima spaziatura degli elettrodi e per il fatto che questi sono schermati dall'effetto di by-pass del fango per mezzo del cuscinetto isolante, il Microlog è capace di individuare strati sottilissimi con diverse caratteristiche. Il suo potere risolvante è dell'ordine di pochi pollici. Esso presenta inoltre brusche deflessioni ai confini fra gli strati.

Con l'aiuto della curva del PS o della curva del Microcaliper, oppure del Gamma Ray Log, il Microlog distingue le formazioni porose e permeabili dagli strati compatti (rocce dure ed argille). Esso dà anche l'esatta ubicazione dei limiti delle riserve potenziali e rende possibile il calcolo dello spessore totale del pay potenziale.

Mediante l'uso di appropriate carte di interpretazione si può ottenere mediante il Microlog il valore della resistività R_{zo} della zona

spiazzata nelle formazioni di alta e media porosità.

Da questo valore si può ricavare il fattore di formazione per formazioni sostanzialmente pulite. Il Microlog è quindi molto importante per la determinazione della porosità e della saturazione nelle formazioni di questo tipo.

A parità delle altre condizioni, R_{xo} varia con la saturazione in acqua della formazione. Di conseguenza, nel caso di porosità relativamente alta e costante, quando le letture della micronormale non sono troppo diverse da R_{xo} , il Microlog può dare l'ubicazione dei contatti olio-acqua o gas-acqua.

PARTE II^o - IL MICROLATEROLOG

NOZIONI GENERALI

6-10. Nella parte I^o (paragrafo 6-8) è stato detto che il Microlog non fornisce una determinazione molto accurata di R_{xo} e di conseguenza del fattore di formazione e della porosità, quando la porosità della formazione in esame è minore di circa il 15%. Questa limitazione del Microlog è dovuta in primo luogo all'effetto di by-pass del pannello sulla corrente di misura.

Il Microlaterolog è un microdispositivo che comprende un sistema di focalizzazione per cui l'effetto del pannello sulle misure viene notevolmente ridotto e anche reso trascurabile se lo spessore del pannello è abbastanza piccolo. Per pannelli sottili il Microlaterolog permette la determinazione di R_{xo} in ogni tipo di formazione.

Il Microlaterolog fu introdotto per la prima volta nell'uso industriale nel 1952 ed ora fa parte della tecnica standard nella maggior parte delle zone a rocce dure dove vengono usati fanghi ad alta salinità e dove di conseguenza si hanno di regola pannelli molto sottili (*).

6-11. Il dispositivo del Microlaterolog, come è usato attualmente, comprende un elettrodo centrale, A_0 , di dimensioni molto piccole e tre elettrodi circolari ad anello, M_1 , M_2 ed A_1 , concentrici con A_0 e distanziati di piccoli intervalli compresi tra mezzo pollice ed un pollice (Fig. 6-6a). Questi elettrodi sono inseriti in un cuscinetto isolante che viene tenuto a contatto con la parete del foro mediante un sistema di molle.

(*) Sembra in effetti che i pannelli siano molto teneri e che vengano ridotti ad una pellicola molto sottile dalla pressione dei cuscinetti.

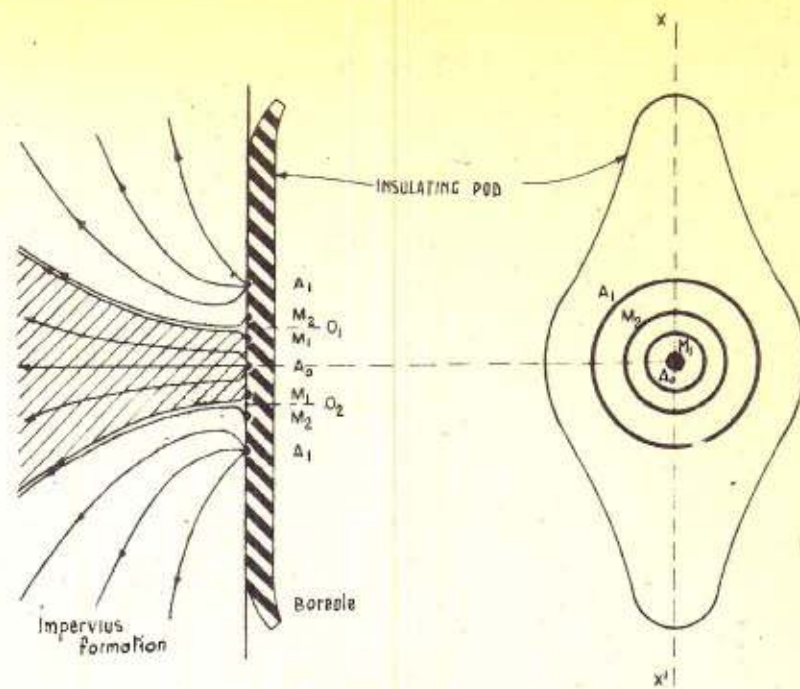


FIG. 6-6 PATTINO DEL LATEROLOG MOSTRANTE GLI ELETTRODI (A DESTRA) E SCHEMA DELLE LINEE DI CORRENTE (A SINISTRA).

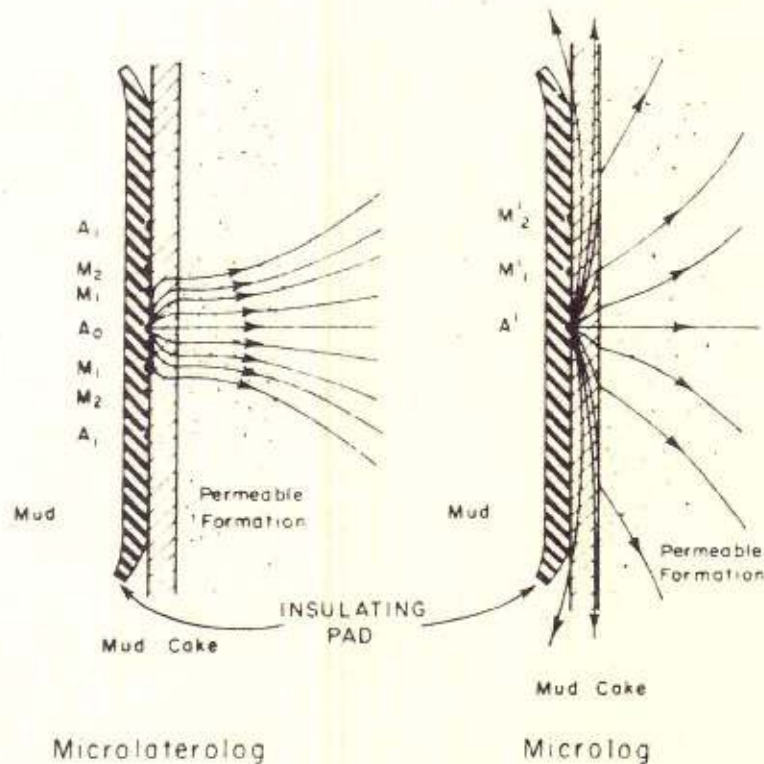


FIG. 6-7 COMPARAZIONE DELLA DISTRIBUZIONE DELLE LINEE DI CORRENTE PER IL MICROLATEROLOG E PER IL MICROLOG NEL CASO DI UNA FORMAZIONE POROSA E PERMEABILE PIU' RESISTIVA DEL PANNELLO (SCHEMA QUALITATIVO).

Una corrente di intensità nota e costante viene immessa attraverso l'elettrodo centrale A_0 ed un'altra corrente della stessa polarità viene inviata attraverso l'elettrodo esterno ad anello A_1 . L'intensità di questa ultima corrente viene di continue regolata automaticamente in modo che la d.d.p. fra gli anelli M_1 ed M_2 viene mantenuta praticamente uguale a zero. Viene registrato quindi il potenziale esistente in M_1 o in M_2 .

La resistività apparente misurata con il dispositivo è proporzionale al valore di questo potenziale e ad un fattore che dipende dalla configurazione geometrica del sistema. Questo fattore viene determinato sperimentalmente.

Con questo sistema, la corrente proveniente dall'elettrodo centrale A_0 non può divergere liberamente in tutte le direzioni a causa della corrente emessa dall'elettrodo A_1 , ma è costretta in un fascio che penetra nelle formazioni perpendicolarmente alla parete del foro. Questo fascio è limitato approssimativamente da una superficie di rivoluzione intorno ad un asse passante per l'elettrodo centrale A_0 e perpendicolare alla parete del foro. Il diametro del fascio, all'altezza della parete del foro, è uguale all'incirca alla media dei diametri degli anelli M_1 ed M_2 ; varia cioè da 1 a 2 pollici.

Il diametro del fascio aumenta, dapprima molto lentamente, poi sempre più rapidamente, con la distanza dalla parete del pozzo. Esperienze di laboratorio hanno dimostrato che la parte di formazione situata ad una distanza di oltre 3" dalla parete ha già poca influenza sulle misure.

Nel caso di una formazione porosa e permeabile fra il sistema di elettrodi e la formazione è interposto il pannello. Dato che la corrente si traversa il pannello in direzione perpendicolare alla parete, il percorso che essa compie attraverso il pannello è piccolo in confronto di quello attraverso la formazione. Inoltre la resistività del pannello è in genere minore della resistività della formazione. In conseguenza di questi due fattori, l'influenza del pannello sulle misure è piccola e agli sco

più pratici può ritenersi trascurabile se lo spessore del pannello non è troppo grande. Come si è detto in precedenza, nel Microlog il pannello fornisce un'ottima strada per il ritorno della corrente attraverso la colonna del fango e di conseguenza esso influenza le misure molto più che nel Microlaterolog, in particolare per formazioni aventi bassa porosità (vedi Fig. 6-7).

Dalla precedente discussione dovrebbe risultare chiaro che, nel caso di pannelli sottili, le misure di resistività ottenute con il Microlaterolog interessano principalmente la zona spazzata.

L'apparecchiatura usata ogni giorno (fig. 6-6b) registra una sola curva effettuata mediante un sistema di elettrodi indicato come tipo A (spaziatura fra gli elettrodi successivi $9/16''$). Prove di laboratorio ed esperienza di campagna hanno mostrato che questo apparecchio dà direttamente R_{xo} , cioè il fattore di formazione e la porosità, senza bisogno di correzioni, purché il pannello abbia spessore minore di $3/8''$. L'apparecchio comprende anche un Microcaliper, come la sonda del Microlog.

INTERPRETAZIONI ED APPLICAZIONI

6-12. Dato che il fascio della corrente ha un diametro molto piccolo (circa $2''$), il potere risolutivo del Microlog è molto grande. Le curve registrate possono dare una delimitazione molto accurata dei confini, anche per strati di spessore molto piccolo (fino a circa $2''$). Di conseguenza il Microlaterolog viene molto spesso registrato con due scale di profondità: quella regolata ($5''$ per $100''$) e quella ingrandita ($25''$ per $100''$). (*)

(*) Le scale comunemente usate dall'AGIP Mineraria nelle operazioni di carotaggio sono di 1:1000 e 1:200 (N.d.T.).

Formazioni compatte

Poichè queste formazioni presentano scavernamenti molto di rado, il cuscinetto vi si trova quasi sempre a contatto e si ottengono valori di resistività molto alti.

Argille

Se non vi sono scavernamenti, il cuscinetto è appoggiato direttamente alla formazione. A causa del sistema di focalizzazione, la presenza di una sottile pellicola di fango fra il cuscinetto e la parete del pozzo non ha influenza sulle misure che indicano perciò la resistività delle argille.

Come nel caso del Microlog, la presenza di scavernamenti può dare luogo a curve simili a quelle che si ottengono per gli strati porosi. In casi simili il PS, il Gamma Ray o il Microcaliper Log possono fornire una distinzione fra le argille e gli strati permeabili.

6-13. FORMAZIONI POROSE E PERMEABILI

- 1) Spessore del pannello minore di 3/8" - Le resistività misurate con il Microlaterolog danno direttamente i valori di R_{ro}, senza bisogno di ulteriori correzioni.

Pannelli molto sottili si osservano in genere nei pozzi perforati con fango molto salato; di conseguenza il Microlaterolog è uno dei componenti della cosiddetta "tecnica delle prospezioni in fanghi salati", che viene usata sempre più frequentemente in presenza di rocce dure, quando è comune l'impiego di fanghi ad alta salinità (Kansas, Michigan, Bacino di Williston). Gli altri componenti sono il Laterolog, il Gamma Ray Log e, spesso, la curva del PS ed il Neutron Log.

2) Spessore del pannello maggiore di $3/8''$ - L'influenza del pannello non è più trascurabile e le resistività registrate con l'apparecchio tipo A sono minori di R_{xo} . La Carta C-14 dà R_{xo} quando siano noti la resistività apparente (R_{MLL}), la resistività del pannello (R_{mc}) e lo spessore del pannello (t_{mc}).

Il valore di t_{mc} può ottenersi in molti casi dal Microcaliper Log, ma bisogna operare con molta cautela. La differenza fra il diametro teorico del foro, dato dalle dimensioni dello scalpello, ed il diametro effettivo del foro, è uguale al doppio dello spessore del pannello solo se la formazione considerata non presenta scavernamenti. Fori perforati in formazioni molto ben consolidate, come ad esempio calcari, danno in genere misure attendibili, ma le formazioni più tenere presentano spesso scavernamenti.

D'altra parte ricerche di laboratorio e prove nei campi tendono a perfezionare sempre più la scelta della spaziatura degli elettrodi, per cui l'influenza del pannello sulle letture del Microlaterolog può essere ulteriormente ridotta.

6-14. ESEMPIO PRATICO

La figura 6-8 mostra parte di una "prospezione in fango salato" fatta in un pozzo del Kansas (vedi par. 6-13). Il dettaglio minuto offerto dal Microlaterolog è molto evidente.

La sezione A corrisponde ad uno strato poroso e permeabile. Il Gamma Ray Log (cap. 7) mostra che esso è relativamente privo di argilla. Il Laterolog dà una lettura di 300 Ohm-m, che equivale per lo strato ad R_t . La lettura del Microlaterolog, uguale ad R_{xo} , è 10 Ohm-m.

La figura comprende inoltre i dati essenziali richiesti per la determinazione quantitativa della porosità e della saturazione, unitamente ad un'idea approssimata della produzione. Questo verrà discusso nel capitolo 9, par. 9-19.

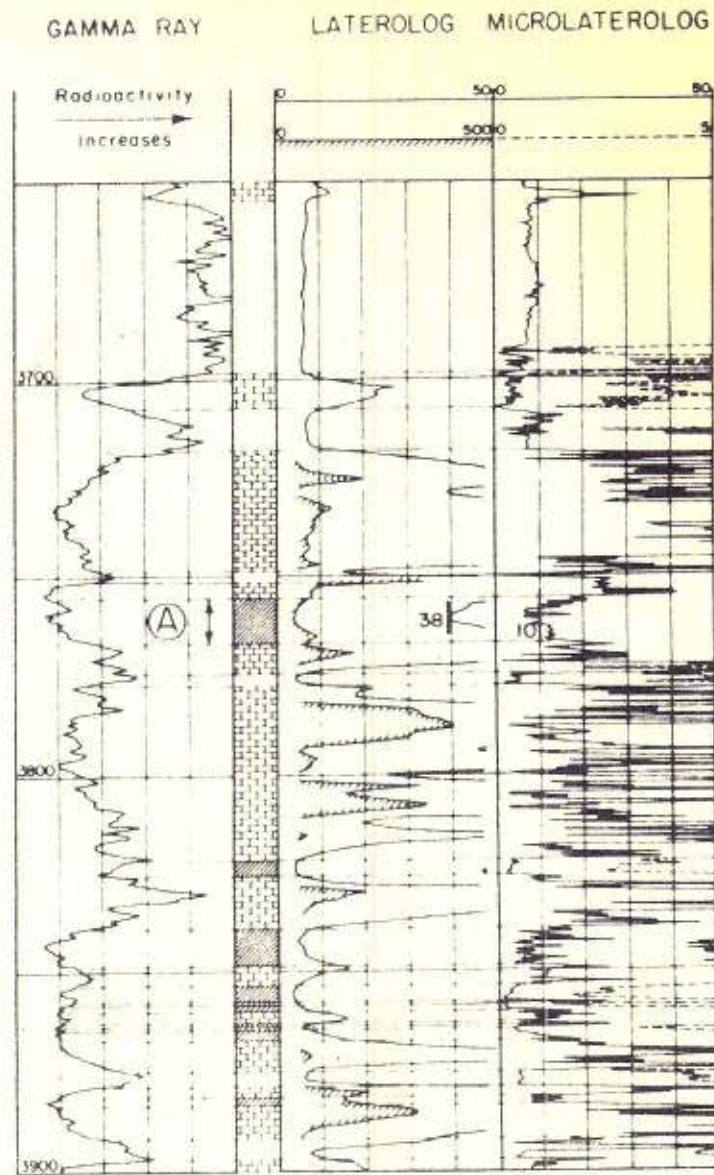


FIG. 6-8 GAMMA RAY-LATERALOG E MICROLATERALOG IN FORMAZIONI CALCAREE PERFORATE CON FANGO AD ALTA SALINITÀ.

CONCLUSIONE

6-15. Quando lo spessore del pannello è minore di $3/8''$ il Micro-Laterolog può essere usato per ricavare direttamente Rzo in ogni tipo di formazione.

In formazioni dure (porosità minore di circa il 15 %), perforate con fanghi salati, il Micro-Laterolog legge in genere direttamente Rzo. Se lo spessore del pannello supera i $3/8''$, bisogna tener conto del suo effetto e si può trovare Rzo per mezzo della Carta C-14.