

PROPRIETA' ELETTRICHE DELLE ROCCE LUNGO IL PROFILO CROP 03

RIASSUNTO

In questo lavoro si presenta una sintesi dei dati relativi alle proprietà elettriche di alcuni litotipi presenti nell'area oggetto di indagine da parte del CROP 03 e ottenuti studiando campioni prelevati in superficie ed in pozzo.

Le misure dei parametri elettrici sono state condotte inizialmente presso il laboratorio dell'Osservatorio Geofisico dell'Università di Siena e successivamente presso il Laboratorio di Geofisica Applicata della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Firenze. Durante le esperienze sono stati condizionati sia i segnali elettrici in frequenza ed ampiezza che la pressione idrostatica (*external pressure*) fino a 40 MPa, la pressione del fluido interno (*internal pressure*) fino a 36 MPa e la temperatura fino a 230°C.

Alcuni campioni di roccia anidri sono stati studiati presso il Laboratorio delle proprietà elettriche delle rocce dell'Accademia delle Scienze di Praga condizionando la temperatura fino a 1000°C.

I dati presentati sono stati organizzati secondo le tre principali tipologie comportamentali (rocce argillose, rocce isotrope, rocce anisotrope) evidenziate dalle esperienze, poiché si ritiene che i risultati ottenuti siano indipendenti dal sito e quindi legati prevalentemente alla struttura petrografica della litologia.

ABSTRACT

Selected data of hydrated rock sample electrical properties are described. The studied rock samples have been taken from surface and boreholes in the CROP 03 area.

The measurements have been carried out at first at Osservatorio Geofisico laboratory of Siena University and then at Laboratorio di Geofisica Applicata of Florence University. During the experiments the following parameters have been conditioned: frequency and amplitude of electric signals, hydrostatic pressure (up to 40 MPa), internal fluid pressure (up to 36 MPa), and temperature (up to 230°C).

Some dry rock samples have been studied under temperature up to 1000°C at the Rock Electrical laboratory of Czechoslovak Academy of Sciences in Prague.

The shown data are catalogued in three classes, according to their electrical behaviour (clay containing rocks, homogenous rocks, unhomogeneous rocks), because the experimental results showed that the rock structure is the most important parameter.

PAROLE CHIAVE: Geofisica applicata, Proprietà elettriche, Isotropia, Anisotropia.

KEY-WORDS: Applied geophysics, Electrical properties, Isotropy, Anisotropy.

(*) Dipartimento di Ingegneria Civile - Università di Firenze

1. PREMESSA

Prima di presentare i dati relativi alle proprietà elettriche di alcuni litotipi presenti nell'area oggetto di indagine da parte del CROP 03, sembra opportuno ricordare alcune delle maggiori problematiche relative alle interpretazioni dei dati di campagna ottenuti mediante i diversi metodi elettromagnetici.

1) Significato di elettrostratigrafia.

E' noto che un metodo largamente diffuso per l'indagine della litosfera è quello di studiare la distribuzione delle litologie secondo la verticale e recentemente anche secondo 2 e 3 dimensioni, basandosi sui valori dei parametri elettrici.

Il parametro elettrico più utilizzato è la resistività ρ (Ohm.m), che può essere ottenuto mediante "prospezioni" sul terreno, utilizzando diverse metodologie e tecnologie.

I modelli elettro-stratigrafici o elettro-strutturali che si ottengono non sono "automaticamente" utilizzabili per la definizione di una lito-stratigrafia o di una geo-struttura, per un insieme di problemi legati al comportamento elettrico delle rocce, non sempre teoricamente ipotizzabile.

2) Problemi di attribuzioni di valori a ciascun litotipo.

Di norma le elettrostratigrafie ottenute per un certo sito vengono abbinate ad una geo-stratigrafia senza tener conto della "Fisica del Sistema", ossia delle condizioni fisiche - locali ed al contorno - del volume di rocce esplorato. Ciò comporta attribuzioni di "una resistività" ad una litologia sia nel tempo che nello spazio, senza tener conto delle variazioni dipendenti dalle diverse condizioni bariche, termiche, idriche della litologia e da sue possibili condizioni di "instabilità meccanica" connessa a variazioni temporali e locali dei fluidi endogeni (LOSITO *et al.*, 1989).

Si è reso dunque necessario analiticamente e sperimentalmente definire il comportamento elettrico dei mezzi rocciosi al fine di individuarne le fenomenologie comportamentali. Ciò ha portato all'attivazione in più parti - a livello internazionale - di laboratori *ad hoc* ed al "costoso" prelievo di campioni in pozzo, al fine di misurare i più importanti parametri fisici utilizzati dalla Prospezione Geofisica a condizioni fisiche controllate.

A tal scopo in Italia è stato realizzato un laboratorio, dotato di strumentazione progettata e costruita *ad hoc*, in grado di sottoporre i campioni a condizioni di pressione idrostatica (fino a 40 MPa), pressione dei

fluidi interni (fino a 36 MPa) e temperatura (fino a 300°C) controllate e a tali condizioni poter misurare i parametri elettrici ed elastici (BERNABINI *et al.*, 1986).

L'uso di questo laboratorio ha consentito di studiare le proprietà elettriche di diversi campioni, definendo anche per un ciclo sperimentale le condizioni fisiche di micro-fratturazione della roccia, tramite misure di emissioni acustiche realizzate contemporaneamente a quelle di parametri elettrici.

Nel seguito si presentano i più significativi dati ottenuti, rimandando il lettore alla bibliografia (LOSITO *ed.*, 1989) per quanto riguarda la metodologia sperimentale.

La presentazione dei dati è basata su di una catalogazione comportamentale e non secondo la zona di provenienza, vista la diffusione nell'area esaminata dal CROP 03 delle litologie descritte.

Dati i limiti di spazio disponibile, si rinuncia ad una discussione dei dati presentati, poichè essa è già stata argomento di altre note citate in bibliografia. Sembra tuttavia opportuno richiamare alcuni punti essenziali nel seguito:

I) Le misure dei parametri elettrici di campioni umidi sono state effettuate presso i laboratori dell'Università di Siena fino al 1984 e successivamente presso l'Università di Firenze, condizionando la temperatura fino a 230°C, la pressione idrostatica fino a 40 MPa e la pressione del fluido interno fino a 36 MPa;

II) Le misure della conducibilità elettrica di campioni anidri fino a 1000°C sono state effettuate presso l'Istituto di Geofisica dell'Accademia delle Scienze di Praga;

III) I valori dei parametri elettrici (resistività, permittività, sfasamento) sono stati calcolati a partire dai

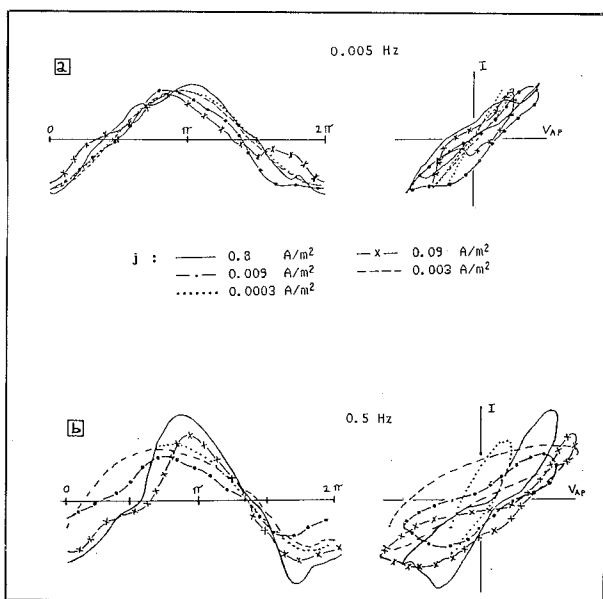


Fig. 1 - Segnali di *output* distorti (corrente I) e figure di Lissajous (I, V_{ap}) di un campione di argilla idrato del Bacino di Siena studiato a due frequenze: a) $f = 0.005$ Hz, b) $f = 0.5$ Hz. Forma del segnale di *input*: sinusoidale (da LOSITO & TROVA, 1986).

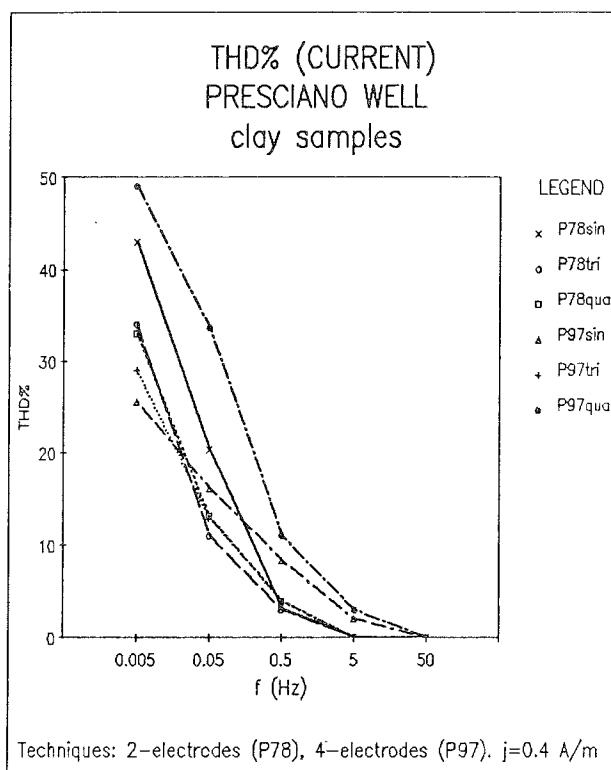


Fig. 2 - Distorsione dei segnali prodotti da argille.

segnali digitalizzati, eliminando componenti frequenziali spurie;

IV) Le misure dei parametri elettrici sono sempre effettuate in funzione della frequenza;

V) Il parametro THD% (distorsione armonica percentuale) è stato specificatamente definito ed adottato per misurare le distorsioni dei segnali prodotte dalla roccia (in generale da fillosilicati). La sua applicazione risulta particolarmente utile nella separazione di effetti di polarizzazione elettrica dovuta a minerali argillosi da quelli dovuti a minerali utili (solfuri).

2. ROCCE CONTENENTI MINERALI ARGILLOSI

Questa classe di litotipi presenta comportamenti elettrici fortemente non-lineari, cioè fenomeni di polarizzazione elettrica frequenziale associata a distorsione dei segnali elettrici (introduzione di frequenze "spurie") da parte della roccia.

A questa classe appartengono i seguenti campioni analizzati:

1) Sabbie Plioceniche del Graben di Siena, prelevate in superficie (LOSITO, 1979; LOSITO & FINZICONTINI, 1981; LOSITO, 1981). I campioni analizzati (umidità 20%) hanno resistività media di 50 Ohm.m, presentano forti fenomeni di distorsione dei segnali per frequenze minori di 10 Hz.

2) Argille provenienti dal pozzo geotermico di Pre-sciano nel Graben di Siena (LOSITO & TROVA, 1981; LOSITO & TROVA, 1985). La resistività di questo litotipo è risultata mediamente di 10 Ohm.m (umidità 13%). La distorsione dei segnali (Fig. 1) ha richiesto

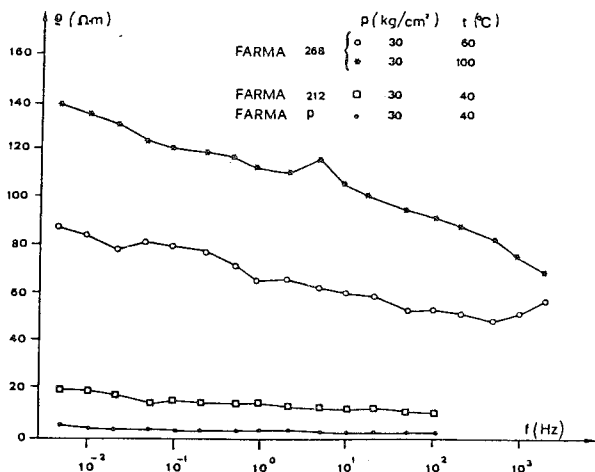


Fig. 3a - Resistività complessa di scisti carboniosi.

un studio *ad hoc* per l'attribuzione dei valori della resistività complessa; utilizzando il parametro THD% (Fig. 2), è stato possibile quantificare l'entità del fenomeno in funzione di frequenza, forma d'onda e densità di corrente. Il fenomeno è di particolare interesse dal punto di vista esplorativo, in quanto può indurre ad inserire "falsi strati" nell'elettrostratigrafia interpretativa.

3) Scisti carbonatici provenienti dal pozzo geotermico di Farma (LOSITO, 1982). Il comportamento elettrico di questa roccia (Fig. 3a) presenta andamenti regolari della resistività complessa in funzione della temperatura e fenomeni di polarizzazione modesti. La sua scistosità è ben descritta dall'andamento fortemente differenziato della conducibilità durante le fasi di riscaldamento/raffreddamento del ciclo termico ad alta temperatura realizzato a Praga da M. Lastovickova (Fig. 3b).

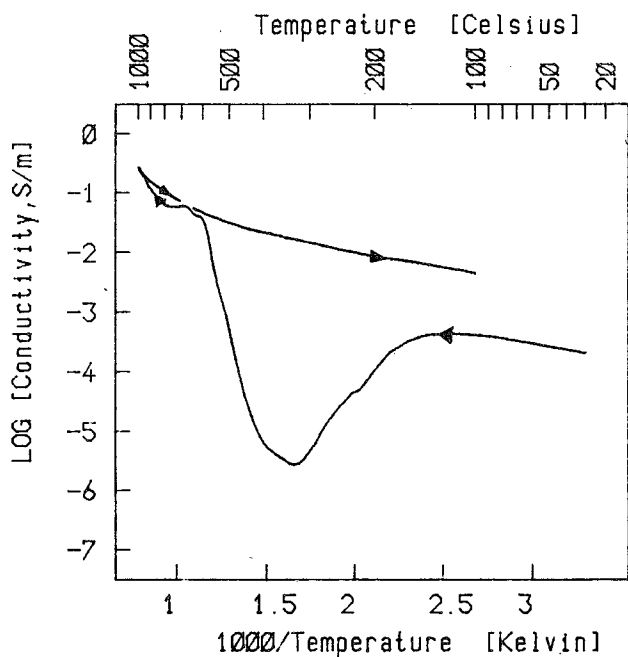


Fig. 3b - Conducibilità elettrica di scisti carboniosi anidri ad alte temperature. (M. LASTOVICKOVA).

4) Gessi argillosi provenienti dal pozzo di Latera 1, nell'area geotermica di Bolsena (LOSITO, 1989; LOSITO & MUSCHIETTI, 1989).

In generale, come già accennato, queste litologie presentano bassi valori di resistività ($\rho = 70 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) (Fig. 4a) fenomeni di polarizzazione, come indicato dagli andamenti della resistività e permittività in funzione della frequenza (Figg. 4a,4b) e forti fenomeni di distorsione (Fig. 4c) a basse temperature. I fenomeni di polarizzazione sono da catalogarsi tra quelli cosiddetti "di membrana". Il comportamento a temperature maggiori 90°C è strettamente legato ai micro-equilibri tra acqua e vapore, anche a livello di "interstrato" argilloso.

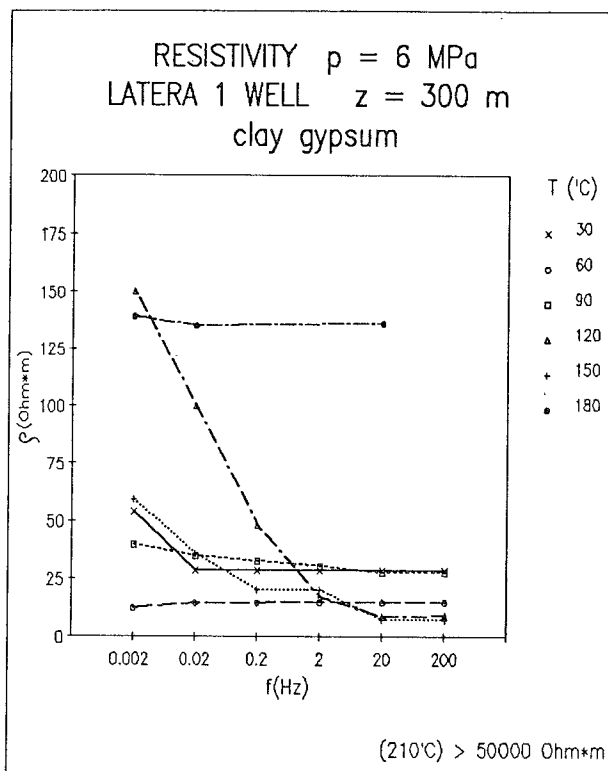


Fig. 4a - Resistività complessa di gesso argilloso di Bolsena.

3. ROCCE ISOTROPE

Prima di passare alla descrizione analitica del comportamento di queste rocce, si ritiene opportuno fare alcune precisazioni sul criterio di selezione comportamentale.

Infatti lo studio del comportamento elettrico di campioni di roccia alle condizioni termo-bariche citate ha consentito di valutare indirettamente il modo secondo il quale i pori comunicanti e non comunicanti sono distribuiti all'interno della matrice rocciosa.

Si sono individuate in tal modo due classi litologiche dal punto di vista del comportamento meccanico: rocce isotrope e rocce anisotrope.

Le rocce isotrope hanno distribuzione omogenea dei pori comunicanti, presentano al più una variazione

della resistività in funzione delle pressioni applicate (idrostatica ed interna), dovuta ad un nuovo assetto degli elementi strutturali della roccia. Appartengono a

- 1) Tefrite fonolitica (Fig. 5);
- 2) Ignimbrite latitica (Fig. 6);
- 3) Tefrite leucitica (Fig. 7).

Dalle Figg. 5, 6, 7 si nota come le relazioni temperatura/resistività sono dovute alla presenza di acqua; i "salti" della resistività indicano il raggiungimento di nuovi assetti strutturali (variazioni di pori comunicanti idrati) e quindi di nuove condizioni di equilibrio.

Un esempio di campione omogeneo è quello di una tefrite leucitica proveniente dal pozzo Latera 4 (Fig. 8a): in questo caso la pressione idrostatica non produce alcun effetto (alle condizioni di sperimentazione).

Un comportamento ben diverso è invece stato evidenziato nel caso di un campione proveniente dallo stesso blocco ma contenente inclusioni calcitiche (Fig. 8b): infatti in questo caso sono presenti forti oscillazioni della resistività in funzione della pressione, che consentono di ascrivere questa roccia alla classe delle rocce anisotrope.

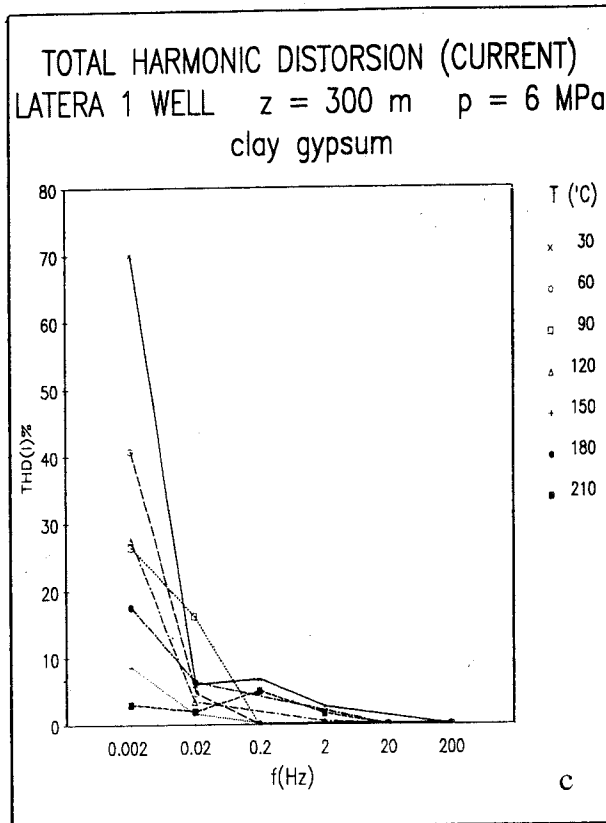
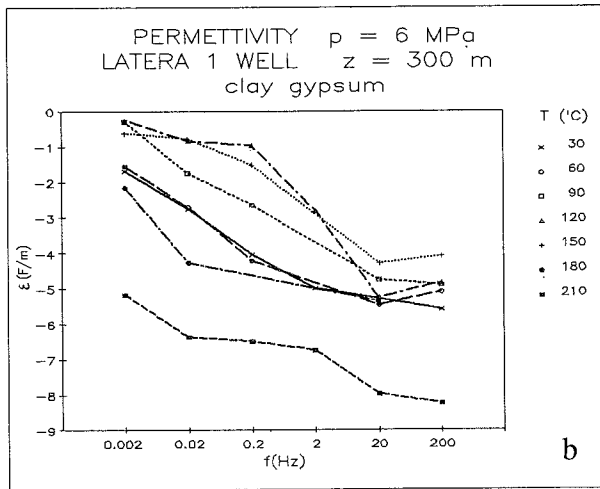


Fig. 4b - Permettività di gesso argilloso di Bolsena.
Fig. 4c - Distorsione armonica dello stesso campione.

questa categoria rocce recenti, con scarsa storia termobarica (in generale campioni prelevati in superficie) e rocce con lunga storia termo-barica, in cui gli elementi strutturali si sono "ben amalgamati" (rocce a granulometria uniforme e componenti con comportamento meccanico simile).

Sono risultati appartenenti a questa categoria i seguenti campioni prelevati in superficie nell'area di Bolsena:

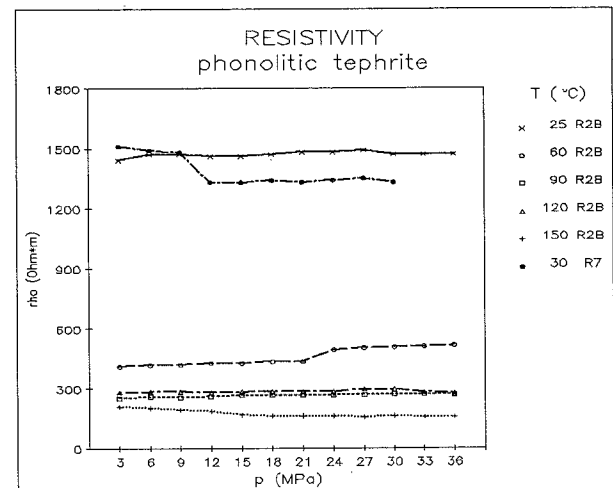


Fig. 5 - Resistività di un campione superficiale di Tefrite fonolitica a diverse condizioni di temperatura e pressione.

4. ROCCE ANISOTROPE

Le rocce anisotrope hanno distribuzione non-omogenea dei pori comunicanti e presentano oscillazione della resistività in funzione delle pressioni e in relazione alla temperatura. Si tratta di rocce con inclusioni di materiale diverso da quello della matrice (dal punto di vista meccanico; talvolta può coincidere con una mineralogia diversa) o formata da più componenti con comportamento meccanico differenziato distribuiti secondo una geometria 2D (rocce stratificate) o in modo random. Per l'interpretazione dei dati relativi a quest'ultima categoria è stato messo a punto un modello numerico meccanico (LOSITO *et al.*, 1989) ed uno equivalente elettrico (LOSITO & TROVA, 1990), ambedue basati sul metodo degli elementi finiti.

Mediante tali modelli si è dimostrato che le oscillazioni della resistività in funzione delle pressioni è prodotta da creazione di microfratture: il fenomeno è stato comprovato da misure di Emissioni Acustiche

realizzate contemporaneamente alle misure elettriche per un campione significativo (argilla termometamorfica del pozzo Bolsena1) (LOSITO *et al.*, 1991).

Sono risultati appartenenti a questa categoria i seguenti campioni prelevati in pozzo nell'area di Bolsena:

- 1) Calcare a Rhaetavicula Contorta (Fig. 9a, 9b, 9c);
- 2) Argillite termo-metamorfica (Fig. 10a, 10b);

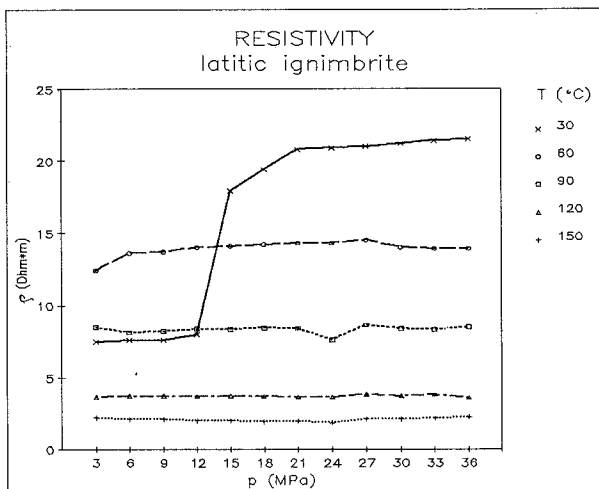


Fig. 6 - Resistività di un campione superficiale di Ignimbrite latitica a diverse condizioni di temperatura e pressione.

Il Calcare a Rhaetavicula Contorta è stato studiato utilizzando diversi campioni provenienti dal pozzo Latera 4.

La Fig. 9a mostra i valori di resistività ottenuti durante un primo ciclo termo-barico di un campione, che data la tortuosità degli andamenti della resistività è stato nuovamente idratato e sottoposto ad un secondo ciclo termo-barico: in questo caso il comportamento elettrico è stato quello tipico dei mezzi omogenei, confermato l'ipotesi che durante il primo ciclo si siano prodotte alterazioni (micro-fratture) permanenti. Misure ad alta temperatura (Praga) della conducibilità dei

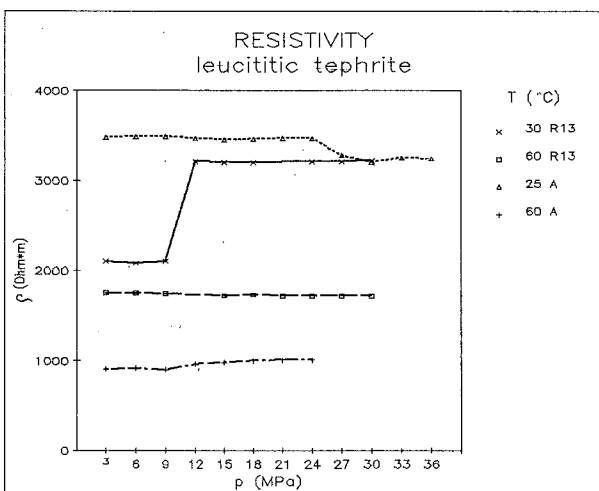


Fig. 7 - Resistività di un campione superficiale di Tefrite leucitica a diverse condizioni di temperatura e pressione.

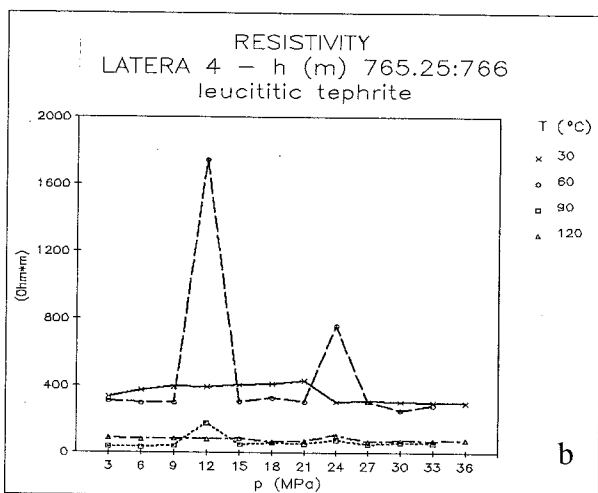
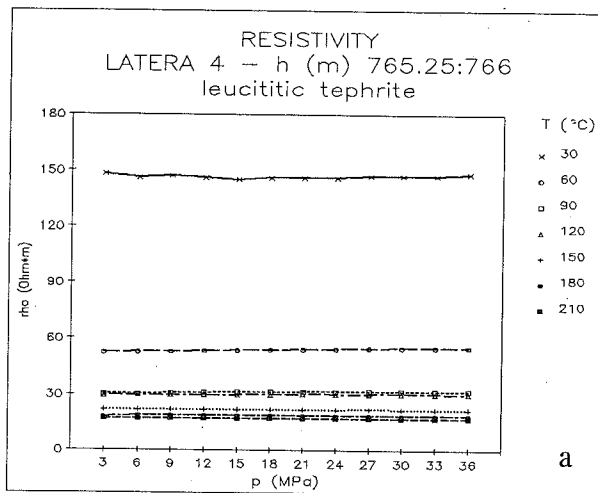


Fig. 8 - a) Resistività di un campione di Tefrite leucitica omogeneo. b) Resistività di un campione di Tefrite leucitica con inclusioni calcitiche.

due componenti (Fig. 9c) hanno ulteriormente confermato che la causa delle alterazioni risiede nel diverso comportamento dei due mezzi che costituiscono questa roccia.

Le proprietà elettriche dell'Argillite termo-metamorfica sono state valutate utilizzando più campioni provenienti dallo stesso blocco.

I dati (Fig. 10a, 10b) indicano variazioni meccaniche notevoli ma con *trend* uniforme, in dipendenza dalla struttura 2D della roccia. I campioni sono stati analizzati condizionando la pressione idrostatica (Fig. 10a) e quella del fluido interno (Fig. 10b). Come accennato misure di emissioni acustiche effettuate contemporaneamente a quelle elettriche hanno confermato l'ipotesi della creazione di fratture.

CONCLUSIONI

Le misure di laboratorio per la definizione delle proprietà elettriche delle rocce presenti nell'area di indagine hanno evidenziato tre classi comportamentali, che appaiono significative per il prospektore. Si rende

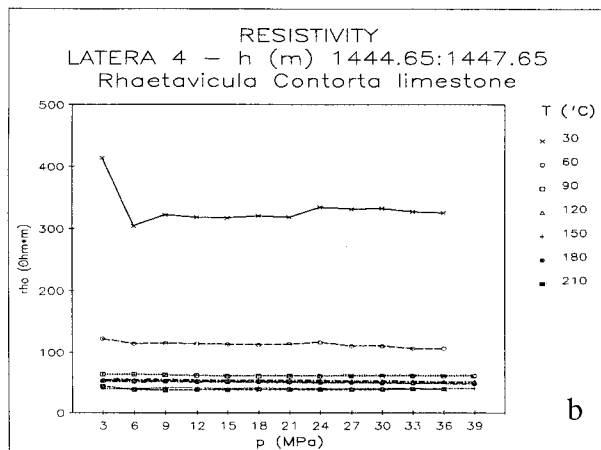
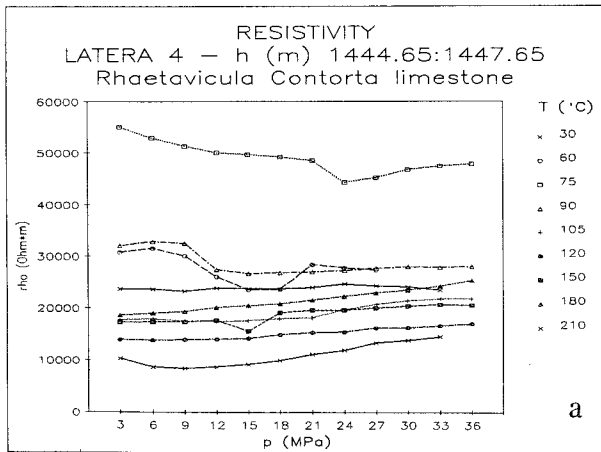


Fig. 9 - Resistività di un campione di Calcere a Rhaetavicula contorta in funzione della pressione idrostatica per diverse temperature. a) I ciclo; b) II ciclo.

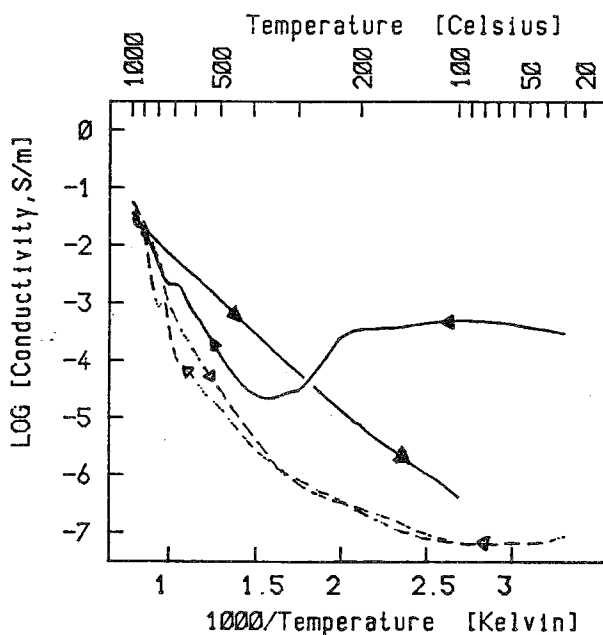


Fig. 9c - Conducibilità in funzione della temperatura della matrice (linea atratti) e della componente "Nodulo" (linea continua) della Rhaetavicula Contorta (Laboratoria M. Lastovickova, Praga).

tuttavia indispensabile allargare le conoscenze ad altre aree utilizzando campioni provenienti da pozzo.

RINGRAZIAMENTI

La scrivente ringrazia il F.T. A. TROVA e la dr. M. MUSCHIETTI per aver cooperato con impegno e dedizione nella conduzione della ricerca descritta.

La scrivente inoltre ringrazia la dr. M. LASTOVICKOVA per aver completato l'indagine sperimentale ad alte temperature presso il Laboratorio in Praga da lei diretto.

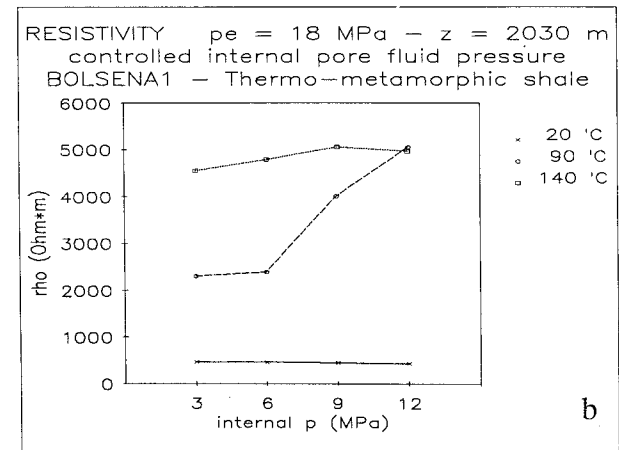
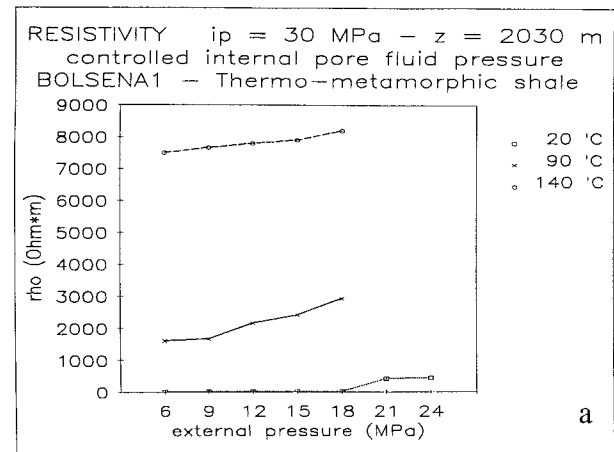


Fig. 10 - Resistività di un campione di scisto termo-metamorfico per diverse temperature. a) variazione della pressione idrostatica; b) variazione della pressione del fluido interno.

BIBLIOGRAFIA

FINZI-CONTINI G. & LOSITO G. (1974) - *Equivalence Situations in Magnetotelluric responses for Frequency-and-Temperature Dispersions of Conductivity*. Riv. It. di Geof., 23, n. 3/4, 137-138.

LOSITO G. (1979) - *Comportamenti elettrici di campioni di roccia incoerenti in funzione di frequenza, temperatura e pressione idrostatica, ottenuti mediante l'uso di una apparecchiatura pilota da laboratorio*. In Atti Convegno Energia

Geotermica: Prospettive aperte dalle ricerche del CNR, Roma, 163-172.

LOSITO G. & FINZI-CONTINI G. (1981) - *Laboratory instrumentation to study changes of electrical conductivity of rocks with changes of frequency, temperature and pressure*. Geoph. Prosp., **29**, 923-931.

MARCHISIO M. & LOSITO G. (1981) - *A Generalized geoelectrical procedure to improve Magneto-telluric interpretation*. Boll. di Geof. Teor. e Appl. Vol., **23**, N. 89, 73-84.

LOSITO G. (1981) - *Prospettive aperte nella ricerca di laboratorio sul comportamento elettrico di campioni di roccia studiati nel dominio frequenziale in funzione di densità di corrente, temperatura e pressione idrostatica*. Energia Geot.: prospettive aperte dalle ricerche del CNR, 2° Sem., 166-175.

LOSITO G. & TROVA A. (1981) - *Comportamenti elettrici non lineari di campioni di roccia studiati in laboratorio*. Atti 1° Convegno GNGTS, Roma, 377-388.

LOSITO G. (1982) - *Misure elettriche di laboratorio su alcuni litotipi*. Energia geotermica: Prospettive aperte dalle Ricerche del CNR, PFE, **3**, 155-170.

LOSITO G. & TROVA A. (1983) - *Comportamenti elettrici di campioni di roccia discriminati utilizzando l'analisi spettrale*. In Atti 2° Convegno Annuale GNGTS, 519- 530.

LOSITO G. & TROVA A. (1985) - *Evidenze sperimentali sull'anomalo comportamento elettrico di campioni di argilla studiati in laboratorio*. 4° Convegno GNGTS, 621-634.

BERNABINI M., BORELLI G.B., FINZI-CONTINI G., LOSITO G. & TROVA A. (1986) - *Su una apparecchiatura da laboratorio per lo studio di proprietà elettriche ed elastiche di litotipi in condizioni termo-bariche di interesse geotermico*. 5° Convegno GNGTS, 1071-1081.

LOSITO G., MUSCHIETTI M. & TROVA A. (1989) - *Dipendenza sperimentale dei parametri elettrici delle rocce dalla pressione del fluido interno*. 8° GNGTS, CNR, Roma. In stampa.

LOSITO G., MAJORANA C. & ZAVARISE G. (1989) - *La resistività come indizio di microfratturazioni in situazioni di stress: un modello numerico basato sugli elementi finiti*. 8° GNGTS, CNR, Roma. In stampa.

LOSITO G., MUSCHIETTI M. & TROVA A. (1991) - *Laboratory electrical responses of rock samples under geothermal*

temperature-hydrostatic pressure conditions. Geothermics, **20**, n.3.

LOSITO G., editore (1989) - *A new rock physics laboratory apparatus with programmed thermo-baric cycles & controlled pore fluid internal pressure (theory, hardware-software, electrical measurements)*. CNR-ENEA, PFE SP Energia Geotermica, **LB-21**, 150.

LOSITO G. & MUSCHIETTI M. (1989) - *Geothermal effects on electrical nonlinear phenomena of rock samples studied in laboratory*. XIV Meeting EGS, Barcelona, 1989.

LOSITO G., MAJORANA C., MUSCHIETTI M., TROVA A. (1989) - *Finite element models of rock samples electrical responses under geothermal thermo-baric conditions*. Presentato al XXXIV International Geophysical Symposium, Budapest, Hungary, 1989.

LOSITO G., TROVA A., MUSCHIETTI M. & MAJORANA C. (1990) - *Resistivity changes related to microcracks produced by rock internal fluid pressure at different thermo-baric conditions: laboratory experiments and numerical model*. XV EGS Meeting, Copenhagen, p. 21.

LOSITO G. & TROVA A. (1990) - *Modelli elettromagnetici 3D di strutture petrografiche anisotrope*. 9° Convegno GNGTS, CNR, Roma.

LOSITO G. & TROVA A. (1990) - *Electromagnetic and Mechanical Finite Element Models of Electrical Rock Samples Behaviour at Geothermal Physical Conditions*. 10th Workshop on electromagnetic induction in the Earth, Ensenada, Mexico, Poster 9.9.

MUSCHIETTI M., LOSITO G. & TROVA A. (1990) - *Laboratory Experiments on Rock Electrical Properties at stated Temperatures (up to 250°C), Hydrostatic Pressures (up to 40 MPa) and Internal Pore Fluid Pressures*. 10th Workshop on electromagnetic induction in the Earth, Ensenada, Mexico, Poster 9.10.

LOSITO G. & TROVA A. (1990) - *Modelli elettromagnetici 3D di strutture petrografiche anisotrope*. 9° Convegno GNGTS, CNR, Roma.

LOSITO G., MUSCHIETTI M. TROVA A. & BIAGI E. (1991) - *Rock samples microcracks produced by temperature, hydrostatic pressure and fluid pressure stresses: electrical responses and acoustic emissions*. Poster P161, 53rd EAEG Meeting, Firenze.

