

COSA PUÒ (E NON PUÒ) DARE LA GEOFISICA PROFONDA?

INDICE

RIASSUNTO	pag.	131
ABSTRACT	"	131
PREMESSA	"	131
CONTRIBUTI DELLA PETROGRAFIA	"	132
CONTRIBUTI DELLE PERFORAZIONI SUPER-PROFONDE	"	132
CONCLUSIONI	"	134
BIBLIOGRAFIA	"	134

RIASSUNTO

Essendo metodi indiretti, i metodi geofisici necessitano di vincoli su cui impostare le interpretazioni. Sono ben note le indeterminazioni connesse con i metodi gravimetrici e magnetici ai quali i vincoli vengono normalmente offerti dalla sismica, i cui risultati essi consentono di estendere anche lateralmente.

Più delicato è il problema della sismica, quando dal sedimentario si passa al basamento metamorfico: riflettori pochi e dispersi, debole rapporto S/D. Le sofisticate tecniche di elaborazione consentono talvolta di offrire sezioni soddisfacenti all'occhio, ma di significato spesso incerto. Esempi vengono forniti dai dati messi in evidenza dalle perforazioni profonde e super-profonde.

Quella di Kola ha anche rivelato che nel cristallino può esistere un terzo tipo di riflettori, sub-orizzontali e correlabili anche per lunghe distanze, causati non da differenze petrologiche o litologiche, o tettoniche (faglie), ma da cambiamenti nelle condizioni fisiche connessi con la presenza di fluidi (disaggregazione idraulica, microfratturazione).

ABSTRACT

Being indirect methods, the geophysical methods need constraints on which to base the interpretations. Well known are the indeterminations connected with the gravimetric and magnetic methods, to which the constraints are normally given by seismics, whose results they allow to extend also laterally.

More delicate is the problem of seismics, when passing from the sedimentary to the metamorphic: few and dispersed reflectors, weak S/N ratio. The sophisticated processing techniques permit sometimes to present sections which satisfy the eye, but are often of uncertain meaning. Examples are given by data evidenced from deep and super-deep drill-holes.

The Super-deep Kola drill-hole has also revealed that in the basement can exist a third type of reflectors, sub-horizontal ones and correlable also for long distances, caused not by petrological or lithological differences, or by tectonic ones (faults), but by changes in the physical conditions connected

with the presence of fluids (hydraulic disaggregation, microfracturation).

PAROLE CHIAVE: Interpretazione geofisica, vincoli, limitazioni, perforazioni profonde.

KEY WORDS: Geophysical interpretation, constraints, limitations, super-deep drillings.

PREMESSA

Un'analisi dei risultati più recenti delle esperienze di Geofisica profonda in stretta collaborazione con Geologia e Petrografia sperimentale indica possibilità e limiti.

I metodi di potenziale (gravimetrici e magnetici) per passare all'interpretazione dei risultati devono basarsi su vincoli, che alle grandi profondità possono essere offerti solo dalla sismica. Esempi positivi: ECORS-CROP, EGT; negativi: Sancerre, KTB.

Per passare alla sismica conviene precisare anzitutto che il programma "Crosta profonda" ha per oggetto principalmente la crosta non sedimentaria, che invece è il campo principale di interesse della ricerca industriale. La differenza si ripercuote soprattutto sulla sismica a riflessione (NVR), di cui è ben noto l'avanzamento tecnologico e scientifico ed i successi conseguiti nelle serie sedimentarie (porose), dove i riflettori sono in generale continui, seguibili per distanze anche lunghissime, ricchi di caratteristiche specifiche e bene individuabili, spesso tarati da perforazioni numerose e ben focalizzate.

Il contrario si verifica non appena si entra nel cristallino (fratturato) dove i segnali sono in generale deboli e sommersi in un disturbo generalizzato.

La NVR posiziona ancora riflettori, normalmente di lunghezza limitata, che diventano riflessioni continue per *stacking*, ma devono essere messe al loro posto per migrazione. Inoltre per passare dalle sezioni tempi alle sezioni profondità, bisogna conoscere le leggi di velocità, che diventano tanto più incerte quanto più grande è la profondità.

Per conoscere le velocità in profondità si ricorre alla sismica a rifrazione profonda (DSS), che inoltre rivela le principali discontinuità nella loro posizione.

Per tutti i metodi geofisici indicati è necessaria la corretta impostazione ed il massimo dettaglio.

Esempio tipico: la sezione EGT Alpi-Appennini, dove, in collaborazione europea, il programma sismico NFP-20 ha fornito un'ottima DRS, la EGT il DSS e le altre misure necessarie, il Gruppo Grandi Esplosioni italiano con la partecipazione europea le altre misure DSS di dettaglio.

(*) Dipartimento di Ingegneria Navale, del Mare e per l'Ambiente, Sezione per le Georisorse e l'Ambiente. Università, 34127 Trieste

L'interpretazione integrata ha fornito quindi risultati completi, che in collaborazione con la Geologia hanno aperto nuovi orizzonti.

Manca ancora l'ultimo passaggio, il più delicato: dalle velocità alla natura petrografica. La petrografia sperimentale ha aperto nuovi orizzonti con misure in laboratorio ad alte pressioni e temperature per la determinazione delle velocità e densità su campioni di rocce della crosta e del mantello superiore, le perforazioni super-profonde dando nuovi significati per i riflettori della sismica.

CONTRIBUTI DELLA PETROGRAFIA

Quali risultati particolarmente importanti della petrografia sperimentale ricordiamo quelli delle esperienze di MENGEL & KERN (1991). Da misure in laboratorio su numerosi campioni dei più vari minerali di origine profonda provenienti da tutte le regioni dove affiorano rocce profonde, e facendo variare la pressione fino a 6 Kbar (corrispondente a circa 25 km di profondità), gli AA. hanno ricavato leggi di variazione con la pressione per le velocità v delle onde longitudinali e per la densità d , e da queste i "campi di esistenza" della relazione v/d per i diversi minerali (Fig. 1). Questi campi di esistenza sono funzioni delle diverse condizioni ambientali e fisiche (pressione, temperatura, disidratazione, porosità, microfratturazione, permeabilità, ecc.).

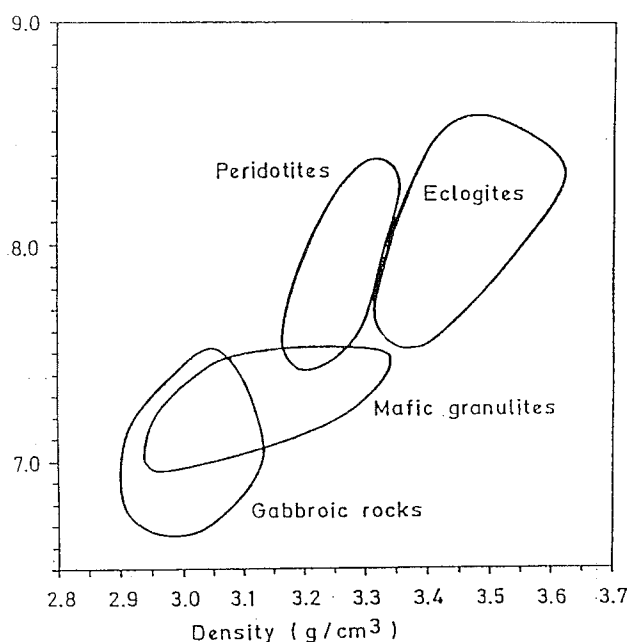


Fig. 1 - Velocità (in km/s) delle onde di compressione e densità determinate sperimentalmente per i gabbri, granuliti mafiche, eclogiti e peridotiti a 6 Kbar (MENGEL & KERN, 1991).

La conseguenza immediata per la geofisica è stata per l'interpretazione gravimetrica profonda, dove i modelli gravimetrici (da confrontare con i valori osservati in superficie) si calcolano sulla base di densità ricavate dalle velocità: fino ad oggi dalla ben nota legge di NAFE & DRAKE (1965), relazione biunivoca fra v e d universalmente accettata ma spesso non applicabile in profondità; o dalla sua estensione di Ludwig, NAFE & DRAKE (1970), più recente e quindi meno applicata, ma con le stesse limitazioni.

I risultati di MENGEL & KERN consentono invece di tenere conto delle variazioni conseguenti alle diverse condizioni ambientali e fisiche sopra menzionate.

Altro contributo di base dalle ricerche di MENGEL & KERN è stato portato alla comprensione delle interazioni fra crosta e mantello. Per illustrarle, prendiamo l'esempio del basalto.

Com'è noto, i basalti rappresentano il magma più diffuso della terra. I liquidi basaltici si formano, come sottolineato dai dati sperimentali, geofisici e geochimici, per fusione parziale del mantello superiore, costituito da rocce di tipo peridotitico. Il processo di idratazione della peridotite del mantello, che trasformandosi in serpentinite, aumenta significativamente il proprio volume, dà origine a sollevamento regionale.

A basse pressioni il basalto fuso ha bassa densità e perciò migra verso l'alto. Raffreddandosi, sprofonda e si converte in una roccia densa (eclogite) a profondità maggiori di 50 km nel mantello.

Questo cambiamento di fase basalto-eclogite spiega anche il fatto che circa 60-80 km è lo spessore massimo della crosta: la base di una crosta più spessa di circa 60-80 km si trasforma in eclogite densa e si comporta non più come crosta ma come un mantello particolarmente denso. Non solo è denso, ma assume anche le proprietà sismiche del mantello. In questo caso non è più necessario parlare di distacco e subduzione di crosta inferiore, ma di trasformazione della stessa in materiale affine al mantello.

Viceversa, uno strato di serpentinite ricoprente le peridotiti con spessore da 3 a 9 km è stato trovato in corrispondenza dei *rift* oceanici, esteso probabilmente anche sotto la crosta continentale del *rift* dove essa è stata molto assottigliata e fratturata per stiramento (BOILLOT *et al.*, 1989). Ciò permette di estendere alle regioni continentali che hanno subito uno stiramento orizzontale il concetto di accrezione alla base della crosta di origine idrotermale (*undercrusting*).

Poiché la velocità delle onde sismiche nella serpentinite è molto vicina a quella della Crosta continentale inferiore (6.7-6.8 km/s), è difficile rivelare le serpentiniti. La Moho potrebbe essere interpretata come frontiera fra peridotiti e serpentiniti.

CONTRIBUTI DELLE PERFORAZIONI SUPER-PROFONDE

Contributi altrettanto importanti alla conoscenza delle condizioni fisiche in profondità sono stati portati dalle perforazioni super-profonde di Kola (12.500 m) e dal KTB in corso di perforazione in Baviera (profondità attuale > 6000 m).

In entrambi i casi i risultati inaspettati sono stati numerosi e spesso eclatanti. Dal punto di vista fisico, essi si possono così riassumere:

1) Presenza di fluidi. Arrivati al tetto di rocce metamorfiche disaggregate, entrambi i pozzi incontrarono abbondanti flussi di acqua calda, altamente mineralizzata. Quest'acqua, "acqua di mineralizzazione", è generata da minerali che formano le rocce cristalline, e viene liberata quando i costituenti subiscono dissociazione e riassociazione durante l'impatto e la cottura del metamorfismo.

È ben noto che l'acqua di metamorfismo riveste un

ruolo importante nella formazione di giacimenti minerali. Normalmente trova la via di uscita dalla formazione metamorfica e deposita il suo contenuto minerale a livelli superiori della crosta. A Kola l'acqua è stata intrappolata sul posto della sua liberazione da strati sovrastanti di rocce ignee impermeabili dallo spessore di 2 km. La disidratazione è stata accompagnata da microfratturazioni. Questo fenomeno della disaggregazione idraulica di rocce metamorfiche, mai osservato prima, può rivestire un posto significativo nella struttura dei continenti.

L'avanzamento della perforazione di Kola liberò anche flussi di gas a tutti i livelli. Fra i gas identificati risultano: He, H, N, CO₂, CH₄ ed altri idrocarburi. Gli elementi leggeri in questi gas provengono, ovviamente, dalla struttura cristallina della roccia per gli stessi processi metamorfici che hanno liberato l'acqua. Una seconda origine "biogenica" per la CO₂ è tuttavia suggerita dalla composizione isotopica del suo C: attribuibile alla presenza di micro-organismi fossili nelle rocce Proterozoiche, vecchie centinaia di milioni di anni.

Dal punto di vista geofisico, le sorprese non sono state meno importanti.

Anzitutto, per il significato dei riflettori sismici. Entrambe le perforazioni super-profonde avevano come uno degli obiettivi principali il raggiungimento di orizzonti sismici profondi capaci di portare informazioni risolutive sulla struttura della crosta o sulla sua evoluzione tettonica: Kola voleva raggiungere (a 9000 m) la cosiddetta "discontinuità di Conrad" dei simologi, prevista quale superficie di separazione fra la crosta superiore ("strato del granito" della sismologia) e la crosta inferiore ("strato del basalto"); la KTB una discontinuità molto netta indicata dalla NVR a 3500 m, prevista separazione fra gli strati ercinici del Moldanubikum sovrapposti a quelli del Saxothuringikum. Le due discontinuità non sono state incontrate fino a fondo pozzo (12.500 m per Kola, 4001 m per il KTB di prova).

La spiegazione è venuta da Kola. Le carote hanno dimostrato che, partendo dall'alto, il contenuto di acqua di origine chimica è il 4% della roccia, e rimane costante fino a 4500 m di profondità, dove il contenuto d'acqua diminuisce bruscamente al 2.1%. È qui che comincia la zona di disaggregazione, con la microfratturazione della roccia che aumenta la sua porosità di 3 o 4 volte rispetto alla roccia sovrastante e corrispondentemente riduce la densità da 3.1 g/cm³ a 2.9. I calcoli mostrano che l'acqua liberata, intrappolata negli interstizi della roccia fratturata ha forzato il volume totale iniziale di roccia ed acqua ad un aumento dell'1.7%. L'enorme pressione idraulica così esercitata ha causato la microfratturazione che inizialmente deve aver aumentato la porosità della roccia a 10 volte quella degli strati sovrastanti.

Il limite inferiore di questa zona, a - 9000 m, corrisponde ad un aumento di velocità delle onde sismiche. Questo non corrisponde alla presunta discontinuità di Conrad, ma semplicemente alla fine della zona di disaggregazione con il ritorno a rocce di densità normale ed alla cessazione di afflusso di acqua termale nel pozzo.

Le perforazioni profonde hanno così confermato che nella crosta profonda fluidi ad alta pressione nei pori possono spiegare i bassi valori riscontrati delle velocità sismiche e l'aumento di riflettività. Possono così dare alle discontinuità sismiche rivelate dalla sismica profonda un

significato diverso da quello finora sempre attribuito: non più diversità litologiche o tettoniche, ma discontinuità causate da variazioni nei parametri fisici, in particolare pressione, fratturazione e fluidi inclusi.

Le zone a bassa velocità possono essere quindi zone di "disaggregazione idraulica" delle rocce metamorfiche: cioè si ha un "cambio della natura fisica" e non stratigrafica.

Il risultato più importante è stato quindi che non sempre le discontinuità sismiche corrispondono a variazioni litologiche, ma dipendono invece da cambiamenti nelle condizioni fisiche delle rocce.

Kola ha infatti dimostrato che esistono tre possibili

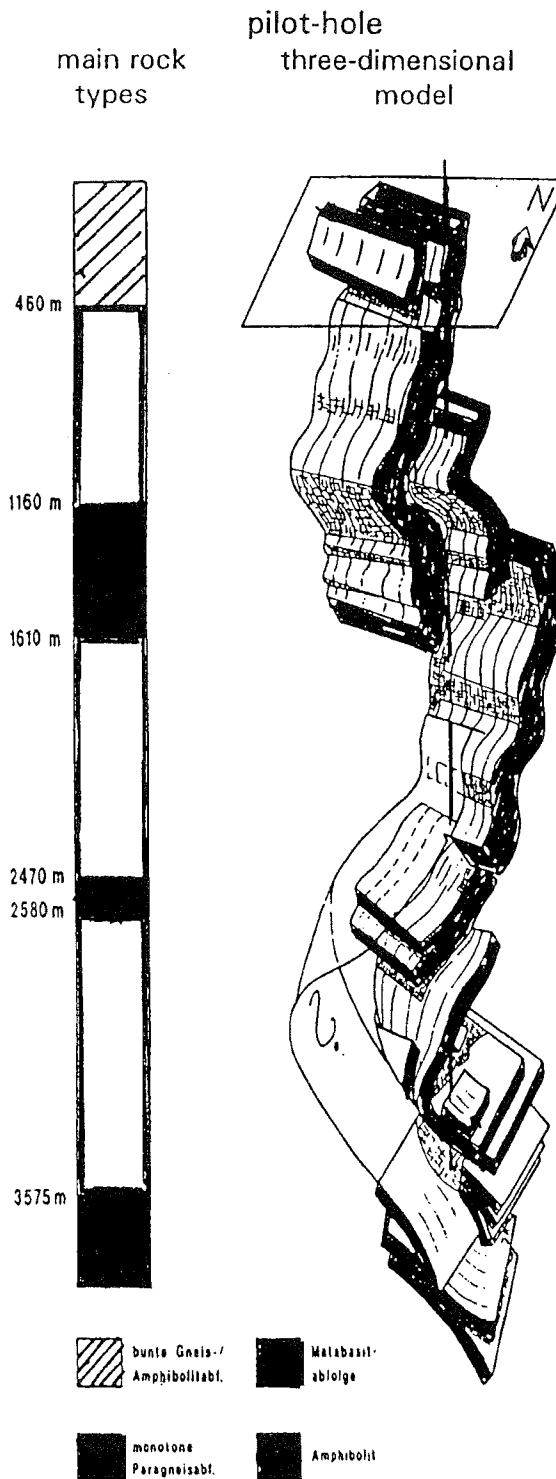


Fig. 2 - KTB: riflettori inclinati ed attorcigliati (da EMMERMANN *et al.*, 1992).

cause per i riflettori sismici. Anzitutto, le discontinuità petrologiche o litologiche fra rocce di differente composizione. I principali riflettori sono causati da una variazione di velocità delle onde sismiche in orizzonti sedimentari e tufacei.

Il secondo tipo di riflettori è collegato a cause tettoniche, in particolare con zone di faglie e rocce fagliate.

Entrambi i tipi, litologici e tettonici, contribuiscono alla struttura geologica attuale di una crosta antica. Inoltre, sono da tenere presenti i cambi di certe caratteristiche fisiche delle rocce come porosità, anisotropia delle velocità sismiche; ed anche il diametro del pozzo, che caratterizza la tensione delle rocce e le variazioni di pressione.

I primi due tipi di discontinuità, quali risultano da dati sismici, sono osservati spesso sulla crosta superiore, con maggiore attendibilità in NVR che in WA. Quelle del terzo tipo, discontinuità fisiche, sono in prevalenza sub-orizzontali, e si trovano a profondità maggiori. Possono essere messe in evidenza sia da NVR che da WA.

Seconda sorpresa: la geometria degli strati. La sismica a riflessione profonda (NVR) mostrava per il KTB la presenza di discontinuità sub-orizzontali abbastanza regolari; il pozzo di prova ha rivelato invece una situazione complicatissima di strati sub-verticali, attorcigliati e ripetuti in profondità (Fig. 2), dimostrando che le tecniche moderne, molto sofisticate, per l'elaborazione dei dati di sismica a riflessione per gli strati sedimentari non possono essere trasferite *sic et simpliciter* nel cristallino.

Difatti negli strati sedimentari le discontinuità litologico-petrografiche e tettoniche producono in generale riflettori con buon rapporto segnale/disturbo che possono essere seguiti con continuità per lunghe distanze. Diverso è il caso delle rocce metamorfiche, dove i riflettori sono in generale deboli, discontinui e variamente orientati. Le moderne e sofisticate tecniche di elaborazione consentono, quasi sempre con grandi difficoltà, di produrre segnali correlabili, che possono soddisfare l'occhio dell'interprete ma che non sempre corrispondono ad una realtà fisica.

Terza sorpresa: la temperatura. A Kola, il gradiente geotermico, che in superficie è di 10° C/km (molto basso), aumenta in profondità e raggiunge 18° C/km a partire da 6 km; sono seguiti aumenti fino a 25° C/km e diminuzioni fino a 15° C/km. La temperatura a fondo pozzo è risultata di 185° C.

Attualmente (dopo la ripresa delle perforazioni) le previsioni sono di 280° C a 15 km.

Al KTB, un flusso geotermico di 60 mW/m² era stato accuratamente misurato in un esteso rilievo con pozzetti di 300-500 m attorno al pozzo di prova, e la temperatura prevista a 4000 m era di 90° C: ma il flusso termico misurato aumentò, con forti fluttuazioni, a 85 mW/m² a fondo pozzo, e la temperatura misurata è stata di 118,6° C.

Le discrepanze fra i valori previsti e quelli osservati sono state attribuite alla convezione di calore per percolazione di acque superficiali verso il basso, ed all'effetto paleo-climatico (storia della temperatura in superficie). Esse sono state verificate quantitativamente con modelli. Le previsioni sono ora di 296° C a 10 km e di 350° C a 12 km.

CONCLUSIONI

In conclusione, l'avanzamento delle conoscenze geofisiche in profondità nell'interno dei continenti per mezzo della Geofisica (soprattutto sismica profonda, a riflessione ed a rifrazione) indica nuove tematiche alla scienza (geologia, tettonica) ed alla ricerca (di minerali e di fluidi). La taratura delle indicazioni geofisiche mediante perforazioni profonde era quindi una necessità.

Il risultato più importante è stato che non sempre le discontinuità sismiche corrispondono a variazioni litologiche, ma dipendono invece da cambiamenti nelle condizioni fisiche delle rocce.

Kola ha infatti dimostrato che esistono tre possibili cause per i riflettori sismici. Anzitutto, le discontinuità petrologiche o litologiche fra rocce di differente composizione. I principali riflettori sono causati da una variazione di velocità delle onde sismiche in orizzonti sedimentari e tufacei.

Il secondo tipo di riflettori è collegato a cause tettoniche in particolare con zone di faglie e rocce fagliate.

Il terzo tipo corrisponde a cambiamenti di certe caratteristiche fisiche delle rocce come porosità, anisotropia delle velocità sismiche; ed anche il diametro del pozzo, che caratterizza la tensione delle rocce e le variazioni di pressione.

Anche nell'interpretazione dei riflettori sismici nel cristallino occorre quindi l'ausilio di vincoli, e grande cautela.

BIBLIOGRAFIA

BOILLOT G., FERAUD G., RECQ M. & GIRARDEAU G. (1989) - *Undercrusting by serpentine beneath rifted margins* Nature, **341**, 523-525.

EMMERMANN R., DIETRICH H.G., LAUTERJUNG J. & WOHL TH. (1992) - *KTB Report n. 2 (0-6000 m)*. Niedersachs. Landesamt für Bodenforschung, Hannover.

KERN H. (1982) - *P- and S-wave velocities in crustal and mantle rocks under simultaneous action of high confining pressure and high temperature and the effect of the rock microstructure*. In: W. SCHREYER (Ed.), *High Pressure Researches in Geosciences*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 15-45.

KOZLOVSKY YE.A. (Ed.) (1987) - *The Superdeep Well of the Kola Peninsula - exploration of the Deep Continental Crust*. Springer-Verlag, Berlin, 588 pp.

LUDVIG W.J., NAFE J.E. & DRAKE C.L. (1970) - *Seismic refraction*. In: "The sea", vol. 4, A.E. MAXWELL (Ed.), 53-84.

MENGEL K. & KERN H. (1991) - *Evolution of the petrological and seismic Moho: implications for the continental crust - mantle boundary*. Terra Nova, 169-176.

MORELLI C. & MOTTANA A. (1992) - *Il ruolo dei fluidi nella tettonosfera*. Mem. Acc. Naz. Lincei, s. IX, vol. II, 2, 62 pp.

NAFE J.E. & DRAKE C. (1965) - Cited as "personal communication". In: F.S. GRANT & G.F. WEST, 1965: *Interpretation theory in applied geophysics*. 200 pp., McGraw-Hill, New York.