

PROPRIETÀ ELASTICHE DELLE ROCCE DEL PROFILO CROP-01 DESUNTE DALLA LETTERATURA: IL CONTRIBUTO DELLE PROVE DI LABORATORIO ALLE INDAGINI NVR

INDICE

RIASSUNTO	pag.	143
ABSTRACT	"	143
INTRODUZIONE	"	143
TECNICHE IN USO	"	143
IL PROBLEMA DEI FLUIDI	"	144
APPLICAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI AL PROFILO CROP-01	"	144
CONCLUSIONI	"	146
DISCUSSIONE	"	147
BIBLIOGRAFIA	"	147

RIASSUNTO

Le caratteristiche elastiche dei materiali naturali sono funzione principalmente della composizione mineralogica, della *fabric*, della porosità, della pressione confinante e dei pori, e della temperatura.

In laboratorio è possibile determinare le velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali e trasversali su provini di roccia sottoposti a diverse condizioni di pressione confinante e dei pori e di temperatura. Le tecniche più comunemente in uso differiscono sostanzialmente per la forma del provino utilizzato, (cilindrica, cubica o sferica), per il mezzo che trasmette la pressione confinante (pistoni, olio o acqua, gas) e per la massima temperatura raggiungibile. Una possibile applicazione delle misure di laboratorio è il calcolo del coefficiente di riflessione tra due litotipi a contatto. Questo calcolo può rivelarsi utile nella fase di progettazione e di elaborazione delle indagini di sismica a piccolo angolo, in quanto permette di identificare i più probabili riflettori (secondo JONES & NUR, 1982, un coefficiente di riflessione superiore a 0.02 indica un potenziale riflettore). Nel settore tra la Toscana e la Pianura Padana del profilo CROP-01 sono stati presi in considerazione alcuni contatti litologici, desunti dalle sezioni geologiche di CASTELLARIN e collaboratori (com. pers.), e di questi sono stati calcolati i coefficienti di riflessione. Il coefficiente più elevato è quello che riguarda il contatto tra gli *Scisti policromi* ed il *Gruppo Calcareo-Siliceo Mesozoico*.

ABSTRACT

The elastic properties of rocks are function of mineral composition, fabric, porosity, confining and pore pressure and temperature. The seismic properties are measured in laboratory on rock samples at different confining and pore pressure and temperature. The techniques differ according to the type of confining medium (oil, water, gas), the maximum temperature

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Via Botticelli 23, Milano, (Italia)

(**) Dipartimento di Scienze della Terra, Via Cicognara 7, Milano, (Italia)

and the sample shape (cylindric, cubic, spheric). A possible application of laboratory measurements regards the calculation of a reflectivity coefficient between two rock formations. These calculations might be useful to the project of a seismic survey and to the interpretation of NVR seismic data, because it indicates the most probable reflectors (a lithologic contact with a reflectivity coefficient greater than 0.02 should be detected by NVR; JONES & NUR, 1982). Along the CROP 01 profile, in the Toscana-Pianura Padana area, we calculated the reflectivity coefficients of some of the most representative lithologic contacts (from the geologic interpretation of CASTELLARIN *et al.*, pers. com.). The highest reflectivity coefficient corresponds to the limit between the *Scisti policromi* and the *Gruppo Calcareo-Siliceo Mesozoico*.

PAROLE CHIAVE: Sismologia, Appennino settentrionale, CROP

KEY WORDS: Seismology, Northern Appennine, CROP

INTRODUZIONE

La conoscenza delle caratteristiche elastiche delle rocce crostali rappresenta un buon vincolo per la progettazione di profili sismici crostali.

Parametri litologici, quali la composizione mineralogica, il *fabric* e la porosità, e parametri fisici, quali la pressione confinante e dei pori e la temperatura del mezzo, sono le principali variabili che influenzano il comportamento elastico di una roccia. La simulazione in laboratorio delle condizioni naturali è un problema ancora non completamente risolto, soprattutto per la rappresentatività dei campioni su cui vengono effettuate le misure e per i limiti fisici degli apparati sperimentali.

Attualmente è possibile operare su campioni di roccia sia ad elevate pressioni (BIRCH, 1960) sia ad alte temperature (KERN & FAKHIMI, 1975), ed eventualmente a pressione dei pori controllata (CHRISTENSEN, 1979; NUR & SIMMONS, 1969).

TECNICHE IN USO

Le tecniche sperimentali in uso, riassunte in Tab.1, si basano sulla possibilità di simulare le condizioni presenti nella crosta su di un campione di qualche centimetro di dimensioni, mediante un mezzo di confinamento in pressione ed una fornace. Al campione viene collegato un sistema di trasmissione e ricezione di impulsi ultrasonici (BIRCH, 1960, 1961). Vengono misurati i tempi di arrivo delle onde longitudinali e trasversali, le variazioni di lunghezza del provino (KERN & FAKHIMI, 1975) in funzione della pressione confinante e, solo in alcuni casi, della pressione dei pori e

Tab. 1 - Schema riassuntivo delle metodologie sperimentali per la determinazione delle velocità di propagazione delle onde elastiche su provini di roccia.

TECNICA	FORMA PROVINO	MEZZO CONFINANTE	T (MAX)	P (MAX)	COMMENTO
Birch (1961)	Cilindro Diametro: 2-3 Cm Lung. 4 Cm	olio, acqua, gas	400°C	10 Kb	si può misurare la pressione dei pori.
Kern & Fakhimi (1975)	Cubo Lato: 4 Cm	pistoni	700°C	6 Kb	P confinante non idrostatica, misure in tre direzioni contemporaneamente
Pros (1977)	Sfera Diametro: 3 Cm.	olio	200°C	4 Kb	misure in tutte le direzioni sullo stesso provino

della temperatura. Si misurano così le velocità di propagazione delle onde elastiche in un mezzo di cui sono note le caratteristiche litologiche e microstrutturali.

I metodi illustrati in Tab. 1 differiscono tra loro principalmente per la forma del provino utilizzato, per il mezzo che trasmette la pressione confinante e per la massima temperatura raggiungibile. La forma del provino determina il numero di misure di velocità di propagazione delle onde eseguibili su di uno stesso campione; ad esempio, con un campione sferico è stato possibile effettuare misure secondo più di 200 direzioni (PROS, 1977), mentre con un campione cubico è possibile misurare la velocità in tre direzioni (KERN & FAKHIMI, 1975), infine con un campione cilindrico è generalmente misurata la velocità in una sola direzione (BIRCH, 1960, 1961).

Il mezzo confinante, oltre ad essere determinante per il tipo di stato tensionale interno del campione, influenza, insieme al sistema di riscaldamento, la temperatura massima raggiungibile. Se si usa un fluido come mezzo di confinamento (BIRCH, 1960), la configurazione è fatta in modo che i trasduttori siano esposti alla stessa temperatura del campione, limitando la massima temperatura raggiungibile a quella della loro stabilità (400-450°C). Non vengono qui considerati i metodi per la determinazione della velocità su provini piccolissimi (*piston cylinder*, onde d'urto, celle ad incudine di diamante ecc.) perché sono relativi alla determinazione di proprietà elastiche di singolo minerali (o aggregati monomineralici) piuttosto che rocce naturali.

Esistono anche metodi teorici per il calcolo dei parametri elastici di una roccia. Uno di questi consiste nel calcolo della matrice di *stiffness* teorica della roccia sulla base della composizione modale, delle proprietà elastiche delle fasi presenti e del *fabric* (MAINPRICE, 1990).

IL PROBLEMA DEI FLUIDI

Le misure di velocità in laboratorio, come già detto, vengono effettuate su provini di roccia di modeste dimensioni. Il limite più evidente di queste tecniche è che un provino di roccia non può rappresentare efficacemente i caratteri sismici di un ammasso roccioso, a causa del ruolo giocato dalle discontinuità che in natura sono presenti ad ogni scala. In laboratorio invece sono rappresentate solo le microfrazture, il cui effetto è ben noto sin dai primi esperimenti condotti da BIRCH (1960, 1961). L'importanza delle microfrazture non è limitata solo ai primi chilometri della crosta, ma si estende fino alla transizione crosta-mantello

se le fratture vengono mantenute aperte da fluidi in pressione (H_2O-CO_2 -fusi). Le fratture, ed i fluidi che eventualmente le riempiono, riducono le velocità di propagazione delle onde (anche oltre il 30%). Le determinazioni su provini intatti e sani indicano perciò la *massima velocità possibile* di propagazione delle onde nel litotipo che il campione rappresenta. Come già accennato, i fluidi nelle rocce della crosta possono essere in pressione. Determinazioni sperimentali di propagazione delle onde elastiche in mezzi porosi, hanno mostrato che la velocità si riduce all'aumentare della pressione dei pori. Le curve velocità/pressione confinante per prove condotte su provini secchi, mostrano un aumento non lineare della velocità con la pressione fino a 100-300 MPa (BIRCH, 1960). Oltre questa pressione la velocità aumenta linearmente con la pressione confinante. La prima parte della curva è correlata con la chiusura delle microfrazture nel campione, mentre la seconda rappresenta le proprietà intrinseche dell'aggregato (KERN, 1990). Se nel provino sono presenti dei fluidi, quando questi entrano in pressione determinano un andamento rettilineo della curva velocità/pressione confinante, grossomodo parallelo a quello delle proprietà elastiche intrinseche, ma spostato a più bassi valori di velocità (NUR & SIMMONS, 1969; CHRISTENSEN, 1989). Non è ancora noto se il contributo dei fluidi nell'abbassare la velocità teorica di propagazione delle onde elastiche sia quello di tenere le fratture aperte, oppure di agire come "fase", con delle specifiche costanti elastiche (CHRISTENSEN, 1979).

APPLICAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI AL PROFILO CROP-01

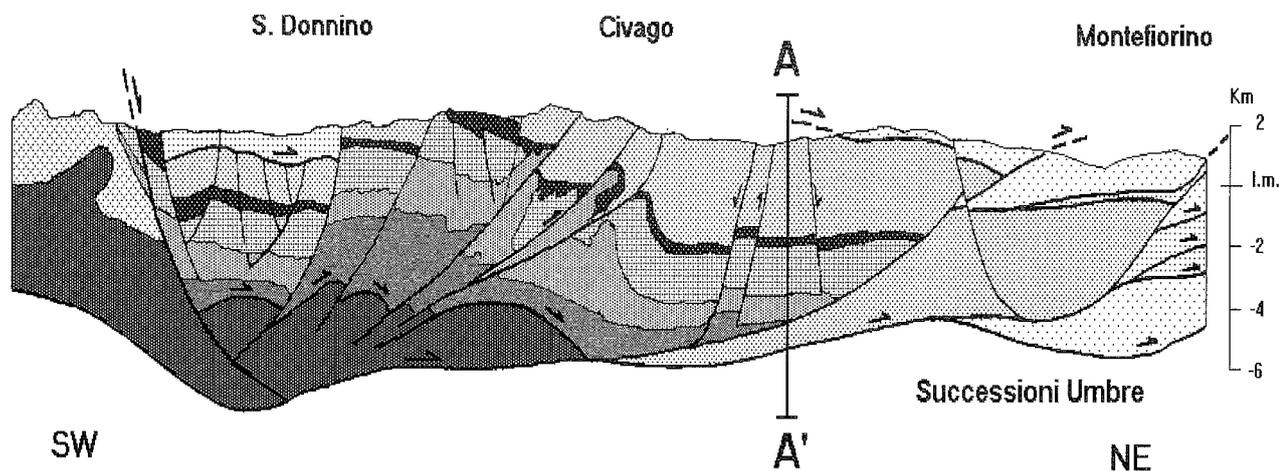
La determinazione dei potenziali riflettori sismici è un'applicazione delle misure di laboratorio che risulta essere una indicazione utile sia in fase di progettazione che di interpretazione di profili sismici NVR. Note le riflettività dei contatti litologici attraversati, i profili di acquisizione potranno essere disposti in modo da ottenere la migliore risposta sismica. Sarà inoltre possibile valutare qualitativamente l'energia elastica che penetrerà alla profondità voluta, fornendo utili indicazioni sul tipo migliore di fonte di energizzazione e sull'ordine di grandezza della sua magnitudo.

Durante l'elaborazione del modello crostale, l'esclusione dei contatti litologici che non presentano un coefficiente di riflessione teorico tale da produrre un segnale sismico rilevabile, limiterà le infinite possibili soluzioni del problema interpretativo.

La stima dei coefficienti di riflessione può essere effettuato secondo le seguenti metodologie:

- mediante l'utilizzo diretto di dati sperimentali (BURKE & FOUNTAIN, 1990; SELLAMI *et al.*, 1990);
- calcolando le costanti elastiche delle rocce che si ipotizza caratterizzino la sezione crostale attraversata dal profilo sismico (MAINPRICE, 1990; MAINPRICE *et al.*, 1990);
- mediante l'utilizzo di misure effettuate dai diversi autori su litotipi analoghi a quelli considerati per il profilo in questione (BURLINI *et al.*, 1991).

Lungo il tracciato del CROP-01, nel settore tra la Toscana e la Pianura Padana è stata presa in considerazione la sezione interpretativa rappresentata nella Fig.1 (da A. CASTELLARIN e R. CAPOZZI, com. pers.).



Legenda

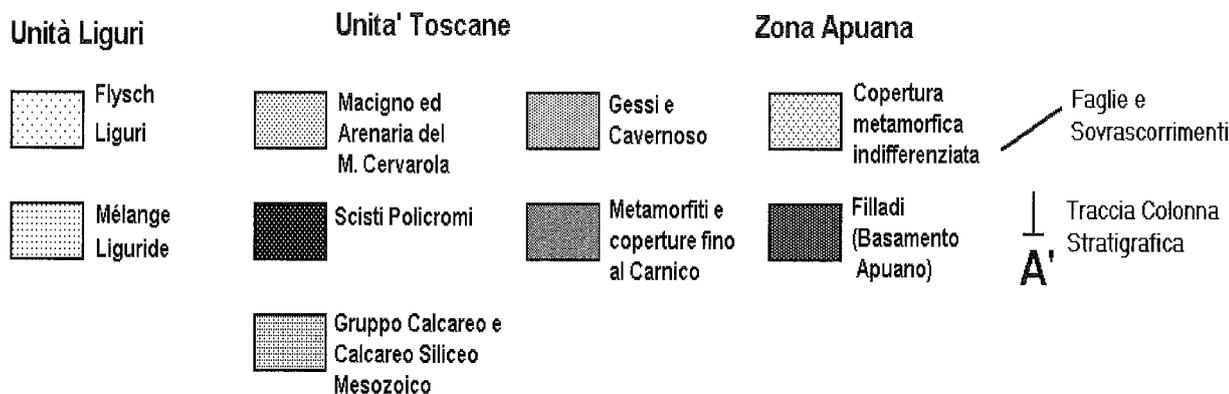


Fig. 1 - Sezione geologica semplificata dell'Appennino emiliano lungo il profilo CROP-01; la scala orizzontale è uguale a quella verticale. La traccia A-A' rappresenta la localizzazione alla quale si riferiscono il modello termico e reologico.
Da CASTELLARIN e collaboratori (Com. Pers.).

Dalla sezione geologica sono stati estratti due modelli geologici (Fig. 2); il secondo modello differisce dal primo in quanto alla base della Falda Toscana prevede la presenza delle successioni umbre. Sulla base dei suddetti modelli geologici sono stati estratti i due modelli litologici semplificati sulla base delle specificate proprietà elastiche, indispensabile per l'elaborazione del modello sismico.

Sono quindi state calcolate le impedenze acustiche in base ai dati di densità e di velocità delle onde elastiche misurate a 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 e 10 Kb, desunti dalla letteratura (BIRCH, 1960, 1961; BURKE & FOUNTAIN, 1990; BURLINI, 1990; CARMICHAEL, 1989; CHRISTENSEN, 1979; CHRISTENSEN 1989; JONES & NUR, 1982; NUR & SIMMONS, 1969; SELLAMI *et al.*, 1990) per le rocce che meglio rappresentano le seguenti unità litostratigrafiche:

Arenarie	<i>Macigno e le Arenarie del M.te Cervarola</i>
Argilliti	<i>Scisti policromi</i>
Calcare	<i>Gruppo Calcareo e Calcareo-Siliceo Mesozoico</i>
Gessi	<i>Gessi e Calcare Cavernoso</i>
Dolomie-Filladi	basamento della Falda Toscana
Calcare	successioni umbre (<i>Multilayer carbonatico</i>)
Arenarie	successioni umbre (<i>Marnoso arenacea</i>)
Evaporiti	successioni umbre (<i>Anidriti di Burano</i>)
Gabbri	crosta superiore

Assumendo che le formazioni abbiano spessori tali da essere risolvibili con prospezioni sismiche di tipo NVR e che i raggi siano incidenti perpendicolarmente rispetto alle interfacce viene calcolato il coefficiente di riflessione teorico dei principali contatti litologici (Fig. 2), alle pressioni di 0.5, 1, 2, e 4 Kb.

I contatti litologici considerati sono:

- 1) *Macigno e le Arenarie del M.te Cervarola-Scisti policromi*
- 2) *Scisti policromi-Gessi*
- 3) *Gessi-Gruppo Calcareo e Calcareo-Siliceo Mesozoico*
- 4) *Gruppo Calcareo e Calcareo-Siliceo Mesozoico-Gessi e Calcare Cavernoso*
- 5) *Gessi e Calcare Cavernoso-basamento della Falda Toscana (dolomie)*
- 6) *basamento della Falda Toscana (dolomie)-basamento della Falda Toscana (filladi)*
- 7) *basamento della Falda Toscana (filladi)-crosta superiore e, per il modello geologico che prevede le successioni umbre alla base della Falda Toscana, anche:*
- 8) *basamento della Falda Toscana (filladi)-Arenarie del M.te Cervarola*
- 9) *Marnoso Arenacea-Multilayer Carbonatico*
- 10) *Multilayer Carbonatico-Anidriti di Burano*
- 11) *Anidriti di Burano-arenarie*
- 12) *arenarie-crosta superiore.*

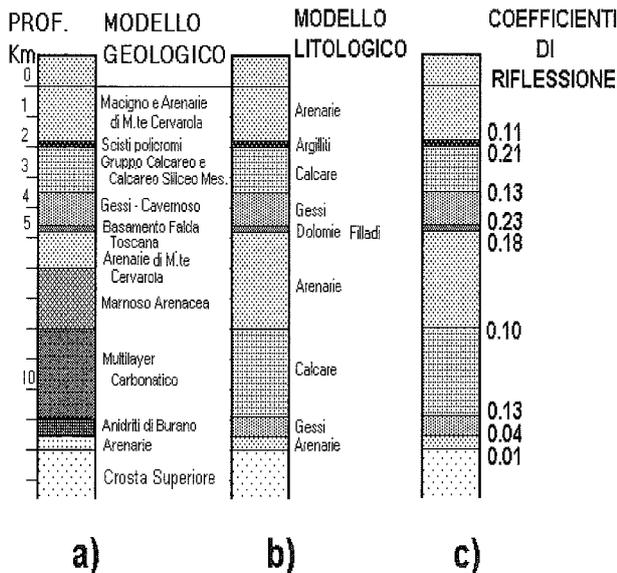
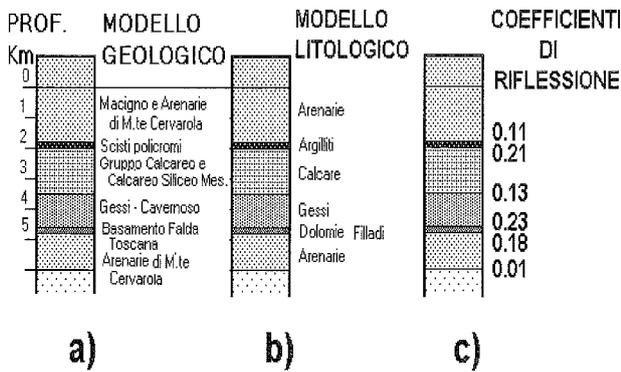


Fig. 2 - Le tre colonnine (sopra e sotto) rappresentano:
 a) interpretazione geologica (dalla Sez. A-A' in Fig. 1)
 b) modello litologico semplificato applicato al modello geologico
 c) coefficienti di riflessione calcolati per i contatti litologici della colonna b), in funzione di pressione e temperatura.
 I retini della colonna a) sono gli stessi della Fig. 1, mentre i retini delle altre tre colonne sono solo indicativi, per un confronto immediato.
 Le tre colonnine sotto rappresentano un modello geologico alternativo, che alla base della Falda Toscana prevede la presenza delle successioni umbre.

Non si sa se le filladi sono sempre sovrastate dai *Gessi-Calcare Cavernoso*. I coefficienti di riflessione calcolati per le diverse interfacce sono riportati in Tab. 2a-b.

CONCLUSIONI

Secondo JONES & NUR (1982) le interfacce con coefficienti di riflettività superiori a 0.05 costituiscono riflettori rilevabili nelle sezioni NVR. Tuttavia, in casi fortunati, si possono rilevare anche interfacce con coefficiente di riflettività di 0.02 (SELLAMI *et al.*, 1990).

Pertanto, sul modello calcolato, si possono fare le seguenti osservazioni:

- il contatto tra filladi e Formazione dei *Marmi e Grezzoni* (basamento della Falda Toscana) risulterebbe trasparente per il valore quasi nullo del coefficiente di riflessione. Questo nell'ipotesi di incidenza normale alla foliazione delle filladi. Se le filladi fossero fortemente

Tab. 2a - Velocità delle onde P (V_p), impedenze acustiche (Z) alle pressioni di 0.5, 1, 2 e 4 Kb, densità e derivate della densità rispetto la pressione e la temperatura dei litotipi presenti sotto il profilo sismico (vedere testo) calcolati come medie di valori riportati in letteratura (BIRCH, 1960, 1961; BURKE & FOUNTAIN, 1990; BURLINI, 1990; CARMICHAEL, 1989; CHRISTENSEN, 1979; CHRISTENSEN 1989; JONES & NUR, 1982; NUR & SIMMONS, 1969; SELLAMI *et al.*, 1990). Le densità usate per il calcolo dell'impedenza acustica (Z) sono le densità alla pressione di 0.1, 0.5, 1, 2 e 4 Kb, e alla temperatura relativa al punto dove è considerato il contatto, valutata sulla base del profilo termico riportato in BURLINI, 1993 (questo volume). Per cui per lo stesso litotipo sono riportate più impedenze acustiche, relative alla temperatura riportata tra parentesi di fianco al nome del litotipo.

Litotipo	$V_p(0.1)$	$V_p(0.5)$	$V_p(1)$	$V_p(2)$	$V_p(4)$	Anisotr. %	Dens. g/cc	dp/dP g/cc*/Kb	dp/dT g/cc*/K
	Km/s	Km/s	Km/s	Km/s	Km/s				
1) EVAPORITI		4.73	5.06	5.16	5.28	2.60	2.40	4.0E-03	-5.0E-05
2) DOLOMIE		6.16	6.46	6.70	6.84	3.40	2.85	4.0E-03	-4.5E-05
3) CALCARI	5.44	5.76	5.84	5.97	6.35	1.90	2.70	4.0E-03	-5.0E-05
4) ARGILLITI			4.58	4.8	5.07		2.25	4.4E-03	-5.0E-05
5) ARENARIE	4.15	4.78	4.87	5.01	5.14	3.04	2.66	4.0E-03	-5.0E-05
6) FILLADI			6.45	6.61	6.74	12.35	2.91	4.2E-03	-4.8E-05
7) GABBRO		4.5	4.75	5	5.25		2.66	4.2E-03	-4.8E-05

Litotipo	(T °C)	$Z(0.1 \text{ Kb})$	$Z(0.5 \text{ Kb})$	$Z(1 \text{ Kb})$	$Z(2 \text{ Kb})$	$Z(4 \text{ Kb})$
ARENARIE	(106)	11.0	12.7	12.9	13.3	13.7
ARGILLITI	(110)			10.3	10.8	11.5
CALCARI	(110)	14.7	16.6	15.7	16.1	17.2
CALCARI	(165)	14.7	16.6	15.7	16.1	17.2
EVAPORITI	(165)			11.3	12.1	12.4
EVAPORITI	(225)			11.3	12.1	12.4
DOLOMIE	(225)			19.5	19.0	19.5
FILLADI	(225)			18.7	19.2	19.6
ARENARIE	(225)	11.0	12.7	12.9	13.3	13.7
ARENARIE	(270)	11.0	12.7	12.9	13.3	13.7
GABBRO	(270)		12.0	12.6	13.3	14.0
ARENARIE	(335)	11.0	12.7	12.9	13.3	13.7
CALCARI	(335)	14.6	16.5	15.7	16.1	17.1
CALCARI	(437)	14.6	16.5	15.7	16.0	17.1
EVAPORITI	(437)			11.3	12.1	12.3
EVAPORITI	(478)			11.2	12.1	12.3
ARENARIE	(475)	11.0	12.6	12.8	13.2	13.6
ARENARIE	(510)	10.9	12.6	12.8	13.2	13.6
GABBRO	(510)		12.0	12.6	13.3	14.0

Tab. 2b - Coefficienti di riflessione (R) per incidenza normale, calcolati in base alla Tab. 2a, alle pressioni di 0.5, 1, 2 e 4 Kb per i possibili riflettori presenti sotto il profilo CROP-01.

Contatto	$R(0.5 \text{ Kb})$	$R(1 \text{ Kb})$	$R(2 \text{ Kb})$	$R(4 \text{ Kb})$
ARENARIE - ARGILLITI		0.11	0.10	0.09
ARGILLITI - CALCARI		0.21	0.20	0.20
CALCARI - EVAPORITI	0.19	0.13	0.13	0.15
EVAPORITI - DOLOMIE		0.23	0.21	0.21
DOLOMIE - FILLADI		0.02	0.00	0.00
FILLADI - ARENARIE		0.18	0.18	0.18
ARENARIE - GABBRO	0.03	0.01	0.00	0.01
ARENARIE - CALCARI	0.13	0.10	0.10	0.11
CALCARI - EVAPORITI	0.19	0.13	0.13	0.15
EVAPORITI - ARENARIE	0.06	0.03	0.04	0.04
ARENARIE - GABBRO	0.03	0.01	0.01	0.01

inclinate, allora la velocità di propagazione delle onde elastiche aumenterebbe di oltre il 10% (BURLINI & FOUNTAIN, 1993), aumentando il valore del coefficiente di riflessione;

- tutti i restanti contatti litologici possono essere potenziali riflettori in quanto sono caratterizzati da coefficienti di riflessione maggiori di 0.05, tranne il contatto con la crosta superiore granitica, in quanto il coefficiente di riflessione è piuttosto basso. I contatti tra *Scisti policromi* e il *Macigno* tra i primi ed il *Gruppo Calcareo e Calcareo Siliceo Mesozoico*, o tra quest'ultimo e la Formazione dei *Gessi* e del *Calcare Cavernoso* presentano coefficienti di riflessione abbastanza elevati, rendendoli potenziali 'markers' sismici. Poiché lo spessore degli *Scisti policromi* è piuttosto limitato, potrebbe accadere che riflessioni provenienti dal letto e dal tetto di questa formazione si sommino, rendendo gli *Scisti policromi* un ottimo 'marker'. Infine è da sottolineare l'altissimo coefficiente di riflessione calcolato per il contatto tra *Gessi* e *Calcare Cavernoso* con il sottostante basamento della Falda Toscana (0.23), oppure, nell'esem-

pio relativo al modello geologico che prevede le successioni ombre alla base della Falda Toscana, il contatto tra *Multilayer Carbonatico* ed *Anidriti di Burano* (0.13).

DISCUSSIONE

Il modello presentato in questo lavoro è stato tarato sui valori di velocità delle onde di compressione e sulle densità reperibili in letteratura. Senza dubbio la determinazione sperimentale delle proprietà elastiche e della densità dei litotipi presenti lungo il tracciato del CROP-01 permetterebbe una più sicura caratterizzazione delle proprietà sismiche degli ipotetici riflettori. È da porre particolare attenzione sul fatto che le proprietà sismiche di una roccia variano enormemente con la porosità e con l'eventuale presenza di fluidi.

Una determinazione sperimentale della velocità in funzione della pressione dei pori sembra attualmente la via migliore per avvicinarsi alle condizioni crostali. Inoltre poiché il settore investigato dal profilo CROP-01 è caratterizzato da alto flusso di calore, sarebbe utile tenere conto anche dell'influenza che l'aumento di temperatura ha sulle proprietà elastiche effettuando misure di laboratorio a temperature variabili.

L'esame sperimentale è sicuramente il metodo più economico e rapido per definire le proprietà elastiche in funzione della composizione modale, della porosità e della temperatura, permettendo di valutare con maggior sicurezza quale sia il comportamento dell'ammasso roccioso ad una data pressione, temperatura e pressione dei fluidi. Sarebbe così possibile verificare la natura sismica dei potenziali riflettori, fornendo vincoli più corretti all'interpretazione sismica, ed indicazioni utili per l'interpretazione geologica dei profili.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano Alberto Castellarin e Rossella Capozzi per averci fornito le sezioni geologiche interpretate del tracciato del CROP-01 e per la costruttiva revisione del manoscritto. Inoltre A. Boriani, R. Cassinis e A. Montrasio per le costruttive discussioni.

BIBLIOGRAFIA

BIRCH F. (1960) - *The velocity of compressional waves in rocks to 10 Kilobars, part 1*. J. Geophys. Res., **65**, 1083-1102.

BIRCH F. (1961) - *The velocity of compressional waves in rocks to 10 Kilobars, part 2*. J. Geophys. Res., **66**, 2199-2224.

BURKE M.M. & FOUNTAIN D.M. (1990) - *Seismic properties of rocks from an exposure of extended continental crust-new*

laboratory measurements from the Ivrea Zone. Tectonophysics, **182**, 119-146.

BURLINI L. (1990) - *Variazioni delle proprietà sismiche delle metapeliti di medio-alto grado in relazione alle caratteristiche petrologiche e microstrutturali. L'esempio dell'Ivrea Verbano e Serie dei Laghi (N-Italia)*. Tesi di Dottorato, Milano. pp. 97.

BURLINI L. (1993) - *Deformazione sperimentale e la reologia della litosfera*, (Questo Vol.).

BURLINI L. & FOUNTAIN D.M. (1993) - *Seismic Anisotropy of Metapelites from the Ivrea-Verbanese Zone and Serie dei Laghi (N-Italy)*. Earth and Planet. Sci. Lett., in stampa.

BURLINI L., MUSACCHIO G. & ZAPPONE A. (1991) - *Contributo delle analisi di laboratorio alla determinazione delle proprietà elastiche delle rocce del profilo CROP 03*. Studi Geologici Camerti, Vol. Speciale **1**, 27-32.

CARMICHAEL R.S. (1989) - *Practical handbook of physical properties of rocks and minerals*. CRC Press, Boca-Raton. pp. 427.

CHRISTENSEN N. (1979) - *Compressional wave velocity in rocks at high temperature and pressure. Critical thermal gradients and crustal low-velocity zones*. J. Geophys. Res., **84**, 6849-6857.

CHRISTENSEN N. (1989) - *Pore pressure, seismic velocities, and crustal structure*. Geol. Soc. Am. Mem., **172**, 783-798.

JONES T. & NUR A. (1982) - *Seismic velocity and anisotropy in mylonites and the reflectivity of deep crustal fault zones*. Geology, **10**, 260-263.

KERN H. & FAKHIMI M. (1975) - *Effect of fabric anisotropy on compressional wave propagation in various metamorphic rocks for the range 20-700 °C at 2 Kbars*. Tectonophysics, **28**, 227-244.

MAINPRICE D. (1990) - *A FORTRAN program to calculate seismic anisotropy from the lattice preferred orientation of minerals*. Computer & Geosciences, **16**, 385-393.

MAINPRICE D., CASEY M. & SCHMID S. (1990) - *The seismic properties of Alpine calcite and quartz mylonites determined from the orientation distribution function*. Mem. Soc. Geol. Fr., **156**, 85-95.

NUR A. & SIMMONS G. (1969) - *The effect of saturation on velocity in low porosity rocks*. Earth Pl. Sci. Lett., **7**, 183-193.

PROS Z. (1977) - *Investigation of anisotropy of elastic properties on rocks of spherical samples at high hydrostatic pressures*. In: "High pressure and temperature studies of physical properties of rocks and minerals", Naukova Dumka, Kiev 1977, pp. 56.

SELLAMI S., BARBLAN F., MAYERAT A.M., PFIFFNER O., RISNES K., WAGNER J.J. (1990) - *Compressional wave velocities of samples from the NFP-20 East seismic reflection profile*. Soc. Geol. Ital., **1**, 77-84.

