

ALCUNE CONSIDERAZIONI SULLA SISMOTETTONICA DELL'APPENNINO NORD-OCCIDENTALE RICAIVATE DALL'ANALISI DEI MECCANISMI FOCALI

ABSTRACT

Fault plane solutions for 50 earthquakes which occurred in the area of the North-Western Apennines between 1971 and 1991 have been determined. Stress field information given by these data are discussed in relation to previous structural reconstructions.

The results confirm the transpressive and compressive character of focal solutions along the Apennines external border, whereas along the main-divide and in the inner sector solutions outline significant variation of the stress regime with depth: distension or transtension predominates in the shallower layers, compression in the deepest regime.

INTRODUZIONE

L'Appennino Settentrionale è, come noto, un'area di complessa manifestazione sismica che può essere messa in relazione con i complicati processi di fratturazione che caratterizzano questo settore sede di forti anisotropie strutturali.

L'attività sismica dell'Appennino nord-occidentale e le sue caratteristiche sono ormai ben note anche grazie ad un notevole miglioramento dovuto all'installazione, effettuata negli ultimi anni, di reti mobili ed, in particolare, di quattro stazioni digitali facenti capo al Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Genova (DISTER). Il loro impiego, in aggiunta alla già esistente rete ligure-piemontese, ha consentito una migliore e più affidabile localizzazione anche a livello locale.

La distribuzione della sismicità (Fig. 1) mostra che gli eventi di maggiore energia si concentrano nel settore nord-orientale mentre le aree sud-occidentali quali la Lunigiana-Garfagnana ed il Borgotaresse sono interessate da livelli più bassi dell'energia sismica (TOMASELLI *et al.*, 1993; AMATO & SELVAGGI, 1991). Inoltre, mentre nella zona del Borgotaresse prevale una attività tipo sequenza sismica, sia lungo il margine appenninico sepolto che nella zona tirrenica l'attività appare più dispersa.

Lo studio dei meccanismi focali ottenuti per i terremoti verificatisi nell'area in esame può evidenziare rapporti esistenti tra la sismicità e le strutture tettoniche e può, inoltre, fornire preziose informazioni sulla natura di tali strutture e sulle direzioni preferenziali di movimento.

In questo lavoro viene presentata una analisi dettagliata delle soluzioni focali ottenute per i principali eventi sismici dell'Appennino Nord Occidentale ed una loro interpretazione.

DATI

I dati utilizzati sono stati estratti da un database di localizzazioni e soluzioni focali per l'Italia Settentrionale, esistente presso il DISTER di Genova, imponendo come limiti una magnitudo superiore a 2.5 e un numero di polarità superiore a 15 al fine di garantire una buona qualità degli eventi (Tab. 1).

Gli eventi analizzati sono avvenuti tra il 1971 ed il 1991 ma le soluzioni focali dei terremoti a partire dal 1985 possono essere considerate le più affidabili in quanto i dati bibliografici sono stati integrati con letture di tracce digitali registrate dalle reti gestite dall'LDG (Parigi), dall'ETH (Zurigo) e dal DISTER (Genova).

Le localizzazioni contenute nel database sono eseguite con le procedure standard di tipo Hypo; solo nei casi di soluzioni ipocentrali particolarmente instabili sono state considerate localizzazioni a profondità imposta, tratte dalla bibliografia, scegliendo le soluzioni che presentavano errori minori.

I valori degli angoli di partenza dei raggi dalla sorgente sono calcolati attraverso tecniche di *ray-tracing* sulla base di modelli di velocità delle onde P nella crosta dato che l'angolo di partenza dei raggi alla sorgente risulta uno dei parametri più critici nel calcolo dei meccanismi focali (DEICHMANN *et al.*, 1991). Tali modelli, anche se semplificati, prevedono una variazione sia orizzontale che verticale della velocità delle onde P ottenuta tramite l'introduzione di gradienti di velocità e di superfici di discontinuità non necessariamente orizzontali. Nel caso specifico, si tratta di modelli di tipo crosta-mantello attraverso i quali si è ricostruita per differenti settori azimutali la topografia della Moho sulla base di informazioni relative alla struttura crostale reperibili in bibliografia.

Il calcolo delle soluzioni focali è di tipo sistematico facendo riferimento ad un modello a doppia coppia di forze sulla base del cosiddetto metodo dei primi arrivi utilizzando il programma FPFIT (REASENBERG & OPPENHEIMER, 1985). Tale procedura di calcolo automatico presenta il vantaggio di mostrare oltre alla soluzione di minimo errore riportata in Fig. 2 nel cerchio più grande, anche quelle relative ad un intervallo di errore attorno al valore minimo, rappresentate nel cerchio più piccolo dalle posizioni delle coppie P e T, che possono risultare preferibili alla luce di considerazioni sismotettoniche (nel caso specifico del terremoto dell'11 Aprile 1990 le soluzioni relative ad un intervallo di errore attorno al valore minimo sono 75).

Per ogni meccanismo viene riportata la localizzazione (vedi Fig. 2), come risultato del programma HYPO-ELLIPSE, e una serie di parametri che individuano il tipo

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Genova

SISMICITA' 1982-1993

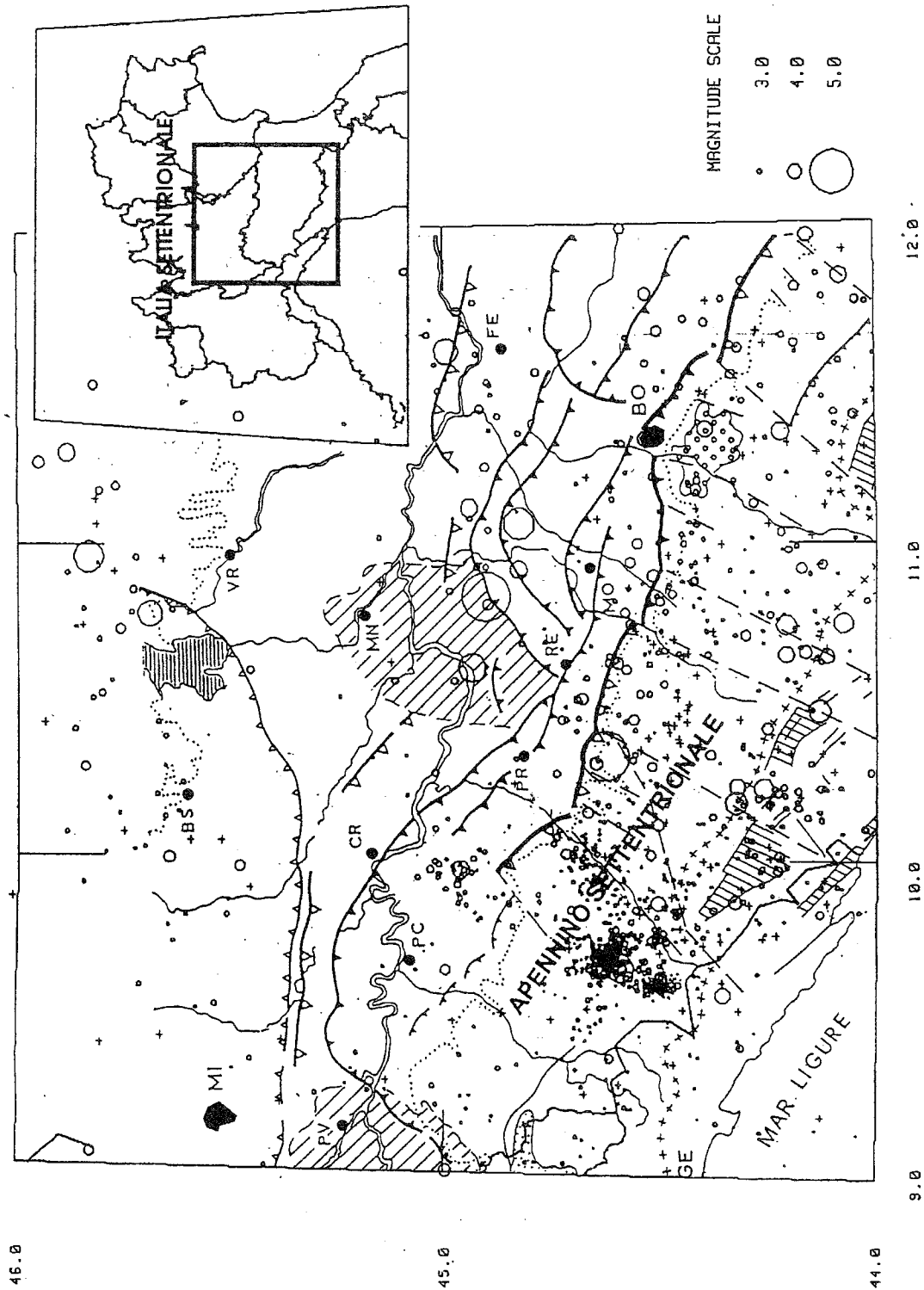


Fig.1 - Sismicità dell' area considerata, periodo 1982-1993, riportata sulla carta tettonica elaborata da CASTELLARIN *et al.* (1986). Per la legenda della carta geologica si fa riferimento a quella riportata in Fig. 3.

Tab. 1 - Elenco dei terremoti presi in esame nel presente lavoro; sono riportati il numero d'ordine dell'evento (con riferimento alla Fig. 3 per gli eventi tipo a) ed alla Fig. 4 per gli eventi tipo b), la data, la localizzazione, la magnitudo, la posizione degli assi P e T della soluzione considerata (direzione-immersione), la posizione dei due piani nodali (direzione della retta di massima pendenza-inclinazione) e il numero delle polarità utilizzate per la costruzione del meccanismo focale.

Per i piani nodali che presentano un * è riportata la direzione del piano considerato e non la direzione della retta di massima pendenza dello stesso.

La mancanza di informazioni sulla posizione dei piani nodali e sul numero di polarità utilizzate indica soluzione focali tratte dalla bibliografia non riportanti detti valori.

EV.	DATA	LAT.	LONG.	PROF.	MAG.	ASSE P	ASSE T	PIANO I	PIANO II	N.P.
1a	19820311 08.04	44.175	11.199	10.0	4.2	26/39	140/20	170/80	272/38	13
2a	19820726 15.07	44.159	10.785	29.0	4.3	295/68	184/07	170/55	23/36	18
3a	19820918 21.59	44.190	11.615	9.0	3.5	198/04	100/42	230/65	338/51	15
4a	19821024 11.40	44.482	9.585	5.0	3.7	321/80	211/03	205/50	40/43	15
5a	19821024 12.04	44.477	9.586	4.0	3.7	262/04	355/18	220/80	126/68	16
6a	19850808 19.05	44.605	9.672	1.3	3.7	138/05	45/18	180/75	275/68	13
7a	19850816 19.39	44.618	9.715	7.8	4.0	160/75	318/14	130/30	321/58	23
8a	19860512 13.03	44.604	9.692	7.3	4.0	140/17	240/23	100/85	7/57	25
9a	1986100119.53	44.330	10.220	9.5	4.4	177/46	274/06	305/65	55/40	41
10a	19870210 21.20	44.261	10.284	9.6	4.3	94/37	196/11	230/75	332/47	28
11a	19870424 02.30	44.861	10.774	7.7	4.7	354/11	258/24	130/60	35/80	39
12a	19870524 10.23	45.635	10.827	9.3	4.5	84/82	203/03	210/50	15/37	27
13a	19880208 11.24	44.175	10.606	15.0	4.3	250/39	139/16	110/75	3/38	39
14a	19880208 13.36	44.189	10.581	11.4	4.1	225/61	121/04	100/55	325/40	39
15a	19880208 14.08	44.170	10.523	8.8	3.9	85/61	194/08	215/60	345/38	21
16a	19880816 07.35	44.490	9.868	4.3	4.0	92/64	194/03	215/55	350/41	21
17a	19880830 17.16	44.316	10.352	10.5	4.1	252/53	137/11	348/34	115/65	16
18a	19891003 09.41	44.514	10.113	7.6	3.8	224/110	108/55	12/34	245/65	36
19a	19891210 03.15	44.155	11.848	16.2	3.7	197/32	82/24	314/37	50/85	19
20a	19900411 21.38	44.711	9.999	1.7	3.7	252/53	157/02	6/47	130/55	30
21a	19900619 01.18	44.014	10.065	10.0	2.5	104/34	345/28	315/85	2219/37	17
22a	19900917 05.56	44.255	10.086	68.0	3.0	179/01	85/55	205/55	329/47	18
23a	19900917 07.56	44.254	10.085	72.0	3.0	180/04	85/40	218/65	326/50	18
24a	19911031 09.31	44.965	9.867	1.0	4.2	8/05	100/09	234/78	325/85	42
1b	19710715 01.33	44.836	10.222	10.0	5.3	354/38	194/45	115/10	5/86	86
2b	19721025 21.56	44.469	9.860	20.0	5.0	318/21	210/32	90/45	353/82	53
3b	19740415 21.49	44.631	9.546	5.0	4.3	162/09	250/03	295/85	26/79	25
4b	19750111 15.54	45.648	10.608	12.0	4.0	130/14	242/58	16/66 *	244/41 *	---
5b	19750404 09.10	44.082	10.940	5.0	4.2	177/0	207/66	95/50	316/45	24
6b	19751116 13.04	44.666	9.437	5.0	4.6	275/13	182/08	140/85	48/69	59
7b	19760822 02.49	44.667	9.519	8.0	4.3	165/60	293/18	85/30	309/65	39
8b	19761213 05.24	45.920	10.830	2.0	4.5	122/26	222/22	173/90 *	262/55 *	---
9b	19770627 12.33	44.324	11.457	10.0	4.0	308/59	74/13	225/35	91/61	30
10b	19781225 22.53	45.004	11.182	5.0	4.0	322/00	230/47	110/55	354/55	31
11b	19791117 20.53	45.762	9.887	7.0	4.1	113/31	7/18	235/50	331/82	32
12b	19800214 00.09	44.380	11.440	12.0	3.0	304/13	158/68	110/30	312/59	19
13b	19800607 18.35	44.080	10.660	5.0	4.0	175/11	270/25	135/80	40/57	34
14b	19800607 18.35	44.031	10.597	5.0	4.3	326/230	222/23	95/50	5/90	57
15b	19800621 09.47	44.681	10.342	5.0	3.7	144/60	38/06	245/45	16/54	19
16b	19801001 16.36	44.170	10.183	7.0	3.3	58/15	166/45	30/70	276/40	15
17b	19801028 09.43	44.155	11.750	18.0	3.9	137/05	237/63	115/55	340/41	24
18b	19801223 12.01	44.775	9.777	17.0	5.0	181/04	90/10	---	---	---
19b	19801223 12.01	44.835	9.741	20.0	4.6	337/11	107/66	180/35	324/57	51
20b	19810526 09.27	44.838	10.696	7.0	3.9	57/25	162/23	200/90	290/46	20
21b	19810706 09.38	44.158	11.111	10.0	3.7	250/82	70/04	70/50	250/36	15
22b	19810710 16.11	44.097	11.114	10.0	3.8	270/88	85/00	265/45	85/48	17
23b	19811017 23.55	44.052	11.202	5.0	3.4	241/70	15/10	180/35	25/54	14
24b	19811218 14.33	44.416	11.116	13.0	3.5	346/70	106/06	120/55	268/36	16

di soluzione focale e la qualità della stessa:

STRIKE - direzione della retta di massima pendenza di uno dei due piani focali (azimuth in gradi a partire dal Nord);

DIP - inclinazione (in gradi dall'orizzontale);

RAKE - (in gradi: 0°= trascorrente sinistra, 90°= inversa, +180°= trascorrente destra, -90°= diretta);

Fj - valore della funzione che esprime l'accordo fra polarità osservate e teoriche (Fj=0.0 rappresenta un perfetto accordo);

NP - numero polarità osservate;

AVWT - valore medio dei pesi attribuiti alle osservazioni;

STDR - indice della distribuzione azimuthale dei dati sulla sfera focale relativamente al "pattern" di radiazione delle onde P (STDR < 0.5 significa che un numero piuttosto grande di dati è posto in prossimità dei piani nodali);

STR, DIP, RAK - intervalli di variazione di strike, dip e rake;

QF - qualità della soluzione (Fj < 0.025 A, 0.025 < Fj < 0.1 B, Fj > 0.1 C).

RISULTATI

In Fig. 3 sono riportate le soluzioni focali relative ai terremoti analizzati a partire dal 1982 sovrapposte alla carta strutturale di CASTELLARIN *et al.* (1986).

In un quadro che vede la predominanza di soluzioni focali a carattere trascorrente possono essere fatte alcune distinzioni sulla base delle diverse componenti distensiva e compressiva e sulla orientazione degli assi. L'Appennino interno (zona dei graben della Lunigiana-Garfagnana a SW dello spartiacque) è caratterizzato da soluzioni focali a componente distensiva; in particolare i terremoti più superficiali presentano assi P orientati prevalentemente in direzione appenninica, WNW-ESE e NW-SE. Tale direzione viene mantenuta più a nord nella zona del Borgotaresse ove le soluzioni sono tipicamente trascorrenti, e nella zona del Mar Ligure, come mostra la soluzione di tipo distensivo (n° 21 in Fig. 3) che bene si accorda con le faglie dirette cartografate nel modello strutturale d'Italia (SCANDONE, 1991). Fa eccezione a questo andamento l'asse P relativo al terremoto n° 22 (Fig. 3) che, a differenza degli altri eventi relativi ad una sismicità superficiale se non addirittura pellicolare, è posto a 62 km

900411 2138 33.71 44N42.67 9E59.95 1.70 3.70 41 89117.0 .94 3.1 10.3 D
 130 55-130 .19 30 3.73 .45 .00 25 5 10 CIB
 STRIKE DIP RAKE Fj NP AVWT STDR STR DIP RAK QF

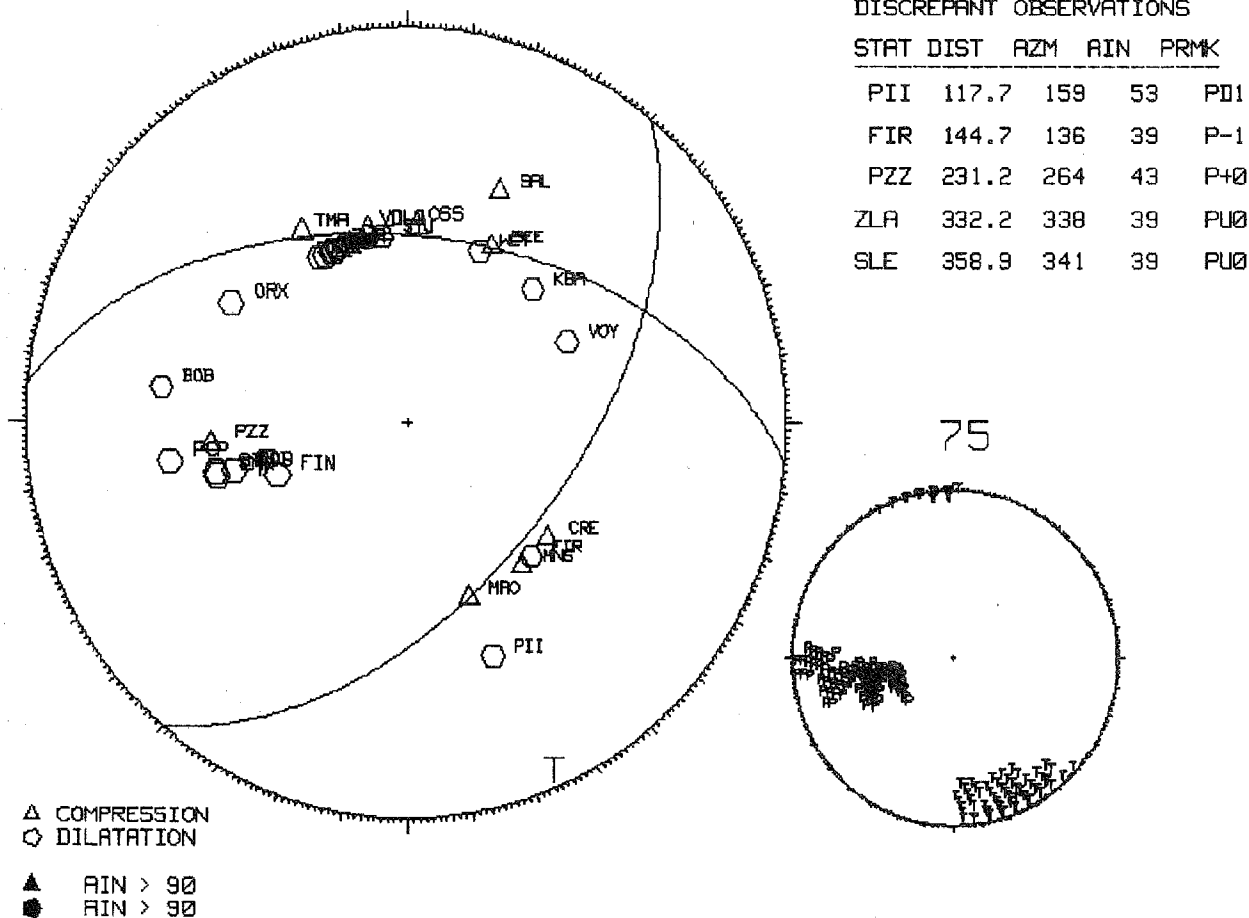


Fig. 2 - Esempio di soluzione focale: terremoto dell' 11 Aprile 1990.

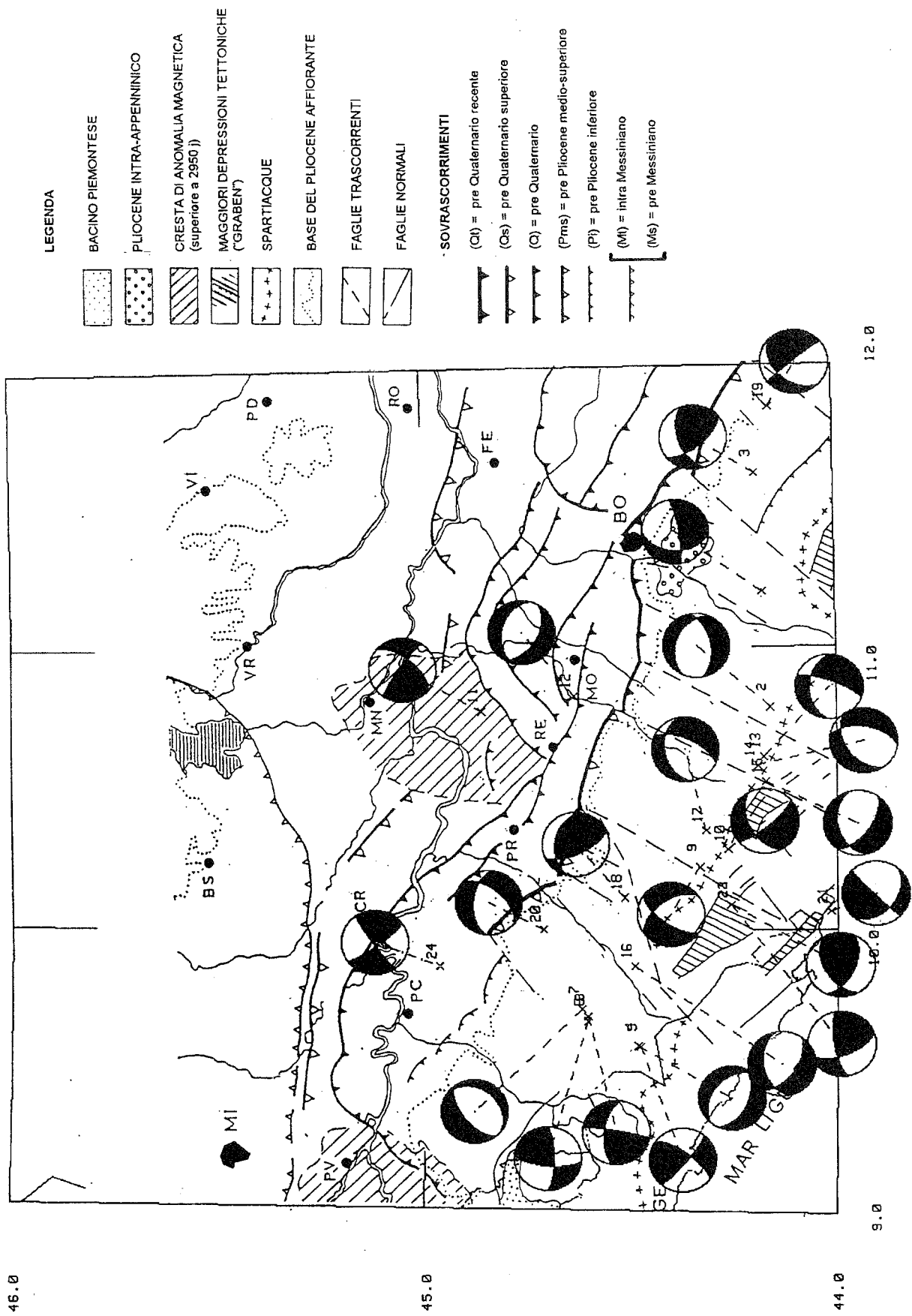


Fig. 3 - Soluzioni focali dei terremoti analizzati per il periodo 1982-1991. La base strutturale è quella di Figura 1.

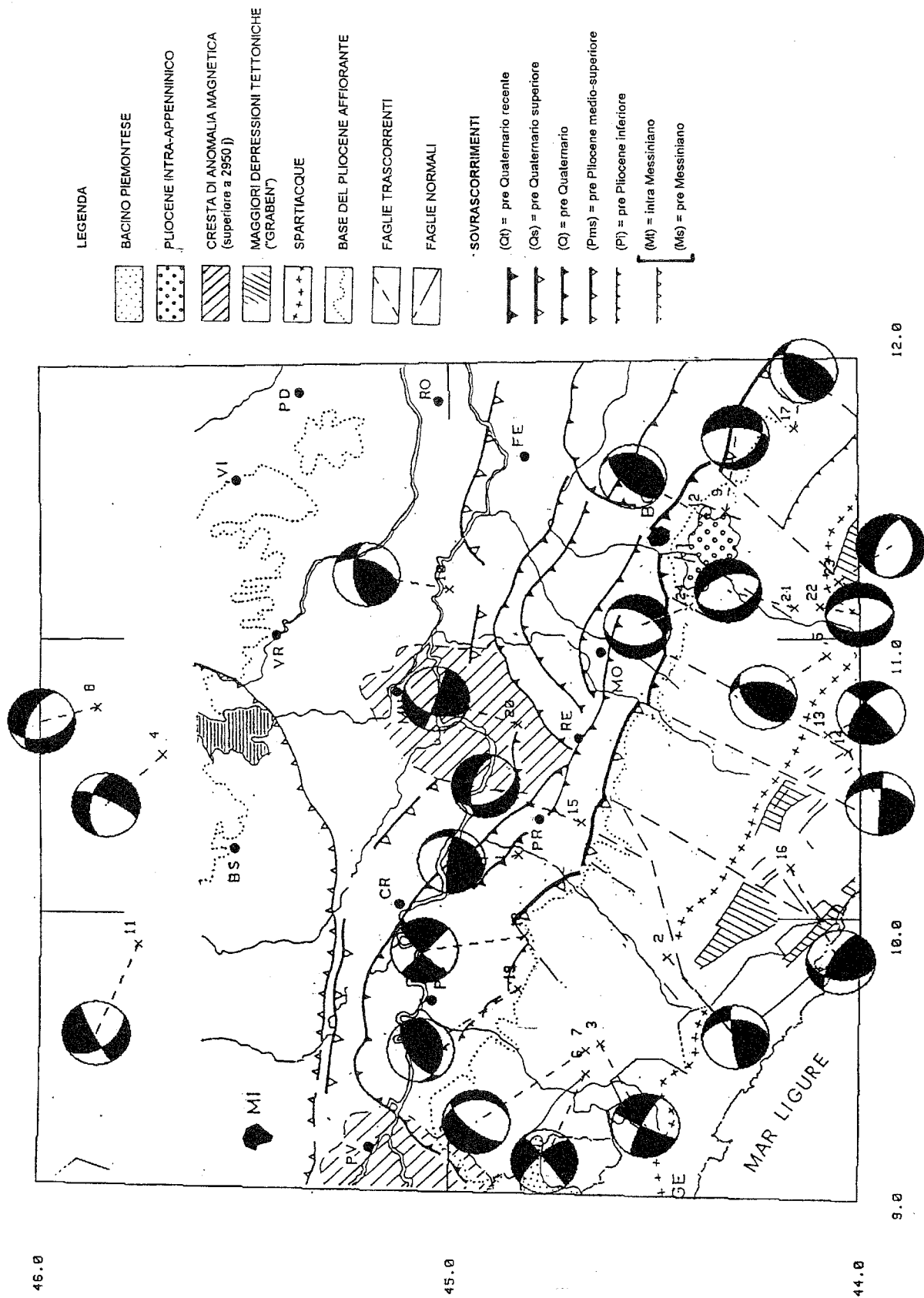


Fig. 4 - Soluzioni focali dei terremoti analizzati per il periodo 1971-1981. La base strutturale è quella di Figura 1.

di profondità (TOMASELLI *et al.*, 1993). Le condizioni si complicano passando alla zona di crinale e verso l'esterno della catena. Compaiono assi di massima compressione in direzione NNE-SSW e NE-SW antiappenninica e meccanismi a componente inversa (n° 11, 24 in Fig. 3). Si passa, in generale, ad una situazione meno chiara da mettere in relazione da un lato con una minore attendibilità delle soluzioni a causa della mancanza, in alcune zone, di informazioni sismologiche di dettaglio e, dall'altro, con una maggiore complicazione strutturale. In qualche caso si è notato un soddisfacente accordo fra soluzione focale e strutture: ne è un esempio il meccanismo focale dell'evento n° 20 (Fig. 3) di tipo diretto con movimento di trascorrenza sinistra lungo il piano orientato NE-SW che si accorda piuttosto bene con la linea del Taro.

Un quadro piuttosto disperso e irregolare si ha anche passando a considerare le soluzioni focali dei terremoti precedenti il 1982 (Fig. 4). In un quadro di maggiore variabilità gli assi P si mantengono in direzione appenninica sia nella zona del Borgotarese che nella zona a SW del crinale.

Decisamente disomogenea è la situazione verso l'Appennino sepolto. Si aggiungono, infatti, in questo caso, una maggiore incompletezza nei dati e, in alcuni casi, grandi difficoltà interpretative. Ne è un esempio la soluzione focale del terremoto avvenuto nel 1971 (n° 1 in Fig. 4) in prossimità di Parma in cui l'estrema dispersione dei dati, per la quasi totalità derivanti da bollettini sismici, è la causa di una soluzione molto incerta caratterizzata da una discreta variabilità nella

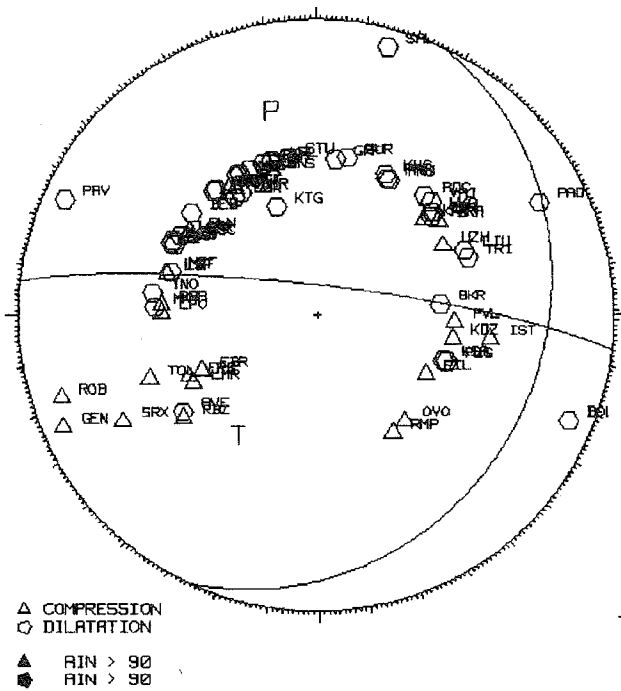
posizione degli assi e da un elevato numero di osservazioni discrepanti (Fig. 5).

Per meglio verificare la direzione delle componenti P e T con la profondità sono state costruite due sezioni della sismicità nelle due direzioni AA' e BB', all'incirca ortogonali alle strutture appenniniche.

Lungo la sezione AA' è proiettata una banda di sismicità pari a 30 km (Fig. 6a). Vi è rappresentata la sismicità a partire dal 1982 con errore sulla verticale inferiore a 10 km. Gli eventi numerati sono quelli per i quali è stata calcolata la soluzione focale che viene rappresentata in sezione verticale. I movimenti verticali, gli unici a poter essere rappresentati sul piano della sezione, sono stati riportati soltanto quando sono prevalenti su quelli trascorrenti (come soluzioni trascorrenti sono state considerate quelle in cui il valore del *Rake* è compreso tra -45° e $+45^\circ$, nel caso di trascorrente sinistra, e tra $+135^\circ$ e $+225^\circ$, nel caso di trascorrente destra). Si può notare la prevalenza di meccanismi di trascorrenza con assi P vicini all'orizzontale, più marcatamente distensive sono le soluzioni degli eventi n° 20, 7, 16 (Fig. 6a) con corrispondenti assi P fortemente inclinati. Tali soluzioni sono da mettere in relazione probabilmente con la superficialità degli eventi di modesta energia e, quindi, a situazioni tettoniche particolari e locali.

Lungo la sezione BB' è riportata la sismicità all'interno di una banda di 45 km (Fig. 6b). È presente una distribuzione dell'attività sismica anche in profondità, come evidenziato da studi di dettaglio condotti nella zona (TOMASELLI *et al.*, 1993; AMATO & SELVAGGI, 1991).

71 715 133 44N50.16 10E13.32 10.00 5.30
115 25 20 .19 66 3.92 .66 .20 20 35 20 CIB



DISCREPANT OBSERVATIONS

STAT	DIST	AZM	AIN	PRMK
KRA	931.7	48	40	EPU0
BRA	643.5	52	43	EPU0
UZH	1010.9	61	40	EPU0
BKR	2696.8	85	34	EPD0
PLG	1188.3	110	38	EPD0
KSA	2507.9	110	37	EPD0
AVE	1928.8	234	46	EPD0
MNY	356.8	273	45	EPD0
TNO	200.0	278	46	EPD0
LSF	694.1	286	43	EPU0
SSC	605.1	288	43	EPU0
GAR	615.0	302	42	EPU0
FLN	858.9	304	42	EPU0
DOU	721.0	326	43	EPU0
UCC	793.4	328	42	EPU0

615

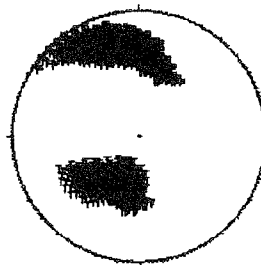


Fig. 5 - Soluzione focale del 15 Luglio 1971.

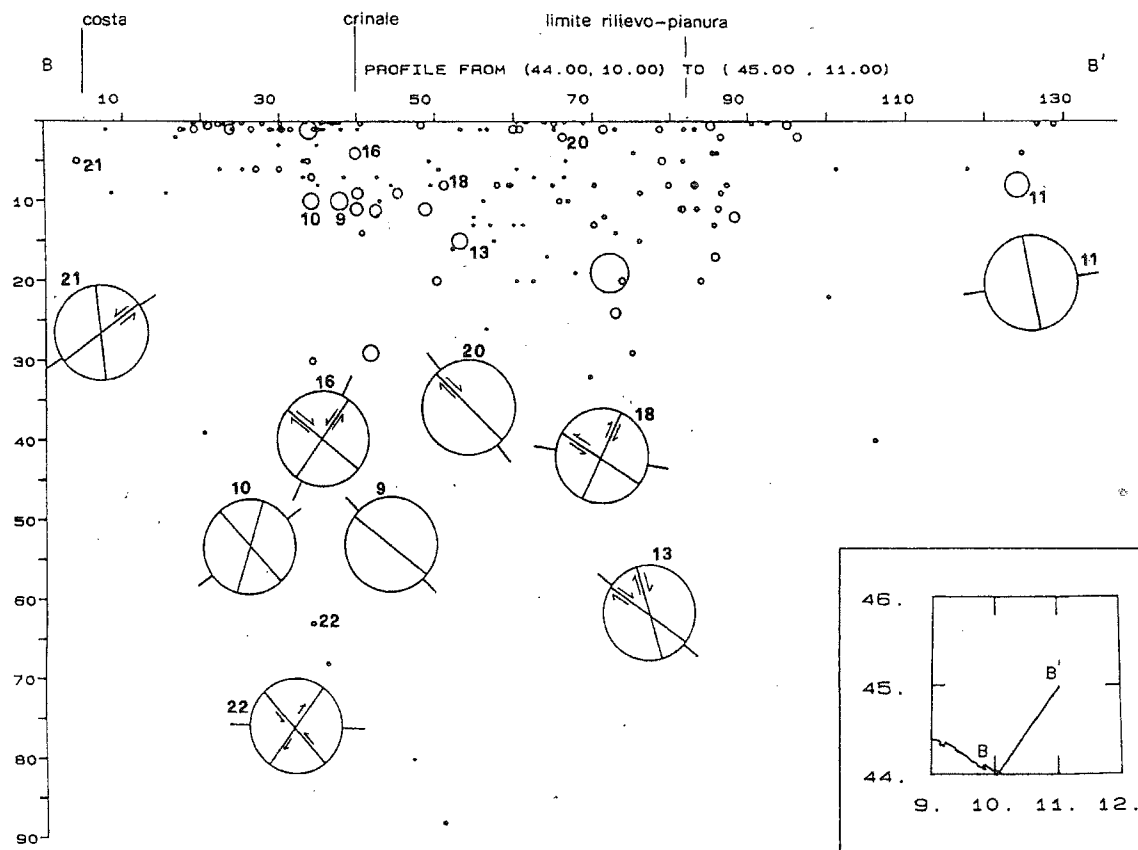
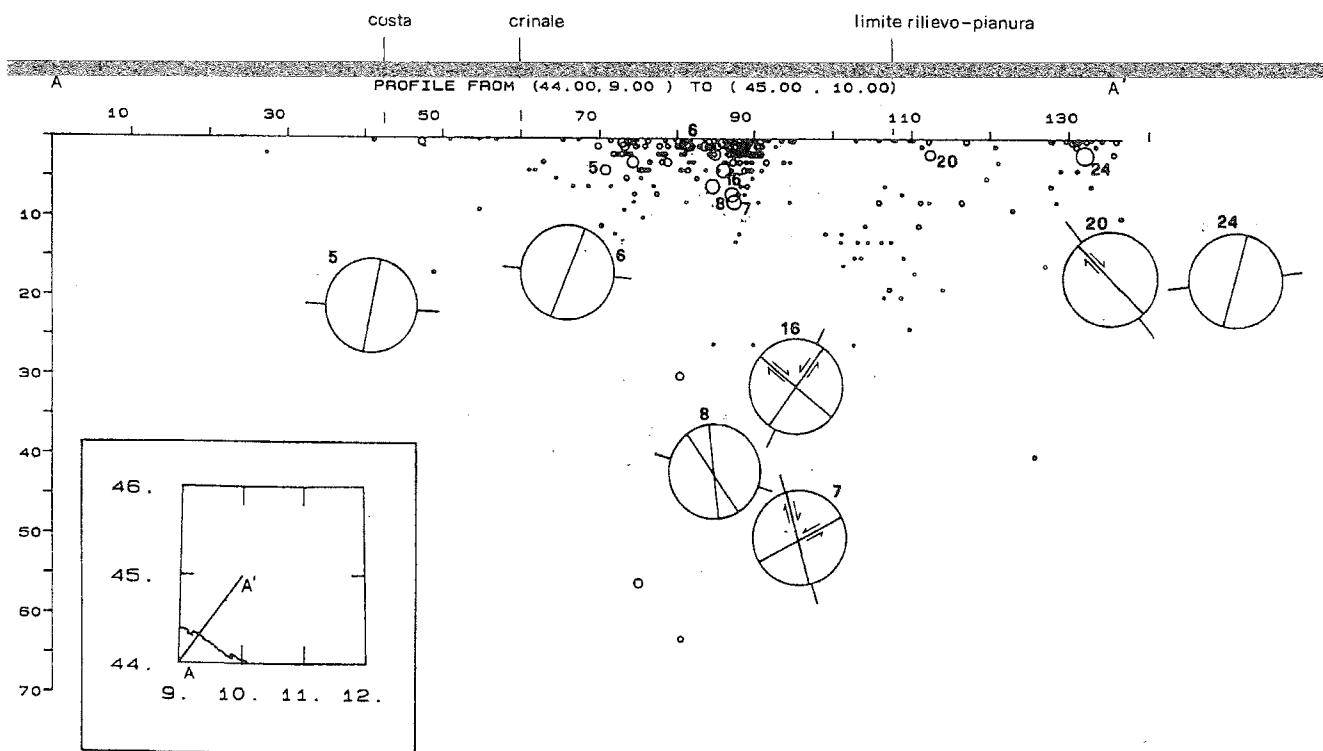


Fig. 6 a e b - Sezioni sismiche e proiezione di alcune delle soluzioni focali analizzate.

La maggior parte degli eventi è situata nei primi 20 km di profondità. Si può notare il prevalere di meccanismi di tipo diretto in superficie e, in particolare, nel tratto compreso fra la costa ed il crinale. Il carattere compressivo tende ad aumentare procedendo verso l'esterno della catena ed in profondità. Da notare inoltre il cambiamento nell'orientazione degli assi P in corrispondenza del crinale appenninico.

CONCLUSIONI

I risultati ottenuti confermano il regime tettonico noto in letteratura (BOCCALETTI *et al.*, 1985; CATTANEO *et al.*, 1983, 1986; EVA *et al.*, 1990). Nelle linee generali la distribuzione degli assi di massima compressione presenta le seguenti caratteristiche:

- un campo prevalentemente distensivo nelle zone a SW dello spartiacque appenninico in particolare in corrispondenza delle strutture a graben della Lunigiana-Garfagnana lungo le quali gli assi P tendono a disporsi in direzione sub-parallela allo spartiacque (n° 10, 21, 13 di Fig. 3);

- un campo prevalentemente trascorrente nella zona del Borgotaresse a NW rispetto allo spartiacque appenninico con assi P orientati NW-SE (n° 6, 7, 8 di Fig. 3);

- un campo da transpressivo a compressivo verso il margine esterno della catena e la parte frontale sepolta del settore padano con assi P diretti perpendicolarmente rispetto alle strutture. La maggiore variabilità nell'orientazione degli assi P in questo settore della catena, particolarmente per i terremoti pre-1982 (Fig. 4), se da un lato può essere messa in relazione con una scarsa consistenza nei dati, non va però dimenticato che gli assi P e T indicano, in realtà, le direzioni di massimo accorciamento ed estensione (deformazioni) e possono, quindi, deviare in modo significativo dagli assi di *stress* principali (GEPHART, 1985).

Inoltre la discrepanza che può esistere fra meccanismo focale e il quadro tettonico che ci si aspetta in questa regione viene attribuito da SUHADOLC *et al.* (1990) a fenomeni locali che potrebbero non essere direttamente legati al campo di sforzi regionale.

L'analisi delle sezioni sismiche con proiezione delle soluzioni focali (Fig. 6) ha evidenziato l'esistenza di un campo tendenzialmente compressivo in profondità. L'esiguo numero di soluzioni disponibili unito alla bassa energia dei terremoti rende, però, difficile una correlazione a livello regionale.

BIBLIOGRAFIA

AMATO A. & SELVAGGI G. (1991) - *Terremoti crostali e subcrostali nell'Appennino Settentrionale*. Studi Geol. Camerti, Vol. Speciale, 1991, 75-82.

BOCCALETTI M., COLI M., EVA C., FERRARI G., GIGLIA G., LAZZAROTTO A., MERLANTI F., NICOLICH R., PAPANI G. & POSTPISCHL D. (1985) - *Considerations on the seismotectonics of the Northern Apennines*. Tectonoph., **117**, 7-38.

CASTELLARIN A., EVA C., GIGLIA G. & VAI G.B. (1986) - *Analisi strutturale del Fronte Appenninico Padano*. Giornale di Geologia, **47**, 47-76.

CATTANEO M., EVA C., GIGLIA G. & MERLANTI F. (1983) - *Seismic hazard in the Northwestern Apennines*. Pageoph, **121**, 221-245.

CATTANEO M., EVA C. & MERLANTI F. (1986) - *Alcune considerazioni sulla sismicità dell'Appennino Nord-Occidentale*. Mem. Descr. Carta Geol. d'Italia, **35**, 33-68.

DEICHMANN N., PASTORE S. & EVA E. (1991) - *Meccanismi focali di terremoti delle Alpi italo-svizzere*. Atti del X Conv. Gruppo Naz. di Geof. Terra Solida, Vol. **1**, 317-329.

EVA C., CATTANEO M., AUGLIERA P., PASTORE S. & TOMASELLI A. (1990) - *Sismotettonica dell'Italia Nord-Occidentale*. Atti del Convegno Gruppo Naz. Difesa dai Terremoti, Ed. Ambiente, Pisa, **1**, 35-45.

GASPARINI C., IANNACCONE G. & SCARPA R. (1985) - *Fault-plane solutions and seismicity of the Italian Peninsula*. Tectonoph., **117**, 59-78.

GEPHART J.W. (1985) - *Principal stress directions and the ambiguity in fault plane identification from focal mechanisms*. Bull. Seism. Soc. of America, **75**, 2, 621-625.

REASENBERG P. & OPPENHEIMER D. (1985) - *FPFIT, fortran computer program for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions*. Open File, U. S. Geological Survey Report, 85-739.

SCANDONE P. (1991) - *Structural Model of Italy*. PFG-CNR.

SUHADOLC P., PANZA G. F., MARSON I., CASTA G. & VACCARI F. (1990) - *Analisi della sismicità e meccanismi focali nell'area italiana*. Atti del Convegno Gruppo Naz. Difesa dai Terremoti, Ed. Ambiente, Pisa, **1**, 157-167.

TOMASELLI A., PASTORE S., AUGLIERA P. & EVA C. (1993) - *Sismicità dell'Appennino Nord-Occidentale*. Studi Geol. Camerti, Vol. Speciale **1992-2**, 43-50.

