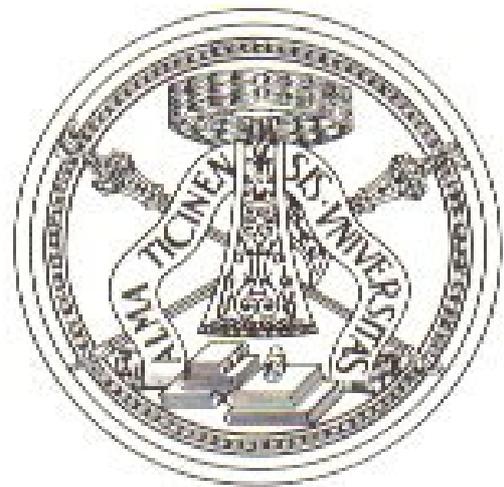


Estratto da:

ATTI
TICINENSI
DI SCIENZE
DELLA
TERRA



Vol. XXXVII

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA

ANALISI MESOSTRUTTURALE DELLA FORMAZIONE DI BISMANTOVA DI PAVULLO NEL FRIGNANO (APPENNINO MODENESE)

MESOSTRUCTURAL ANALYSIS OF THE BISMANTOVA FORMATION OF PAVULLO NEL FRIGNANO (MODENA APENNINES)

M. CAPITANI ⁽¹⁾ & F. SASSO ⁽¹⁾

RIASSUNTO

Lo studio delle faglie mesoscopiche presenti nella Formazione di Bismantova dell'area di Pavullo ha fornito utili informazioni sull'andamento del campo di paleostress e sull'evoluzione tettonica dell'area. Nella zona di Pavullo si riconoscono evidenti indizi dell'azione di un campo di paleostress trascorrente con direzione di compressione massima diretta NW-SE e di estensione massima diretta NE-SW. Tale andamento degli sforzi tettonici è ben documentato dalle faglie mesoscopiche che quasi in tutte le stazioni di misura sono raggruppati in sistemi quasi-coniugati di faglie trascorrenti a direzione N160°-180° (sinistre) e N110°-120° (destra), accompagnati da faglie inverse a direzione N220°-230°.

ABSTRACT

The study of fault populations in the rocks of the Bismantova Formation cropping out in the area of Pavullo nel Frignano (Northern Apennines) gave some information on the paleostress field trend and on the tectonic evolution of the area. In the Pavullo area there are clear evidences of the action of a transcurrent paleostress field with a main compressional direction trending SE-NW and main extensional direction trending SW-NE. The faults are generally grouped in systems of quasi-conjugate faults, trending N160°-180° (sinistrals) and N110°-120° (dextrals), with inverse ones trending N220°-230°.

PAROLE CHIAVE: *analisi mesostrutturale, faglie trascorrenti, formazione di Bismantova, sforzi principali, tettonica trascorrente.*

KEY WORDS: *mesostructural analysis, strike-slip faults, Bismantova Formation, main stress, transcurrent tectonics.*

INTRODUZIONE

Analisi di faglie mesoscopiche, finalizzate allo studio della cinematica e dinamica tettoniche dell'Appennino Settentrionale, sono state condotte soprattutto sui terreni messiniano-quadernari del margine padano (BERNINI, 1986; BERNINI & CLERICI, 1983, FESCE, 1987 a; 1987 b; 1987 c; FESCE & PINI, 1987; MANNORI, 1987; MANNORI & SANI, 1987) o su terreni più antichi (PEROTTI & VERCESI, 1991). Al contrario gli studi delle strutture mesoscopiche nelle formazioni epiliguri (BETTELLI *et al.* 1987 a; 1987 b; RICCI LUCCHI & ORI, 1985) sono ancora rari (SASSO, 1991).

Il presente lavoro descrive le analisi condotte sulle faglie mesoscopiche presenti nella Formazione di Bismantova, affiorante nei

⁽¹⁾ Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Modena, Corso Vittorio Emanuele II, 59 - 41100 Modena

dintorni di Pavullo nel Frignano (Appennino modenese); riporta una discussione critica di tali dati in relazione all'assetto macrostrutturale derivato dai rilevamenti geologici alla scala 1:10.000 (PANINI, BETTELLI & PIZZOLO, 1993 com. pers.); illustra una proposta interpretativa sull'evoluzione tettonica neogenica della zona di Pavullo.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La Formazione di Bismantova (PIERI, 1961; ROVERI, 1966; SESTINI, 1970; RICCI LUCCHI & ORI, 1985; BETTELLI *et al.*, 1987 a; 1987 b) affiora estesamente nell'area circostante Pavullo nel Frignano (fig. 1). Essa rappresenta, assieme alla Formazione del Termina, la parte superiore della successione epiligure (RICCI LUCCHI & ORI, 1985; BETTELLI *et al.*, 1987 a; 1987 b).

Le formazioni epiliguri costituiscono la successione sedimentaria che si è deposta al di sopra del prisma di accrezione ligure durante la sua traslazione relativa verso i domini subliguri, toscano ed umbro-marchigiano (REUTTER, 1981; TREVES, 1984; RICCI LUCCHI & ORI, 1985; BETTELLI *et al.*, 1987 a; 1987 b), avvenuta posteriormente alla fase tettonica ligure eocenica.

Nell'Appennino modenese e nelle zone limitrofe (BETTELLI *et al.*, 1987 a; 1987 b) la successione epiligure è stata suddivisa nelle seguenti formazioni (dal basso verso l'alto) coincidenti in parte con le vecchie suddivisioni dei geologi dell'AGIP (PIERI, 1961; LUCCHETTI *et al.*, 1962):

- Mélange sedimentari tipo Val Fossa (Eocene medio-Oligocene inferiore);
- Formazione di Monte Piano (Eocene medio-Oligocene inferiore);
- Formazione di Ranzano (Oligocene inferiore);
- Mélange della Val Tiepido-Canossa e Formazione di Antognola (Oligocene inferiore?-superiore-Burdigaliano inferiore);

- Formazione di Bismantova (Burdigaliano superiore- Serravalliano);
- Formazione del Termina (Tortoniano-Messiniano inf.?).

Nel territorio di Pavullo nel Frignano affiora soprattutto la Formazione di Bismantova (BETTELLI *et al.*, 1987 a), la quale, come accade in altre zone dell'Appennino Settentrionale: Pietra di Bismantova (Appennino reggiano), Val Marecchia (Appennino romagnolo) (CONTI, 1991; CONTI & TOSATTI, 1991), forma un esteso rilievo tabulare, bordato da ripide pareti (fig. 1) (BETTELLI *et al.*, 1987 b), compreso grossomodo tra le valli del Fiume Panaro a Est, del Torrente Scoltenna a Sud, del Rio Benedello a Nord, e limitato ad Ovest dalla Dorsale di Montecucolo.

Nella zona di Pavullo sono state studiate le faglie mesoscopiche presenti soprattutto nelle rocce appartenenti al membro basale della Formazione di Bismantova, cioè al Membro di Pantano, che ha meglio registrato la cinematica della deformazione fragile.

Il Membro di Pantano (Burdigaliano superiore-Langhiano) è costituito in prevalenza da arenarie calcaree e calcareniti medio-fini a cemento calcareo, con una abbondante frazione bioclastica (echinidi, lamellibranchi). Generalmente la stratificazione è mal definita a causa della intensa bioturbazione, soprattutto negli affioramenti ad Est di Pavullo, mentre litofacies a laminazione obliqua ed a grana grossolana sono riconoscibili ad Occidente. Tali caratteristiche sedimentologiche suggeriscono l'ipotesi dell'esistenza di un originario paleopendio marino inclinato verso Oriente (BETTELLI & PANINI, 1993 com. pers.) durante il Burdigaliano-Langhiano.

Di scarso interesse per le finalità del presente studio sono invece le rocce appartenenti agli altri membri della Formazione di Bismantova. In effetti, il Membro delle Marne di Cigarellino (Langhiano-Serravalliano),

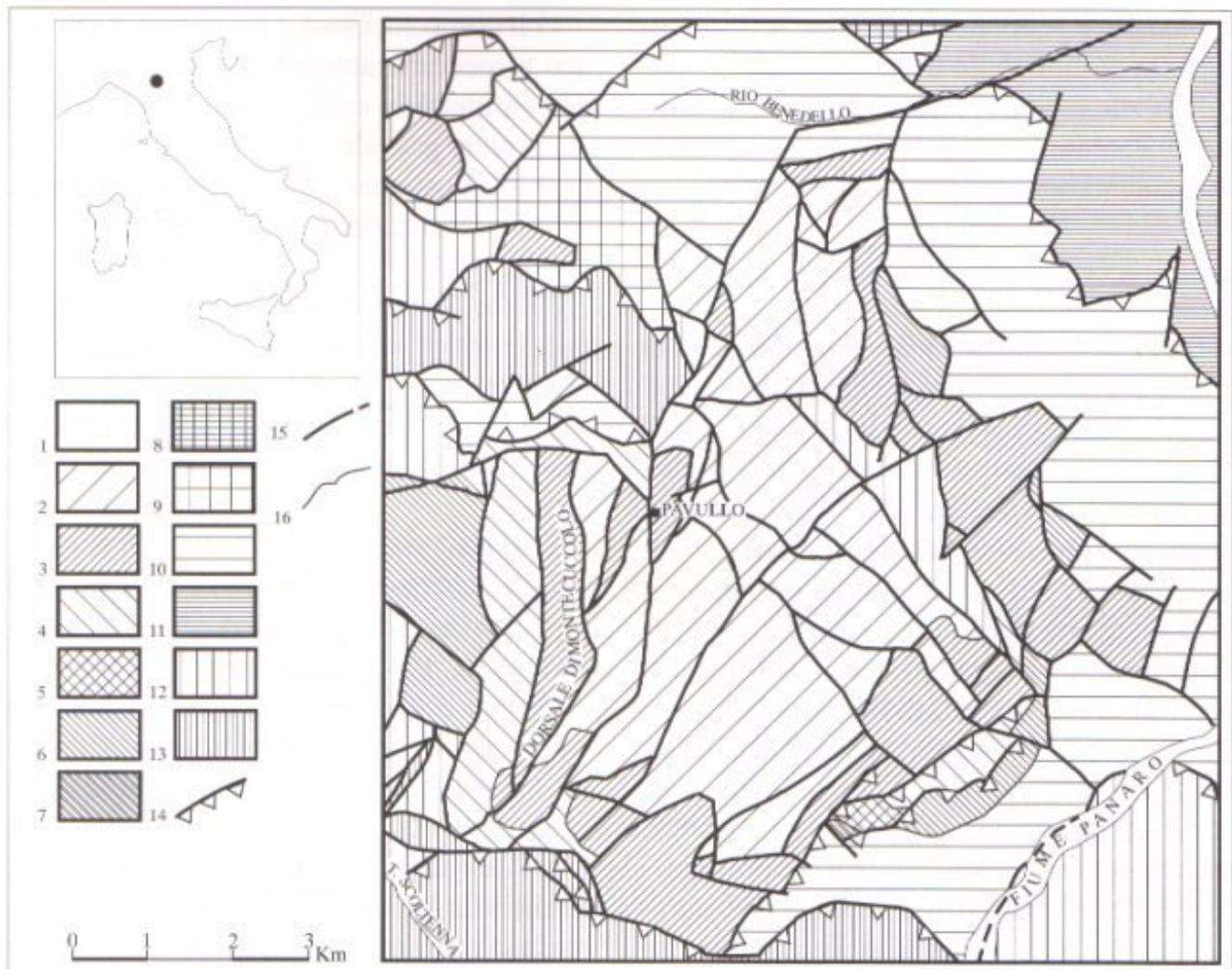


Fig. 1 - Carta Geologica schematica dell'area di Pavullo nel Frignano. Nella zona centrale affiora estesamente la Formazione di Bismantova. **1:** Depositi alluvionali (Olocene); **2:** Formazione di Bismantova: Membri delle Marne di Cigarello e delle Arenarie di Marola (Serravalliano-Langhiano); **3:** Formazione di Bismantova: Membro di Pantano (Langhiano-Burdigaliano p.p.); **4:** Formazione di Antognola (Burdigaliano p.p.- Oligocene sup.); **5:** Formazione di Ranzano (Oligocene inf.); **6:** Marne di Montepiano ed Arenarie di Loiano (Oligocene inf.-Eocene med.); **7:** Mélange sedimentari tipo Val Fossa (Eocene sup.med.); **8:** Mélange tettonico di Coscogo (Oligocene sup.?); **9:** Argille di Viano (Eocene inf.-Paleocene?); **10:** Arenarie di Scabiazza ed Argille Varicolori: (Campaniano inf.-Cenomaniano); **11:** Argille a Palombini II (Cenomaniano-Cretaceo inf.); **12:** Formazione di Monghidoro (Paleocene sup.-Maastrichtiano) e Formazione di Monte Venere (Maastrichtiano); **13:** Argille a Palombini I (Cenomaniano-Cretaceo inf.); **14:** Sovrascorrimenti e faglie inverse; **15:** Faglie normali e faglie trascorrenti; **16:** Limiti stratigrafici.

1. Schematic geological map of the area of Pavullo nel Frignano. The Bismantova Formation crops out extensively in the centre of the area. **1:** Alluvials (Olocene); **2:** Bismantova Fm.: Cigarello Marls and Marola Sandstones (Serravallian-Langhian); **3:** Bismantova Fm.: Pantano Member (Langhian-Burdigalian p.p.); **4:** Antognola Fm. (Burdigalian p.p.-Late Oligocene); **5:** Ranzano Fm. (Early Oligocene); **6:** Montepiano Marls and Loiano Sandstones (Early Oligocene-Middle Eocene); **7:** Sedimentary Mélange of Val Fossa Type (Middle Late Eocene); **8:** Coscogo Tectonic Mélange (Late Oligocene?); **9:** Viano Shales (Early Eocene?-Paleocene?); **10:** Scabiazza Sandstones and Varicoloured Shales (Early Campanian-Cenomanian); **11:** Palombini Shales II (Cenomanian-Early Cretaceous); **12:** Monghidoro Fm. (Late Paleocene-Maastrichtian) and Mt. Venere Fm. (Maastrichtian); **13:** Palombini Shales I (Cenomanian-Early Cretaceous); **14:** Thrusts and reverse faults; **15:** Normal and strike-slip faults; **16:** Stratigraphic limits.

composto prevalentemente da rocce pelitiche, non presenta strutture tettoniche fragili ben conservate. La medesima osservazione

può essere fatta riguardo al Membro delle Arenarie di Marola (Langhiano-Serravalliano), costituito da alternanze di arenarie rise-

dimentate e peliti, nel quale sono state misurate soprattutto delle fratture, spesso subparallele alle superfici striate presenti nel Membro di Pantano, tuttavia prive di chiari indicatori cinematici.

ANALISI MESOSTRUTTURALE

Sono state misurate alcune centinaia di faglie mesoscopiche in diversi affioramenti del Membro di Pantano della Formazione di Bismantova. Non si è tenuto conto di quei piani striati sui quali non sono stati reperiti indicatori di movimento (PETIT *et al.*, 1983; PETIT, 1987) che consentissero un'interpretazione chiara della cinematica delle faglie.

La presenza di gradini in calcite fibrosa e/o di fratture secondarie di Riedel (PETIT *et al.*, 1983; PETIT, 1987) sono stati gli unici criteri utilizzati per stabilire il movimento delle faglie. Molto spesso si è potuto verificare la coerenza di entrambi questi indicatori cinematici sul medesimo piano striato. Al contrario non sono stati presi in considerazione quei piani che presentavano esclusivamente strutture morfologicamente simili alle fratture di Riedel, ma che non evidenziavano chiare strie di movimento a causa dei processi di alterazione superficiale.

I dati mesostrutturali, raggruppati per affioramenti, sono stati analizzati per mezzo del programma Carey (CAREY, 1976; 1979) che consente di calcolare i parametri dell'ellissoide degli sforzi che meglio rende conto dei movimenti osservati sulle superfici di faglia.

Il programma Carey, come è noto, è basato su di un modello ipotetico di comportamento meccanico elementare di un mezzo roccioso prefratturato, sottoposto ad un campo di sforzi omogeneo (CAREY & BRUNIER, 1974) e fondato su una serie di assunti teorici tra i quali i più importanti sono i seguenti (CAREY & BRUNIER, 1974; CAREY, 1976; 1979; MERCIER *et al.*, 1991):

1) il corpo roccioso è fisicamente omogeneo e meccanicamente isotropo, per cui le discontinuità in esso presenti sono disposte in maniera casuale;

2) gli spostamenti su ciascuna faglia sono piccoli in relazione alle dimensioni della faglia;

3) non c'è deformazione duttile del materiale coinvolto e nessuna rotazione dei piani di frattura;

4) un determinato evento deformativo può essere descritto da un tensore degli stress medio;

5) la stria misurata è parallela allo sforzo tangenziale che sarebbe applicato al piano di faglia da parte del tensore degli stress medio (WALLACE, 1951; BOTT, 1959).

Queste assunzioni non sono in generale valide per le rocce della crosta terrestre, che non sono né omogenee né isotrope (MERCIER *et al.*, 1991). Tuttavia alla scala dei corpi rocciosi (della stazione di misura) queste assunzioni si dimostrano spesso valide e i risultati coerenti ottenuti in siti diversi forniscono di frequente valide indicazioni sull'andamento degli sforzi a scala regionale (MERCIER *et al.*, 1991).

Il programma Carey (CAREY, 1976; 1979) consente di determinare 4 parametri relativi al tensore degli sforzi che rende minimo lo scarto angolare tra le strie misurate sulle faglie e lo sforzo tangenziale applicato su ogni singolo piano, e cioè le tre direzioni degli sforzi principali ed il rapporto di forma $R=S_1-S_2/S_3-S_2$, essendo S_1, S_2, S_3 rispettivamente gli sforzi principali massimo, intermedio e minimo (CAREY, 1976; 1979).

Le faglie misurate (fig. 2, tabb. 1 e 2) si riferiscono a 44 affioramenti distinti (fig. 3), ognuno corrispondente ad una stazione di misura. Per gli affioramenti con almeno sette faglie non isoorientate è stata condotta l'analisi numerica per la ricerca dei parametri del tensore degli stress (fig. 2, tab. 1). Al contrario sui dati relativi alle stazioni con meno di

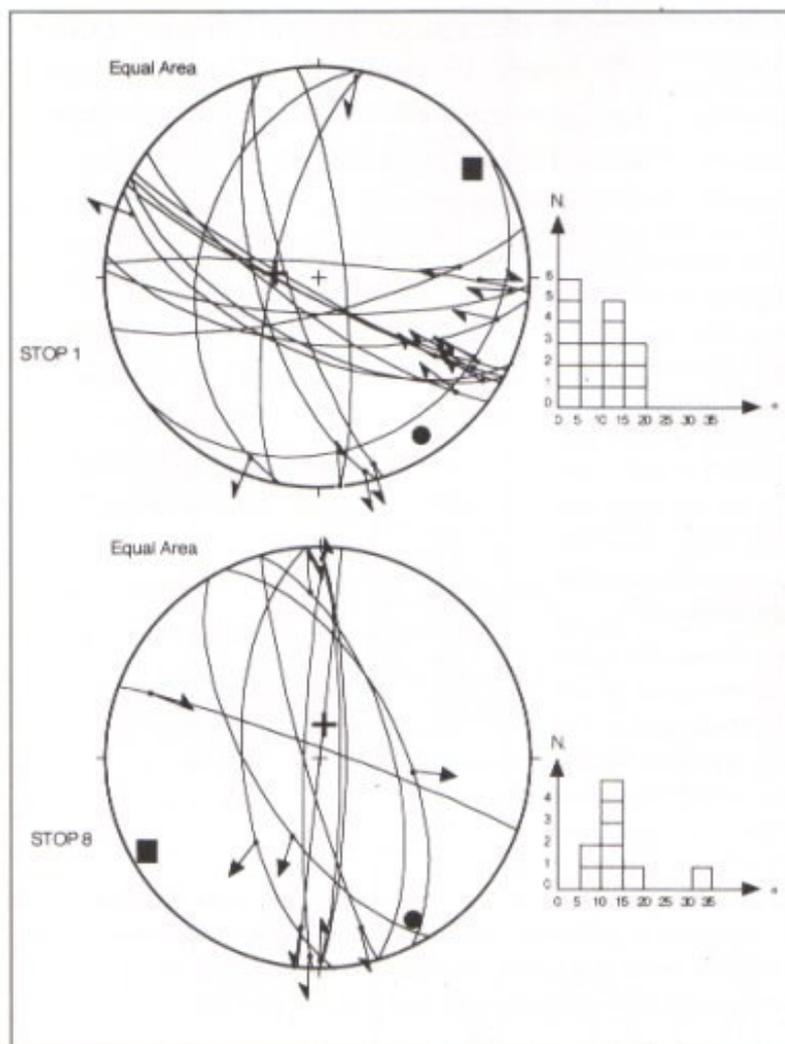


Fig. 2 - Proiezioni stereografiche (reticolo di Schmidt, emisfero inferiore) delle faglie misurate negli stop 1 e 8 (tab. 1, fig. 3). Il cerchio pieno, la croce ed il quadrato pieno indicano l'orientazione rispettivamente dello sforzo principale di compressione massima, intermedio e di estensione calcolati tramite l'analisi con il programma Carey (CAREY, 1979). Gli istogrammi riportano in ascissa lo scarto tra i pitch reali e quelli teorici, mentre in ordinata è indicato il numero di faglie che evidenziano analoghi scarti angolari. L'analisi viene ritenuta accettabile nel caso in cui almeno l'80% delle faglie presenti uno scarto angolare inferiore a 20° (CAREY, 1979).

Stereoplots (Schmidt net, lower hemisphere) of the faults surveyed in stop 1 and in stop 8 (tab. 1, fig. 3). The big dot, the cross and the solid square show respectively the attitude of the main compressional, intermediate and extensional stress axes calculated by means of the Carey computer program (CAREY, 1979). The histograms show on the abscissa axis the angular discrepancy between the real and the calculated pitches of the striae, while the number of faults that have the same angular discrepancy is reported on the ordinate axis. The stress tensor analysis is considered valid if the 80% or more of the faults has an angular discrepancy less than 20° (CAREY, 1979).

Tab. 1 - Risultati delle analisi numeriche eseguiti sulle faglie misurate nelle stazioni dalla n. 1 alla n. 20. Per la localizzazione vedi fig. 3. *n.dati*: Numero di faglie misurate; *R*: Rapporto di forma dell'ellissoide degli stress (vedi testo); *S1*: Sforzo principale massimo; *S2*: Sforzo principale intermedio; *S3*: Sforzo principale minimo; *Accordo*: Rapporto tra il numero di faglie che presentano uno scarto angolare inferiore a 20° (cfr fig. 2) e numero totale di faglie misurate; *: Stazioni i cui dati hanno subito una probabile rotazione (vedi testo).

Results of the numerical analysis performed in the mesostructural stations numbered from 1 to 20, see fig. 3 for locations. *n.dati*: Surveyed faults; *R*: Stress ellipsoid shape ratio (see text for explanation); *S1*: Main compressional stress; *S2*: Intermediate stress; *S3*: Main extensional stress; *Accordo*: Ratio between the faults showing an angular discrepancy less than 20° (see fig. 2) and the total number of faults; *: Mesostructural data that probably have been rotated (see text for explanation).

Stop	<i>n.dati</i>	<i>R</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>Accordo</i>	
1	17	0.59	147/10	277/73	055/12	17/17	
2	9	0.76	319/03	087/84	228/04	8/9	
3	10	0.49	150/11	008/76	241/08	9/10	
4	12	0.41	313/11	129/78	223/01	12/12	
5	13	0.47	201/70	317/09	050/17	12/13	
6	13	0.60	326/01	232/77	056/12	12/13	
7	7	0.67	306/05	206/61	039/28	7/7	
8	9	0.72	307/16	111/72	216/05	7/9	
9	13	0.67	323/01	065/85	232/05	13/13	
10	14	0.56	320/20	192/59	059/22	10/14	*
11	20	0.92	319/19	147/70	050/02	17/20	
12	13	0.88	330/12	130/76	239/04	13/13	
13	13	0.83	149/06	059/04	292/81	9/13	
14	7	0.34	331/19	111/65	235/14	5/7	
15	8	0.45	122/02	216/65	031/24	8/8	
16	14	0.64	315/23	173/71	052/15	12/14	
17	13	0.70	301/06	063/77	210/10	13/13	
18	10	0.91	119/04	029/06	238/82	8/10	
19	16	0.89	323/30	214/29	089/45	15/16	*
20	15	0.90	134/03	225/25	317/63	15/15	

*: Mesostructural data that probably have been rotated (see text for explanation).

Tab. 2 - Risultati dei test eseguiti sulle stazioni mesostrutturali con poche faglie. I test sono stati eseguiti utilizzando i parametri dell'ellissoide degli sforzi calcolato coi dati di altre stazioni (tab. 1). Per la localizzazione vedi fig. 3. Le faglie degli stop 23, 39, e 44 sono caratterizzate da orientazioni antiappenniniche (direzioni N220-230) e da cinematica trascorrente compatibili con una direzione di compressione circa N-S. Dato lo scarso numero, questi dati non possono essere soggetti ad interpretazioni particolari, tuttavia si ritiene possano essere riferiti a un campo di sforzi più antico di quello descritto dal presente studio. *n. dati*: Numero di faglie misurate; *Test/Stop*: Riferimento dello stop (tab. 1) il cui ellissoide degli sforzi è stato utilizzato per effettuare il test di compatibilità. Quando con nessuno degli ellissoidi calcolati si è verificata la compatibilità si è ricorso all'analisi con il metodo dei diedri retti (*Diedri R.*) (ANGELIER & MECHLER, 1977). La stazione 39 (**) presenta faglie isoorientate alle quali non si può applicare nemmeno il metodo dei diedri retti; *Accordo*: Rapporto tra il numero di faglie che presentano uno scarto angolare inferiore a 20° (cfr fig. 2) e numero totale di faglie misurate.

Results of the tests carried on the mesostructural stations with fewer faults. The tests have been performed by using the stress tensor parameters calculated in other stations. See fig. 3 for location. The faults of stations 23, 39 and 44 are strike-slip faults trending N220°-230° and their kinematics agree with N-S trending compression that is different from the other faults. They might be the few evidences of an older stress field. *n. dati*: Surveyed faults; *Test/Stop*: reference number of the station (tab. 1) whose stress tensor parameters have been used for the test. The right diedra analysis has been carried on the stations that were not compatible with any calculated stress tensor (*Diedri R.*); the mesostructural station 39 (**) have only two isooriented faults that cannot be analysed by means of the right diedra method too; *Accordo*: ratio between the faults showing an angular discrepancy less than 20° (see fig. 2) and the total number of faults.

sette misure sono stati eseguiti dei test di compatibilità, utilizzando i parametri dell'ellissoide degli sforzi ricavati per altri affioramenti (tab. 2). Nei pochi casi per i quali neanche i test di compatibilità hanno fornito risultati significativi, si è proceduto alla determinazione approssimata delle direzioni degli sforzi principali attraverso il metodo grafico dei diedri retti (cfr. ANGELIER & MECHLER, 1977).

La fig. 3 mette a confronto i risultati delle analisi delle faglie mesoscopiche con le strutture macroscopiche. La tab. 1 riporta il risultato di tutte le analisi numeriche in forma sintetica in quanto per ragioni di spazio la fig. 2 mostra, come esempio, le proiezioni stereografiche (reticolo di Schmidt, emisfero inferiore) delle faglie relative a soli due affioramenti. La fig. 4 invece mostra le dire-

Stop	n. dati	Test/Stop	Accordo
21	1	4	1/1
22	1	4	1/1
23	3	Diedri r.	
24	6	4	6/6
25	9	2	9/9
26	3	15	3/3
27	4	2	4/4
28	1	6	1/1
29	2	2	2/2
30	3	19	3/3
31	4	6	4/4
32	4	15	4/4
33	2	2	2/2
34	1	2	1/1
35	3	6	3/3
36	1	6	1/1
37	3	20	3/3
38	4	2	3/4
39	2	**	
40	5	4	5/5
41	1	2	1/1
42	1	2	1/1
43	2	2	5/6
44	3	Diedri r.	

zioni degli sforzi principali ricavate tramite l'analisi numerica (tab. 1), e rappresenta l'integrazione dei risultati allo scopo di dedurre l'andamento generale del campo di paleostress alla scala dell'intera area considerata. Come si è riferito più sopra, indicazioni valide sull'andamento del campo degli sforzi regionale possono essere ricavate solo dall'integrazione degli studi condotti su diversi siti di misura, in quanto l'analisi eseguita in un solo affioramento ha un significato limitato all'estensione dell'affioramento stesso (CAREY, 1976; 1979).

Sia le tabb. 1 e 2 sia le figg. 2, 3 e 4 sottolineano chiaramente la generale coerenza cinematica e dinamica delle faglie misurate nei diversi affioramenti. Tale osservazione si dimostra valida, a parte alcune eccezioni, soprattutto sul lato orientale degli

affioramenti di Pavullo, dove i dati raccolti sono anche molto più numerosi. Quest'ultimo fatto è stato interpretato come dovuto alle sopradescritte variazioni litologiche riconosciute nel Membro di Pantano, per cui le rocce più omogenee (sia per litologia sia per assenza di strutture sedimentarie) presenti ad Est avrebbero registrato la cinematica delle deformazioni tettoniche molto meglio dei coevi sedimenti, più o meno laminati, presenti nella dorsale occidentale.

Ciò nonostante, si osserva che la quasi totalità dei dati considerati è compatibile dal punto di vista geometrico-cinematico (fig. 2) e dinamico (figg. 3 e 4, tabb. 1 e 2) con un regime tettonico essenzialmente trascorrente, caratterizzato da una direzione dello sforzo principale massimo (S1 di compressione) diretta SE-NW e da una direzione dello sforzo principale minimo (S3 di estensione) diretta SW-NE. Solo le faglie misurate in tre stazioni (tab. 1: nn. 18, 19, 20) meglio si



Fig. 3 - Carta strutturale schematica dell'area di Pavullo nel Frignano. Sono indicati gli affioramenti dove sono state misurate delle faglie mesoscopiche e l'orientazione degli sforzi principali di compressione e di estensione per le stazioni sui cui dati si è effettuata l'analisi numerica (tab. 1). **1:** Sovrascorrimenti e faglie inverse; **2:** Faglie normali e trascorrenti; **3:** Stazioni di misure mesostrutturali dove sono state calcolate le direzioni degli assi dell'ellissoide degli sforzi (tab. 1); **4:** Altre stazioni di misure mesostrutturali (tab. 2).

Schematic structural map of the area of Pavullo nel Frignano. The mesostructural stations and the orientation of the calculated stress tensors are shown. **1:** Thrusts and reverse faults; **2:** Normal and strike-slip faults; **3:** Mesostructural stations analysed by means of the stress tensor analysis. The direction of the main compressional and extensional stress are shown (tab. 1); **4:** Other mesostructural stations (tab. 2).

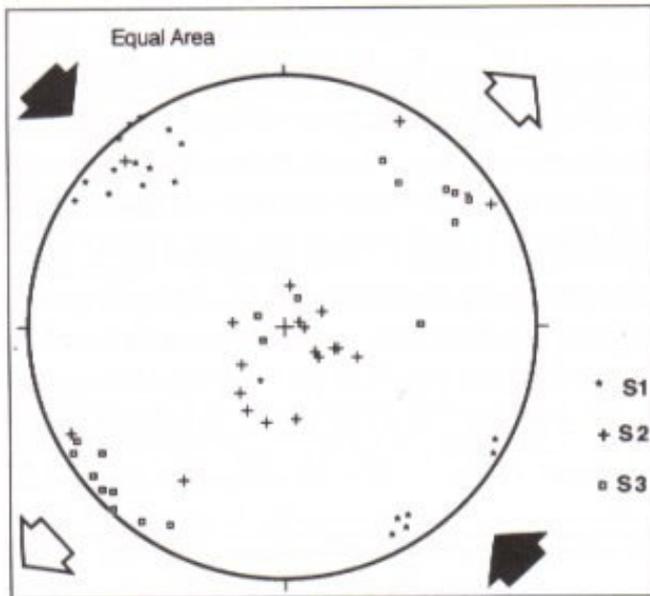


Fig. 4 - Orientazione degli assi dell'ellissoide degli sforzi calcolati nelle stazioni di misura indicate in tab. 1. L'integrazione dei dati mette in evidenza un campo di sforzi trascorrente con direzione di compressione diretta NW-SE e di estensione diretta NE-SW (vedi anche testo). S1: Sforzo principale massimo; S2: Sforzo principale intermedio; S3: Sforzo principale minimo.

Attitude of the principal stress directions calculated in the mesostructural stations of tab. 1. The data show the action of a transcurrent stress field characterized by a main compressional direction trending NW-SE and a main extensional direction trending NE-SW. S1: main compressional stress; S2: intermediate stress; S3: main extensional stress.

accordano con un regime puramente compressivo, che tuttavia presenta una direzione di compressione massima sempre diretta SE-NW. I dati di una sola stazione (tab. 1: n. 5) definiscono un ellissoide degli stress con compressione massima verticale (regime distensivo), che è comunque caratterizzato da uno sforzo principale estensivo S3 diretto SW-NE subparallelo a quello ricavato per le altre stazioni.

Occorre comunque fare alcune precisazioni per quanto riguarda la generale coerenza dei risultati analitici.

In primo luogo si deve sottolineare come la maggioranza delle faglie mesoscopiche sia raggruppabile in sistemi trascorrenti quasi-coniugati (ANGELIER, 1979; 1984) ad assetto

sostanzialmente simile (direzione N160°-180° per le faglie sinistre e N110°-120° per le faglie destre, con inclinazioni in generale superiori a 70 gradi). Tuttavia, seppure con minore frequenza, sono presenti anche piani striati a movimento obliquo, con componente inversa o normale, e ad assetto più disperso. Per quest'ultimo motivo si è ritenuto di poter utilizzare il programma Carey che assume appunto l'ipotesi di un mezzo prefratturato, con disposizione casuale delle discontinuità planari preesistenti all'applicazione del campo di sforzi.

In secondo luogo si vuole richiamare l'attenzione sulla colonna "Accordo" di tab. 1: in essa viene rapportato, per ogni affioramento, il numero di faglie compatibili con l'ellissoide degli sforzi calcolato con il numero totale delle faglie misurate. Si ritiene che l'analisi numerica di un gruppo di faglie sia accettabile nel caso in cui almeno l'80% dei dati esaminati presenti una differenza angolare tra la stria reale e quella calcolata inferiore a 20 gradi (Carey, 1976; 1979). I dati che presentano scarti angolari superiori a 20 gradi non possono però essere scartati come privi di significato, ma se ne deve motivare la presenza, la quale, a seconda dei casi, può essere dovuta a ragioni diverse: ad esempio alla presenza di più eventi deformativi fragili, oppure ad un errata interpretazione del senso di movimento della faglia, o comunque ad un errore nella misura, o a forti discrepanze tra modello meccanico elementare e la situazione naturale dell'affioramento, o ad altro ancora.

Per i rari casi di dati incompatibili da noi riscontrati (tabb. 1 e 2) una delle cause più probabili va ricercata in locali rotazioni di blocchi fagliati causate da movimenti gravitativi di versante. In effetti, in alcuni affioramenti, localizzati nella parte orientale dell'area studiata, vi è un forte controllo strutturale delle frane per crollo e per ribaltamento ivi presenti, da parte soprattutto delle faglie

trascorrenti subverticali, le quali contribuiscono a destabilizzare le ripide pareti che bordano gli affioramenti miocenici. A tale riguardo, molto spesso, sono state osservate fratture beanti di parecchi centimetri o addirittura decimetri di larghezza derivate dall'apertura di originarie faglie, che presentano ancora chiari indicatori di movimento tettonico (scalini in calcite e fratture di Riedel) sulle proprie pareti.

Tale interpretazione non è ritenuta però valida per la zona sud-occidentale degli affioramenti miocenici di Pavullo, dove alcune misure di piani di faglia, seppure molto sparse e con strutture di difficile riconoscimento, indicano la presenza di movimenti trascorrenti sinistri lungo piani striati a direzione $N220^{\circ}$ - 230° . Queste faglie non si accordano con un campo di sforzi a direzione di compressione massima SE-NW per il quale dovrebbero presentare un movimento inverso, ma piuttosto sono compatibili con una compressione diretta N-S. Per questo motivo sono ipoteticamente interpretate come l'evidenza di un diverso evento tettonico, forse precedente alla fase tettonica registrata dalla maggioranza delle faglie da noi misurate.

Infine, si vuol porre l'accento sulle stazioni contrassegnate in tab. 1 con un asterisco. Esse presentano gli assi dell'ellissoide degli sforzi tendenzialmente obliqui. Ciò viene da noi interpretato come dovuto ad una parziale rotazione delle faglie. Questa interpretazione è suggerita dal contesto macrostrutturale in cui sono collocate tali stazioni di misura, e cioè in corrispondenza di una faglia cartografica che presenta una componente di movimento verticale inversa che può avere perturbato l'originale assetto degli elementi strutturali mesoscopici. Tale motivazione non è comunque l'unica, in quanto anche per questi casi potrebbero essersi avute delle rotazioni di blocchi fagliati a causa dei movimenti gravitativi di versante, come sopra riferito.

CONCLUSIONI

La presente ricerca costituisce uno dei primi esempi di analisi strutturale mesoscopica condotta su terreni appartenenti alla successione epiligure.

Lo studio delle faglie mesoscopiche della zona di Pavullo ha messo in evidenza l'azione di un campo di sforzi trascorrente con asse di compressione massima diretto SE-NW e di estensione massima diretto SW-NE (figg. 3 e 4).

Un tale andamento degli stress, peraltro già osservato in altre parti dell'Appennino (PEROTTI & VERCESI, 1991), è in disaccordo con il quadro geologico regionale dell'Appennino settentrionale, per il quale (sul versante padano) sarebbe più coerente un campo di sforzi compressivo con direzione di compressione massima diretta N-S o NNE-SSW, che renderebbe meglio conto della vergenza dei principali accavallamenti tettonici (si veda ad es. C.N.R., 1982; BOCCALETTI *et al.*, 1985; CASTELLARIN *et al.*, 1985; PEROTTI, 1991).

Per spiegare questa anomalia si potrebbero avanzare numerose ipotesi le quali, tuttavia, possono essere tutte ricondotte a due categorie principali: 1) le ipotesi secondo le quali la deformazione trascorrente con compressioni NW-SE sarebbe confinata alla sola zona di Pavullo e aree limitrofe; 2) le ipotesi secondo le quali sarebbe plausibile che, in una certa fase della storia evolutiva dell'Appennino settentrionale, siano stati attivi campi di sforzi (non necessariamente trascorrenti) a compressione massima diretta NW-SE e che questi abbiano avuto un ruolo regionale e non locale.

La mancanza di studi mesostrutturali eseguiti in altre aree prossime a quella da noi studiata, non consente un confronto dei nostri dati con altri, per cui le ipotesi interpretative appartenenti al gruppo 2) non sono falsificabili per la mancanza di dati, ma ne-

anche per ora proponibili, mentre per quanto riguarda quelle del gruppo 1), riteniamo che la più accreditabile sia quella che imputa l'esistenza di un campo di sforzi con compressioni massime dirette NW-SE alla presenza del sistema di dislocazioni trasversale indicato da BETTELLI *et al.*, (1987b) (BETTELLI & PANINI, in stampa) come "linea dello Scoltenna"; secondo questi autori, infatti, questa struttura trasversale potrebbe essersi imposta su di un preesistente elemento strutturale e/o paleogeografico oligocenico che bordava ad Occidente il locale bacino epiligure.

La Linea dello Scoltenna, nella zona di Pavullo, è formata da una fascia di dislocazioni che si estende per una decina di chilometri in senso meridiano e la cui ampiezza è di circa due chilometri. Essa è costituita da un sistema di faglie cartografiche, generalmente subverticali, orientate in generale circa N180° e N230°, a cinematica spesso di difficile comprensione, le quali tuttavia mostrano forti rigetti verticali se si considera la stratigrafia dei blocchi giustapposti. A Nord di Pavullo la Linea dello Scoltenna subisce una deviazione verso Oriente ed assume le caratteristiche di un fronte di accavallamento appenninico con sovrascorrimento dei terreni liguri, sottostanti alle formazioni epiliguri di Pavullo, al di sopra del Mélange di Coscogno (BETTELLI, 1993 com. pers.).

La Linea dello Scoltenna, nell'ipotesi che essa rappresenti la riattivazione di una preesistente discontinuità di età oligocenica (BETTELLI *et al.*, 1987b), avrebbe agito da elemento perturbatore dell'andamento degli sforzi principali determinando la deviazione della direzione di compressione massima regionale, ad azimuth circa N-S, secondo una direzione SE-NW. Fenomeni analoghi in corrispondenza di elementi strutturali trasversali sono previsti a livello teorico. Ad esempio il modello ad elementi finiti di Perotti (1991) riconosce che in corrispondenza

di un arco strutturale generato dalla presenza di una zona indeformata si abbiano forti deviazioni nella direzione dell'asse di massima compressione (Perotti, 1991: fig. 4). Inoltre la stessa esistenza di una faglia importante preesistente viene indicata come elemento perturbatore del campo di stress tanto che nelle sue vicinanze le direzioni degli sforzi principali possono discostarsi sensibilmente da quelle al contorno (ad es. BLES & FEUGA, 1981: pag. 98).

Nella zona di Pavullo, gli sforzi compressivi diretti SE-NW avrebbero dapprima rimobilizzato le faglie antiappenniniche (a direzione N230°), appartenenti alla Linea dello Scoltenna, come faglie inverse. Tuttavia l'alta inclinazione di queste ultime avrebbe causato indirettamente la permutazione tra sforzo compressivo massimo ed intermedio, determinando il passaggio da un regime di sforzi compressivo ad uno trascorrente. In pratica ad un certo momento il peso della regione da deformare attraverso la mobilitazione di faglie inverse ad alto angolo avrebbe esercitato un forte confinamento verticale tale da rendere più efficiente la deformazione attraverso faglie trascorrenti.

Questa ipotesi interpretativa comunque non può essere ritenuta conclusiva e si deve rimandare l'interpretazione definitiva dei dati al momento in cui saranno disponibili degli studi analoghi di confronto condotti in altre zone dell'Appennino Settentrionale. Aperto rimane anche il problema di una migliore definizione dell'età dei movimenti trascorrenti attivi nella zona di Pavullo: la mancanza in quest'area di sedimenti post-serravalliani, rende soltanto possibile attribuire le deformazioni studiate ad un generico intervallo cronologico che si estende dal Tortoniano alla fine del Pliocene inferiore, nell'ipotesi che la tettonica trascorrente di Pavullo sia in un certo qual modo collegata con l'attività della Linea dello Scoltenna (BETTELLI *et al.*, 1987b, BETTELLI & PANINI, in

stampa) la quale circa 10 chilometri a NE di Pavullo è suturata dai sedimenti del Pliocene medio-superiore. Tuttavia non si può escludere a priori che i campi di stress trascorrenti descritti nel presente lavoro possano essere stati attivi in epoca più recente, soprattutto nell'ipotesi che questi siano stati determinati da un vero e proprio cambiamento di regime tettonico, e non da una distorsione locale del campo di sforzi generale. A tale riguardo, è interessante notare come i dati mesostrutturali, recentemente rilevati nella zona di Monte Radicchio (Appennino bolognese), sempre in rocce della formazione di Bismantova, rivelino, in base alle prime elaborazioni effettuate, l'attività di campi di stress trascorrenti a direzione di compressione massima circa ESE-WNW, e quindi sostanzialmente concordi con quelli riconosciuti nella zona di Pavullo.

Si ringraziano il Prof. G. BETTELLI per la lettura critica del manoscritto, il Dr. F. PANINI per le discussioni e suggerimenti ed i Proff. C.R. PEROTTI e G. PAPANI per la lettura critica del manoscritto e per i suggerimenti.

Lavoro eseguito con fondi M.U.R.S.T. 60% (responsabile G. BETTELLI)

BIBLIOGRAFIA

- ANGELIER J. (1979) - *Néotectonique de l'arc égéen*. Soc. Geol. Nord Publ., 3, 418 pp.
- ANGELIER J. (1984) - *Tectonic analysis of fault slip data sets*. J. Geophys. Res., 89, n. B7, 5835-5848.
- ANGELIER J. & MECHLER P. (1977) - *Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en sismologie: la methode des diedres droits*. Bull. Soc. Geol. France, (7), XIX, 1309-1318.
- BERNINI M. (1986) - *Le deformazioni dei sedimenti messiniano-pleistocenici fra il F. Taro ed il T. Baganza (Parma)*. L'Ateneo Parmense, Acta Nat., 22, 171-186.
- BERNINI M. & CLERICI A. (1983) - *Individuazione di un campo di sforzi compressivo in alcuni affioramenti del Pleistocene continentale del margine appenninico presso Collecchio (Parma)*. Boll. Soc. Geol. It., 102, 369-384.
- BETTELLI G., BONAZZI U., FAZZINI P., GASPERI G., GELMINI R. & PANINI F., (1987 a) - *Nota illustrativa alla Carta Geologica Schematica dell'Appennino modenese e delle aree limitrofe*. Mem. Soc. Geol. It., 39 (1989), 487-498.
- BETTELLI G., BONAZZI U., FAZZINI P. & PANINI F. (1987 b) - *Schema introduttivo alla geologia delle Epiliguridi dell'Appennino modenese e delle aree limitrofe*. Mem. Soc. Geol. It., 39 (1989), 215-244.
- BETTELLI G. & PANINI F. (in stampa) - *Nota illustrativa ad una sezione geologica attraverso l'Appennino modenese*. Studi Geol. Camerti.
- BLES J.L. & FEUGA B. - *La fracturation des roches*. Manuels & Methodes 1, B.R.G.M., Orléans, Francia, pp.122.
- BOCCALETTI M., COLI M., EVA C., FERRARI C., GIGLIA G., LAZZAROTTO A., MERLANTI F., NICOLIC R., PAPANI G. & POSTPISCHL D. (1985) - *Considerations on the seismotectonics of the Northern Apennines*. Tectonophysics, 117, 737-743.
- BOTT M.H.P. (1959) - *The mechanics of oblique slip faulting*. Geol. Mag., 96, 109-117.
- CÁREY E. (1976) - *Analyse numerique d'un modele mecanique elementaire applique a l'etude d'une population de failles: calcul d'un tenseur moyen des contraintes a partir de stries de glissement*. These 3^{ème} Cycle. Centre d'Orsay, France.
- CAREY E. (1979) - *Recherche des directions principales de contraintes associées au jeu d'une population de failles*. Revue de Geol. Dynam. et de Geogr. Phys., 21,1, 57-66.
- CAREY E. & BRUNIER B. (1974) - *Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles*. C. R. Acad. Sci. Paris, 279 (D), 891-894.
- CASTELLARIN A., EVA C., GIGLIA G. & VAI G.B. (con contributo di RABBI E., PINI G.A. & CRESTANA G. (1985) - *Analisi strutturale del fronte appenninico padano*. Giornale di Geologia, Ser. 3, 47, 47-76.
- C.N.R. (1982): BOCCALETTI M., DECANDIA F.A., GASPERI G., GELMINI R., LAZZAROTTO A. & ZANZUCCHI G. (a cura di) - *Carta strutturale dell'Appennino Settentrionale. Note Illustrative*. C.N.R. Prog. Finaliz. Geodinamica Pubbl. n. 429, pp. 202.
- CONTI S. (1991) - *Caratteristiche geologico-strutturali delle placche epiliguri della coltre della Val Marecchia e loro riflessi sulla franosità*. Giornale di Geologia, 53, 147-165.
- CONTI S. & TOSATTI G. (1991) - *Le "Placche" di San Leo e Pennabilli (Val Marecchia): rapporti fra gli elementi strutturali e le deformazioni gravitative profonde*. Atti I Convegno dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Gargnano (BS) 22 e 23 ottobre 1991, pp. 57-66.
- FESCE A.M. (1987 a) - *Analisi mesostrutturale sui ciottoli di conglomerato e su superfici di faglia della Formazione a Colombacci lungo la valle del Bidente*

- (Forlì). Rend. Soc. Geol. It., **10**, 41-43.
- FESCE A.M. (1987 b) - *Individuazione di un campo di deformazione compressivo nei conglomerati del messiniano superiore del bolognese*. Rend. Soc. Geol. It., **10**, 45-46
- FESCE A.M. (1987 c) - *Deformazioni compressive neogeniche nei conglomerati messiniani del bacino sinclinalico Giaggiolo-Cella (Forlì)*. Mem. Soc. Geol. It., **39**, 345-358.
- FESCE A.M. & PINI G.A. (1987) - *Analisi mesoscopiche sui terreni caotici (Argille Scagliose) e sul Pliocene Intrappenninico del Bolognese*. L'Ateneo Parmense, Acta Nat. **23**, 211-218.
- LUCCHETTI L., ALBERTELLI L., MAZZEI R., THIEME R., BONGIORNI D. & DONDI L. (1962) - *Contributo alle conoscenze del pedeappennino padano*. Boll. Soc. Geol. It., **81**, 5-245.
- MANNORI M.R. (1987) - *Analisi mesostrutturale della successione Plio-Pleistocenica del Santerno (Pedeappennino imolose)*. L'Ateneo Parmense, Acta Nat. **23**, 241-252.
- MANNORI M.R. & SANI F. (1987) - *Analisi strutturale dei depositi neogenici neoautoctoni e semialloctoni della Val Marecchia*. L'Ateneo Parmense, Acta Nat. **23**, 61-76.
- MERCIER J.L., CAREY-GAILHARDIS E. & SEBRIER M. (1991) - *Paleostress determinations from fault kinematics: application to the neotectonics of the Himalayas-Tibet and the Central Andes*. Phil. Trans. R. Soc. Lond., **A. 337**, 41-52.
- PEROTTI C.R. (1991) - *Osservazioni sull'assetto strutturale del versante padano dell'Appennino Nord-Occidentale*. Atti Tic. Sc. Terra, **34**, 11-22.
- PEROTTI C.R. & VERCESI P.L. (1991) - *Assetto tettonico ed evoluzione recente della porzione nord-occidentale dell'Appennino emiliano*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **46**, 313-326.
- PETTIT J.P. (1987) - *Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks*. J. Struct. Geol., **9**, 597-608.
- PETTIT J.P., PROUST F. & TAPPONIER P. (1983) - *Criteres du sens de mouvement sur les miroirs de failles en roches non calcaires*. Boll. Soc. Geol. France 1983 (7), t. XXV, n. 4, 589-608.
- PIERI M. (1961) - *Nota introduttiva al rilevamento del versante appenninico padano eseguito nel 1955-59 dai geologi dell'AGIP MINERARIA*. Boll. Soc. Geol. It., **80**, 3-34.
- REUTTER K.J. (1981) - *A trench-forearc model for the Northern Apennines*. In: WEZEL F.C. (ed.), *Sedimentary basins of Mediterranean margins.*, 433-443, Tectoprint Bologna.
- RICCI LUCCHI F. & ORI G.G. (1985) - *Field excursion D: Synorogenic deposits of a migrating basin system in the NW Adriatic Foreland: Examples from Emilia-Romagna, Northern Apennines*. In: *International Symposium on Foreland Basins*, Fribourg, Switzerland 2-4 September 1985. Excursion Guidebook, Edited by Ph. Allen, P. Homewood e G. William, 137-176.
- ROVERI E. (1966) - *Geologia della sinclinale Vetto-Carpineti (Reggio Emilia)*. Mem. Soc. Geol. It., **5**, 241-267.
- SASSO F. (1991) - *Analisi strutturale della Successione epiliguride affiorante nell'area di Pavullo nel Frignano (MO). Appennino Settentrionale*. Istituto di Geologia di Modena, Tesi non pubbl.
- SESTINI G. (1970) - *Sedimentation of the late geosynclinal stage. In Development of the Northern Apennines Geosyncline*. Edited by G Sestini. Sediment. Geol., **4**, 445-480.
- TREVES B. (1984) - *Orogenic belts as accretionary prism: the example of the Northern Apennines*. Ofioliti, **9** (3), 577-618
- WALLACE R.E. (1951) - *Geometry of shearing stress and relation to faulting*. J. Geol., **59**, 118-130.

Manoscritto definitivo consegnato il 14 giugno 1994

Finito di stampare il 2 marzo 1995