

## I THRUSTS APPENNINICI ESTERNI NEL SETTORE FIRENZUOLA-BOCCA TRABARIA. EVOLUZIONE DEFORMATIVA ED IMPLICAZIONI STRUTTURALI

### INDICE

RIASSUNTO	pag. 87
ABSTRACT	" 87
1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE	" 88
2. ANALISI MESOSTRUTTURALE	" 89
2.1 UNITA' CERVAROLA-FALTERONA	" 89
2.2 UNITA' DI CASTEL GUERRINO	" 92
2.3 SUCCESSIONE UMBRO-MARCHIGIANO-ROMAGNOLA	" 93
3. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	" 93
3.1 EVOLUZIONE DEFORMATIVA	" 93
3.2 IMPLICAZIONI MECCANICHE	" 93
3.3 TEMPI DI AVANZAMENTO	" 96
BIBLIOGRAFIA	" 96

### RIASSUNTO

Vengono sintetizzati i risultati dello studio strutturale della catena appenninica nel settore compreso tra l'area di Firenze a nord-ovest e Bocca Trabaria a sud-est. In particolare è stato studiato il *thrust* dell'Unità del Cervarola-Falterona, dell'Unità di Castel Guerrino ed i *thrusts* interni della Formazione Marnoso-Arenacea. Il rilievo geologico-strutturale di dettaglio, basato sull'analisi di vari tipi di mesostrutture, ha portato ad una migliore definizione degli assetti geometrici delle unità affioranti con particolare riguardo ai loro rapporti reciproci ed alle strutture interne; sono state inoltre individuate cronologie relative di eventi deformativi e determinate le condizioni cinematiche di messa in posto. Per l'Unità Cervarola-Falterona i livelli di Scisti Varicolori hanno preservato le strutture deformative permettendo l'acquisizione di dati interessanti soprattutto per lo studio delle modalità di deformazione. Caratteristica peculiare di questa formazione sono i sistemi di vene di taglio, lo studio dei quali ha consentito la determinazione della direzione di accavallamento.

Per l'Unità di Castel Guerrino e per la Formazione Marnoso-arenacea, le mesostrutture riconosciute sono soprattutto sistemi di *joint* estensionali (quasi costantemente riempiti in calcite) e sistemi di *joint* di taglio. Sono comunque presenti, specialmente nelle zone di *thrust*, molte vene di taglio. Lo studio dell'assetto e delle relazioni tra queste strutture ha permesso di ottenere una cronologia relativa degli eventi deformativi: i sistemi di *joint* estensionali risultano essere precedenti a quelli di taglio e successivamente entrambi i sistemi sono stati riorientati dalle strutture plicative relative ai *thrusts*. Le relazioni tra piegamenti e *thrusts*, consentono di ipotizzare una contemporaneità tra queste strutture che infatti risultano sempre intimamente connesse.

Dagli indicatori cinematici presenti, ottenuti dai sistemi di vene di taglio che interessano sia gli Scisti Varicolori che le altre formazioni, si deducono direzioni di compressione orientate in genere obliquamente rispetto all'andamento dei *thrusts* e precisamente verso N-N20 nell'area compresa tra Firenze e Caprile, verso N50-60 nell'area a sud dei terreni alloctoni della Val Marecchia. In quest'area però anche i

*thrusts* subiscono una variazione di orientazione, assumendo un andamento da N-S per il *thrust* dell'Unità Cervarola-Falterona a NNW-SSE per quelli della Marnoso-arenacea. L'angolo tra la direzione di compressione determinata e la direzione del *thrust* resta comunque invariato nei due settori nominati, suggerendo la possibilità di movimenti lungo la zona di affioramento dei terreni della Val Marecchia. Resta tuttavia da spiegare la direzione di compressione obliqua rispetto a quella deducibile dall'andamento dei *thrusts* in affioramento: è possibile che si tratti di una direzione dovuta alle ultime fasi di messa in posto o ad una riattivazione in tempi più recenti rispetto a quelli della nucleazione del *thrust*. La storia deformativa riconosciuta si inserisce molto bene nell'ambito dei modelli recenti di deformazione delle catene a *thrust* specie per quanto riguarda le modalità di sviluppo ed evoluzione temporale.

### ABSTRACT

The Northern Apennines thrust system consists of classic foredeep deposits that have been progressively involved in thrusting towards the northeast from Oligocene to the Recent.

The outcropping geological units, the Cervarola-Falterona unit (Early-Middle Miocene sandstones, shales and marlstones), the Castel Guerrino unit (Middle Miocene sandstones and marlstones) and the Marnoso-Arenacea unit (Middle-Late Miocene marly sandstones), are progressively younger towards the foreland, implying that sedimentation and deformation developed together.

During thrusting, the Scisti Varicolori formation of the Cervarola-Falterona unit was very intensely deformed and widely affected by shear veins filled with calcite. A regional pattern has been detected in the vein distribution: veins are concentrated some ten metres above the thrust fault, in a band a few metres thick, and can be grouped into two systems with typical orientation in respect to the thrust-fault.

In turbiditic arenaceous formations the most important structural feature are the joint systems in addition to vein systems. The Marnoso-arenacea formation provides good examples of pre-thrust and thrust related structures so that a chronological and structural evolution can be argued. An extensional calcite-filled joint system, with two sub-vertical and orthogonal sets with constant orientation, developed before thrusting. A later conjugated shear joint system which cross-cuts the extensional veins, were developed in the early stages of thrusting. Folds related to the thrusting (i.e. footwall synclines or hangingwall anticline) spatially reoriented the previously formed joint systems. In the thrust zone shear veins give good indications about thrust direction of movement: an almost constant direction around N-N20E has been detected for the northern part of the area. South of Val Marecchia alloctonous formations, the thrust directions is N50-60E according to the N-S direction of thrust fault.

**PAROLE CHIAVE:** Analisi strutturale, Appennino Settentrionale, Thrust, Joint, Vene.

**KEY WORDS:** Structural analysis, Northern Apennines, Thrust, Joint, Vein.

(\*) Dipartimento Scienze della Terra - Università di Firenze.

# 1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

Il settore della catena appenninica preso in esame è compreso tra Firenzuola a NW ed il P.so di Bocca Trabaria a SE. Nell'area studiata (Fig. 1), sono presenti tre importanti unità tettoniche dell'Appennino settentrionale; procedendo dall'interno verso l'esterno, tali unità sono: l'Unità Cervarola-Falterona (NARDI & TONGIORGI, 1962; DALLAN NARDI & NARDI, 1972; BOCCALETTI *et alii* (ed.), 1987; ABBATE & BRUNI, 1987); l'Unità di Castel Guerrino (GROSCURTH, 1971; DE JAGER, 1979); la Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola, rappresentata quasi esclusivamente dalla Marnoso-Arenacea, a sua volta suddivisibile in due Unità indipendenti dal punto di vista paleogeografico e tettonico ovvero l'Unità di M. Nero, piú interna e la Marnoso-Arenacea s.s. piú esterna (DE JAGER, 1979; TEN HAAF & VAN WAMEL, 1979; DE FEYTER, 1982; DE FEYTER *et alii*, 1986; RICCI LUCCHI, 1986 a, b). Tali unità sono in contatto tettonico, appilate le une sulle altre nell'ordine precedente, ovvero l'Unità Cervarola-Falterona risulta essere geometricamente superiore, mentre la Suc-

cessione Umbro-Marchigiano-Romagnola occupa la posizione tettonicamente inferiore.

Al fine di chiarire e meglio definire i rapporti geometrici e strutturali tra le varie unità affioranti, le modalità cinematiche di messa in posto, e, ove possibile, di ricostruire la storia deformativa dell'area, è stata effettuata un'accurata analisi meso-strutturale, con particolare riguardo allo studio dei rapporti tra meso e macro strutture.

Dal punto di vista macrostrutturale lo studio effettuato ha portato a qualche novità rispetto ai dati precedenti, che qui descriveremo solo brevemente rimandando a lavori piú dettagliati la descrizione puntuale (SANI, 1989; 1990). Per quanto riguarda l'Unità Cervarola-Falterona, che nella zona in esame risulta costituita da quattro formazioni (dal basso verso l'alto: Scisti Varicolori, Arenarie del M. Falterona, Arenarie del M. Cervarola, Marne di Vicchio), l'assetto generale consiste in numerosi *thrust* il livello di scollamento dei quali è localizzato all'interno degli Scisti Varicolori. Questa formazione marca quasi sempre il *thrust* principale dell'Unità Cervarola-Falterona sulle altre unità; inoltre, localmente, ad esempio nell'area di Vil-

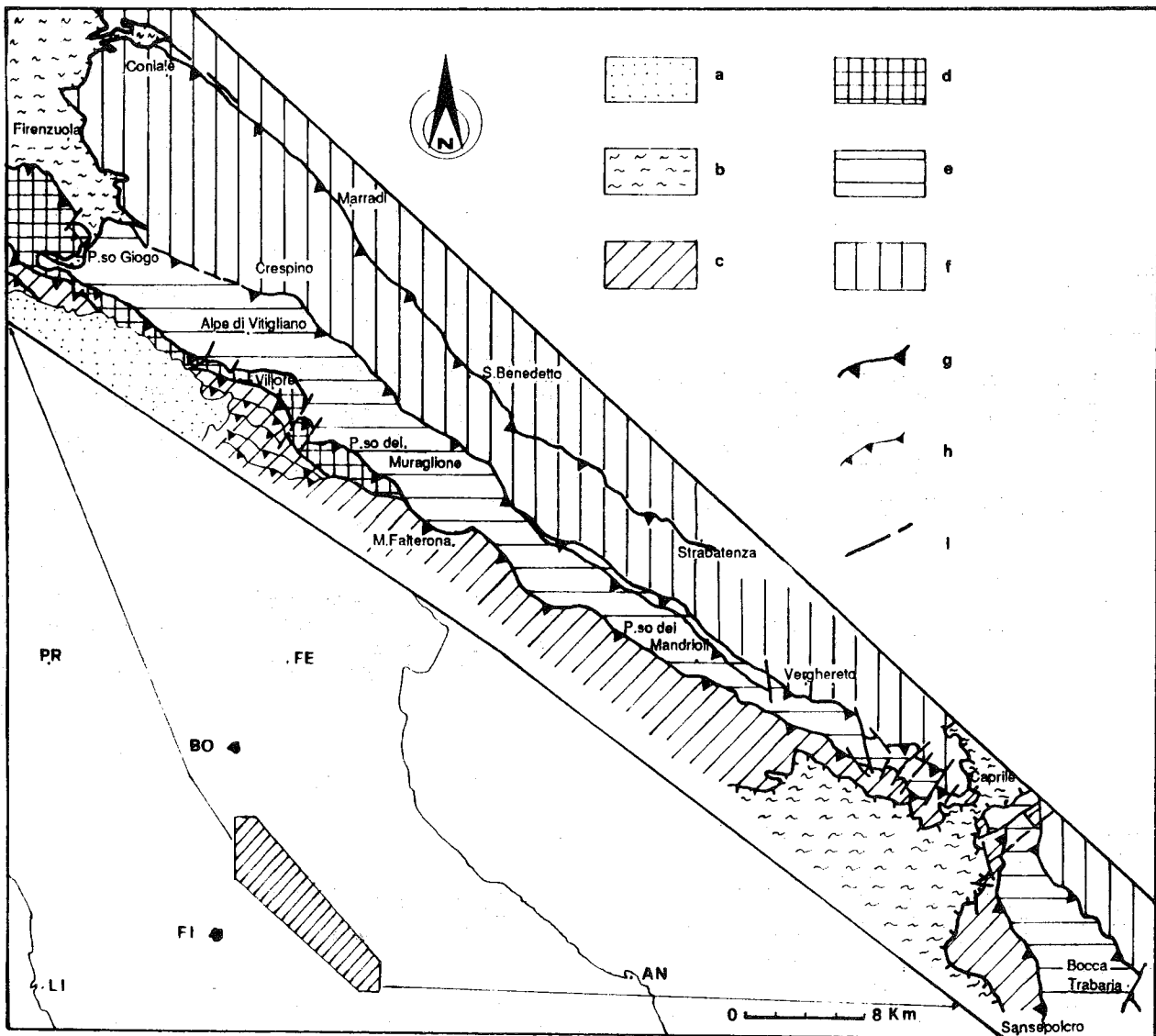


Fig. 1 - Cartina schematica dell'area studiata: a) depositi del bacino lacustre del Mugello; b) terreni alloctoni del Complesso Caotico di Firenzuola e della Coltre della Val Marecchia; c) Unità Cervarola-Falterona; d) Unità di Castel Guerrino; e) Marnoso-Arenacea, Unità di M. Nero; f) Marnoso-Arenacea s.s.; g) *thrust* principali; h) *thrust* minori; i) faglie.

lore (Fig. 2) si hanno strutture tipo "leading imbricate thrust fan" (BOYER & ELLIOTT, 1982), costituite da numerosi piccoli thrust che si ricongiungono verso il basso a quello principale (SANI, 1989; 1990). L'accavallamento dell'Unità Cervarola-Falterona avviene nella zona a nord-est sull'Unità di Castel Guerrino, e, dal M. Falterona verso SW, direttamente sulla Marnoso-Arenacea. Un altro aspetto interessante è costituito dal fatto che l'orientazione del thrust dell'Unità Cervarola-Falterona cambia nell'area a sud di Caprile ovvero oltre i terreni alloctoni della Val Marecchia, assumendo un andamento submeridiano (Fig. 3).

Nell'area in esame affiora quasi interamente l'Unità di Castel Guerrino, definita da GROSCURTH (1971), che è stata da noi cartografata in tutta la sua lunghezza ed estensione (Fig. 2). Nelle fonti cartografiche precedenti (Carta Geologica d'Italia F. 98, 99, 107) questa unità era stata compresa sia nell'Unità Cervarola-Falterona (Macigno del Mugello e/o Macigno del Chianti), sia nella formazione Marnoso-Arenacea (CREMONINI & ELMI, 1971 a, b; MERLA & BORTOLOTTI, 1969). All'estremità NW della zona studiata (Figg. 1 e 2), questa unità affiora estesamente e sovrascorre direttamente il Complesso Caotico di Firenzuola. All'altezza del M. Falterona, l'Unità di Castel Guerrino viene interamente sovrascorsa dall'Unità Cervarola-Falterona, e non riaffiora più proseguendo verso sud. Tale situazione può essere probabilmente spiegata con un avanzamento maggiore dell'Unità Cervarola-Falterona rispetto all'Unità di Castel Guerrino per effetto di una riattivazione.

La Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola occupa la maggior parte dell'area studiata. E' rappresentata soprattutto dalla Marnoso-Arenacea e, in minor misura, da Marne di Verghereto e da Schlier. Per quanto riguarda la Marnoso-Arenacea, è possibile distinguere una porzione più interna, l'Unità di M. Nero, da una più esterna la Marnoso-Arenacea s.s.. La suddivisione, già operata per le aree più meridionali da TEN HAAF & VAN WAMEL (1979) su basi sostanzialmente tettoniche, ha anche una giustificazione dal punto di vista stratigrafico (BENINI *et alii*, 1990; FARABEGOLI *et alii*, 1990). L'Unità di M. Nero è in contatto tettonico con la Marnoso-Arenacea s.s. tramite il thrust di Crespino-Verghereto (Figg. 1 e 4). Per quanto riguarda l'assetto macrostrutturale di questo thrust l'aspetto probabilmente più importante risulta la sua prosecuzione verso NW fino al Complesso Caotico affiorante nell'area di Firenzuola, che comporta l'attribuzione all'Unità di M. Nero degli affioramenti di Marnoso-arenacea compresi tra l'Unità di Castel Guerrino ed il thrust stesso. Tale prosecuzione non risulta dai lavori precedenti, ma anzi TEN HAAF & VAN WAMEL (1979) spiegano con una anticlinale rovesciata il contatto tra l'Unità di M. Nero e quello con la Marnoso-arenacea s.s. più esterna. Inoltre il thrust interessa anche l'olistostroma di Casaglia ed i livelli di slump ad esso sopra e sottostanti, che infatti si interrompono bruscamente contro di esso (SANI, 1990). Ancora verso NW il thrust prosegue e sparisce sotto il Complesso caotico di Firenzuola. Circa all'altezza del M. Falterona, il thrust principale si sdoppia proseguendo in questo modo verso SE, per alcuni km (Figg. 1 e 4). Poco a SE del P.so dei Mandrioli il thrust più interno termina contro una delle numerose faglie presenti nell'area di Verghereto e legate alla maggiore tettonizzazione dovuta alla presenza dei terreni alloctoni della Val Marecchia.

Il thrust più esterno, invece, prosegue fino a Caprile e poi più a sud, oltre i terreni della Val Marecchia, subendo anche in questo caso, come in quello dell'Unità Cervarola-Falterona un netto cambio di direzione.

Il thrust più esterno da noi studiato è interno alla Marnoso-Arenacea s.s. ed è stato cartografato da Coniale a Strabatenza (Figg. 1 e 4). L'assetto strutturale di questa porzione esterna della Marnoso-Arenacea risulta globalmente meno complesso e variabile rispetto alle precedenti Unità.

## 2. ANALISI MESOSTRUTTURALE

Le Unità affioranti risultano relativamente uniformi dal punto di vista litologico trattandosi per la maggior parte di grossi corpi sedimentari costituiti da una regolare alternanza di strati di arenaria e livelli pelitici. Unica eccezione sono i livelli di Scisti Varicolori e le Marne di Vicchio dell'Unità Cervarola-Falterona (Figg. 2 e 3), i pochi affioramenti di Schlier e le Marne di Verghereto per la Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola (Fig. 3). Nell'esposizione dei risultati dell'analisi mesostrutturale procederemo dall'interno verso l'esterno ovvero dall'Unità Cervarola-Falterona verso la Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola.

### 2.1 UNITA' CERVAROLA-FALTERONA

Come già accennato, i livelli di Scisti Varicolori hanno costituito l'orizzonte preferenziale lungo il quale si sono localizzati gli scollamenti di questa unità per cui il maggior numero di informazioni sulle modalità di accavallamento e di deformazione si ottengono dallo studio di questa formazione. La struttura più abbondante e interessante presente è costituita dalle vene di taglio in calcite; dalle fibre di accrescimento dei cristalli è possibile ricostruire la direzione del flusso dei fluidi che le ha generate. All'interno di una singola thrust-sheet è stata riconosciuta una precisa sequenza deformativa (SANI, 1989; 1990) dalla quale risulta che la fascia interessata dalle vene di taglio non si trova immediatamente a ridosso del thrust ma termina a qualche metro da esso dove è invece frequente un tipico assetto della fissilità delle argille detto *scaly-fabric*, del tutto simile a quello definito nelle aree di subduzione e accrezione attiva (Barbados Ridge, MOORE *et alii*, 1986; 1988). Sempre ispirandoci ai modelli messi a punto in tali aree, si può spiegare la presenza di fluidi a pressione con una deformazione per *simple shear* progressivo che comporta una riorientazione dei minerali argillosi ed espulsione d'acqua. Le vene di calcite possono riferirsi a due sistemi costituiti a loro volta da due set ciascuno. Il primo sistema presenta vene con direzione subparallela al thrust, immergenti sia parallelamente alla fissilità principale che in senso opposto (Figg. 2 e 3). Il secondo sistema, in genere meno rappresentato ma localmente prevalente, è costituito da due set trasversali rispetto al thrust e con andamento trascorrente delle fibre di accrescimento di calcite (Figg. 2 e 3). In genere comunque le direzioni di trasporto tettonico deducibili dalle fibre di accrescimento dei cristalli di calcite delle vene sono intorno a N-N20E per la parte a nord (Fig. 2), si dispongono più uniformemente verso N nella zona tra il P.so dei Mandrioli e Caprile, ma subiscono un netto cambio di direzione nell'area a sud

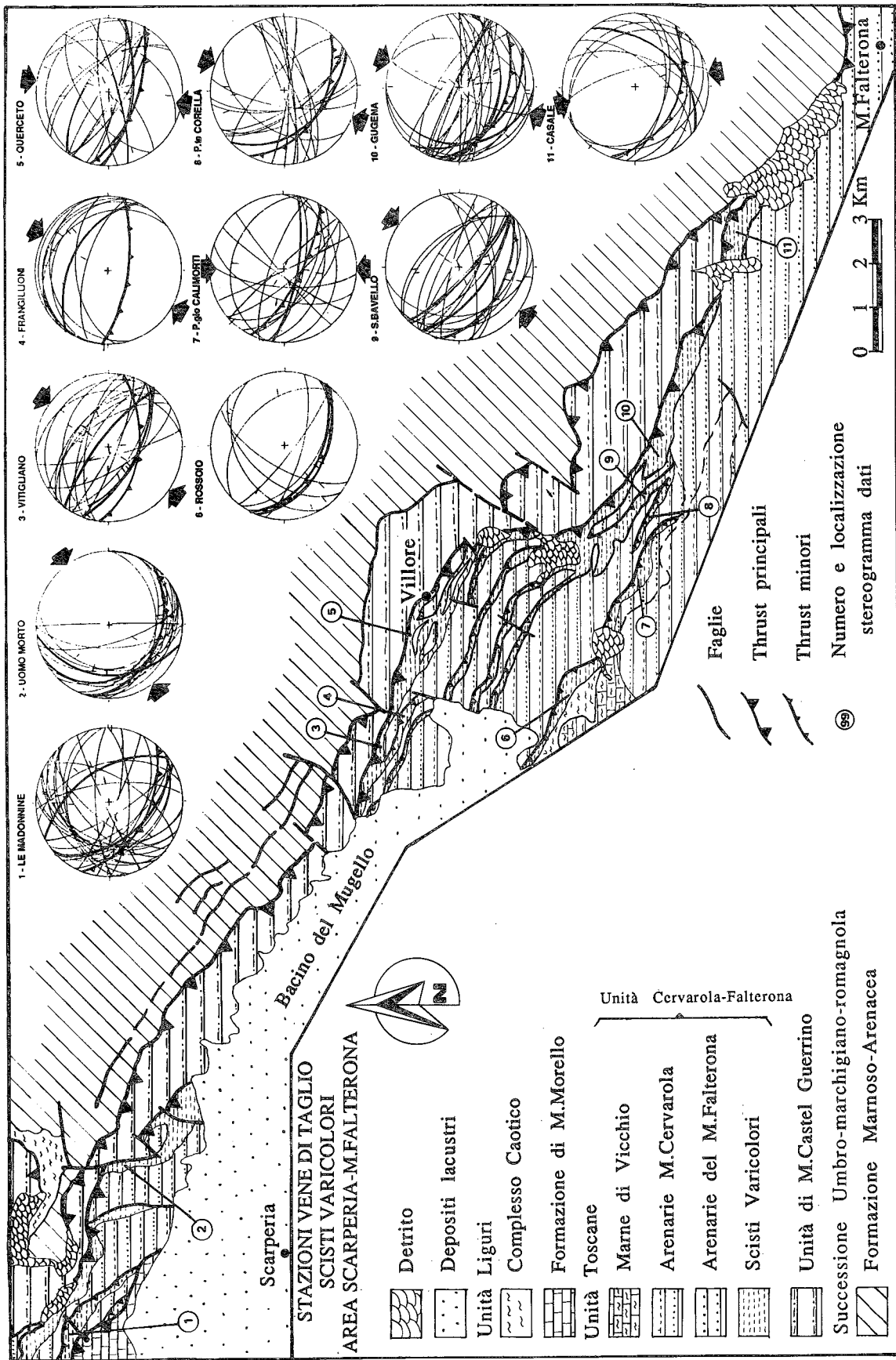


Fig. 2 - Cartina schematica dell'area Scarperia-M. Falterona. Sono riportati i dati delle vene di taglio degli Scisti Varicolori. Negli stereogrammi la ciclografica con i triangoli rappresenta l'andamento del *thrust*, la linea tratteggiata la stratificazione (da SANI, 1989, modificato).

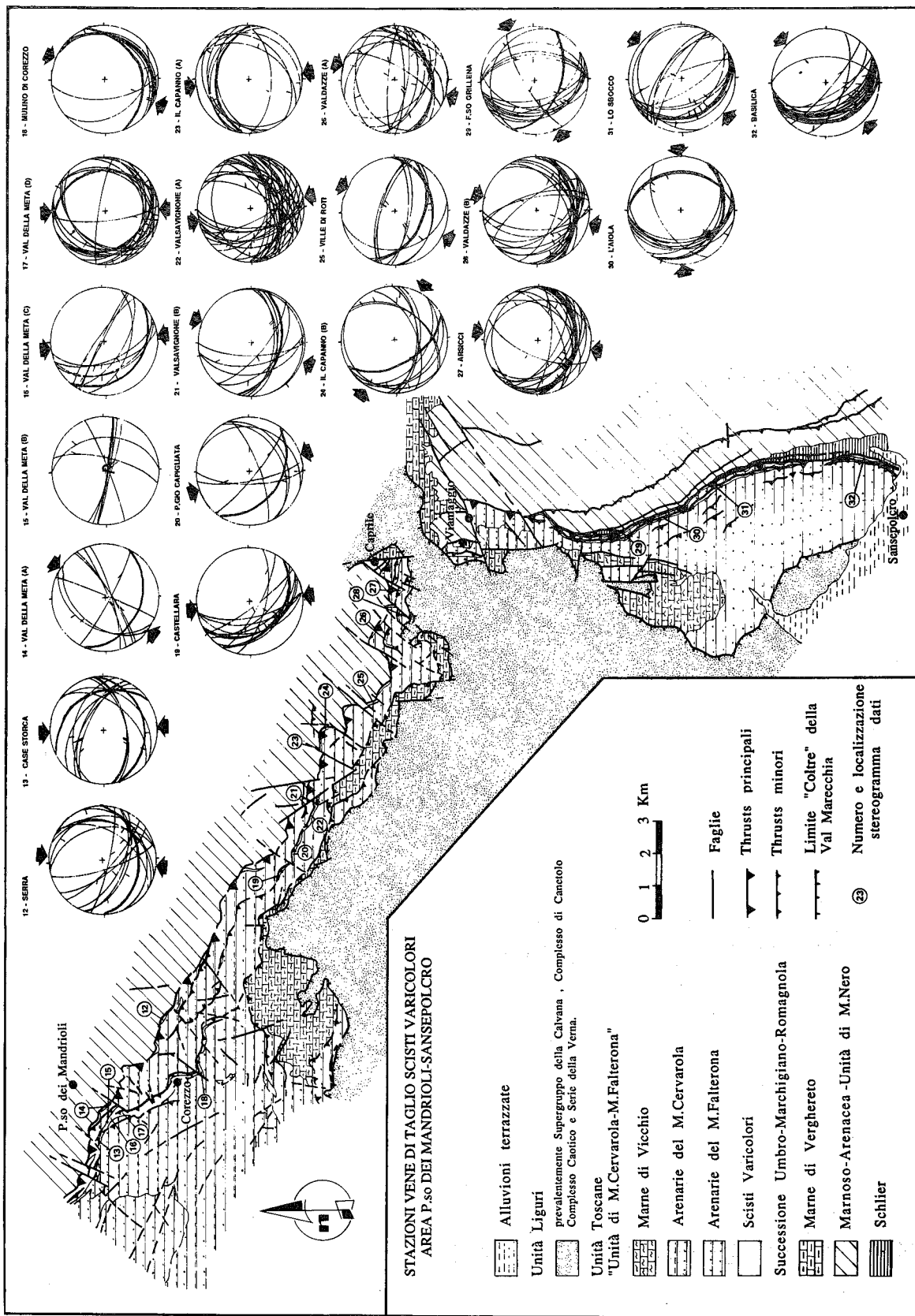


Fig. 3 - Cartina schematica dell'area P. so dei Mandrioli-Sansepolcro. Sono riportati i dati delle vene di taglio degli Scisti Varicolori. Negli stereogrammi la ciclografica più marcata rappresenta la stratificazione. L'area tra il P. so dei Mandrioli e Caprite è ripresa da BONINI (1990); quella tra Viamaggio e Sansepolcro da MORELLI (1988).

dei terreni della Val Marecchia indicando direzioni intorno a N50-60E (Fig. 3). Come già ricordato, in quest'area anche la direzione del *thrust* del Cervarola cambia, assumendo un andamento circa N-S (Fig. 3). Possiamo perciò osservare che i rapporti angolari tra la direzione del *thrust* e quella della direzione di accavallamento dedotta dall'analisi strutturale non cambiano.

Per quanto riguarda le altre formazioni dell'Unità Cervarola-Falterona, cioè le Arenarie del M. Cervarola, del M. Falterona e le Marne di Vicchio, le maggiori indicazioni sulla direzione di trasporto tettonico sono date, anche in questo caso dalle vene di taglio in calcite; abbiamo riportato i dati per aree omogenee da un punto di vista strutturale, ed il quadro che emerge è coerente con quanto già osservato in precedenza: la direzione di trasporto tettonico risulta generalmente intorno a N20E e varia, a sud di Caprile, assumendo un orientamento intorno a N50E (Fig. 4).

Altre strutture presenti sono costituite da sistemi di *joint* soprattutto diffusi nelle formazioni arenacee ad esempio nelle Arenarie del M. Cervarola e del M. Falterona. Localmente sono riconoscibili set ben rappresentati e riferibili a sistemi compatibili con le strut-

ture presenti, tuttavia la discontinuità di affioramento che contraddistingue queste formazioni non consente la messa a punto di un quadro coerente a scala regionale.

## 2.2 UNITA' DI CASTEL GUERRINO

Le mesostrutture presenti all'interno di questa formazione sono riconducibili a quelle già descritte precedentemente. Ancora una volta i dati più interessanti derivano dallo studio delle vene di taglio che sono state rappresentate per zone omogenee strutturalmente. Anche in questo caso si ottengono direzioni di accavallamento intorno a N15-20E con la sola eccezione della zona a nord, nell'area di M. Castel Guerrino dove la direzione di accavallamento, intorno ad E-W, è quindi anomala nel contesto finora delineato, pur non essendo incompatibile con l'andamento del contatto tettonico tra questa Unità ed il sottostante Complesso Caotico, può essere determinata, tardivamente, per fenomeni di galleggiamento su substrato poco competente (Fig. 4).

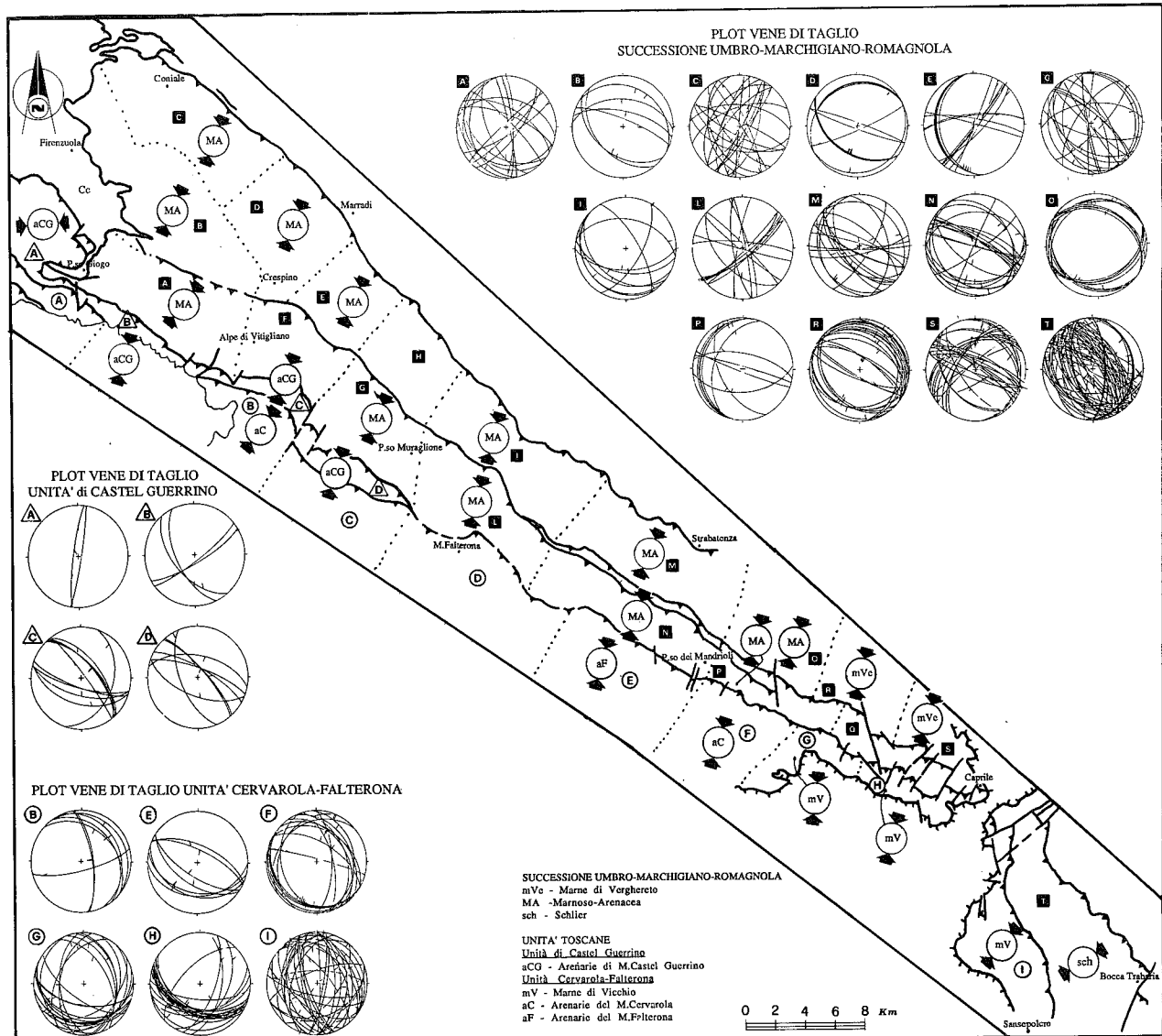


Fig. 4 - Schema di tutta l'area studiata. Sono riportati i dati delle vene di taglio delle formazioni arenacee. Le sigle all'interno degli stereogrammi con le direzioni di compressione, si riferiscono alla litologia. I diagrammi si riferiscono a zone strutturalmente omogenee, delimitate dalle linee a puntini.

Sono presenti anche in questo caso sistemi di *joint* costituiti da piú set talora ben sviluppati, che in generale confermano quanto visto in precedenza.

### 2.3 SUCCESSIONE UMBRO-MARCHIGIANO-ROMA-GNOLA

Dal punto di vista delle mesostrutture analizzate è conveniente trattare globalmente questa Unità anche se nel paragrafo precedente è stata suddivisa in due parti. L'abbondanza e la bellezza degli affioramenti disponibili ha consentito una ottima correlabilità delle strutture presenti e degli eventi riconosciuti. Inoltre si è potuta ricostruire un'evoluzione strutturale completa dalle prime fasi deformative precedenti l'accavallamento.

La struttura meglio rappresentata sia quantitativamente che qualitativamente è costituita senz'altro dai sistemi di *joint*, che risultano inoltre omogeneamente distribuiti su tutta l'area studiata. Abbiamo riconosciuto principalmente due sistemi di *joint* costituiti entrambi da due set coniugati, piú un altro sistema con diffusione discontinua e locale. Il primo sistema è costituito da due set di *joint* estensionali ortogonali tra loro, perpendicolari alla stratificazione e quasi costantemente riempiti in calcite (SANI, 1990). Il primo set è orientato NNE-SSW e l'altro, ad esso perpendicolare, è orientato intorno a WNW-ESE (Fig. 5a), si tratta rispettivamente di "ac" e "bc" *joint* (PRICE, 1966; HANCOCK, 1985).

Nelle aree prossime alle zone di accavallamento, ma talvolta anche molto distante dai *thrust* stessi, in presenza di strati sub-orizzontali, è presente il secondo sistema di *joint*, costituito da due set con assetto tipo h01 (HANCOCK, 1985) orientati cioè con direzione subparallela a quella della stratificazione (Fig. 5b). Si tratta in questo caso di *joint* di taglio (*shear joint*) con angoli diedri tra i due set compresi tra i 60 e gli 80°.

Dai rapporti di antecedenza osservati tra i set dei due sistemi possiamo affermare che il sistema estensionale risulta precedente a quello di taglio ed entrambi sono stati ruotati e riorientati dalle deformazioni plicative e di taglio relative all'accavallamento (Fig. 5c). Questi rapporti sono evidenziati dal fatto che in corrispondenza di strati subverticali o rovesci, presenti nelle zone di *thrust*, soprattutto il set orientato WNW-ESE del sistema estensionale assume assetti conseguenti all'inclinazione della stratificazione arrivando a disporsi suborizzontalmente in corrispondenza di strati subverticali (Fig. 5c). Il sistema NNE-SSW invece, dato che ha un assetto trasversale, subisce minori variazioni nell'orientazione. Per quanto riguarda il sistema di taglio, in presenza di strati verticali si sono localmente osservati lievissimi rigetti normali lungo le superfici dei *joint*, che però, se riportati all'orizzontale ritornano ad essere inversi come sistematicamente notato in zone con strati poco inclinati (Fig. 5c). Limitatamente alle zone di *thrust*, che possono raggiungere alcune centinaia di metri di ampiezza e che sono caratterizzate da notevole tettonizzazione con piegamenti, mesofaglie, strati verticali, sono presenti molte vene di taglio, lo studio delle quali ha portato alla individuazione delle direzioni di accavallamento (Fig. 4). Molte delle mesofaglie e delle vene di taglio rilevate si sono impostate su fratture preesistenti ed orientate favorevolmente, in genere *joint* dei sistemi precedentemente descritti. Anche in questo

caso le direzioni di accavallamento sono intorno a N20E, per tutti i *thrust* presenti nella Marnoso-Arenacea, con la sola eccezione di quelli a sud dei terreni della Val Marecchia dove le direzioni di trasporto tettonico individuate risultano intorno a N50E (Fig. 4).

### 3. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

#### 3.1 EVOLUZIONE DEFORMATIVA

L'analisi mesostrutturale effettuata, unitamente alla revisione critica degli assetti geometrici dei *thrust* affioranti in quest'area, ha portato alla individuazione di una evoluzione deformativa che è stato possibile ricostruire soprattutto per la Marnoso-arenacea ma che riteniamo possibile estendere anche alle altre Unità. La presenza della calcite estensionale nel piú antico sistema di *joint* della Marnoso-Arenacea può indicare un'origine relativamente profonda per queste strutture, probabilmente durante la diagenesi, subito dopo la deposizione. I fluidi ricchi in carbonato di calcio, analogamente a quanto visto per gli Scisti Varicolori, possono essere originati per deformazione dei livelli argilloso-siltosi per espulsione dell'acqua in essi contenuta (MOORE *et alii*, 1986). Con il procedere della deformazione, il calo della pressione dei fluidi dovuto alla risalita dalle zone profonde a causa della messa in posto, ha portato alla precipitazione dei soluti ed alla cristallizzazione della calcite nelle vene (Fig. 6a). Successivamente, in posizione piú superficiale vista l'assenza di fluidi, si sono formati i *joint* di taglio (Fig. 6b). Queste strutture sono state poi riorientate e ridistribuite nello spazio dalle pieghe e dai *thrust* (Fig. 6c). Nelle zone di accavallamento, e geneticamente connesse ad essi, la presenza di vene testimonia una circolazione di fluidi a pressione, come è logico aspettarsi in zone dove si concentra la deformazione.

Per quanto riguarda la direzione di accavallamento individuata, essa risulta, per tutti i *thrust* studiati, verso N20E nella parte settentrionale e verso N50E in quella meridionale; si tratta di una direzione sfalsata rispetto a quella deducibile dall'andamento dei *thrust*. Sulle ragioni di questo disassamento non siamo attualmente in grado di pronunciarsi in modo definitivo, ma tra le probabili cause possono esserci riattivazioni recenti, o movimenti tardivi durante le ultime fasi di messa in posto; non è da escludere tuttavia la presenza di discontinuità in profondità orientate in modo tale da determinare l'attuale assetto, con direzioni di accavallamento diversamente orientate (SANI, 1990).

#### 3.2 IMPLICAZIONI MECCANICHE

L'evoluzione strutturale precedentemente delineata, se da un lato risulta piuttosto semplice, dall'altro apre alcuni problemi interessanti e, per alcuni aspetti, relativamente nuovi per queste aree. Tali aspetti riguardano ad esempio le cause meccaniche all'origine degli accavallamenti, la profondità dello scollamento, l'estensione laterale e verticale delle scaglie ed i tempi di messa in posto.

Recentemente CELLO & NUR (1988), hanno criticamente rivisto alcuni di questi problemi, mettendo a punto un modello nel quale ben si inquadra l'evoluzione deformativa da noi riconosciuta.

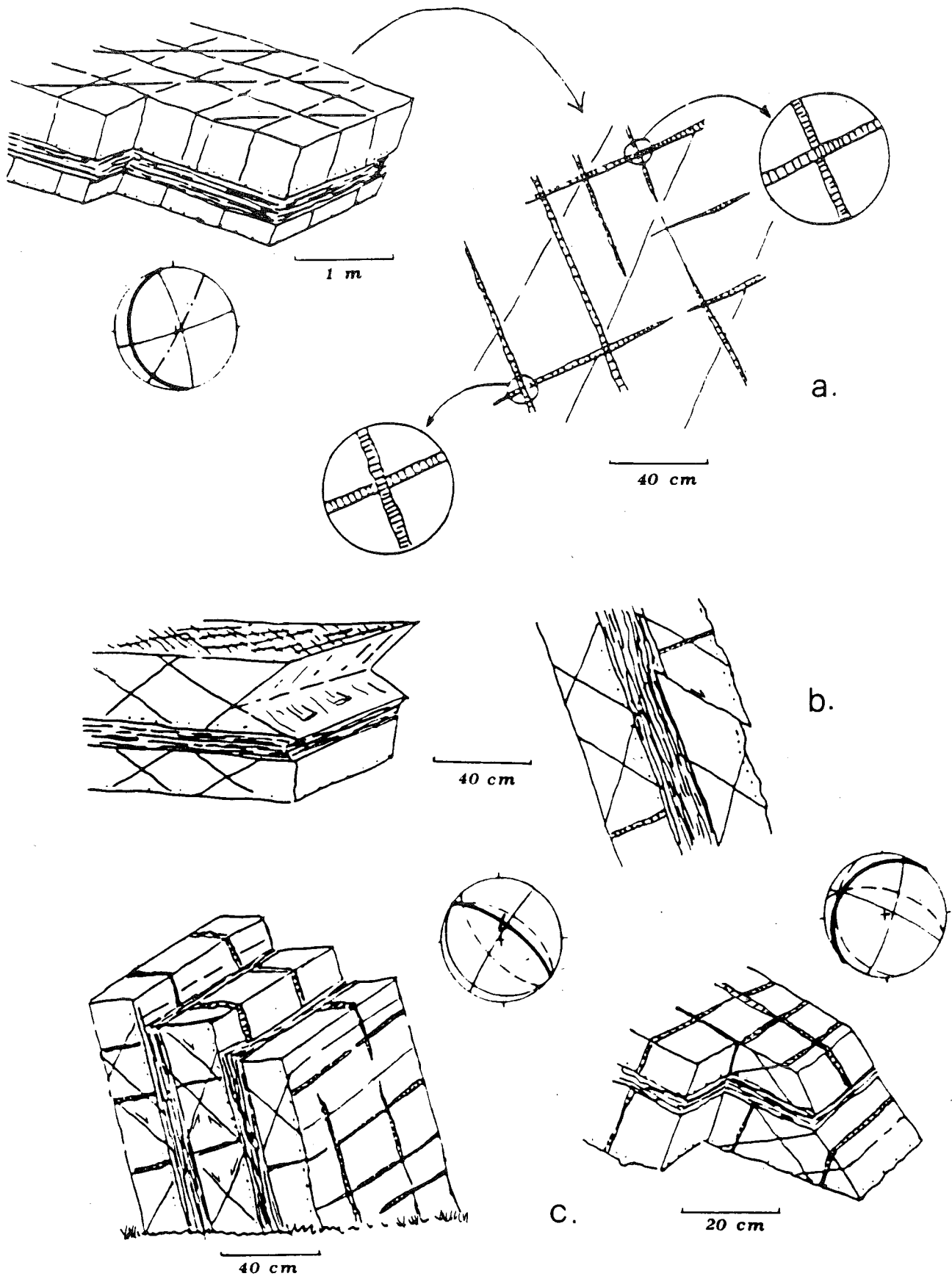


Fig. 5 - Esempi, ridisegnati da foto, dei sistemi di *joint* presenti nella Marnoso-arenacea. Per ogni disegno sono riportati i plot per indicare l'orientamento delle strutture. La ciclografica piú marcata indica la stratificazione, quella continua il sistema estensionale, quella a tratteggio il sistema di taglio e quella a tratto e punto il sistema locale. a) sistema estensionale; i due set si tagliano reciprocamente indicando una contemporaneità di formazione. E' rappresentato anche il sistema locale. b) Sistema di taglio, presente sia in strati poco inclinati che rovesci subverticali. c) Rapporti tra i due sistemi in strati rovesci subverticali e normali poco inclinati.



Uno dei processi dai quali dipende l'inizio del movimento di accavallamento è rappresentato dall'aumento anormale della pressione dei fluidi in un determinato orizzonte, che deve ovviamente arrivare ad uguagliare la pressione litostatica perché il *thrust* inizi a muoversi (GRETENER, 1972; 1981; SUPPE 1985; BREMAEKER, 1987; CELLO & NUR, 1988). Secondo CELLO & NUR (1988), sono sufficienti livelli impermeabili piuttosto sottili, in profondità, perché si creino le condizioni necessarie per la crescita della pressione dei pori fino a raggiungere la pressione litostatica. I tempi per tale crescita sono stimati da questi autori nell'ordine di poche centinaia di migliaia di anni. E' ovvio che tali livelli siano costituiti preferenzialmente da evaporiti e livelli argillosi, come l'esperienza geologica comune ha più volte indicato. Inoltre si può dimostrare (GRETENER, 1972, 1981) che tali livelli (detti di "superdebolezza", GRETENER, 1972), sono in genere poco inclinati, e spesso coincidenti con la stratificazione.

Nel nostro caso, il *thrust* dell'Unità Cervarola-Falterona, localizzato a livello degli Scisti Varicolori, è del tutto spiegabile con questo modello. Le elevate pressioni dei fluidi presenti sono dimostrate dalla presenza dei sistemi di vene descritti in precedenza. Per quanto riguarda la Marnoso-Arenacea, più difficile risulta l'individuazione di un livello preciso di scollamento nella serie, data l'uniformità della formazione; da un punto di vista meccanico comunque, è possibile dimostrare (CELLO & NUR, 1988), che anche in presenza di molti livelli sottili impermeabili possono svilupparsi sovrappressioni. Inoltre, anche senza supporre scollamenti all'interno della Marnoso-arenacea orizzonti di scollamento tipici nella Successione Umbro-Romagnola sono costituiti dalle Anidriti di Burano.

L'anormale pressione dei pori che si sviluppa, porta ad una locale diminuzione dello stress effettivo facilitando il comportamento fragile con sviluppo di una intensa fratturazione (CELLO & NUR, 1988); tale comportamento è stato da noi riscontrato nella Marnoso-Arenacea, dove lo sviluppo dei sistemi di *joint* precede l'accavallamento.

Un altro aspetto interessante è costituito dall'ampiezza dell'area interessata dalle sovrappressioni, L, in relazione alla profondità di scollamento, D. CELLO & NUR (1988), pongono come probabile un rapporto  $L/D = 1,6$  perché il *thrust* inizi a muoversi. Inoltre sembra probabile per questi autori che la spaziatura finale dei *thrust* sia dello stesso ordine della profondità di scollamento. Tali argomenti di nuovo ben si inseriscono nella situazione strutturale del settore appenninico da noi investigato: infatti all'interno dell'Unità Cervarola-Falterona si hanno localmente molti *thrust*, poco spazati (500-1000 m), delimitati alla base dagli Scisti Varicolori, con spessori della serie soprastante di circa 400-500 m. In altre aree, nella stessa unità si ha invece un solo livello di scollamento, con affioramento di spessori molto maggiori della serie.

Nella Marnoso-arenacea la spaziatura dei *thrust* è maggiore, anche se variabile, passando da circa 5-10 Km a NW e mantenendosi sui 4-5 Km, o meno, nelle altre aree. Secondo il modello precedentemente citato, queste dovrebbero essere anche le profondità di scollamento dato che i *joint* descritti in precedenza sono diffusi ovunque indicando che tutta l'area è stata interessata da sovrappressioni. Gli scollamenti quindi non si verrebbero a collocare all'interno della Marnoso arenacea ma, più probabilmente, a quello delle Anidriti

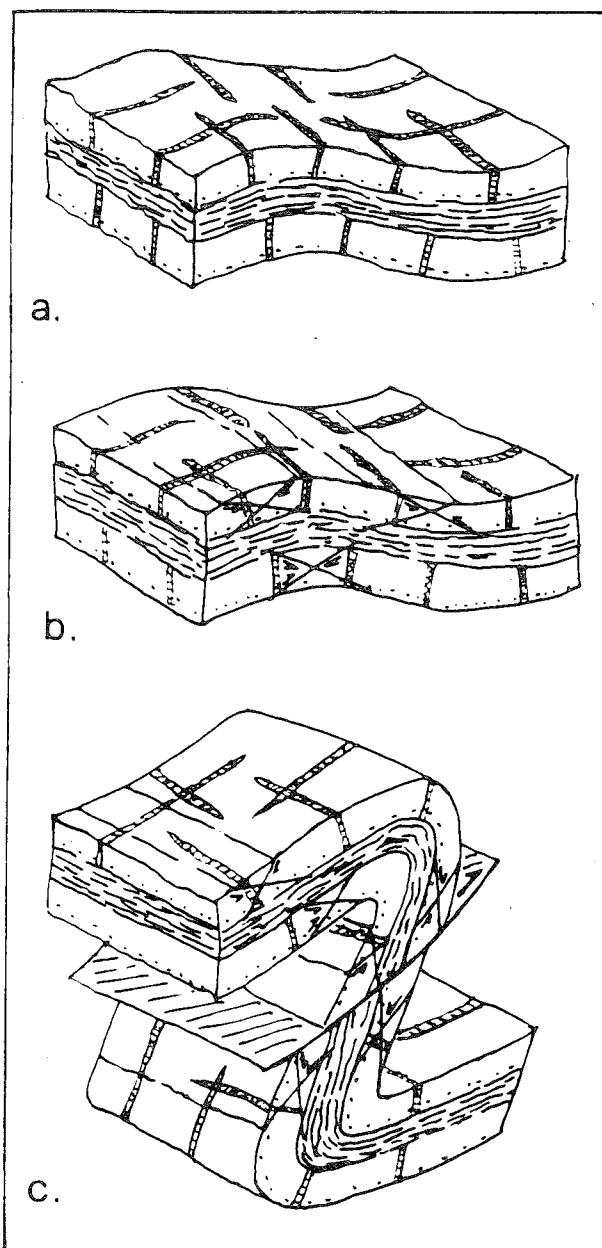


Fig. 6 - Schema dell'evoluzione strutturale della Marnoso-arenacea: a) formazione dei *joint* estensionali; b) formazione dei *joint* di taglio; c) piegamento e *thrusting*.

di Burano. Anche considerando gli spessori della Successione Umbro-Romagnola (BORTOLOTTI *et alii*, 1970; DALLAN NARDI & NARDI, 1972; CENTAMORE *et alii*, 1986; CANTALAMESSA *et alii*, 1986; BOCCALETTI *et alii* (ed), 1987) e i dati provenienti da alcune perforazioni (Dicomano 1, Palazzuolo 1, Marradi 1, Modi 1x, Montefreddo 2) si vede come al di sotto della successione torbiditica della Marnoso-Arenacea sia in genere presente la serie di terreni pressoché regolare senza che vengano individuati raddoppi di serie intermedi. Inoltre spessori di questo ordine (5-6 Km) per le profondità di distacco dei *thrust* sarebbero in accordo con quelli presenti in quasi tutte le catene a *thrust* (GRETENER, 1972, 1981; SUPPE 1985; CELLO & NUR, 1988).

### 3.3 TEMPI DI AVANZAMENTO

Da un punto di vista temporale, la formazione di una catena a *thrust* è un processo che possiamo valutare in decine di Ma (GRETENER, 1972; 1981). Anche la catena appenninica rientra in questo ordine di grandezza: si può infatti valutare l'inizio della tetto-genesi dall'Oligocene sup. fino ad oggi, ovvero circa 25 Ma (RICCI LUCCHI, 1986b; VAI, 1987; BOCCALETTI *et alii*, 1990a,b).

Un aspetto diverso è rappresentato dalla messa in posto delle singole scaglie tettoniche della catena, che prevede un tempo nettamente inferiore, dell'ordine del milione di anni (GRETENER, 1972, 1981); durante questo lasso di tempo il sistema si "ricarica", acquista di nuovo un valore di pressione dei pori paragonabile a quello della pressione litostatica, ed una nuova scaglia viene messa in posto (GRETENER, 1972, 1981). Nel nostro caso, per l'Unità Cervarola-Falterona possiamo stimare un'età minima per l'inizio della messa in posto intorno al Serravalliano sup.-Tortoniano inf.; per la Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola, i terreni più recenti coinvolti sono le Marne di Verghereto di età Tortoniana, il che porta ad ipotizzare un accavallamento almeno al Tort.sup-Messiniano. Età più o meno simili sono riportate anche nella carta di BIGI *et alii* (1989), che pongono un'età genericamente tortoniana per il *thrust* dell'Unità Cervarola-Falterona e messiniana per i *thrusts* più interni della Marnoso-Arenacea. Infine VAI (1987, 1988) e BOCCALETTI *et alii* (1990 a,b) hanno individuato alcuni periodi di tempo corrispondenti ad altrettante fasi tettoniche, per le quali sono state stimate le entità degli accavallamenti. Per gli intervalli Tortoniano-Messiniano e Messiniano-Pliocene inferiore si hanno velocità dei fronti principali dell'ordine dei 10 Km/Ma in media. Inoltre RICCI LUCCHI (1986b), sulla base della progressiva migrazione del depocentro dell'avanfossa appenninica, ha stimato una velocità massima di migrazione dell'ordine di 8 Km/Ma, corrispondente presumibilmente anche alla migrazione del fronte attivo dell'accavallamento. Quindi in un periodo di tempo di circa 4-5 Ma sono state messe in posto l'Unità del Cervarola-Falterona, l'Unità di Castel Guerrino e almeno i due *thrust* più interni della Marnoso-Arenacea.

Come si vede, compatibilmente con le incertezze del caso, siamo entro i tempi derivati teoricamente per la messa in posto delle singole *thrust sheet*. La messa in posto dei *thrusts* rappresenta inoltre un caso di rapido carico, che può portare a causare sovrappressioni nella scaglia sottostante, ed innescare quindi le condizioni per la messa in posto di una nuova scaglia. Si viene quindi a creare un meccanismo che si autoalimenta (GRETENER, 1972, 1981), e che spiega il gran numero di scaglie accavallate presenti in genere nelle catene a *thrust*. Un altro aspetto da tenere presente è il riequilibrio isostatico dovuto agli accavallamenti stessi (GRETENER, 1972, 1981). La sovrapposizione di due o più scaglie porta per conseguenza isostatica alla formazione di depressioni a ridosso degli accavallamenti; non è quindi un caso che la formazione delle avanfosse appenniniche inizi quasi contemporaneamente e segua di pari passo gli accavallamenti (RICCI LUCCHI, 1986b; BOCCALETTI *et alii*, 1990a,b; VAI, 1987).

### BIBLIOGRAFIA

- ABBATE E. & BRUNI P. (1987) - *Modino-Cervarola o Modino e Cervarola? Torbiditi Oligo-Mioceniche ed evoluzione del margine nord-appenninico*. Mem. Soc. Geol. It., **39**, 19-33.
- BENINI A., FARABEGOLI E., MARTELLI L. & SEVERI P. (1990) - *Stratigrafia e paleogeografia del Gruppo di S. Sofia dell'Appennino forlivese*. Secondo seminario di Cartografia Geologica, Bologna 21-23 febbraio 1990. Riassunti, 19.
- BIGI G., CASTELLARIN A., CATALANO R., COLI M., COSENTINO D., DAL PIAZ G.V., LENTINI F., PAROTTO M., PATACCA E., PRATURLON A., SALVINI F., SARTORI R., SCANDONE P. & VAI G.B. (1989) - *Synthetic structural-kinematic map of Italy*. C.N.R. P.F. Geodinamica. 28th International Geological Congress, Washington D.C. - USA.
- BOCCALETTI M., DECANDIA F.A., GASPERI G., GELMINI R., LAZZAROTTO A. & ZANZUCCHI G. (editori) (1987) - *Note illustrative della Carta Strutturale dell'Appennino Settentrionale*. C.N.R. - P.F. Geodinamica Pubbl. 429, pp. 203.
- BOCCALETTI M., CIARANFI N., COSENTINO D., DEIANA G., GELATI R., MASSARI F., MORATTI G. & RICCI LUCCHI F. (1990) - *Migrating foredeep-thrust belt system in the Northern Apennines and Southern Alps*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **77**, 1, 3-14.
- BOCCALETTI M., CIARANFI N., COSENTINO D., DEIANA G., GELATI R., LENTINI F., MASSARI F., MORATTI G., PESCATORE T., RICCI LUCCHI F. & TORTORICI L. (1989) - *Palinspastic restoration and palaeogeographic reconstruction of the peri-tyrrhenian area during the Neogene*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **77**, 1, 41-50.
- BONINI M. (1990) - *Analisi strutturale dei thrust appenninici esterni nel settore compreso tra Badia Prataglia e Caprile*. Tesi di Laurea inedita, Università degli Studi di Firenze.
- BORTOLOTTI V., PASSERINI P., SAGRI M. & SESTINI G. (1970) - *The Miogeosynclinal sequences*. In "Development of the Northern Apennines Geosyncline" (G. SESTINI Ed.), Sed. Geol., Special Issue, vol. 4/3-4, 341-444.
- BOYER S.E. & ELLIOTT D. (1982) - *Thrust Systems*. A.A.P.G. Bull., **66/9**, 1196-1230.
- CANTALAMESSA G., CENTAMORE E., CHIOCCHINI U., MICARELLI A., POTETTI M., con la collaborazione di DI LORITO L. (1986) - *Il Miocene delle Marche*. In vol. spec. "La Geologia delle Marche", Studi geol. Camerti, p. 35-55.
- CELLO G. & NUR A. (1988) - *Emplacement of foreland Thrust systems*. Tectonics, **7**, 261-271.
- CENTAMORE E., DEIANA G., MICARELLI A. & POTETTI M. (1986) - *Il Trias-Paleogene delle Marche*. In vol. spec. "La Geologia delle Marche" Studi geol. Camerti, p. 9-27.
- CREMONINI G. & ELMI C. (1971 a) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia, foglio 98*. Vergato, 51 pp.
- CREMONINI G. & ELMI C. (1971 b) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia, foglio 99*. Faenza, 53 pp.
- DALLAN NARDI L. & NARDI R. (1972) - *Schema stratigrafico e strutturale dell'Appennino Settentrionale*. Mem. Acc. Lunig. Scienze, **XLII**, 1-212.
- DE BREMAEKER J.C.L. (1987) - *Thrust sheet motion and earthquake mechanisms*. Earth Plan. Sci. Lett., **83**, 159-166.
- DE FEYTER A.J. (1982) - *The structure of the Northern Umbrian Apennines, Italy*. Geol. en Mijnbouw, **61**, 183-189.
- DE FEYTER A.J., KOOPMANN A., MOLENAAR N. & VAN DEN ENDE C. (1986) - *Detachment tectonics and sedimentation, Umbro-Marchean Apennines, Italy*. Boll. Soc. Geol. It., **105**, 65-85.

- DE JAGER J. (1979) - *The relation between tectonics and sedimentation along the "Sillaro line" (Northern Apennines, Italy)*. *Geologica Ultraiectina*, **19**, 1-98, Utrecht.
- FARABEGOLI E., BENINI A., MARTELLI L., ONOREVOLI G. & SEVERI P. (1990) - *Geologia dell'Appennino romagnolo da Campigna a Cesenatico*. Secondo seminario di Cartografia Geologica, Bologna 21-23 febbraio 1990. Riassunti, 11.
- GREENER P.E. (1972) - *Thoughts on overthrust faulting in a layered sequence*. *Bull. Can. Petr. Geol.*, **20**, 583-607.
- GREENER P.E. (1981) - *Pore pressure, discontinuities, isostasy and overthrusts*. In "Thrust and Nappe Tectonics". *Spec. Publ. Geol. Soc. London*, **9**, 33-39.
- GROSCURTH J. (1971) - *Zur geologie der Randgebiete des westlichen Teils des Mugello - Beckens ostlich der Prato-Sillaro "Linie" (N. Apennin, Prov. Florenz)*. *Diss. Freie Univ. Berlin*, 1-210.
- HANCOCK P.L. (1985) - *Brittle microtectonics: principles and practice*. *Journ. Struct. Geol.*, **7**, 3/4, 437-457.
- MERLA G. & BORTOLOTTI V. (1969) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia, foglio 107*. M. Falterona. 52 pp.
- MOORE C.J. (Ed.) (1986) - *Structural fabrics in Deep Sea Drilling Project cores from forearcs*. *Geol. Soc. Am. Mem.*, **166**, 1-160.
- MOORE C.J., MASCLE A., TAYLOR E., ANDREIEFF P., ALVAREZ F., BARNES R., BECK C., BEHRMANN J., BLANC G., BROWN K., CLARK M., DOLAN J., FISCHER A., GIESKES J., HOUNSLOW M., McLELLAN P., MORAN K., OGAWA Y., SAKAI T., SCHOONMAKER J., VROLIK P.J., WILKENS R. & WILLIAMS C. (1988) - *Expulsion of deep-sourced fluids along subduction zone decollement, Northern Barbados Ridge*. *Nature*, **325**, 785-788.
- MORELLI M. (1988) - *Studio strutturale dei thrust appenninici esterni nel settore compreso tra Badia Tedalda e Bocca Trabaria*. Tesi di Laurea inedita, Università degli Studi di Firenze.
- NARDI R. & TONGIORGI M. (1962) - *Contributo alla geologia dell'Appennino Tosco-Emiliano: I - Stratigrafia e tettonica dei dintorni di Pievepelago (Appennino Modenese)*. *Boll. Soc. Geol. It.*, **81**, (3), 1-76.
- PRICE N.J. (1966) - *Fault and Joint development in Brittle and Semi-Brittle rock*. Pergamon Press, Oxford, 176 pp.
- RICCI LUCCHI F. (1986 a) - *The foreland basin system of the Northern Apennines and related clastic wedges: a preliminary outline*. *Geol. Geol.*, ser. 3, vol. **48/1-2**, 165-185.
- RICCI LUCCHI F. (1986 b) - *The Oligocene to Recent foreland basins of the Northern Apennines*. *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.*, **8**, 105-139.
- SANI F. (1989) - *Caratteristiche deformative mesoscopiche degli Scisti Varicolori nell'area Scarperia-M. Falterona (Appennino Settentrionale)*. *Acta Naturalia de L'Ateneo Parmense*, **25**, 45-53.
- SANI F. (1990) - *Rilevamento strutturale della catena appenninica nel settore Firenzuola-Bocca Trabaria*. *Atti del II Seminario di Cartografia Geologica, Bologna 21-23 febbraio 1990*. *Mem. Descr. Carta Geol.* In stampa.
- SUPPE J. (1985) - *Principles of structural geology*. Prentice Hall. pp. 537.
- VAI G.B. (1987) - *Migrazione complessa del sistema fronte deformativo-avanfossa-cercine periferico: il caso dell'Appennino Settentrionale*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **38**, 95-105.
- VAI G.B. (1988) - *A fieldtrip guide to the Romagna Apennine geology. The Lamone Valley*. In "Fossil vertebrates in the Lamone Valley, Romagna Apennine". *Fieldtrip guidebook*, (DE GIULI C., VAI G.B. ed.). 7-37.
- TEN HAAFF E. & VAN WAMEL W.A. (1979) - *Nappes of the Alta Romagna*. *Geologie en Mijnbouw*, **58**, 145-152.

