

R. CAROSI (\*) (\*\*), C. FRASSI (\*), C. MONTOMOLI (\*), P.C. PERTUSATI (\*) (\*\*)

## LE PIEGHE DELLA ZONA DI PESCAGLIA (ALPI APUANE MERIDIONALI): UN ESEMPIO DI INTERFERENZA CHILOMETRICA DI PIEGHE TARDIVE NELLA FALDA TOSCANA

**Riassunto** - L'analisi strutturale effettuata nella Falda Toscana nel settore meridionale delle Alpi Apuane, ha evidenziato una tettonica polifasata molto più complessa rispetto a quanto proposto negli ultimi decenni. Dai dati strutturali raccolti emerge che le pieghe chilometriche ad andamento NW-SE presenti nell'area investigata (antiforme del Monte Pescaglino e di Pescaglia e sinforme del Monte Pigiione) e riferite alla seconda fase deformativa, sono state successivamente interessate da pieghe F3 ad andamento WNW-ESE. L'interferenza tra questi due sistemi plicativi, legati a direzioni di raccorciamento rispettivamente ortogonali e paralleli all'andamento della catena appenninica, ha portato allo sviluppo di strutture tipo duomi e bacini che hanno contribuito alla nucleazione e all'evoluzione del duomo metamorfico apuano. Le due direzioni di raccorciamento orizzontale infatti, hanno indotto *buckling* e crescita verticale del duomo apuano favorendo così l'esumazione delle rocce metamorfiche. In questo nuovo modello evolutivo quindi, l'esumazione della Falda Toscana è avvenuta prevalentemente durante il regime di tettonica compressiva responsabile della costruzione della catena appenninica, in contrasto con quanto proposto nell'ultimo decennio dal modello del «*core-complex* apuano».

**Parole chiave** - Appennino Settentrionale, duomi metamorfici, pieghe, tettonica compressiva, tettonica estensionale, Falda Toscana.

**Abstract** - *The folds in the Pescaglia area (Southern Apuan Alps): an example of kilometric interference pattern in later folds in the Tuscan Nappe.* Structural analysis carried out in the Tuscan Nappe in the southern sector of the Apuan Alps, points out a structural evolution much more complex than that proposed so far. The second deformation phase is responsible for the prominent NW-SE trending folds recognized in the study area (Mt. Pescaglino and Pescaglia antiforms and Mt. Pigiione synform). These structures are intersected by WNW-ESE trending F3 folds. The F2-F3 folds interference pattern could be related to the development of the metamorphic domes. The two directions of horizontal shortening induced buckling and vertical growth of the metamorphic domes, enhancing the process of exhumation of the metamorphic rocks. In this new model the exhumation of Tuscan Nappe occurred mainly in a compressive tectonic setting against the core complex model developed in the last years (Carmignani & Kligfield, 1990; Carmignani *et al.*, 1991; 1995).

**Key words** - Northern Apennines, metamorphic domes, folds, compressional tectonics, extensional tectonics, Tuscan Nappe.

### INTRODUZIONE

L'evoluzione tettonica delle catene collisionali può essere spesso suddivisa in diversi stadi a seconda del

regime tettonico dominante. Ad una prima fase dominata da *thrusts* e pieghe infatti, segue molto spesso il collasso dell'orogene con lo sviluppo di strutture estensionali quali pieghe di collasso e faglie normali. La sovrapposizione di strutture legate a questi due diversi regimi deformativi rende l'analisi e la ricostruzione della storia deformativa dell'orogene molto complessa e molto spesso soggetta a interpretazioni contrastanti. In questo lavoro vengono presentati i risultati di un'analisi strutturale effettuata nel settore occidentale dell'Appennino Settentrionale con lo scopo di discriminare il reale comportamento cinematico delle strutture presenti il cui significato è stato per lungo tempo controverso. I nuovi dati strutturali hanno così permesso di formulare un nuovo modello evolutivo per il duomo metamorfico delle Alpi Apuane, che è stato interpretato come un *core complex* estensionale (Carmignani & Kligfield, 1990) a partire dai primi anni '90. La tettonica polifasata della Falda Toscana, documentata già a partire dalla fine degli anni '70 da Pertusati *et al.* (1977), è stata soggetta a interpretazioni spesso contrastanti. Dopo un lungo periodo in cui l'attuale strutturazione veniva attribuita interamente alla tettonica compressiva, a partire dagli anni '90, Coli (1989), Carmignani & Kligfield (1990) e Carmignani *et al.*, (1994) hanno interpretato tutta l'area delle Alpi Apuane come un *core complex*, attribuendo alla tettonica estensionale la maggior parte delle strutture presenti nell'area. In questo modello la Falda Toscana costituisce l'*upper plate* non metamorfica mentre l'Unità delle Apuane e l'Unità di Massa, entrambe caratterizzate da un metamorfismo più elevato, rappresentano la *lower plate*. Viene quindi riconosciuta una fase deformativa D1 responsabile dell'impilamento delle varie unità tettoniche mentre tutte le successive strutture vengono attribuite interamente alla tettonica estensionale (Carmignani & Kligfield, 1990; Giammarino & Giglia, 1990; Carter, 1992).

Recenti studi tuttavia hanno riconosciuto nella Falda Toscana quattro fasi deformative (Carosi *et al.*, 2002a e b) le cui caratteristiche geometriche e cinematiche sembrano mettere in discussione il ruolo fondamentale svolto dalla tettonica estensionale nell'evoluzione dell'Appennino Settentrionale.

Per cercare di acquisire più dati strutturali è stata scelta un'area di particolare interesse situata nel settore meridionale delle Alpi Apuane, caratterizzata, secondo il modello estensionale, dalla presenza di pieghe e zone di taglio a vergenza opposta rispetto alla cresta del duomo.

(\*) Dipartimento di Scienze della Terra, via S. Maria 53, I-56126 Pisa.

(\*\*) Istituto di Geoscienze e Georisorse - CNR, via Moruzzi 1, I-56124 Pisa.

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'Appennino settentrionale è il risultato di una complessa storia evolutiva iniziata a partire dall'Oligocene superiore con la collisione continentale tra il blocco sardo-corso e la microplacca Adria (Boccaletti *et al.*, 1971, 1980; Alvarez *et al.*, 1974; Dallan Nardi & Nardi, 1978; Boccaletti & Coli, 1983; Kligfield *et al.*, 1986). La catena appenninica è costituita da differenti unità, organizzate in un complesso sistema di falde sovrapposte, derivate sia dal dominio oceanico (Unità Liguridi) sia dal dominio continentale (Dominio Toscano e Umbro-Marchigiano).

Nell'area delle Alpi Apuane, il Dominio Toscano è rappresentato da tre differenti unità tettoniche sovrapposte: l'Unità delle Alpi Apuane, con metamorfismo in facies Scisti Verdi, l'Unità di Massa, con un grado metamorfico maggiore rispetto alla sottostante unità delle Alpi Apuane, e la Falda Toscana situata ai più alti livelli strutturali e localmente caratterizzata da un metamorfismo di bassissimo grado (Baldacci *et al.*, 1967; Cerrina Feroni *et al.*, 1983; Franceschelli *et al.*, 1986). Nell'area studiata, situata nella porzione meridionale del massiccio delle Alpi Apuane (Fig. 1), affiorano esclusivamente i termini della Falda Toscana compresi tra il Trias superiore e il Cretaceo. Si ritrova infatti una formazione carbonatica basale del Trias Superiore (Formazione dei Calcari e marne a *Raethavicula contorta*) a cui seguono calcari di mare basso hettangiani rappresentati dalla Formazione del Calcare Massiccio.

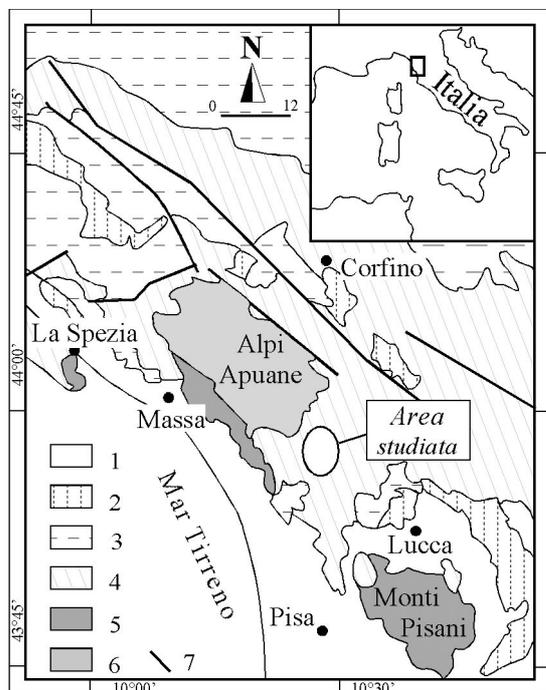


Fig. 1 - Schema geologico dell'Appennino Settentrionale e localizzazione dell'area studiata. 1: Coperture quaternarie; 2: Depositi Mio-Pliocenici; 3: Unità Liguri; 4: Falda Toscana; 5: Unità di Massa s.l.; 6: Complesso Metamorfico delle Alpi Apuane; 7: Faglie.

La successione continua con calcari e argille pelagiche (Formazioni del Rosso Ammonitico, del Calcare selcifero inferiore, delle Marne a Posidonia e dei Calcari selcifero superiori), e con radiolariti (Dogger, Formazione dei Diaspri). La parte terminale è rappresentata da spesse calcilutiti cretache (Formazione della Maiolica).

Secondo alcuni Autori (Carmignani & Kligfield, 1990; Giammarino & Giglia, 1990; Carmignani *et al.*, 1991, 1992, 1995; Carter, 1992; Del Tredici *et al.*, 1997) la Falda Toscana e le sottostanti Unità di Massa e Unità delle Alpi Apuane, sono state interessate da un'importante fase di tettonica estensionale (fase D2), sviluppata durante il collasso della catena appenninica (modello del «core-complex apuano»: Carmignani & Kligfield, 1990). In questa ricostruzione, faglie a basso angolo e pieghe di collasso (F2) centrifughe rispetto alla cresta del duomo apuano, sono responsabili della progressiva esumazione delle unità metamorfiche. Datazioni  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  e K/Ar effettuate sull'Unità delle Alpi Apuane attribuiscono alla fase di raccorciamento crostale D1, un'età di circa 27 Ma (Kligfield *et al.*, 1986), mentre età radiometriche di circa 8 Ma (Giglia & Radicati di Brozolo, 1970; Kligfield *et al.*, 1986) segnano la fine della tettonica estensionale D2. Età di 8-5 Ma per la Falda Toscana e di 6-2 Ma per l'Unità delle Alpi Apuane ottenuti mediante analisi delle tracce di fissione dell'apatite (Balestrieri *et al.*, 2003; Abbate *et al.*, 1994) vincolano infine, anche gli stadi finali di sollevamento.

## ANALISI STRUTTURALE

L'analisi strutturale ha evidenziato una tettonica poli-fasata molto complessa caratterizzata da tre sistemi plicativi sviluppati in un regime di tettonica compressiva a cui segue una tettonica estensionale tardiva rappresentata da pieghe di collasso e da faglie normali a basso e ad alto angolo.

### Fase deformativa D1

La fase D1 è stata ben descritta e documentata nei numerosi lavori effettuati sulla Falda Toscana nell'area del ricoprimento apuano a partire dalla fine degli anni '70 (Pertusati *et al.*, 1977; Carmignani *et al.*, 1990; Carmignani *et al.*, 1991, 1995; Carosi *et al.*, 2002a, 2002b).

Nell'area in esame, la fase D1 è evidente solo nei litotipi a dominante argillosa dove sono stati documentati relitti della foliazione S1 e più raramente, pieghe isoclinali F1 a scala centimetrica.

### Fase deformativa D2

La fase D2 è la principale fase plicativa conosciuta nella Falda Toscana. Questa fase è infatti responsabile dello sviluppo di pieghe di dimensioni variabili, da millimetriche a chilometriche (es: la sinforme sinclinale del Monte Pignone; Fig. 2 e Fig. 3) che si ritrovano abbondantemente in tutte le formazioni presenti nell'area investigata. Le pieghe F2 presentano generalmente cerniere arrotondate e una geometria approssimativa-

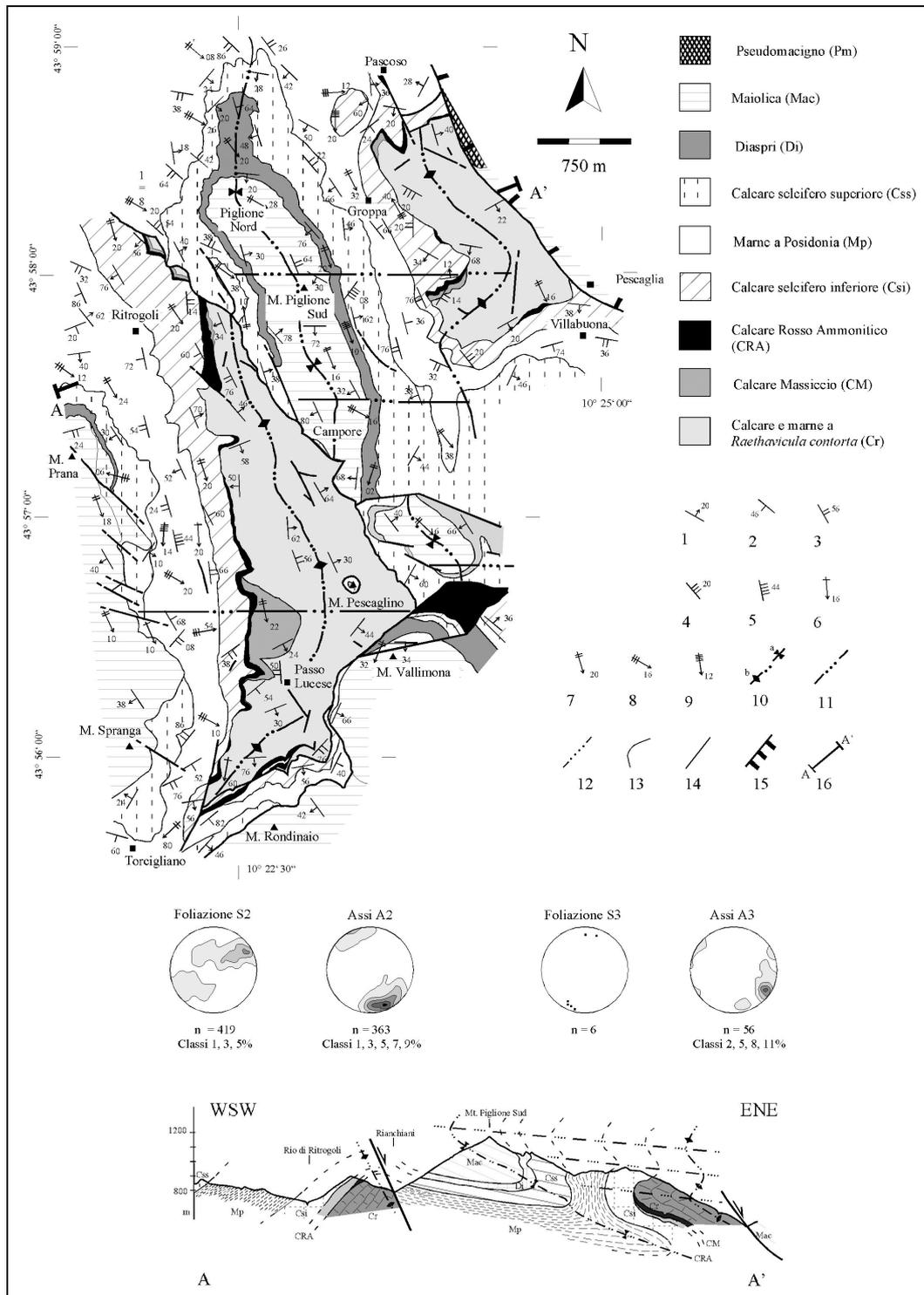


Fig. 2 - Carta geologica e strutturale dell'area in esame con relativa sezione geologica (A-A') e proiezioni stereografiche relative alle fasi deformative D2 e D3. Questa carta è basata su dati inediti di Giorgi R., Rossi L., Storti O. e Pertusati P.C., 1989-1992 (scala 1:10.000), e Carosi R., Frassi C. e Montomoli C., 1989-2002 (scala 1:5.000). 1: Stratificazione S0; 2: Foliazione S1; 3: Foliazione S2; 4: Foliazione S3; 5: Foliazione S4; 6: Asse A1; 7: Asse A2; 8: Asse A3; 9: Asse A4; 10: Piani assiali delle pieghe F2 a: sinformi; b: antiformi; 11: Piani assiali delle pieghe F3; 12: Piani assiali delle pieghe F4; 13: Contatti stratigrafici; 14: Faglie; 15: Traccia della sezione geologica A-A'.

mente simile (classe 2 e 3 di Ramsay, 1967), con cerniere ispessite e fianchi assottigliati.

Le direzioni assiali presentano un andamento circa NW-SE con deboli immersioni di  $10^{\circ}$ - $20^{\circ}$  verso i quadranti sud-orientali; le superfici di piano assiale mostrano un'inclinazione variabile da  $60^{\circ}$  a  $80^{\circ}$  verso est (Fig. 2).

Questa fase deformativa è responsabile anche dello sviluppo di una foliazione di piano assiale S2 sviluppata soprattutto nei litotipi meno competenti e rappresentata a scala macroscopica, da un clivaggio di crenulazione spaziato, definito spesso da superfici di dissoluzione. A scala microscopica la foliazione S2 può essere classificata come un clivaggio di crenulazione zonato e discreto (Twiss & Moore, 1992).

Alla fase deformativa D2 vanno inoltre imputate le pieghe chilometriche riconosciute nell'area in esame (Fig. 2). Da ovest verso est sono state infatti cartografate e descritte: l'antiforme anticlinale del Monte Pescaglino, la sinforme sinclinale del Monte Piglione (Fig. 3) e l'antiforme anticlinale di Pescaglia (Fig. 2). L'anticlinale del Monte Pescaglino e la sinclinale del Monte Piglione sono separate da una faglia normale che taglia i fianchi ed i piani assiali di queste due strutture. Tale faglia si sviluppa in direzione NW-SE per circa 10 chilometri e presenta immersione verso est. Analogamente, il fianco orientale dell'anticlinale di Pescaglia è tagliato dalla faglia diretta, a geometria listrica, che si estende da sud di Pescaglia fino al Monte Croce (faglia Pescaglia-Monte Croce: Carmignani *et al.*, 1991; 1995; Carosi *et al.*, 2002a,b, 2004, *in press*).

I nuclei delle antiformi sono costituite dalla Formazione dei Calcari e marne a *Raethavicula contorta*, mentre al nucleo delle sinformi si ritrova la formazione più giovane affiorante nell'area, quella della Maiolica. Queste megastrutture presentano una geometria leggermente asimmetrica con fianchi dritti poco inclinati e corti fianchi rovesci generalmente sub-verticali. Sono pieghe aperte, con angoli di apertura variabili da  $60^{\circ}$  a  $80^{\circ}$ , piani assiali sub-verticali e assi orientati circa NW-SE, leggermente inclinati verso SE (Fig. 2 e Fig. 3).

Per meglio comprendere e descrivere l'evoluzione dell'area queste strutture sono state suddivise in domini strutturali caratterizzati da una distribuzione omogenea dei vari elementi strutturali. Le proiezioni stereografiche effettuate hanno evidenziato una rotazione oraria di  $15^{\circ}$ - $25^{\circ}$  di tutti gli elementi strutturali associati alle fasi D1 e D2.

### Fase deformativa D3

Le strutture associate a questa fase deformativa sono rappresentate da pieghe centimetriche, aperte, con cerniere arrotondate e geometria simile (classe 1B di Ramsay, 1967). La direzione assiale varia da N110°E a N130°E con immersioni di  $10^{\circ}$ - $20^{\circ}$  verso i quadranti sud-orientali (Fig. 2).

Parallelamente alla superficie di piano assiale, che presenta un'inclinazione compresa tra i  $60^{\circ}$  e gli  $80^{\circ}$  verso NE, si sviluppa raramente, una foliazione S3 evidenziata dalla crenulazione della precedente foliazione S2 (Fig. 4).

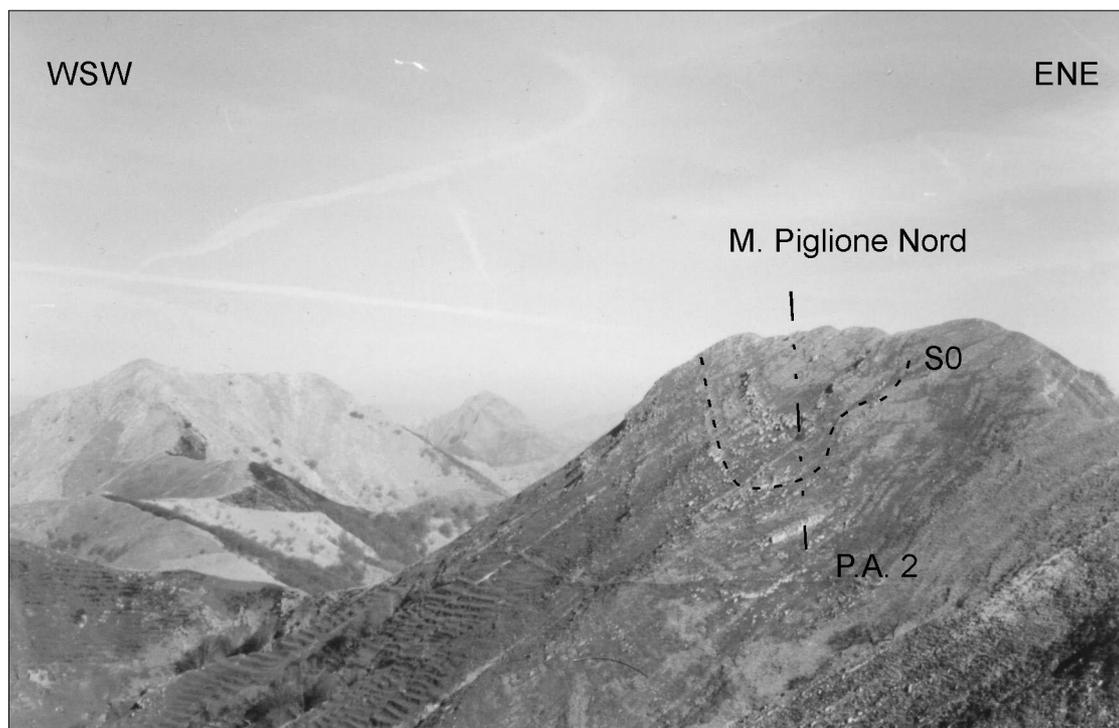


Fig. 3 - Panoramica da sud della sinforme della fase D2 del Monte Piglione Nord.

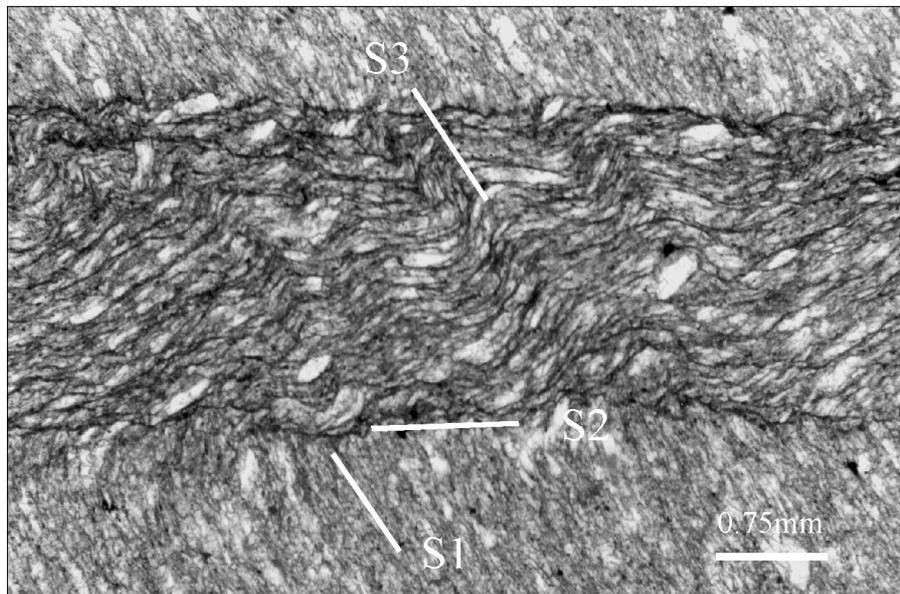


Fig. 4 - Sviluppo selettivo del clivaggio di crenulazione S3 che risulta localizzato solo nei domini di clivaggio S2. La foliazione S1 non risulta crenulata perché è orientata perpendicolarmente alla direzione di raccorciamento (Monte Prana, Maiolica; Nicol paralleli).

### Sistemi d'interferenza F2-F3

L'interferenza tra la pieghe F2 e F3 può essere classificata come intermedia tra il tipo 1 e il tipo 2 di Ramsay (1967). I due sistemi di pieghe infatti, pur essendo caratterizzati da piani assiali sub-verticali e assi sub-orizzontali, presentano direzioni assiali non perfettamente ortogonali che portano allo sviluppo di strutture a duomi a bacini di forma allungata.

### Tettonica tardiva

I tre sistemi di pieghe precedentemente descritti sono state successivamente interessate da pieghe di collasso (F4) con piano assiale sub-orizzontale e direzione assiale NNW-SSE, e da faglie normali a basso ed ad alto angolo legate alla tettonica estensionale responsabile del collasso del prisma orogenetico e/o dell'apertura del Mar Tirreno.

### DISCUSSIONI

Nel modello del «*core-complex* apuano» (Carmignani & Kligfield, 1990) l'esumazione delle unità metamorfiche e della sovrastante Falda Toscana, è avvenuta essenzialmente per tettonica estensionale mediante lo sviluppo di pieghe in cascata a vergenza opposta rispetto alla cresta del duomo apuano e di *detachments faults* estensionali coniugati.

In questo contesto le pieghe chilometriche a vergenza occidentale presenti nell'area studiata, vengono interpretate come la conseguenza dello sviluppo di una zona di taglio estensionale di spessore chilometrico. Tale struttura sarebbe delimitata superiormente da un'ipotetica faglia normale a basso angolo inclinata verso ovest e localizzata all'interno della Formazione delle

Marne a Posidonia nelle pendici orientali del Monte Prana, mentre inferiormente, dal livello di scollamento del Calcare Cavernoso. La faglia diretta Pescaglia - M. Croce rappresenterebbe inoltre il *detachment fault* coniugato ad immersione orientale, legato allo sviluppo di ipotetiche pieghe a vergenza orientale.

I dati raccolti in questo lavoro, tuttavia, non sembrano concordare con questo quadro evolutivo. Non sono state infatti trovate testimonianze a sostegno della presenza del *detachment fault* del M. Prana né della presenza di pieghe a vergenza orientale associate allo sviluppo della faglia Pescaglia - M. Croce. Inoltre, le caratteristiche delle pieghe F2, la loro geometria, l'inclinazione del piano assiale, la direzione di raccorciamento, le relazioni di intersezione con le faglie estensionali (Fig. 2) e la mancanza di rapporti diretti con le *detachment faults* rendono difficile attribuire queste strutture ad un regime tettonico estensionale. La geometria chiusa, i piani assiali inclinati (50-60°) e la presenza di abbondanti pieghe parassite sviluppate su entrambi i fianchi delle pieghe F2 infatti, sembrano essere tutti elementi indicativi di un raccorciamento orizzontale sviluppato durante un regime tettonico compressivo.

Carmignani *et al.* (1995), imputano alla tettonica estensionale anche il piegamento dell'anticlinale del M. Pescagliano (Fig. 2) che viene così interpretata come una piega di trascinamento legata al movimento trascorrente destro della faglia NE-SW presente lungo le pendici settentrionali del M. Rondinaio - M. Vallimona. Dai dati raccolti tuttavia non sono emerse prove a sostegno di questa ipotesi. Il piegamento del piano assiale delle pieghe F2 non è limitato solo a questa struttura (Fig. 2) e il movimento di trascorrenza non è così

importante da giustificare un piegamento così accentuato. Dall'elaborazione statistica dei dati raccolti infatti emerge chiaramente come il piegamento chilometrico possa essere provocato dalla fase plicativa D3 caratterizzata da pieghe con piano assiale verticale e assi circa WNW-ESE.

Nella nostra ricostruzione, quindi, le prime tre fasi plicative si sono sviluppate durante un regime compressivo mentre la quarta fase è connessa con il collasso del cuneo orogenetico in un regime tettonico estensionale caratterizzato da una direzione di raccorciamento verticale. Le fasi D1 e D2 mostrano direzioni assiali NW-SE e piani assiali generalmente molto inclinati, a testimonianza di un raccorciamento orizzontale con direzione NE-SW, ad alto angolo quindi rispetto all'andamento della catena appenninica. La terza fase deformativa D3 infine, è caratterizzata da direzioni di raccorciamento NNE-SSW.

Una storia deformativa simile è stata descritta e documentata anche nell'area di Castelpoggio-Tenerano (Carosi *et al.*, 2002a), nell'area di Metato-Casoli (settore sud-occidentale delle Alpi Apuane; Carosi *et al.*, 2002a), nell'area di Corfino (Carosi *et al.*, 2002b), in quella di La Spezia (Montomoli *et al.*, 2001; Montomoli, 2002) e nella zona dei Monti dell'Uccellina (Toscana meridionale, Campetti *et al.*, 1999). Questa ampia diffusione sembra testimoniare l'attendibilità e la validità del modello proposto anche ad una scala regionale.

L'interferenza tra le pieghe F2 e F3 infatti genera strutture tipo duomi e bacini che interessano la Falda Toscana, le sottostanti unità metamorfiche e il contatto tettonico che le separa (Carosi *et al.*, 2002a) enfatizzando così lo sviluppo dei duomi metamorfici presenti sia nell'Appennino Settentrionale (Alpi Apuane e Monti Pisani) sia nei Monti dell'Uccellina (Toscana Meridionale).

In questa ricostruzione la forma a duomo del complesso metamorfico apuano è il risultato di un'iniziale impilamento delle unità del Dominio Toscano in un'*antiformal stack*, successivamente amplificata proprio dall'interferenza tra le pieghe F2 e F3 che contribuisce così in modo decisivo all'esumazione delle rocce metamorfiche.

La crescita verticale di queste strutture provoca infine, il collasso del cuneo orogenetico e lo sviluppo di pieghe di collasso e di faglie normali a basso ed a alto angolo, che contribuiscono quindi solo nell'ultima parte della storia deformativa all'esumazione delle rocce metamorfiche.

## CONCLUSIONI

Dai dati presentati in questo lavoro emerge che la Falda Toscana è stata interessata da un'evoluzione tettonica molto più complessa rispetto a quanto proposto negli ultimi decenni. Sono state infatti, descritte e documentate quattro fasi plicative (D1, D2, D3, D4) sviluppate in differenti regimi deformativi. Le prime tre si sono sviluppate durante il regime di raccorciamento respon-

sabile dell'impilamento delle unità tettoniche appenniniche, mentre la quarta viene riferita alla tettonica estensionale tardiva, legata al collasso del prisma orogenetico e/o all'apertura del Mar Tirreno.

Da questa ricostruzione emerge quindi il ruolo di primaria importanza assunto dalla tettonica compressiva, responsabile non solo dello sviluppo dell'*antiformal stack* delle unità metamorfiche apuane ma anche, e soprattutto, della loro esumazione. L'interferenza tra strutture che presentano direzioni di raccorciamento sub-orizzontali e ortogonali tra loro (interferenza tipo duomi e bacini tra le pieghe F2 e F3), infatti, amplifica i processi di esumazione delle rocce metamorfiche inducendo *buckling* e crescita verticale del duomo metamorfico.

La mancanza di *detachment faults* e di pieghe di trasciamento centrifughe rispetto alla cresta del duomo apuano (F2: Carmignani & Kligfield, 1990; Carmignani *et al.*, 1991, 1992, 1995) sembra confermare questo nuovo quadro evolutivo, nel quale il ruolo svolto dalla tettonica estensionale è limitato solo agli stadi finali di evoluzione, quando ormai la maggior parte dell'esumazione era già avvenuta. Le pieghe di collasso (F4) e le faglie normali a basso ed ad alto angolo infatti, non sembrano modificare in modo significativo la strutturazione acquisita precedentemente.

## BIBLIOGRAFIA

- Abbate E., Bortolotti V., Maxwell J.C., Merla G., Passerini P., Sagri M., Sestini G., 1970. Development of the Northern Apennine Geosyncline. *Sediment. Geol.* 4: 201-648.
- Abbate E., Balestrieri M., Bigazzi G., Norelli P., Quercioli C., 1994. Fission track datings recent rapid denudation in Northern Apennines. *Mem. Soc. geol. it.* 48: 579-585.
- Alvarez W., Coccozza T., Wezel F., 1974. Fragmentation of the Alpine orogenic belt by microplate dispersal. *Nature* 248: 309-314.
- Baldacci F., Elter P., Giannini E., Giglia G., Lazzarotto A., Nardi R., Tongiorgi M., 1967. Nuove osservazioni sul problema della Falda Toscana e sull'interpretazione dei flysch arenacei tipo «macigno» dell'Appennino Settentrionale. *Mem. Soc. geol. it.* 6: 213-244.
- Balestrieri M.L., Bernet M., Brandon M.T., Picotti V., Reiners P., Zattin M., 2003. Pliocene and Pleistocene exhumation and uplift of two key areas of the Northern Apennines. *Quaternary International* 101-102: 67-73.
- Boccaletti M., Coli M., Decandia F.A., Giannini E., Lazzarotto A., 1980. Evoluzione dell'Appennino Settentrionale secondo un nuovo modello strutturale. *Mem. Soc. geol. it.* 21: 359-373.
- Boccaletti M., Coli M., 1983. La tettonica della Toscana: assetto ed evoluzione. *Mem. Soc. geol. it.* 25: 51-62.
- Boccaletti M., Elter P., Guazzone G., 1971. Plate tectonic model for the development of the Western Alps and Northern Apennines. *Nature* 234: 108-110.
- Carmignani L., Decandia F.A., Fantozzi P., Lazzarotto A., Liotta D., Meccheri M., 1994. Tertiary extensional tectonics in Tuscany (Northern Apennines, Italy). *Tectonophysics* 238: 295-315.
- Carmignani L., Disperati L., Fantozzi P., Giglia G., Meccheri M., 1992a. Tettonica distensiva del Complesso Metamorfico dalle Alpi Apuane: Guida all'escursione. Pietrasanta 1-4 giugno 1993: 1-128.
- Carmignani L., Fantozzi P., Giglia G., Kligfield R., Meccheri M., 1992b. Tectonic inversion from compression to extension: the case of metamorphic complex and Tuscan Nappe in the Apuan Alps (North Apennines, Italy). *Mem. Soc. geol. it.* 48 (1): 23-29.
- Carmignani L., Fantozzi P., Giglia G., Meccheri M., 1993. Pieghe associate alla distensione duttile del Complesso Metamorfico Apuano. *Mem. Soc. geol. it.* 49: 99-124.

- Carmignani L., Fantozzi P., Meccheri M., 1991. La vergenza «sin-» e «post-nappe» della Falda Toscana nelle strutture di Pescaglia e di Castelpoggio (Alpi Apuane). *Boll. Soc. geol. it.* 110: 351-364.
- Carmignani L., Fantozzi P., Meccheri M., 1995. Tettonica estensionale nella Falda Toscana nelle Alpi Apuane meridionali. In Geodinamica e tettonica attiva del sistema Tirreno-Appennino, Camerino, 9-10 febbraio 1995, Riassunti, Abstract Volume, 274-276.
- Carmignani L., Kligfield R., 1990. Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane Core Complex. *Tectonics* 9: 1257-1303.
- Carosi R., Montomoli C., Bertuccelli N., Profeti M., 2002a. The structural evolution of the southern Apuan Alps: new constraints on the tectonic evolution of the Northern Apennines (Italy). *Comptes Rendus Geoscience* 334: 339-346.
- Carosi R., Montomoli C., Pertusati P.C., 2002b. Late orogenic structures and orogen-parallel compression in the Northern Apennines. *Boll. Soc. geol. it. Volume Speciale 1*: 167-180.
- Carter K.E., 1992. Evolution of stacked shear zones in carbonates from mid-crustal levels: Tuscan Nappe, Northern Apennines, Italy. *J. struct. geol.* 14: 182-192.
- Cello G., Mazzoli S., 1996. Extensional processes driven by large-scale duplexing in collisional regimes. *J. struct. geol.* 18 (10): 1275-1279.
- Cerrina Feroni A., Plesi G., Fanelli G., Leoni L., Martinelli P., 1983. Contributo alla conoscenza dei processi di grado molto basso (anchimetamorfismo) a carico della Falda Toscana nell'area del ricoprimento apuano. *Boll. Soc. geol. it.* 102: 269-280.
- Coli M., 1989. Time and mode of uplift of the Apuane Alps metamorphic complex. *Atti ticin. Sci. Terra* 32: 47-56.
- Dallan Nardi L., Nardi R., 1978. Il quadro paleotettonico dell'Appennino Settentrionale: un'ipotesi alternativa. *Atti Soc. tosc. Sci. nat., Mem. Ser. A* 85: 289-297.
- Del Tredici S., Giglia G., Robbiano A., 1997. Le strutture estensionali duttili della Falda Toscana nelle Apuane Nord-Occidentali (Appennino Settentrionale). *Atti ticin. Sci. Terra* 39: 217-237.
- Franceschelli M., Leoni L., Memmi I., Puxeddu M., 1986. Regional distribution of Al-silicates and metamorphic zonation in the low-grade Verrucano metasediments from the Northern Apennines, Italy. *Journal metam. Geol.* 4: 309-321.
- Giammarino S., Giglia G., 1990. Gli elementi strutturali della piega di La Spezia nel contesto geodinamico dell'Appennino settentrionale. *Boll. Soc. geol. it.* 109: 683-692.
- Giglia G., Radicati Di Brozzolo F. 1970. K/Ar age of metamorphism in the Apuane Alps (Northern Tuscany). *Boll. Soc. geol. it.* 89: 485-497.
- Kligfield R., Hunziker J., Dallmeyer R.D., Schamel S. 1986. Dating of deformation phases using K/Ar and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  techniques: results from the Northern Apennines. *J. struct. geol.* 8: 781-798.
- Montomoli C., Ruggieri G., Boiron M.C., Cathelineau M., 2001. Pressure fluctuations during uplift of the northern Apennines (Italy): a fluid inclusions study. *Tectonophysics* 341: 121-139.
- Montomoli C., 2002. Vein development and fluid inclusions data: insight on the evolution of the Tuscan Nappe in the Northern Apennines. *Boll. Soc. geol. it., Volume Speciale 1*: 167-180.
- Pertusati P.C., Plesi G., Cerrina Feroni A., 1977. Alcuni esempi di tettonica polifasata della Falda Toscana. *Boll. Soc. geol. it.* 96: 587-603.
- Ramsay J.G., 1967. *Folding and fracturing of rocks*. McGraw Hill: London.
- Twiss R.J., Moore E.M., 1992. *Structural Geology*. W.H. Freeman and C.: New York.

(ms. pres. il 31 luglio 2004; ult. bozze il 20 settembre 2004)

