

R. CAROSI (*) (**), C. MONTOMOLI (*)

STRUTTURE TARDO OROGENICHE E COMPRESSIONE PARALLELA ALL'OROGENE IN APPENNINO SETTENTRIONALE: LA STRUTTURA DI INTERFERENZA POLIFASICA DI S. GIULIANO (UNITÀ DI S. MARIA DEL GIUDICE, MONTI PISANI).

Riassunto - Il rilevamento geologico di dettaglio affiancato dall'analisi meso e microstrutturale hanno messo in evidenza, nell'Unità di Santa Maria del Giudice (Monti Pisani, Appennino Settentrionale), la presenza di due sistemi di pieghe tardive che ripiegano una precedente sinclinale di prima fase.

Entrambi i sistemi di pieghe tardive sono caratterizzati da piani assiali molto inclinati e da assi circa ortogonali, con orientazioni rispettivamente NW-SE e SW-NE. Mentre il primo sistema di pieghe ammette una direzione di raccorciamento orientata SW-NE, il secondo sistema è compatibile con una direzione di raccorciamento parallela al trend della catena stessa. Le due direzioni di raccorciamento orizzontale possono aver giocato un ruolo non secondario nella crescita dei duomi metamorfici nell'Appennino Settentrionale.

Parole chiave - Monti Pisani, Appennino Settentrionale, Unità di Santa Maria del Giudice, analisi strutturale, strutture di interferenza, piegamenti tardivi, duomi metamorfici.

Abstract - *Late orogenic structures and orogen parallel compression in the Northern Apennines: the fold interference pattern of S. Giuliano (S. Maria del Giudice Unit, Pisani Mts).*

Detailed geological mapping paired with meso to microstructural analyses pointed out the presence, in the Santa Maria del Giudice Unit (Pisani Mts, Northern Apennines), of two systems of later folds deforming an older D1 syncline. Both systems of fold are characterized by steeply dipping or upright axial planes and their axes trend respectively NW-SE and SW-NE. While the first system of fold is in agreement with a direction of shortening oriented roughly SW-NE, the direction of shortening related to the second system of fold is parallel to the main trend of the belt. The two directions of horizontal shortening induced buckling and growth in the metamorphic domes, enhancing the process of exhumation of the metamorphic rocks.

Key words - Pisani Mts, Northern Apennines, Santa Maria del Giudice Unit, structural analysis, interference pattern, later folding, metamorphic domes.

INTRODUZIONE

Nelle unità tettoniche dell'Appennino Settentrionale, sviluppatasi su crosta continentale, sono state riconosciute due fasi deformative principali: una prima fase (D1) caratterizzata da una compressione orientata SW-NE e legata alla messa in posto delle diverse unità tet-

toniche, con lo sviluppo di pieghe e *thrust* NE vergenti (Boccaletti *et al.*, 1971; Carmignani *et al.*, 1978), seguita da una ulteriore fase deformativa sviluppatasi in un regime tettonico estensionale e legata all'esumazione delle unità più profonde (Carmignani & Kligfield, 1990; Carmignani *et al.*, 1994).

Nuovi rilevamenti geologici, accompagnati dall'analisi meso e microstrutturale, hanno permesso di documentare la presenza di una tettonica polifasata più articolata e complessa di quella fino ad ora riconosciuta sia nelle unità metamorfiche (Molli & Meccheri, 2000; Carosi *et al.*, 2001) sia nella Falda Toscana (Pertusati *et al.*, 1979; Carosi *et al.*, 2001; Montomoli *et al.*, 2001). In particolare, sono stati riconosciuti due sistemi di pieghe tardive caratterizzati da direzioni di compressione tra loro ortogonali.

In questo lavoro viene descritta e interpretata una struttura di interferenza di dimensioni chilometriche riconosciuta e cartografata nell'Unità di S. Maria del Giudice, affiorante sui Monti Pisani. In particolare, è stato svolto uno studio di dettaglio nel settore nordoccidentale (Fig. 1) del massiccio che offre ottimi affioramenti delle successioni di basso grado metamorfico che hanno registrato bene i diversi eventi deformativi e dove le relative strutture di interferenza possono essere meglio analizzate.

La struttura in oggetto evidenzia l'esistenza di due sistemi di pieghe tardive, rispetto alla fase D1, riferibili a sistemi documentati in altre aree dell'Appennino settentrionale. Viene quindi discusso il loro possibile ruolo nell'ambito dell'evoluzione tettonica della catena appenninica e nello sviluppo dei duomi metamorfici.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

I Monti Pisani rappresentano uno dei maggiori nuclei metamorfici principali dell'Appennino Settentrionale. La loro struttura fondamentale è data dalla sovrapposizione di due unità tettoniche (Unità del Monte Serra sormontata dall'Unità di Santa Maria del Giudice), al di sopra delle quali sono conservate *klippen* della sovrastante Falda Toscana. Le due unità tettoniche principali, correlate entrambe con l'Unità di Massa da Rau & Tongiorgi (1974), sono costituite da una successione silicoclastica triassica ("Verrucano", Tongiorgi *et*

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Via S. Maria 53, 56126 Pisa.

(**) Centro di Studio per la Geologia Strutturale e Dinamica dell'Appennino CNR, via S. Maria, 53, Pisa.

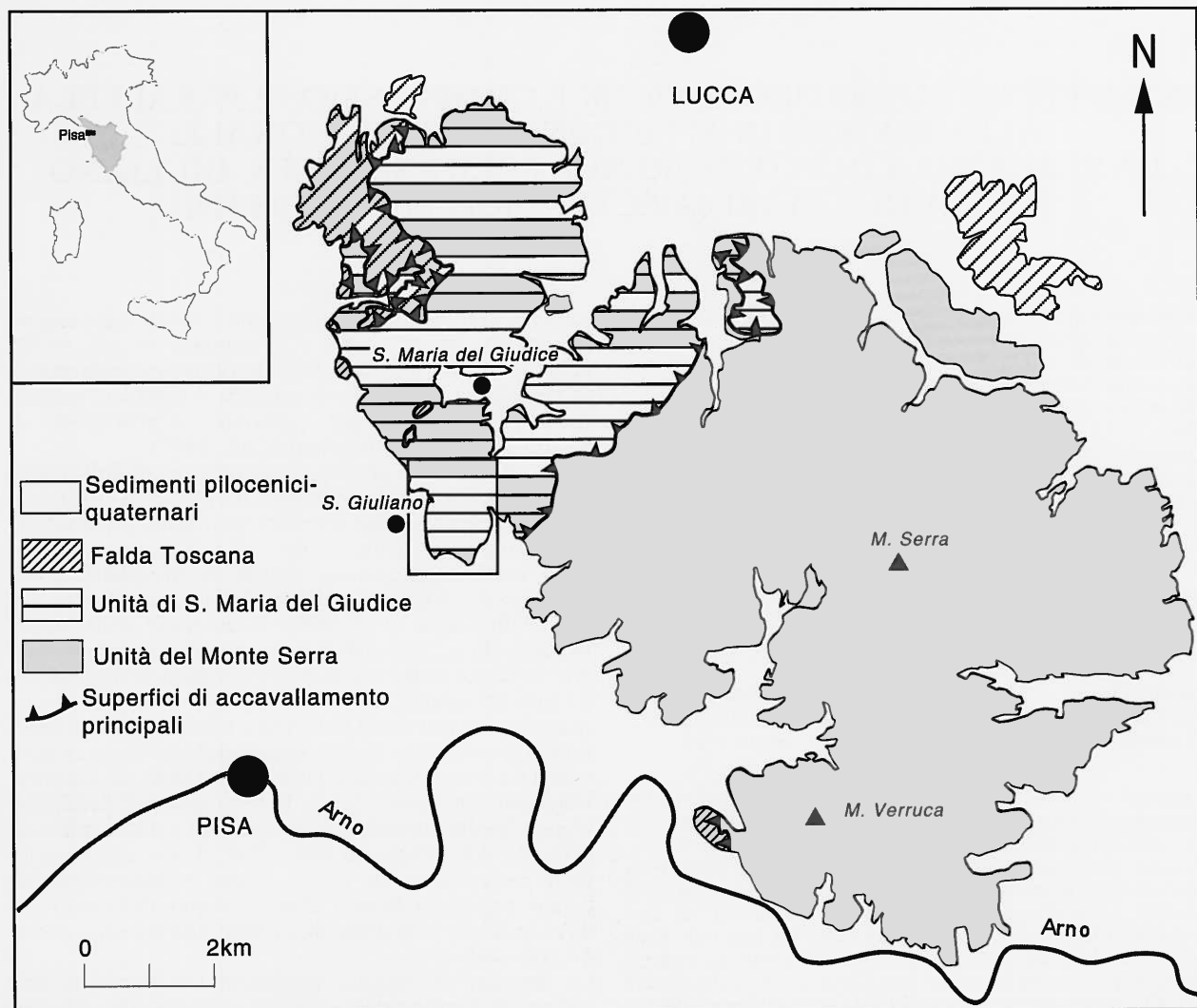


Fig. 1 - Localizzazione dell'area studiata.

al., 1977) tipica di un ambiente fluvio-deltizio e con età comprese tra l'Anisico (?) -Ladinico ed il Carnico superiore (Rau & Tongiorgi, 1974). Il "Verrucano" è sorretto da una successione carbonatica che comprende, dal basso verso l'alto, le formazioni dei Grezzoni, Marmi, Calcare selcifero, Marne a Posidonia, Diaspri, Scaglia e Pseudomacigno, nell'Unità di Santa Maria del Giudice, mentre termina con i Diaspri nell'Unità di Monte Serra (Rau & Tongiorgi, 1974).

Sebbene in entrambe le unità i rapporti tra la porzione carbonatica superiore e la successione silicoclastica inferiore non siano mai ben evidenti, originari rapporti stratigrafici non possono essere esclusi (Rau & Tongiorgi, 1974).

La presenza di una tettonica polifasata prevalentemente duttile è stata segnalata ormai da tempo nell'intero massiccio dei Monti Pisani (Rau & Tongiorgi, 1974; Carosi *et al.*, 1996, 1997; Carosi & Montomoli, 1998). Le ana-

lisi strutturali più recenti (Carosi *et al.*, 1996) hanno riconosciuto due principali fasi scistogene. La prima fase deformativa (D1), legata alla messa in posto delle diverse unità tettoniche, è la più penetrativa ed è responsabile della formazione delle maggiori strutture plicative riconosciute in tutta l'area. Le pieghe F1 sono in genere caratterizzate da angoli di apertura stretti e piani assiali molto inclinati. Presentano vergenze diverse passando dal settore meridionale del massiccio, dove hanno vergenza sia verso NE che verso SW, al settore nordoccidentale dove si osservano vergenze prevalentemente verso ESE. Alla fase D1 sono associate anche pieghe di tipo *transpressed* (Borradaile, 1978; Ramsay & Lisle, 2000), ben sviluppate nel settore meridionale del massiccio, con angoli medi di *transecting* di circa 20° (Carosi & Montomoli, 1998) che, unitamente allo stretto parallelismo tra lineazioni di massima estensione ed assi delle pieghe coeve, permettono di ipotiz-

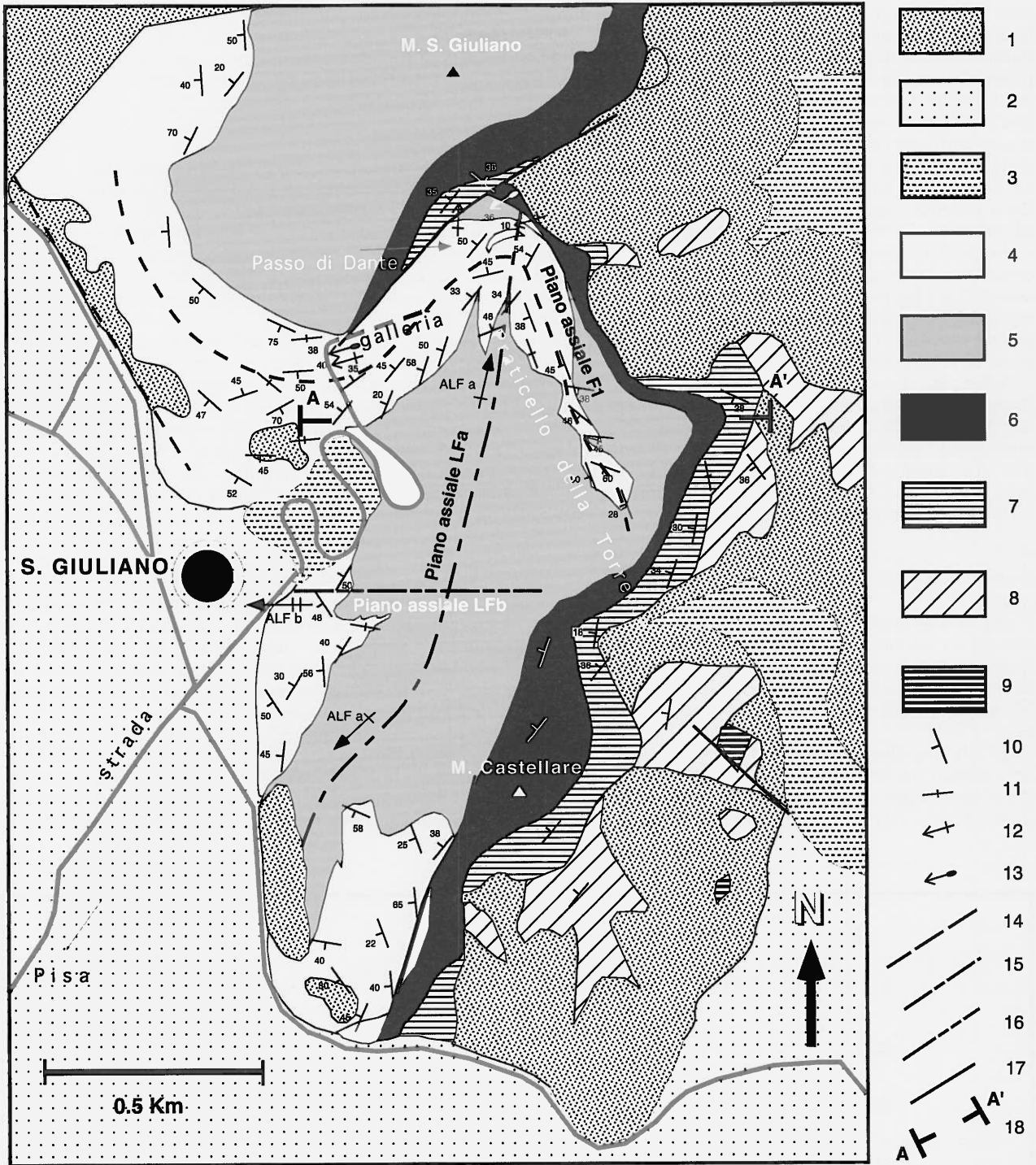


Fig. 2 - Schema geologico dell'Unità di S. Maria del Giudice nel settore studiato. L'andamento complesso delle formazioni all'affioramento è dovuto all'interferenza tra una sinclinale F1 e un'antiforme LFa, come schematicamente mostrato nella Figura 6. (1: Coperture quaternarie; 2: depositi alluvionali; 3: alluvioni terrazzate; 4: Calcare selcifero (cs); 5: Calcare ceroide, metabrecce, sottili livelli di marmi giallo-rosa riferibili al Calcare Rosso Ammonitico (cm); 6: Grezzoni (gr); 7: Quarziti viola zonate (qv); 8: Quarziti bianco rosa (qr); 9: Quarziti verdi; 10: foliazione S1; 11: foliazione S1 verticale; 12: assi di pieghe F1; 13: lineazione di allungamento L1; 14: traccia del piano assiale della sinclinale F1; 15: traccia del piano assiale delle pieghe LFa; 16: traccia del piano assiale delle pieghe Lfb; 17: faglie; 18: traccia della sezione geologica di Fig. 3).

zare la presenza di una componente transpressiva durante la deformazione (Carosi & Montomoli, 1999).

Parallelamente ai piani assiali delle pieghe F1 si sviluppa una foliazione S1, in facies scisti verdi (Franceschelli *et al.*, 1986; Carosi *et al.*, 1993), che si presenta come una foliazione continua e penetrativa nei litotipi meno competenti (prevalentemente pelitici), mentre è più spaziata nei litotipi a maggior competenza. Sulla superficie S1 si sviluppa una lineazione di massima estensione circa parallela agli assi delle pieghe coeve (Carosi & Montomoli, 1999). Segue una fase D2 associata allo sviluppo di pieghe F2 caratterizzate da piani assiali suborizzontali e da un clivaggio di crenulazione di piano assiale. Le pieghe F2 si sviluppano in genere sui fianchi molto inclinati delle strutture plicative F1 e la loro vergenza, variabile, è strettamente condizionata dalla direzione e, principalmente, dall'inclinazione delle superfici deformate (Carosi *et al.*, 1996; 1997).

Passando dal settore meridionale a quello nordoccidentale del massiccio è stata osservata una variazione sistematica nell'orientazione degli elementi strutturali relativi ad entrambe le fasi descritte, con direzioni prevalenti NW-SE nel settore meridionale e direzioni NNE-SSW nel settore nordoccidentale (Carosi *et al.*, 1997).

ANALISI STRUTTURALE

L'analisi strutturale alla meso e alla microscala, affiancata da un rilevamento geologico alla scala 1: 5.000, è stata condotta sull'Unità di Santa Maria del Giudice affiorante nel settore occidentale dei Monti Pisani a NE del paese di San Giuliano Terme (Prov. di Pisa; Figg. 1 e 2).

Oltre alle due classiche fasi deformative scistogene già riconosciute su tutto il massiccio è stata documentata in quest'area la presenza di due ulteriori sistemi di pieghe (*Later Fold a e b*) che deformano la foliazione S1 e che

sono a loro volta deformate dalle pieghe F2.

Queste pieghe si sviluppano dalla scala metrica a quella plurichilometrica, non sono generalmente associate ad una foliazione di piano assiale e sono diffuse anche in altre zone del massiccio.

Fase D1

Nell'area studiata la fase D1 è responsabile di una piega di dimensioni chilometriche che coinvolge la successione carbonatica dell'Unità di S. Maria del Giudice (Fig. 3). Si tratta di una sinclinale a nucleo di Calcarea selcifera con sviluppo variabile da NW-SE a SW-NE, deformata da due sistemi di pieghe successive che ne complicano notevolmente la geometria e il *pattern* cartografico.

La zona di cerniera della sinclinale F1 affiora sul versante SE del Monte Praticello della Torretta e procedendo verso NW mostra dei netti cambiamenti nella orientazione degli elementi strutturali di prima fase (foliazione S1, assi di pieghe F1 e lineazioni) che variano da direzioni NW-SE a direzioni SW-NE.

Sono comunque riconoscibili anche pieghe minori F1 (Fig. 4a) con fianchi assottigliati e cerniere ispessite con frequenti strutture tipo *boudin* sui fianchi e cerniere isolate (Fig. 4b).

Pieghe LFa

Le pieghe hanno ampi angoli di apertura e sono caratterizzate da piani assiali molto inclinati e da assi con direzioni comprese tra NNW-SSE e NW-SE. Generalmente non sono associate ad una foliazione di piano assiale, solo raramente, nei livelli pelitici, si riconosce un clivaggio spaziato disgiuntivo.

Nell'area esaminata pieghe LFa sono ben sviluppate nella porzione basale carbonatica dell'Unità di Santa Maria del Giudice. Una struttura chilometrica è stata documentata grazie alla ottima esposizione del contatto tra le formazioni del Calcarea cerioide e del Calcarea

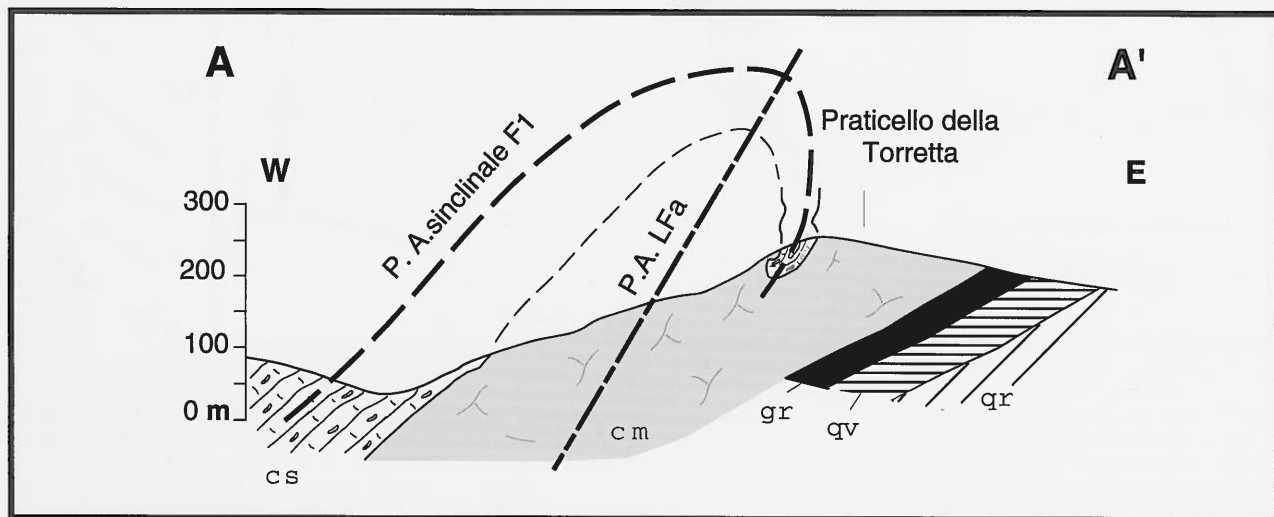
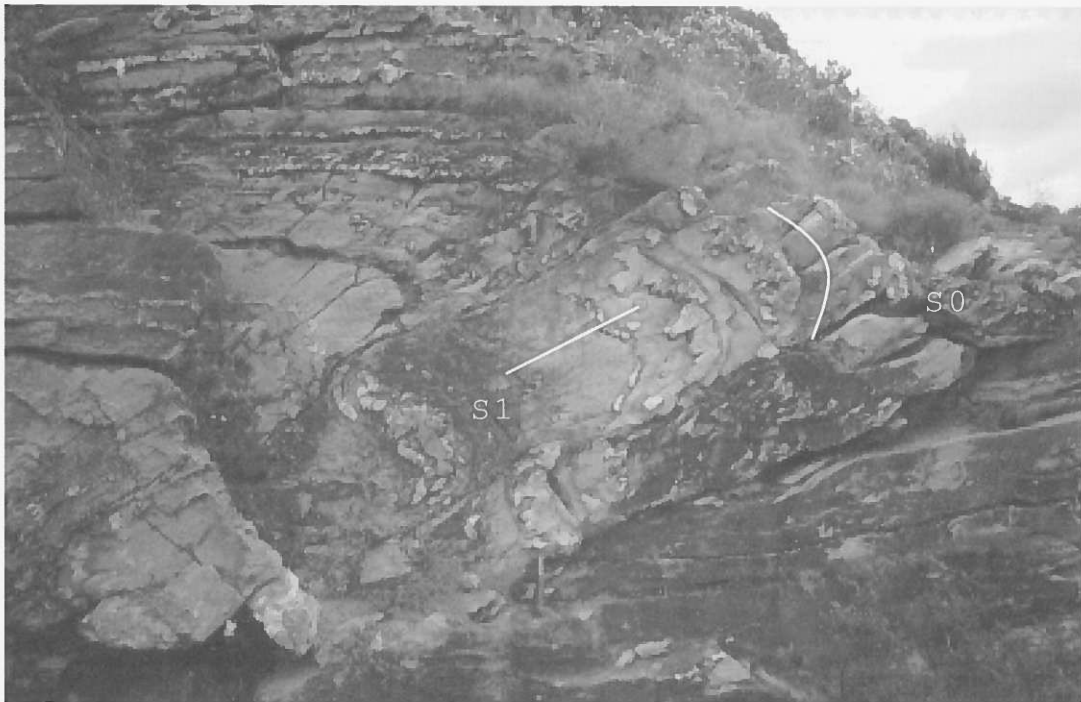


Fig. 3 - Sezione geologica schematica relativa alla struttura analizzata. La traccia della sezione è riportata in Figura 2.



A



B

Fig. 4 - Strutture minori della fase D1 nel Calcere Selcifero. A: Zona di cerniera di piega di prima fase; B: selci boudinate sulla foliazione S1 con quarzo fibroso cresciuto nella direzione di estensione negli spazi aperti tra i *boudin* e riflusso della matrice.

selcifero. La struttura, cartografata in dettaglio (Fig. 2), deforma la sinclinale di prima fase precedentemente descritta (Fig. 3). L'asse della piega tardiva LFa risulta fortemente inclinato verso Nord. Questo è dovuto al fatto che il piegamento F1a non interessa superfici orizzontali ma deforma, ulteriormente, una struttura precedentemente piegata (sinclinale di prima fase) con fianchi molto inclinati, per cui gli assi Alfa nascono in parte già inclinati.

Pieghe LFb

Queste pieghe si sviluppano dalla scala metrica a quella ettometrica. Sono state riconosciute sia nella successione silicoclastica che nella copertura calcarea. Anche questo sistema di pieghe è caratterizzato da piani assiali molto inclinati, in alcuni casi verticali, parallelamente ai quali non è mai stato osservato lo sviluppo di una foliazione. Le pieghe hanno angoli di apertura ampi ed assi orientati circa E-W con immersioni di pochi gradi verso W.

Nell'area esaminata chiari esempi di pieghe LFb sono state osservate nella Formazione del Calcarea selcifero affiorante nella cava immediatamente ad Est del paese di San Giuliano. Qui è possibile osservare una piega LFb di dimensioni ettometriche. La struttura ripiega la foliazione S1, parallela all'originaria superficie di stratificazione, ha un angolo di apertura di circa 120° ed un piano assiale verticale (Fig. 5). La direzione dell'asse, calcolato mediante diagramma π dai poli di piani misurati sui fianchi della piega, è E-W ed immerge di 40°

verso W (Fig. 5). Questa piega è responsabile del ripiegamento della intera struttura LFb che mostra, nel suo complesso, immersioni assiali sia verso NNE che SSW. Pieghe LFb, di dimensioni metriche, si osservano anche nella successione silicoclastica ove presentano le stesse caratteristiche geometriche, hanno piani assiali molto inclinati, angoli di apertura superiori ai 100° e non si osserva quasi mai lo sviluppo di foliazione di piano assiale. Gli assi variano da E-W a WSW-ENE. In alcuni casi è stato possibile osservare che i fianchi delle pieghe LFb sono deformati da pieghe posteriori di collasso con piani assiali sub-orizzontali.

DISCUSSIONE

In questo lavoro è stata esaminata una porzione dell'Unità di S. Maria del Giudice dove le condizioni di affioramento favorevoli hanno permesso di ricostruire un complesso *pattern* di interferenza tra i sistemi di pieghe che hanno interessato l'unità metamorfica. L'analisi strutturale condotta sia durante il rilevamento geologico alla mesoscala che al microscopio ottico ha permesso di districare la complessità della struttura e di interpretarla in funzione di deformazioni diffuse nell'intero massiccio dei Monti Pisani.

L'area in esame è stata cartografata da Giannini & Nardi (1965) e da Rau & Tongiorgi (1974), che avevano interpretato il Calcarea selcifero affiorante al nucleo della sinclinale F1, in parte come una varietà di Calcarea

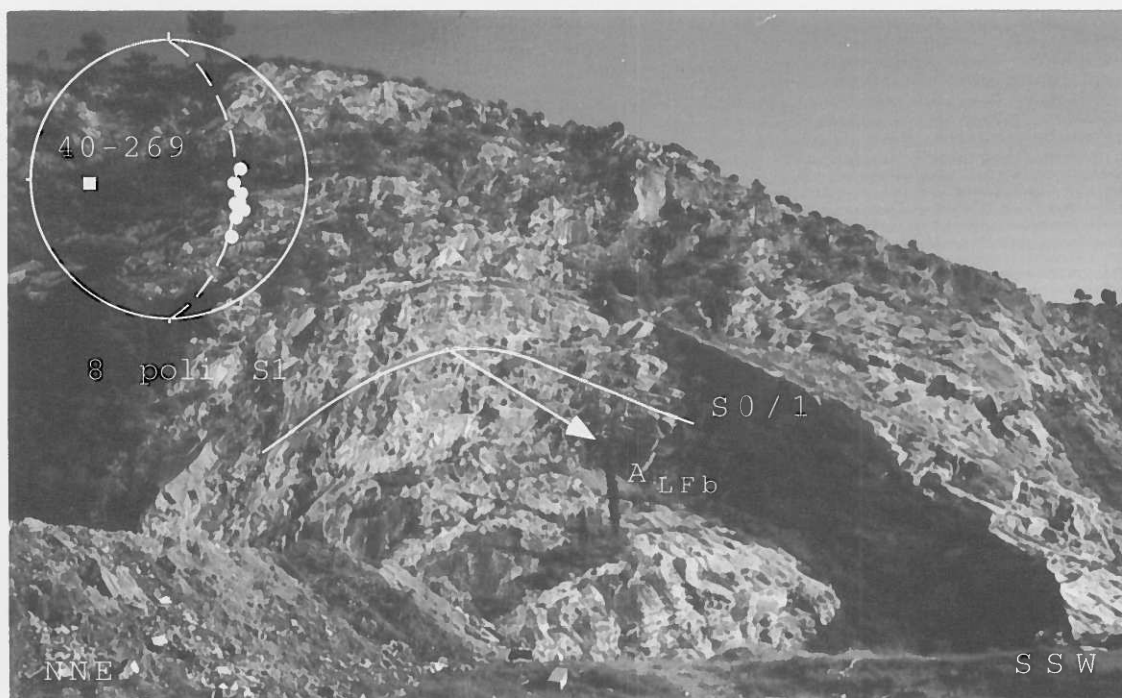


Fig. 5 - Piega ettometrica LFb nel Calcarea selcifero nei pressi di S. Giuliano; la superficie piegata è la foliazione S1, sub-parallela alla superficie di stratificazione. La dispersione dei poli della foliazione S1 indica una piega cilindrica con un asse calcolato con direzione N89E, inclinato di 40° verso W.

ceroidi con liste di selce e in parte come Calcare selcifero. Questo, assieme alla complessità della struttura e alla mancanza di analisi strutturale, ha fatto sì che la struttura di prima fase e il relativo *pattern* di interferenza venissero per lungo tempo trascurate.

Le deformazioni a carico della sinclinale F1 e della relativa foliazione di piano assiale S1 hanno messo in evidenza una storia strutturale più complessa di quella delineata fino ad ora nelle unità metamorfiche dell'Appennino Settentrionale (Figg. 2, 6). Oltre alle due fasi deformative già conosciute in letteratura sono stati documentati due sistemi di pieghe tardive (LFA e LFB), che si sviluppano posteriormente alla fase deformativa D1 (Carosi *et al.*, 1997).

Le geometrie dei due sistemi di pieghe tardive, caratterizzati entrambi da piani assiali molto inclinati, ammettono direzioni di raccorciamento orizzontali che non si accordano con una tettonica estensionale legata ad una direzione di raccorciamento verticale.

Poiché nell'Appennino Settentrionale il regime tettonico esistente dopo la prima fase deformativa è ancora oggi oggetto di discussione, lo studio dei sistemi di pieghe tardive può fornire un importante contributo alla comprensione dell'evoluzione tardiva dell'intera catena.

A scala dell'intero nucleo metamorfico dei Monti Pisani le pieghe LFA possono essere le responsabili della rotazione degli elementi strutturali di prima fase che si osserva passando dal settore meridionale a quello nord-occidentale, variando rispettivamente da NW-SE a NE-SW (Carosi *et al.*, 1997). Tale variazione può essere spiegata ammettendo l'esistenza di una piega (LFA) plurichilometrica con asse orientato circa NW-SE e fortemente immergente verso NW (Fig. 7).

Le pieghe tardive, documentate in questo lavoro, non rappresentano deformazioni particolari presenti solamente nell'area studiata, ma sembrano avere una diffusione regionale e interessare diverse unità tettoniche. Esse testimoniano la presenza di raccorciamenti sia perpendicolari che paralleli alla catena, fino ad oggi

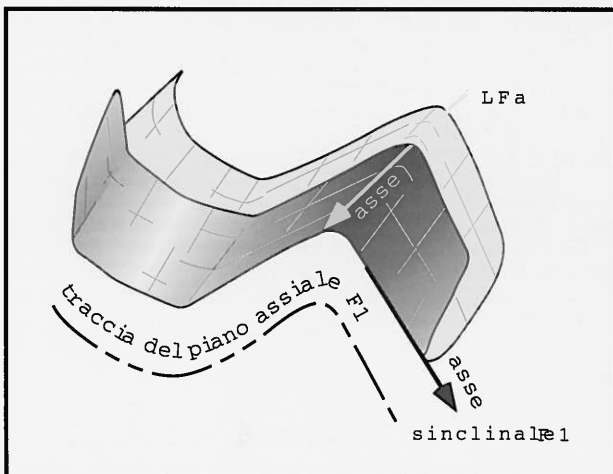


Fig. 6 - Disegno schematico della struttura di S. Giuliano raffigurante l'interferenza tra la sinclinale di prima fase e l'antiforme LFA.

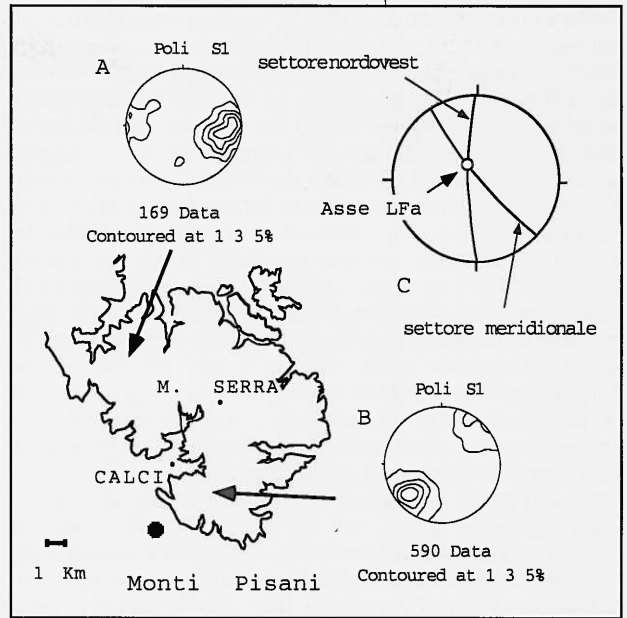


Fig. 7 - I due stereonet (A e B) mostrano l'andamento statistico della foliazione S1 nel settore meridionale (B) e in quello nordoccidentale (A) dei Monti Pisani. Il cambiamento di orientazione osservato è causato da una piega LFA a scala chilometrica il cui asse calcolato ha direzione NW-SE e immerge fortemente verso NW (C).

poco documentati e poco considerati nell'evoluzione tettonica.

Sistemi di pieghe tardive, analoghi a quelli descritti in questo lavoro, sono stati, infatti, riconosciuti di recente anche in altri settori dell'Appennino settentrionale; in particolare nella Falda Toscana affiorante nella zona di La Spezia (Montomoli 2001; Montomoli *et al.*, 2001), nella zona di Castelpoggio lungo il versante occidentale delle Alpi Apuane (Carosi *et al.*, 2001) e nella terminazione sud orientale del massiccio apuano nella zona di Pescaglia (Carosi *et al.*, 2001). Lo stesso tipo di strutture sono state riconosciute inoltre anche più ad Est, nella Falda Toscana affiorante nell'area di Corfino (Baldacci *et al.*, 1992), ma anche nei vicini Monti D'Oltreserchio (Carosi *et al.* in preparazione). Per quanto riguarda l'Unità di Massa, pieghe tardive, riferibili al sistema LFA sono state riconosciute nei Monti dell'Uccellina in Toscana meridionale (Campetti *et al.*, 1999).

Al momento attuale mancano i dati di età radiometrica relativi alle diverse fasi deformative e, quindi, le correlazioni tra fasi riconosciute in settori diversi della catena possono talvolta essere problematiche. Tuttavia, le geometrie, i rapporti di sovrapposizione tra le diverse fasi tettoniche (in particolare la presenza di un *fabric* penetrativo D1 di riferimento e il fatto che queste pieghe interessino i contatti tettonici tra le principali unità) e le loro direzioni strutturali possono far ritenere che queste fasi plicative tardive abbiano uno sviluppo regionale diffuso e rivestano un ruolo tutt'altro che secondario nella compressione dell'evoluzione strutturale della catena.

Dopo la fase deformativa D1, l'impilamento delle unità tettoniche principali e l'inizio della riesumazione delle unità metamorfiche (Carmignani *et al.*, 1978; Jolivet *et al.*, 1998; Molli *et al.* 2000), la tettonica compressiva ha proseguito con direzioni di raccorciamento sia parallele che perpendicolari all'andamento della catena (Carosi *et al.*, 2001). Le due direzioni di raccorciamento ortogonali hanno favorito la formazione e la crescita dei nuclei metamorfici, formati in corrispondenza dei duomi (interferenza tra due antiformali) e del precedente *antiformal stack* di unità tettoniche. Le due direzioni di raccorciamento orizzontale possono aver indotto piegamenti per *buckling* e possono, quindi, aver giocato un ruolo importante nella crescita e nell'amplificazione dei duomi metamorfici contribuendo al processo di riesumazione delle metamorfite. Successivamente la catena è stata interessata dallo sviluppo di pieghe di collasso e da sistemi di faglie distensive.

I fianchi della sinclinale F1 mostrano blande deformazioni della foliazione S1, riconducibili a pieghe aperte, per lo più simmetriche, con piani assiali suborizzontali, incompatibili con i piani assiali subverticali delle pieghe LFa e LFb (Fig. 3). Sebbene le relazioni tra le pieghe F2 descritte nei Monti Pisani e le pieghe LFa e LFb non siano del tutto chiare nell'area studiata, è verosimile ritenere che le pieghe F2 siano in molti casi posteriori e che possano essere riferite ad una fase finale di collasso delle unità metamorfiche (Fig. 3).

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro è stato eseguito con il contributo finanziario del Centro di Studio per la Geologia Strutturale e Dinamica dell'Appennino (CNR Pisa) e dell'Università degli Studi di Pisa. Si ringrazia il Prof. P.C. Pertusati per la lettura critica del manoscritto e per gli utili suggerimenti ricevuti.

BIBLIOGRAFIA

- Baldacci F., Carmignani L., Fantozzi P.L., Meccheri M. & Plesi, G., 1992. Lineamenti stratigrafico-strutturali lungo la trasversale Alpi Apuane-Appennino Reggiano-Modenese. *Stud. Geol. Camerti*, volume speciale (1992/2), app. CROP 1-1A: 31-49.
- Boccaletti M., Elter P. & Guazzone G., 1971. Plate tectonic model for the development of the Western Alps and Northern Apennines, *Nature*, 234: 108-111.
- Borradaile G.J., 1978. Transected folds: a study illustrated with examples from Canada and Scotland. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 89: 481-493.
- Campetti A., Carosi R., Decandia F.A., Elter P., Lazzarotto A., Montomoli C., Pertusati P.C. & Polverosi B., 1999. Assetto ed evoluzione strutturale dei Monti dell'Uccellina (Toscana meridionale). *Boll. Soc. Geol. Ital.* 118: 149-165.
- Carmignani L. & Kligfield R., 1990. Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from the compression to extension in the Alpi Apuane core complex. *Tectonics*, 9, 6: 1275-1303.
- 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., Giglia G. & Kligfield R., 1978. Structural evolution of the Apuane Alps: an example of continental margin deformation in the Northern Apennines, Italy. *J. Geol.*, 86: 487-504.
- Carosi R., Cerbai N. & Montomoli C., 1996. The F2 folds of the Verrucano as records of extensional tectonics. *C. R. Acad. Sci., Paris*, 322, Ser. II a (9): 773-780.
- Carosi R., Cerbai N. & Montomoli C., 1997. Deformation history of the Verrucano of Pisani Mounts (Northern Apennines, Italy). *Ann. Tect.*, 9 (1995), 1/2: 55-75.
- Carosi R., Leoni L. & Tamponi M., 1993. Temperature di metamorfismo e "cristallinità" dell'Illite nell'Unità di Santa Maria del Giudice (Monti Pisani, Appennino Settentrionale). *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Ser. A*, 99 (1992): 161-173.
- Carosi R. & Montomoli C., 1998. Relazioni tra pieghe e lineazioni di estensione nel Verrucano dei Monti Pisani (Appennino Settentrionale). *Atti Ticin. Sci. Terra (serie speciale)* 7: 39-58.
- Carosi R. & Montomoli C., 1999. Relations between folds and stretching lineation in the Verrucano of Pisani Mounts, Northern Apennines. *C. R. Acad. Sci., Paris*, 328: 485-492.
- Carosi R., Montomoli C. & Pertusati P.C., 2001. Late orogenic structures and orogen-parallel compression in the Northern Apennines. *Boll. Soc. Geol. Ital., Vol. Speciale* 1.
- 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. *J. Metam. Geol.*, 4: 309-321.
- Giannini E. & Nardi R., 1965. Osservazioni sulla stratigrafia e la tettonica della zona di raccordo tra il Monte Pisano e le Alpi Apuane. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, 84: 416-438.
- Jolivet L., Faccenna C., Goffé B., Mattei M., Rossetti F., Brunet C., Storti F., Funicello R., Cadet J.P., D'Agostino N. & Parra T., 1998. Mid-crustal shear zones in post-orogenic extension: example from the Northern Tyrrhenian sea. *J. Geophys. Res.*, 103, B6: 123-160.
- Molli G., Giorgetti G. & Meccheri M., 2000. Strutturali and petrological constraints on the tectono-metamorphic evolution of the Massa Unit (Alpi Apuane, NW Tuscany, Italy). *Geol. Journ.*, 35: 251-264.
- Molli G. & Meccheri M., 2000. Geometrie di deformazione nell'alta valle di Colonnata: un esempio di strutturazione polifasica e composita nelle Alpi Apuane. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, 119: 379-394.
- Montomoli C., 2001. Vein development and fluid inclusion data: insight on the evolution of the Tuscan Nappe in the Northern Apennines. *Boll. Soc. Geol. Ital., vol. Speciale* 1,
- Montomoli C., Ruggieri G., Boiron M.C. & Cathelineau M., 2001. Pressure fluctuations during uplift of the Northern Apennines (Italy): a fluid inclusion study. *Tectonophysics*, 341: 121-139.
- Pertusati P.C., Plesi G. & Cerrina Feroni A., 1979. Alcuni esempi di tettonica polifasata nella Falda Toscana. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, 96 (1977): 587-603.
- Ramsay J. & Lisle R., 2000. *The Techniques of Modern Structural Geology. Vol 3: Applications of continuum mechanics in structural geology.* Academic Press, pp. 701-1061.
- Rau A. & Tongiorgi M., 1974. La geologia dei Monti Pisani a Sud-Est della Valle del Guappero. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, 13: 227-408.
- Tongiorgi M., Rau A. & Martini I.P., 1977. Sedimentology of early-alpine, fluvio-marine clastic deposits (Verrucano, triassic) in the Monti Pisani (Italy). *Sediment. Geol.*, 17: 311-332.