

**L'ANISOTROPIA DELLA SUSCETTIVITA' MAGNETICA NELLA RISOLUZIONE
DI PROBLEMI GEODINAMICI: ALCUNI ESEMPI NELL'APPENNINO CENTRO-MERIDIONALE**

INDICE

RIASSUNTO	pag. 231
ABSTRACT	" 231
INTRODUZIONE	" 231
ANALISI DEI DATI	" 231
IMPLICAZIONI GEODINAMICHE	" 233
CONCLUSIONI	" 235
TESTI CITATI	" 235

RIASSUNTO

Lo studio dell'Anisotropia della Suscettività Magnetica (AMS) di unità rocciose è utilizzato quale metodo di indagine strutturale in numerosi contesti geologici. Nell'Appennino centro-meridionale abbiamo analizzato varie unità sedimentarie, di età compresa tra il Cretacico superiore ed il Pleistocene inferiore, affioranti in strutture diverse. I dati ottenuti evidenziano che i *fabric* magnetici osservati, tipici di sedimenti indeformati o ai primi stadi di deformazione, sono strettamente correlati all'andamento delle strutture e consentono di definire l'orientazione ed il grado relativo della deformazione in ciascuna unità litostratigrafica.

ABSTRACT

Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) studies constitute an effective tool of structural analysis for almost all rock types. We investigated the AMS of sedimentary units, upper Cretaceous to lower Pleistocene in age, from different structures in central-southern Apennines. The obtained results show magnetic fabrics which are typical of undeformed or weakly deformed sediments. Such fabrics are strictly related to the structural setting and allow both the reconstruction of the bedding attitude in massive clayey units and the determination of the orientation and the relative degree of deformation in each lithostratigraphic unit.

PAROLE CHIAVE: AMS, Fabric, Appennino centro-meridionale.

KEY WORDS: AMS, Fabric, Central-Southern Apennines.

INTRODUZIONE

Lo studio dell'Anisotropia della Suscettività Magnetica (AMS) costituisce un metodo molto efficace, relativamente rapido e non distruttivo per esprimere quantitativamente il *fabric* magnetico delle rocce. L'AMS di una roccia dipende sia dalle caratteristiche

mineralogiche dei granuli costituenti (anisotropia magnetocristallina) che dalla loro forma ed orientazione preferenziale (anisotropia di forma) ed è espressa matematicamente da un tensore del secondo ordine e geometricamente da un ellissoide a tre assi (indicati rispettivamente con $K_{max} > K_{int} > K_{min}$). Il *fabric* originale di una roccia, acquisito sotto l'azione dei processi fisici agenti al momento della litogenesi, può essere sostanzialmente modificato se la roccia è soggetta a deformazione. Tale modifica risulta dalla sovrapposizione di un *fabric* deformazionale sull'originale *fabric* sedimentario. In numerosi contesti geologici è stata ampiamente dimostrata l'esistenza di correlazione tra la forma e l'orientazione dell'ellissoide della deformazione e quelle dell'ellissoide della suscettività magnetica, ed è ormai ben nota, almeno qualitativamente, la variazione del *fabric* magnetico al procedere della deformazione (Fig. 1) (GRAHAM, 1966; KLIGFIELD *et alii*, 1981; HROUDA, 1982; BORRADAILE, 1988; HROUDA, 1991). Lo studio dell'AMS è stato pertanto utilizzato per ricostruzioni di carattere geodinamico e per studi sulla deformazione delle rocce in numerosi ambienti strutturali. Nel caso di rocce sedimentarie debolmente deformate, in cui non si riscontrino specifici indicatori geometrici della deformazione, l'analisi dell'AMS può costituire l'unico metodo per la determinazione delle caratteristiche della deformazione stessa. Tuttavia, anche se gli stadi di progressiva e continua modificazione del *fabric* magnetico al procedere della deformazione sono ben noti e ampiamente descritti in letteratura, il tasso con cui tale modificazione avviene e le relazioni quantitative tra AMS e deformazione variano enormemente in dipendenza della mineralogia magnetica (BORRADAILE, 1988) e del modello matematico di deformazione assunto (OWENS, 1974; HROUDA & LANZA, 1989).

In questo lavoro sono considerati i dati di AMS ottenuti da rocce sedimentarie debolmente o niente affatto deformate affioranti in diverse unità strutturali dell'Appennino centro-meridionale (Sabina, piattaforma laziale-abruzzese, Marsica, bacino di Sant'Arcangelo). Tali dati sono considerati in relazione al contesto strutturale e sedimentario di ciascun sito di analisi e vengono utilizzati quali possibili indicatori dell'orientazione e del grado relativo di deformazione per litotipi omogenei all'interno di singole strutture. Le indicazioni ottenute, assieme alla definizione della possibile età di acquisizione del *fabric* stesso, apportano contributi originali alla comprensione della storia deformativa dell'Appennino centro-meridionale.

ANALISI DEI DATI

Sono stati analizzati un totale di 65 siti, da ciascuno dei quali sono stati prelevati in media 8-10 campioni orientati, relativi a litotipi carbonatici (Forma-

(*) Dottorato di Ricerca. Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Roma "La Sapienza".

(**) Istituto Nazionale di Geofisica - Roma.

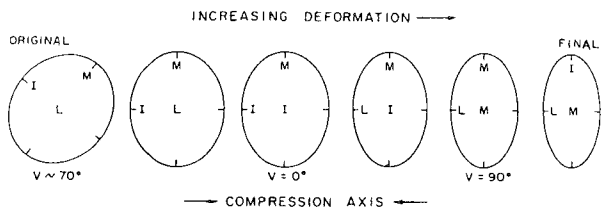


Fig. 1 - Il diagramma illustra la variazione del *fabric* magnetico di un sedimento con il procedere della deformazione. Il piano della figura è parallelo ad uno strato soggetto a compressione orizzontale e libero di espandersi normalmente al piano di stratificazione. Gli assi al centro delle ellissi sono normali allo strato; gli altri sono paralleli ad esso. $L = K_{\min}$; $I = K_{\text{int}}$; $M = K_{\max}$; V è l'angolo tra il K_{\min} ed il vettore che eguaglia il K_{int} nel piano $K_{\min} - K_{\max}$. Da GRAHAM (1966).

zione della Scaglia), marnosi (Formazione di Guadagnolo) ed argillosi (Flysch terrigeni dell'area laziale-abruzzese e argille del bacino di Sant'Arcangelo) di età compresa tra il Cretacico superiore ed il Pleistocene inferiore (MATTEI *et alii*, questo volume; SAGNOTTI & SPERANZA, 1992).

Esistono numerosi parametri tradizionalmente in uso per quantificare il grado di anisotropia e la forma dell'ellissoide della suscettività magnetica (si veda HROUDA, 1982 per una rassegna e per la descrizione dei parametri cui ci si riferirà nel seguito). Nella nostra analisi per ogni campione sono stati calcolati la suscettività media (K_m), il grado di anisotropia (parametri P e P'), la lineazione magnetica (L), la foliazione magnetica (F) ed il parametro di forma T . Dalla media tensoriale (JELINEK, 1978) dei dati relativi a ciascun campione si sono ottenuti gli stessi parametri per ogni sito. La suscettività media è dell'ordine di 10^{-5} unità SI per i litotipi calcareo-marnosi e di 10^{-4} unità SI per i litotipi argillosi. Il grado di anisotropia, generalmente

basso ($P' < 1.1$), è fortemente dipendente dal tipo litologico e dalla posizione strutturale del sito di analisi (con riferimento a FUNICIELLO *et alii*, 1981; COSENTINO & PAROTTO, 1986 e HIPPOLYTE *et alii*, 1991) e raggiunge il valore massimo ($P' = 1.235$) in prossimità degli elementi tettonici maggiori dell'Appennino centrale. Esso tende comunque ad aumentare con la diminuzione della componente calcarea della roccia; in particolare i sedimenti argillosi sono quelli maggiormente anisotropi, mentre i livelli a forte componente calcarea (quali quelli nella Scaglia Cinerea) sono caratterizzati da un *fabric* praticamente isotropo anche in aree fortemente deformate.

I *fabric* ricostruiti per ciascun sito sono sempre o tipicamente primari o riferibili a stadi molto precoci della deformazione; gli ellissoidi di suscettività magnetica variano tra tipologie esclusivamente sedimentarie ed altre tipiche dei primi stadi di trasposizione tettonica del *fabric* originario. Il *fabric* sedimentario tipico, determinato esclusivamente dai processi di compattazione della roccia, è caratterizzato da una foliazione magnetica dominante ($F \gg L$ e $T > 0$) con il K_{\min} perpendicolare alla stratificazione, e $K_{\text{int}} = K_{\max}$ dispersi nel piano perpendicolare al K_{\min} (Fig. 2a). Il *fabric* tettonico estremo da noi riconosciuto è invece caratterizzato dallo sviluppo di una marcata lineazione magnetica ($L > F$ e $T < 0$), con i K_{\max} orientati perpendicolarmente alla massima compressione, e $K_{\text{int}} = K_{\min}$ dispersi in una cintura perpendicolarmente al K_{\max} (Fig. 2b). Nel complesso sono riconoscibili tutti i termini di transizione tra le due tipologie estreme a testimonianza di una evoluzione continua nella forma ed orientazione dell' ellissoide della suscettività magnetica con il procedere della deformazione. Il *fabric* più comune è quello con $K_{\max} > K_{\text{int}} > K_{\min}$ e foliazione magnetica prevalente ($T > 0$), in cui i K_{\min} si addensano sul polo del piano di stratificazione, ed i K_{\max} definiscono una lineazione magnetica perpendicolare al

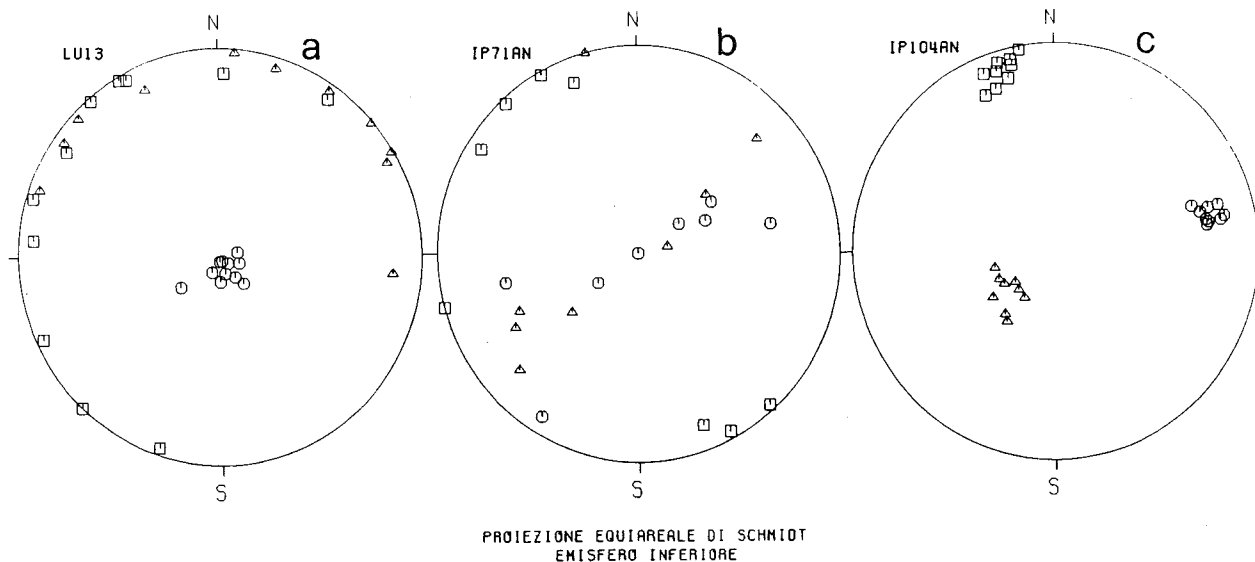


Fig. 2 - Proiezione degli assi principali degli ellissoidi di suscettività magnetica ottenuti per tre siti con *fabric* tipico. Quadrati = K_{\max} ; triangoli = K_{int} ; cerchi = K_{\min} .
 a) *Fabric* tipicamente sedimentario, ellissoide oblato. I K_{\min} sono ben addensati normalmente al piano di stratificazione, mentre i K_{int} e i K_{\max} sono dispersi nel piano di foliazione magnetica (qui pressoché orizzontale).
 b) *Fabric* tipicamente tettonico, ellissoide prolato. I K_{\max} sono addensati e prossimi al piano orizzontale, mentre i K_{int} e i K_{\min} sono dispersi in una fascia normale ai K_{\max} .
 c) *Fabric* misto, ellissoide triassiale. Ciascuno dei tre K è ben addensato. I K_{\min} sono normali al piano di stratificazione, i K_{\max} (prossimi all'orizzontale) sono normali al massimo raccorciamento (si veda il testo).

massimo raccorciamento nel piano di stratificazione. Il corrispondente ellissoide (Fig. 2c) è tipico di un *fabric* misto sedimentario e tettonico, ove cioè il *fabric* magnetico non è determinato interamente dai processi deposizionali ma risente parzialmente della deformazione.

Infatti, mentre la foliazione magnetica si mantiene sempre molto prossima al piano di stratificazione, la presenza e l'orientazione della lineazione magnetica sono invece fortemente controllati dalla posizione strutturale dei siti (si veda, ad esempio, la Fig. 3 per i siti relativi all'Appennino centrale). Questo è particolarmente evidente nella Val Roveto (Fig. 4) dove, per lo stesso litotipo e per uguale intervallo stratigrafico, nei fianchi nord-orientali delle strutture si riconosce un *fabric* tettonico tipico e una lineazione magnetica ben definita, mentre nei fianchi sud-occidentali quest'ultima è molto meno marcata o addirittura assente (*fabric* puramente sedimentario). Tale andamento, che indica sensibile deformazione nel fianco nord-orientale delle strutture e deformazione nulla o estremamente bassa nel fianco sud-occidentale, è in perfetto accordo con l'evoluzione tettonica dell'area che è caratterizzata da una direzione di trasporto delle strutture verso nord-est. Inoltre, l'orientazione della lineazione magnetica per lo più ricalca strettamente l'asse locale delle strutture ed è perpendicolare all'asse di massima compressione ricavato dall'analisi mesostrutturale (SALVINI & VITTORI, 1982; CAVINATO *et alii*, 1986; MATTEI *et alii*, 1986; HIPPOLYTE *et alii*, 1991). Nella gran parte dei siti la lineazione magnetica è disposta orizzontalmente.

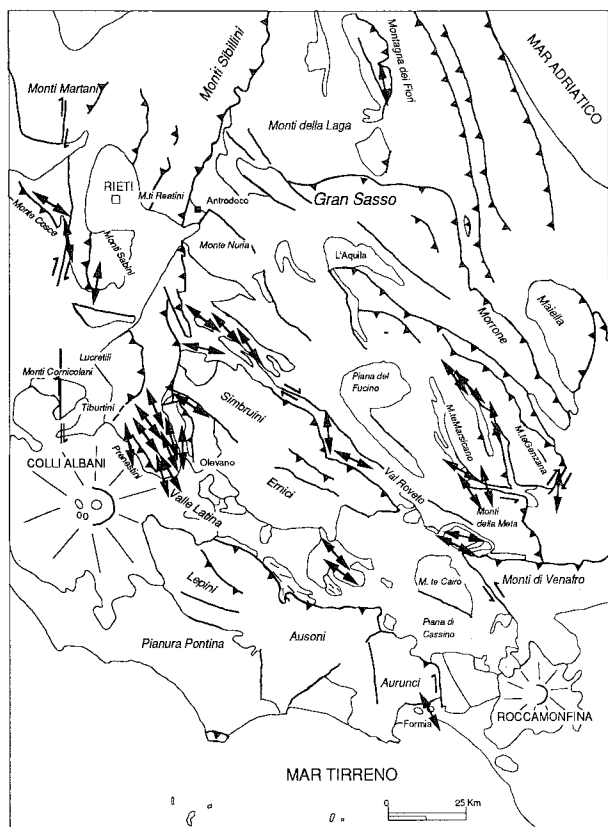


Fig. 3 - Carta strutturale semplificata dell'Appennino centrale. Le doppie frecce indicano l'orientazione della lineazione magnetica in siti di età compresa tra il Cretacico ed il Messiniano. E' evidente la correlazione tra l'orientazione delle lineazioni magnetiche e l'asse delle strutture principali.

Solo raramente ed in situazioni geologiche particolari (pieghe con forte immersione dell'asse, strutture piegate e successivamente basculate secondo una direzione non coassiale al piegamento) la lineazione magnetica si presenta inclinata pur rimanendo contenuta nel piano di stratificazione. Inoltre, il riconoscimento del fatto che la lineazione magnetica è orientata parallelamente all'asse delle strutture, indipendentemente dall'età delle rocce campionate, risulta di notevole aiuto nella definizione dell'assetto tettonico di aree dove siano poco chiari o assenti altri elementi strutturali (piani di clivaggio, pieghe).

IMPLICAZIONI GEODINAMICHE

La quasi completa mancanza di dati di AMS per sedimenti dell'Appennino (se si esclude il lavoro di LOWRIE & HIRT, 1987) limita le possibilità di confronto con altre aree attigue, per cui i risultati illustrati in questo articolo non possono assumere un significato conclusivo. Tuttavia lo studio effettuato ha permesso di definire alcuni aspetti rilevanti dell'evoluzione tettonica dell'Appennino.

Grado di deformazione

Il riconoscimento di *fabric* magnetici o tipicamente sedimentari o, quando di natura tettonica, relativi ai primi stadi di deformazione della roccia, evidenzia che l'entità della deformazione delle sequenze sedimentarie investigate è molto limitata. Un *fabric* magnetico puramente tettonico, che trasponga completamente l'originario *fabric* sedimentario, è stato osservato solo raramente, nei siti più prossimi ai maggiori elementi strutturali. Non sono mai state inoltre rinvenute foliazioni tettoniche perpendicolari all'asse di massima compressione, tipiche di stadi di deformazione più intensi.

Significato della lineazione magnetica

L'origine sedimentaria o tettonica della lineazione magnetica è un aspetto oggetto di ampia discussione. In alcuni casi lo sviluppo di una lineazione magnetica nei sedimenti è legato a fattori caratterizzanti l'ambiente di sedimentazione, quali la presenza di paleocorrenti attive all'interfaccia acqua-sedimento al momento della deposizione. In altri contesti è stata invece dimostrata l'origine tettonica della lineazione magnetica anche in sedimenti apparentemente indeformati (KISSEL *et alii*, 1986). I nostri dati indicano che per le unità analizzate lo sviluppo della lineazione magnetica è, nella maggior parte dei casi, di origine sicuramente tettonica. Infatti i dati ottenuti mostrano che la presenza della lineazione magnetica in un determinato litotipo è correlata alla posizione strutturale del sito di analisi e che l'orientazione della lineazione magnetica nei siti con *fabric* sedimentario predominante è la stessa di quella osservata nei siti con *fabric* esclusivamente tettonico (in cui il *fabric* sedimentario è stato completamente trasposto). Inoltre, tale orientazione è parallela all'asse delle strutture e perpendicolare al massimo sforzo compressivo ricavato dall'analisi mesostrutturale delle deformazioni fragili.

Età di formazione del *fabric* magnetico

Il riconoscimento nella maggior parte dei siti di un *fabric* magnetico di prevalente origine sedimentaria (ellissoide fortemente oblato e K_{min} perpendicola-

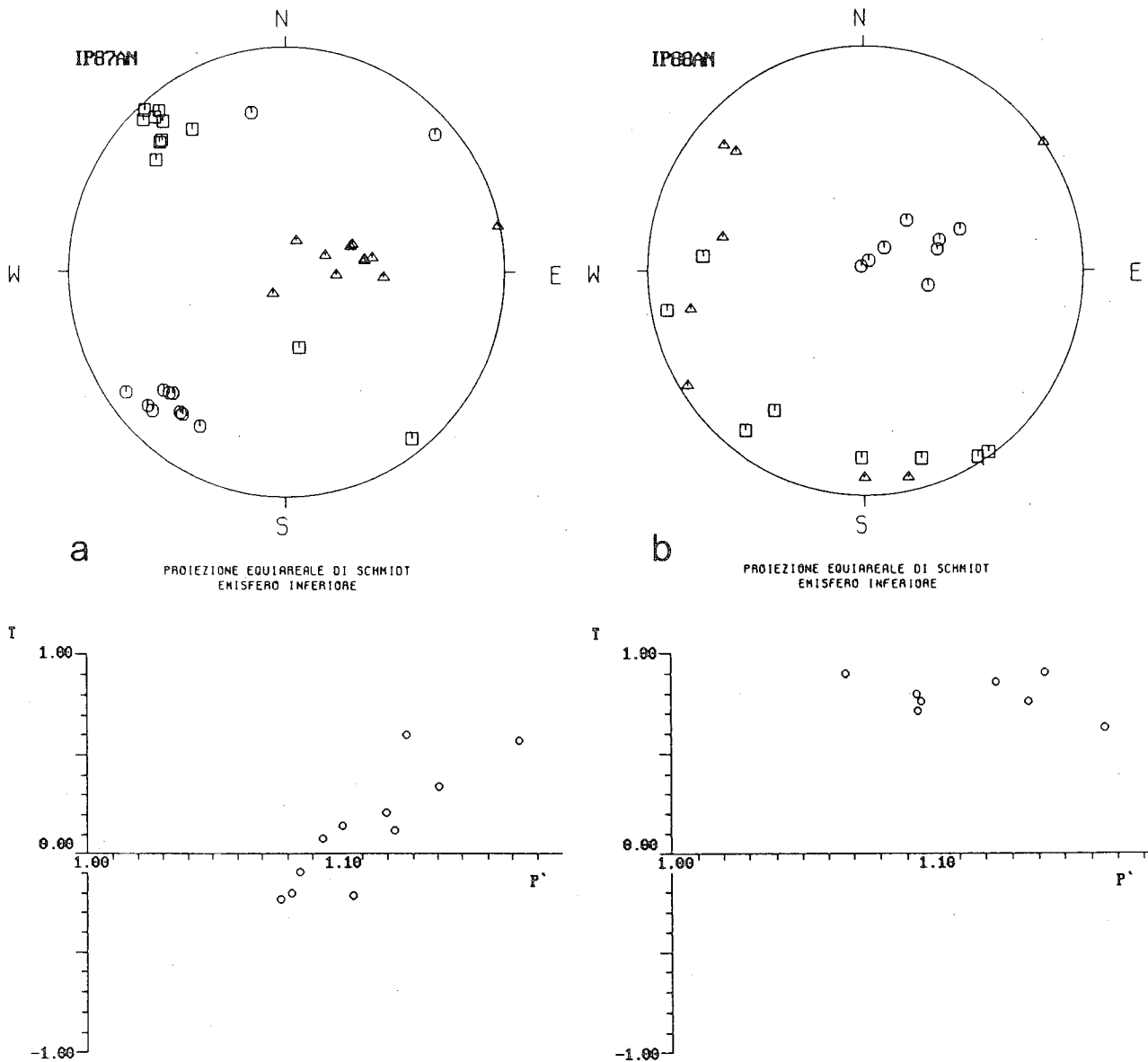


Fig. 4 - Proiezioni degli assi principali degli ellissoidi di suscettività magnetica e diagrammi P' - T ottenuti per l'anticlinale (ad asse NW-SE con vergenza nord-orientale) di Pietrasecca (Val Roveto, Appennino centrale). Il parametro T assume il valore $+1$ per *fabric* magnetici perfettamente planari e -1 per *fabric* magnetici perfettamente lineari. a) fianco nord-orientale (ellissoide triassiale, lineazione magnetica sub-orizzontale), b) fianco sud-occidentale (ellissoide oblatto, assenza di lineazione magnetica). La diversità tra i due *fabric* è chiaramente da imputare al maggior grado di deformazione del fianco nord-orientale della struttura. Simboli come in Figura 2.

re alla stratificazione) dimostra in maniera molto chiara che la sua formazione è per la gran parte precedente o contemporanea al piegamento delle strutture. Allo stesso modo la isorientazione delle lineazioni magnetiche osservate in terreni di varia età (per esempio Eocene-Miocene medio in Sabina) sembra escludere che tali lineazioni si siano formate contemporaneamente (sotto l'azione di paleocorrenti idrauliche) o subito dopo la deposizione, indicando invece che esse si sono originate durante le fasi principali di definizione delle strutture, disponendosi perpendicolarmente all'asse di massimo raccorciamento. Si può pertanto affermare che il *fabric* magnetico osservato, definitosi in tempi differenti nelle varie aree, sia generalmente relativo sia alla compattazione del sedimento che ai principali stadi compressivi responsabili dell'assetto strutturale attuale. Il riconoscimento di *fabric* prevalentemente se-

dimentari nelle strutture esaminate porta inoltre ad escludere un contributo significativo della tettonica polifasata. Si può infatti in questo caso affermare che la sovrapposizione degli effetti di fasi tettoniche successive non è stata comunque sufficiente a trasporre completamente l'originario *fabric* sedimentario, chiaramente riconoscibile nella maggioranza dei siti di analisi. A questa osservazione si aggiunge la considerazione che un sedimento è tanto più sensibile all'azione di sforzi direzionali quanto meno avanzato è il processo di diagenesi. Inoltre la relazione esistente in Appennino centrale tra l'orientazione attuale della lineazione magnetica e l'entità ed il verso delle rotazioni riconosciute con l'analisi paleomagnetica (MATTEI *et alii*, questo volume), indica che i *fabric* ottenuti si riferiscono essenzialmente ai primi stadi di evoluzione delle strutture.

CONCLUSIONI

Le analisi di AMS effettuate in rocce sedimentarie affioranti in diverse unità strutturali dell'Appennino apportano contributi originali alla comprensione dell'andamento della deformazione e della storia deformativa stessa delle strutture analizzate. Si è infatti osservato che, a parità di litologia, il *fabric* magnetico è funzione esclusivamente dell'orientazione e dell'intensità della deformazione di cui, quindi, costituisce una valutazione affidabile e relativamente rapida da ottenere.

L'analisi dei *fabric* magnetici ottenuti si è inoltre rivelata fondamentale per una efficace determinazione della giacitura degli strati, e quindi dell'assetto strutturale, in litotipi argillosi apparentemente omogenei (ad esempio nel bacino di Sant'Arcangelo; Sagnotti, 1992) e per la ricostruzione dell'andamento e della distribuzione spaziale della deformazione, sia nelle singole strutture che in un più ampio contesto regionale. L'analisi delle lineazioni magnetiche, di cui è stata riconosciuta l'origine tettonica, apporta informazioni sulla direzione di massimo raccorciamento in ciascun sito di campionamento al momento della definizione del *fabric* magnetico. Il complesso dei dati e la loro relazione con gli elementi strutturali e sedimentari suggeriscono che tale momento corrisponde generalmente alla prima fase compressiva che ha determinato l'assetto strutturale principale. Non sono state trovate testimonianze di riorientazioni complete di un *fabric* già definito in seguito a fasi tettoniche successive. Sebbene questo costituisca un limite nella ricostruzione della storia tettonica di un'area, rispetto ad esempio alle metodologie di inversione di dati mesostrutturali di tettonica fragile, allo stesso tempo tuttavia consente di riferire il *fabric* magnetico esclusivamente ad eventi geodinamici importanti, generalmente di primo ordine, quali ad esempio lo sviluppo dei sistemi catenavannofossa.

TESTI CITATI

BORRADAILE, G.J. (1988) - *Magnetic fabrics, petrofabrics and strain*. Tectonophysics, **156**, 1-20.

CAVINATO, G.P., SALVINI, F. & TOZZI, M. (1986) - *Evoluzione tettonica del settore centrale della linea Olevano-Antrodoco: il contributo dell'analisi strutturale*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 325-336.

COSENTINO, D. & PAROTTO, M. (1986) - *Assetto strutturale dei Monti Lucretili settentrionali (Sabina): nuovi dati e schema tettonico preeliminarmente*. Geol. Romana, **25**, 73-90.

FUNICIELLO R., PAROTTO, M. & PRATURLON, A. (1981) - *Carta tettonica d'Italia*. Scala 1:1.500.000, C.N.R., Roma.

GRAHAM, J.W. (1966) - *Significance of magnetic anisotropy in Apalachian sedimentary rocks*. In: STEINHART J.S. & SMITH T.J. (eds), *The Earth beneath the continents*, Geophys. Monogr. No **10**, 627-648.

HIPPOLYTE, J.C., ANGELIER, J., ROURE, F. & MULLER, C. (1991) - *Geometrie et mecanisme de formation d'un bassin "piggyback": le bassin de Sant'Arcangelo (Italie meridionale)*. C.R. Acad. Sci. Paris, **312**, Serie II, 1373-1378.

HROUDA, F. (1982) - *Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics*. Geophys. Surv., **5**, 37-82.

HROUDA, F. (1991) - *Models of magnetic anisotropy variation in sedimentary thrust sheets*. Tectonophysics, **186**, 203-210.

HROUDA, F. & LANZA, R. (1989) - *Magnetic anisotropy in the Biella and Traversella stocks (Periadriatic Line): implications for the emplacement mode*. Phys. Earth Planet. Inter., **56**, 337-348.

JELINEK, V. (1978) - *Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens*. Studia geophys. geod., **21**, 50-62.

KISSEL, C., BARRIER, E., LAJ, C. & LEE, T.Q. (1986) - *Magnetic fabric in "undeformed" marine clays from compressional zones*. Tectonics, **51**, 769-781.

KLIGFIELD, R., OWENS, W.H. & LOWRIE, W. (1981) - *Magnetic susceptibility anisotropy, strain, and progressive deformation in Permian sediments from the Maritime Alps (France)*. Earth Planet. Sci. Lett., **55**, 181-189.

LOWRIE, W. & HIRT, A.M. (1987) - *Anisotropy of magnetic susceptibility in the Scaglia Rossa pelagic limestone*. Earth Planet. Sci. Lett., **81**, 349-356.

MATTEI, M., MONTONE, P. & SALVINI, F. (1986) - *Analisi strutturale dei rilievi del margine appenninico intorno a Tivoli (Roma)*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 579-589.

MATTEI, M., FUNICIELLO R., KISSEL, C. & LAJ, C. - *Rotazioni di blocchi crostali neogenici nell'Appennino centrale: analisi paleomagnetiche e di anisotropia della suscettività magnetica (AMS)*. Questo volume.

OWENS, W.H. (1974) - *Mathematical model studies on factors affecting the magnetic anisotropy of deformed rocks*. Tectonophysics, **21**, 115-131.

SAGNOTTI, L. & SPERANZA, F. (1992) - *Magnetic fabric analysis of the Plio-Pleistocene clayey units of the Sant'Arcangelo basin, southern Italy*. sottomesso a Phys. Earth Planet. Inter.

SAGNOTTI, L. (1992) - *Paleomagnetic evidence for a Pleistocene counterclockwise rotation of the Sant'Arcangelo basin, southern Italy*. Geophys. Res. Lett., **19**, 135-138.

SALVINI, F. & VITTORI, E. (1982) - *Analisi strutturale della linea Olevano-Antrodoco-Posta (Ancona-Anzio Auct.): metodologia di studio delle deformazioni fragili e presentazione del tratto meridionale*. Mem. Soc. Geol. It., **24**, 337-355.

