

Il laboratorio di paleomagnetismo dell'Istituto Nazionale di Geofisica: biennio 1990-1991

Leonardo Sagnotti

Istituto Nazionale di Geofisica, Roma, Italia

1. Introduzione

Il paleomagnetismo è una disciplina che, attraverso lo studio della magnetizzazione naturale rimanente delle rocce, apporta dei contributi originali in numerosi campi di ricerca nell'ambito delle Scienze della Terra; in particolare notevoli sono le applicazioni in studi di geodinamica, di stratigrafia e di geomagnetismo.

L'analisi delle proprietà anisotrope della suscettività magnetica delle rocce permette di risalire alla struttura e distribuzione spaziale (*fabric*) dei minerali magnetici *s.l.* presenti al loro interno e costituisce quindi una efficace sorgente di informazioni per la ricostruzione dei processi geologici che hanno impartito un *fabric* ad una compagine rocciosa.

Le attività dell'Istituto Nazionale di Geofisica nel campo del paleomagnetismo e dell'analisi del *fabric* magnetico delle rocce sono cominciate nel 1990 con l'allestimento e la messa a punto di un laboratorio specializzato, al momento (fine 1991) ospitato nei locali dell'Osservatorio Geofisico «Castello» in L'Aquila, e dell'attrezzatura di campagna per le operazioni di campionamento sul terreno.

Il laboratorio è attualmente funzionante sia per analisi di anisotropia della suscettività magnetica (AMS) in campo debole, sia per misure di magnetizzazione naturale rimanente (NRM) a tappe diverse di smagnetizzazione termica. Entro tempi brevi è previsto l'ampliamento

dell'attrezzatura installata al fine di realizzare un laboratorio di paleomagnetismo tradizionale di alta precisione pienamente efficiente.

2. Strumentazione di campagna

L'attrezzatura di campagna consente il prelievo dal loro ambiente naturale di «carote» rocciose orientate. L'unità di perforazione è costituita da un trapano elettrico, debitamente modificato e alimentato da un gruppo elettrogeno da 1000 W, che monta un «carotiere» in ottone a corona diamantata raffreddato ad acqua. Per litotipi ad elevata durezza al trapano elettrico viene sostituito un perforatore a motore, specificamente realizzato (Pomeroy core rock drill, model D-2801). Tale attrezzatura consente il prelievo di «carote» di roccia di 25 mm di diametro, per una lunghezza massima di circa 12 cm. Le carote vengono opportunamente contrassegnate, prima della definitiva estrazione, secondo la propria orientazione spaziale *in situ*, determinata per mezzo di una bussola montata su un apposito tavolino orientatore. Dalle carote prelevate in campagna vengono successivamente tagliati in laboratorio dei provini cilindrici standard di 25 mm di diametro e 22 mm di altezza, idonei all'inserimento negli strumenti specifici di misura.

3. Strumentazione di laboratorio

La strumentazione al momento presente nel laboratorio di paleomagnetismo in L'Aquila (fig. 1) consente:

- di ottenere, dalle «carote» prelevate in campagna dei «provini» idonei all'uso negli strumenti di misura veri e propri;

- la misura della suscettività magnetica in campo debole dei provini esaminati secondo diverse orientazioni rispetto ad un campo verticale stabile;

- la misura dell'intensità e della direzione della magnetizzazione naturale rimanente dei provini esaminati;

- la smagnetizzazione termica dei provini stessi per tappe crescenti di temperatura in ambiente schermato dal campo magnetico esterno.

Tale attrezzatura comprende:

- una sega da tavolo con disco diamantato per l'ottenimento, dalle carote prelevate in

campagna, dei cilindri standard per gli strumenti di misura. Il taglio può essere effettuato sia a secco sia con acqua, in dipendenza del litotipo;

- un magnetometro JR-4 di tipo *spinner* per la definizione dell'intensità e della direzione della magnetizzazione naturale rimanente (fig. 2a,b). La sensibilità dichiarata dello strumento è di 3 pT (2.4×10^{-6} A/m), una singola misura comporta l'inserimento del provino in 6 posizioni diverse e richiede mediamente circa 5-6 minuti in totale. Lo strumento ha comunque 6 distinti *ranges* di misura con un tempo di integrazione, entro cui ruota effettivamente il provino per ciascuna posizione, variabile da 1 a 100 secondi in dipendenza della sensibilità richiesta, che a sua volta è determinata dall'intensità di magnetizzazione del campione. Il provino ruota ad una velocità di 89.2 giri/secondo entro una coppia di bobine piane, configurate similmente alle bobine di Helmholtz, all'interno di un triplo schermo in permalloy che minimizza l'influenza del campo magnetico esterno;

- un *kappa bridge* KLY-2 per lo studio

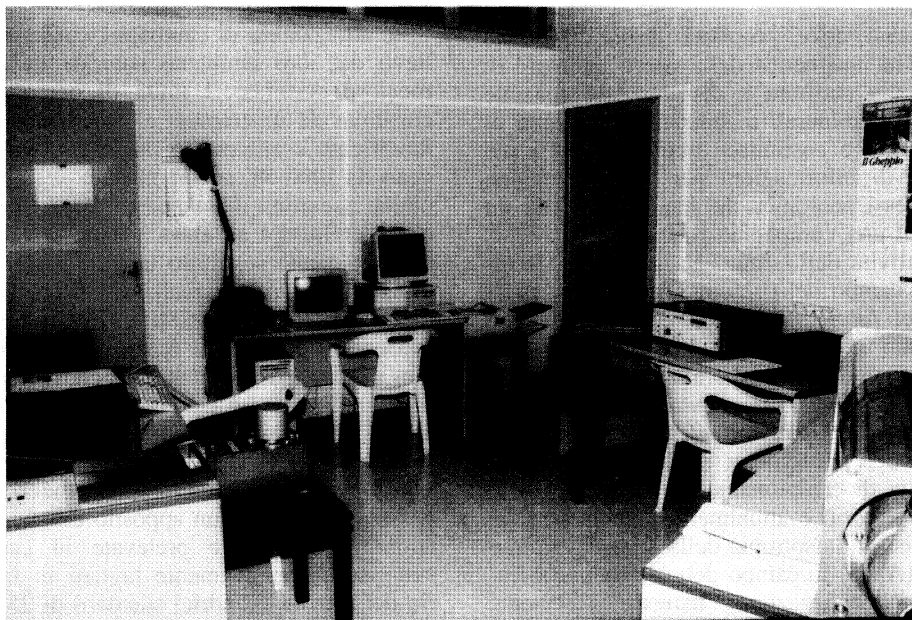


Fig. 1. Il laboratorio di paleomagnetismo a fine 1991. Veduta d'insieme.

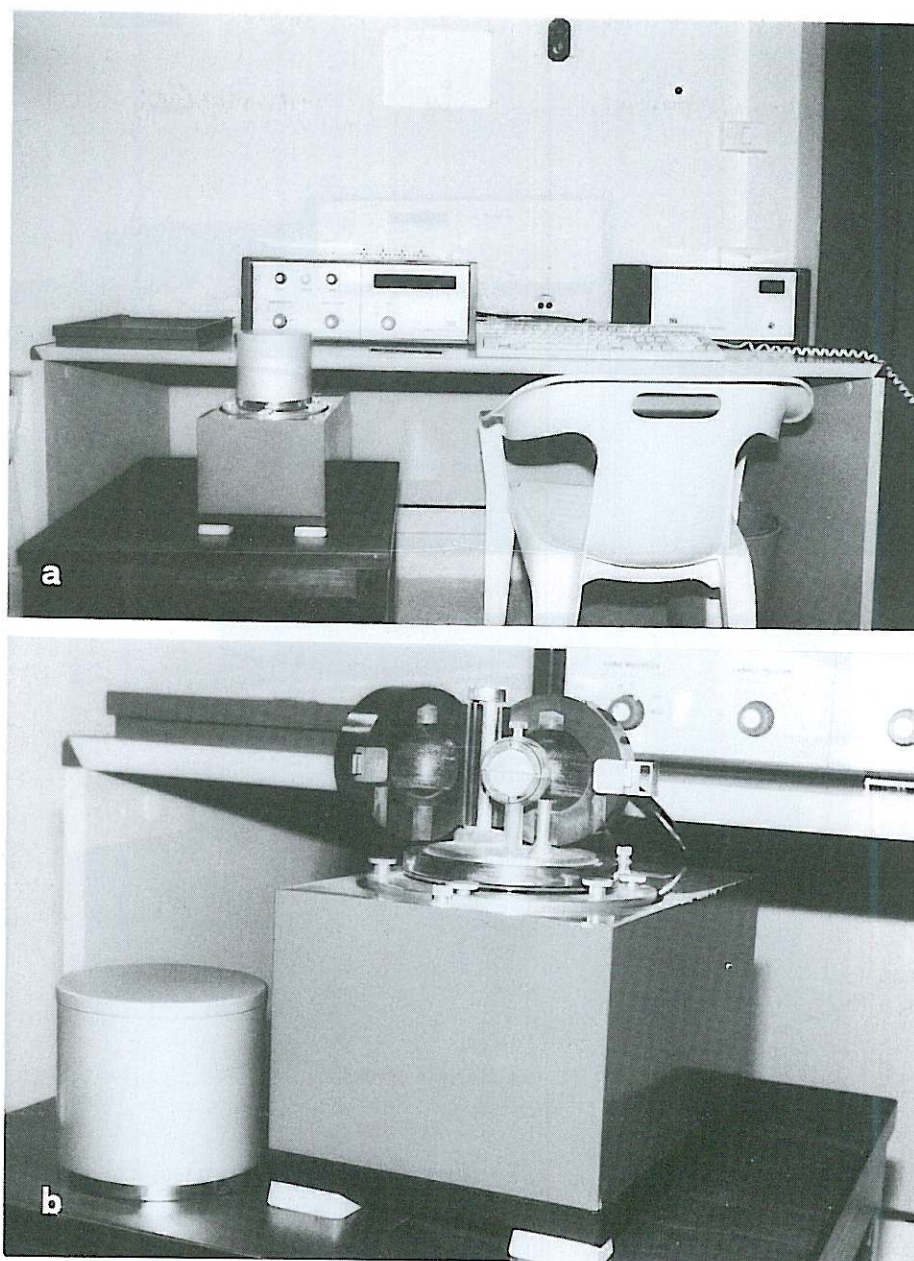


Fig. 2. a) Il magnetometro JR-4. Si distinguono, da destra verso sinistra: l'unità di alimentazione, l'unità di misura e l'unità di rilevazione del segnale («pick-up unit»). b) La pick-up unit del magnetometro JR-4 nella configurazione di inserimento di un campione cilindrico di dimensioni standard. Durante la misura le bobine (aperte nella foto) sono richiuse sul campione che ruota a 89.2 giri/secondo; il tutto è schermato dal campo magnetico esterno per mezzo di un cilindro costituito da tre fogli concentrici di permalloy (alla sinistra dello strumento in foto).

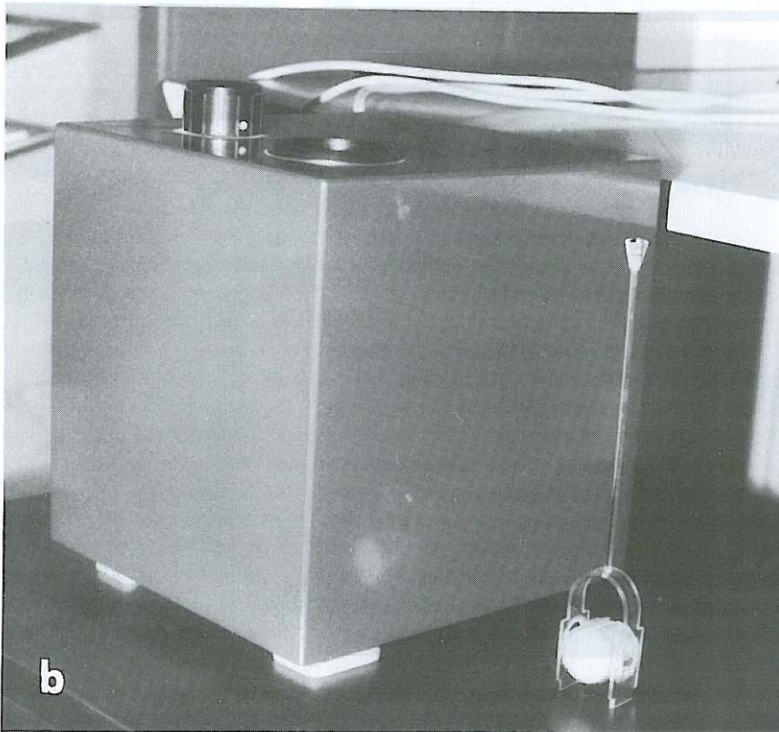
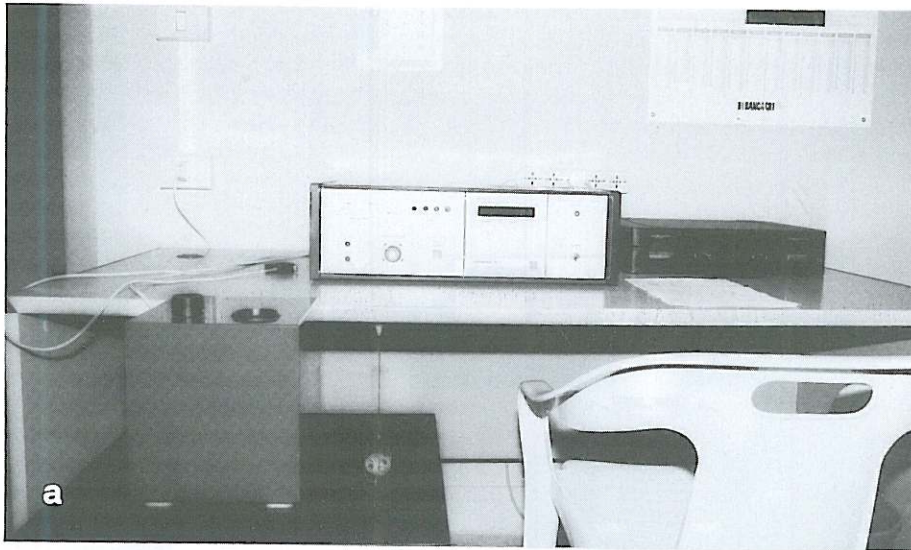


Fig. 3. a) Il Kappa Bridge KLY-2. b) La *pick-up unit* del Kappa Bridge ed il relativo portacampioni (idoneo agli stessi cilindri standard richiesti dal magnetometro JR-4). All'interno della *pick-up unit* il campione viene sottoposto ad un campo magnetico verticale; l'inserimento viene effettuato dal foro superiore.

dell'anisotropia della suscettività magnetica in campo debole (fig. 3a,b). Lo strumento possiede 11 diversi *ranges* di misura ed una sensibilità dichiarata di 4×10^{-8} unità S.I. per i provini normalmente usati. Al campione viene applicato un campo magnetico verticale di 300 A/m (0.377 mT). Una singola misura comporta l'inserimento del campione in 15 posizioni diverse e richiede circa 8 minuti di tempo;

– un forno elettrico tubolare orizzontale, utilizzabile fino a temperature di 700°C, con 3 regolatori elettronici di temperatura e stabilità di 1°C, per la smagnetizzazione termica dei provini sulla base dello spettro delle temperature di blocco dei granuli magnetici contenuti (fig. 4). Al forno è associata una «camera di raffreddamento» entro cui i campioni vengono sottoposti a circolazione continua di aria, immessa dalla stanza del laboratorio ed espulsa al di fuori di esso, fino a quando non raggiungono nuovamente la temperatura ambiente. Tutto l'insieme è contenuto in un sistema di

schermaggio magnetico costituito da tre fogli cilindrici concentrici in Mu-metal (lega metallica ad altissima permeabilità magnetica al 79% in Nichel) che rende minimo il campo magnetico interno ed assicura da eventuali ri-magnetizzazioni indesiderate durante il raffreddamento. Un impianto idraulico a circuito chiuso garantisce una circolazione continua di acqua nello spazio tra il forno e lo schermo magnetico, assicurando quest'ultimo dagli effetti nocivi delle alte temperature.

Un *personal computer* HP Vectra 486 con periferiche, viene impiegato sia per la gestione dei cicli di misura, sia per la memorizzazione e l'elaborazione dei dati ottenuti. Il software messo a punto consente:

– la definizione del tensore dell'anisotropia della suscettività magnetica e dei parametri di forma ed orientazione del relativo ellissoide per ciascun provino; in pratica si tratta del

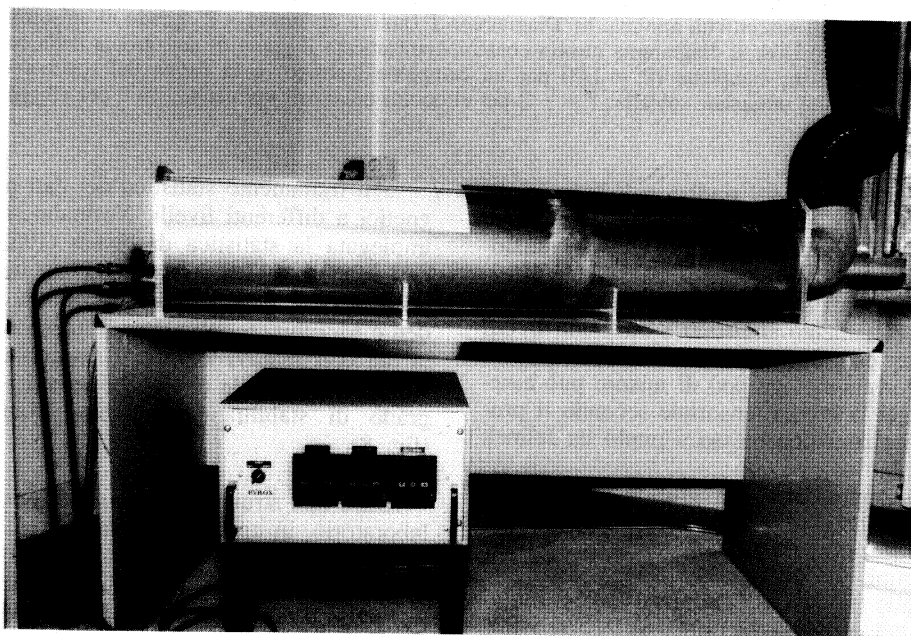


Fig. 4. L'unità di smagnetizzazione termica. Il forno elettrico vero e proprio è contenuto all'interno di un triplo strato cilindrico di Mu-metal che protegge dal campo magnetico esterno anche una «camera di raffreddamento», entro cui il campione torna a temperatura ambiente. Sono visibili le tubazioni relative ai sistemi di raffreddamento ad aria e ad acqua e l'unità di regolazione e controllo della temperatura.

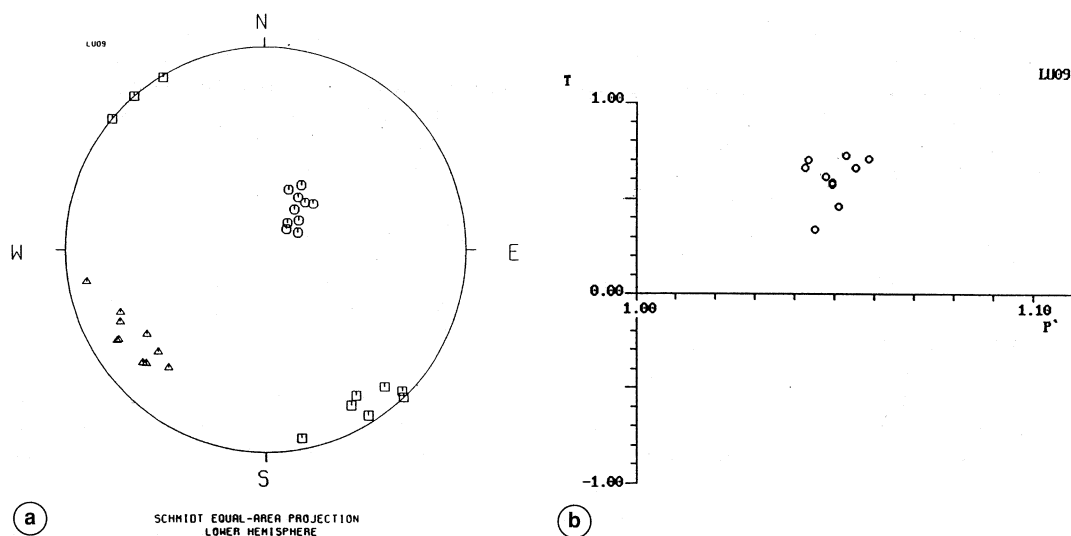


Fig. 5. a) Proiezione equiareale degli assi degli ellissoidi della suscettività magnetica determinati per i campioni prelevati nel sito LU09. È rappresentata l'orientazione spaziale dell'ellissoide relativo a ciascun campione e si deducono inoltre le caratteristiche direzionali tipiche del *fabric* magnetico dell'intero sito di campionamento. Quadrati: k_1 = asse di suscettività massima; triangoli: k_2 = asse di suscettività intermedia; cerchi: k_3 = asse di suscettività minima. b) Diagramma T (fattore di forma) - P' (grado di anisotropia) per i campioni del sito LU09. Il diagramma mostra contemporaneamente il grado di anisotropia della suscettività magnetica di ciascun campione ($P' = 1.00$ per un campione isotropo) e la forma del relativo ellissoide ($T = 1$ per ellissoidi uniassiali «oblati», $T = -1$ per ellissoidi uniassiali «prolati», $T = 0$ per ellissoidi «neutri»).

computo dei parametri tradizionalmente in uso negli studi di anisotropia (si veda Hroudá, 1982) e della determinazione e rappresentazione grafica dell'orientazione spaziale degli ellissoidi ottenuti (fig. 5a,b);

- il trattamento statistico a differenti livelli (provino, campione, sito, area) dei dati di AMS. Per ciascun gruppo di misure può essere valutata la media tensoriale secondo il procedimento statistico messo a punto da Jelinek (1978);

- la rappresentazione grafica delle variazioni di direzione e intensità del vettore di magnetizzazione durante la smagnetizzazione (diagrammi di Zijdeveld, 1967), proiezioni equiareali (fig. 6a,b). Tramite l'analisi multivariata dei componenti principali (Kirschvink, 1980) vengono determinate le linee o i cerchi di *best fit* per tali dati;

- il controllo delle variazioni della suscettività magnetica dei provini durante la smagnetizzazione termica (fig. 7);

- il trattamento statistico dei dati paleomagnetici a differenti livelli. Normalmente viene impiegata la statistica di Fisher (1953) per i dati relativi solo a componenti stabili di magnetizzazione e la tecnica descritta da McFadden e McElhinny (1988) per l'analisi combinata dei dati relativi a provini sia con un'unica componente stabile che con due componenti a grado di stabilità parzialmente sovrapposto (fig. 8).

Oltre alla strumentazione sopra descritta, il laboratorio, in un prossimo futuro, sarà attrezzato anche per affrontare studi di mineralogia magnetica, ossia per determinare quali sono i minerali che portano la NRM e la AMS misurate e comprenderà quindi un elettromagnete ad impulsi, generante un campo magnetico di intensità programmabile, variabile tra 10 e 16 000 Gauss, su un volume pari a quello dei provini standard. Inoltre, entro tempi brevi si

prevede l'installazione di un'unità di smagnetizzazione per campo magnetico alternato che agisca selettivamente sui domini magnetici dei provini in base allo spettro della loro forza coercitiva. Tale tecnica di smagnetizzazione consentirà di eliminare quei problemi che sorgono nel trattamento termico di quei litotipi soggetti a modificazioni dei minerali magnetici originari a temperature inferiori a quelle necessarie per completare la loro smagnetizzazione.

Infine nella sua forma definitiva il laboratorio verrà equipaggiato anche di un magnetometro criogenico, a sensori SQUID, fondato sulle proprietà superconduttrici di alcuni metalli alla temperatura dell'elio liquido, più ra-

pido e sensibile dei magnetometri di tipo *spinner*. Tutta la strumentazione relativa alle misure di NRM e alla smagnetizzazione per tappe sarà contenuta in una camera schermata da campi magnetici esterni, con valori del campo interno dell'ordine di poche (2-3) centinaia di nT.

4. Possibili applicazioni dello studio dell'anisotropia della suscettività magnetica (AMS)

La determinazione delle caratteristiche di anisotropia della suscettività magnetica in campo debole di campioni fornisce informa-

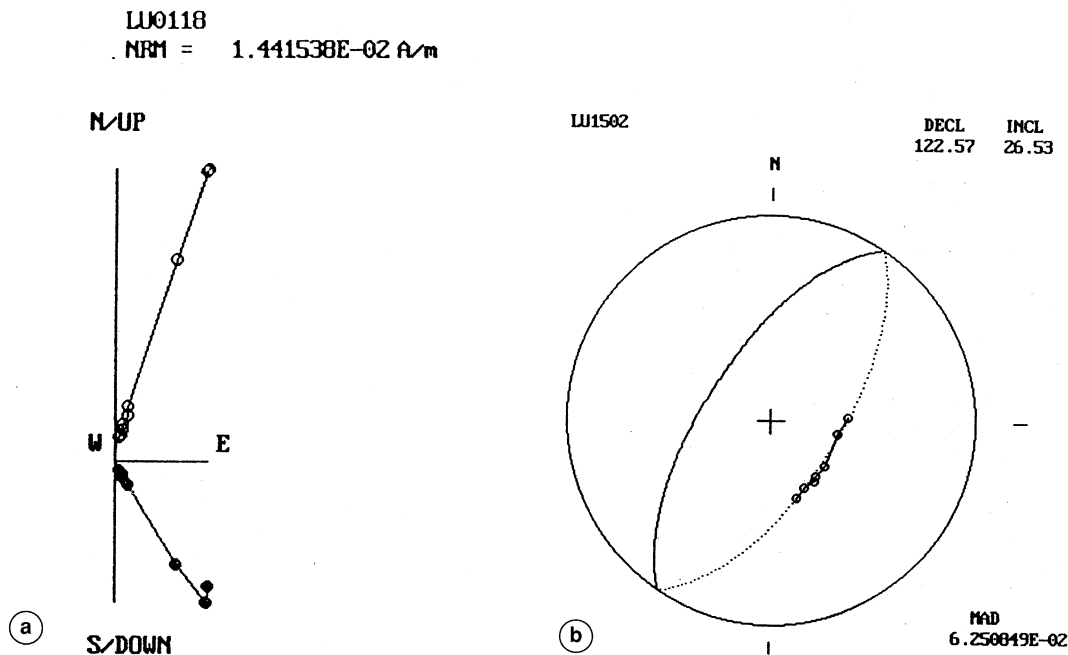


Fig. 6. a) Diagramma di Zijderveld relativo al campione LU0118. Si noti la relativamente elevata intensità iniziale della NRM ed il comportamento estremamente regolare del provino durante le diverse tappe di smagnetizzazione termica, indizio della presenza di un'unica componente di magnetizzazione. Cerchi pieni: proiezione sul piano orizzontale; cerchi vuoti: proiezione nel piano verticale. b) Proiezione equiareale del «percorso di smagnetizzazione» descritto dal campione LU1502. Tale percorso è tipico di quei provini caratterizzati da due componenti di magnetizzazione a grado di stabilità parzialmente sovrapposto ed è ben approssimato da un cerchio massimo passante per il centro della sfera, detto «circolo di rimagnetizzazione». Tratto intero: emisfero inferiore; puntinato e cerchi vuoti: emisfero superiore. In figura sono riportate declinazione ed inclinazione del polo del cerchio massimo di *best-fit* ed il parametro maximum angular deviation (MAD) di Kirschvink (1980) che permette di valutare la bontà del *fit* stesso.

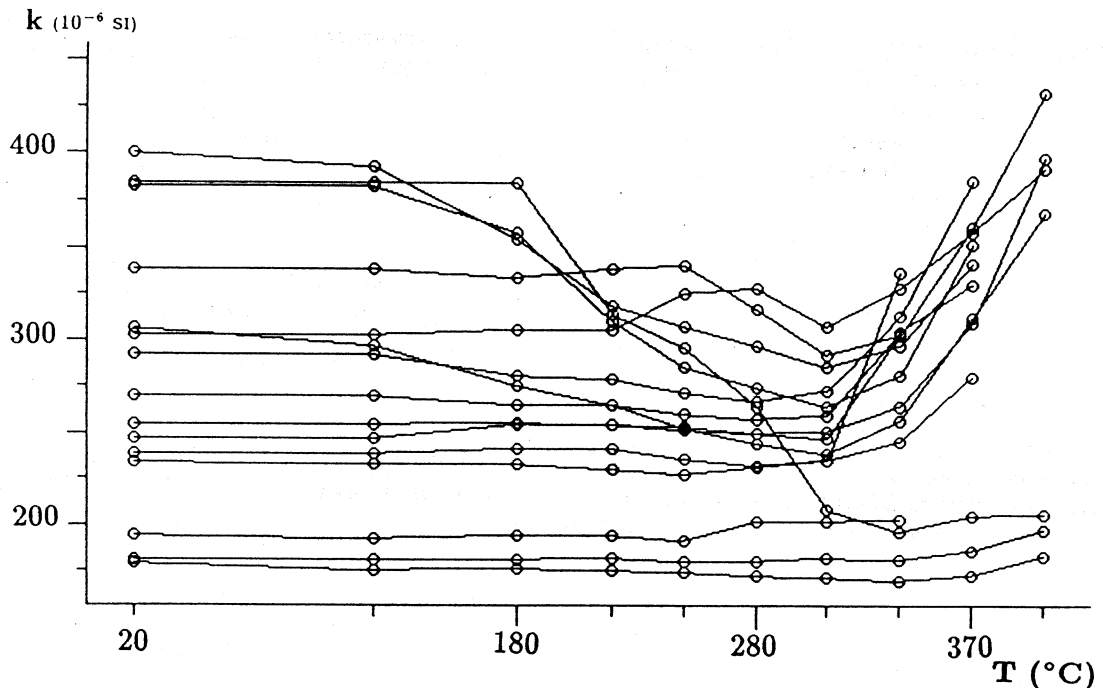


Fig. 7. Il diagramma illustra le variazioni della suscettività magnetica dei campioni durante la smagnetizzazione termica per tappe. Il «salto» a valori di suscettività sensibilmente maggiori di quelli misurati a temperatura ambiente è un importante indizio dell'occorrenza di significative modificazioni nella mineralogia magnetica originaria (creazione di nuove fasi magnetiche).

zioni sulla natura e l'orientazione dei processi geologici che hanno impartito un *fabric* magnetico al corpo roccioso in esame. È importante distinguere tra *fabric* primari, acquisiti cioè al momento della litogenesi, e *fabric* secondari, impartiti alla roccia da deformazioni tettoniche successive. Nel loro insieme le applicazioni dello studio dell'AMS possono essere schematizzate nel modo seguente.

Rocce indeformate

– In sedimenti si ottengono indicazioni sui processi fisici di controllo della deposizione (principalmente determinazione del piano di sedimentazione e della direzione, ed eventualmente verso, di flusso delle correnti idrodinamiche agenti sul sedimento in formazione).

– In vulcaniti si ottengono indicazioni sulla direzione di flusso del materiale eruttato

(con possibilità, ad esempio, di risalire alla posizione dei centri eruttivi).

– In rocce intrusive si ottengono indicazioni sulla direzione di apporto e sulle modalità di messa in posto del magma.

Rocce deformate

Per litotipi deformati, anche solo debolmente, è stata dimostrata un'influenza significativa dello *strain* tettonico sul *fabric* magnetico complessivo. La relazione reciproca dipende sia dalla mineralogia magnetica sia dal meccanismo di deformazione; i risultati di numerosi studi suggeriscono che:

– per stadi di deformazione non particolarmente spinta la direzione dell'asse di suscettività massima (K_{max}) tende ad allontanarsi dalla direzione di massimo raccorciamento e a disporsi lungo la direzione di massima estensio-

ne (in regioni a pieghe tende ad allinearsi con l'asse delle strutture);

– per stadi di deformazione spinta, nel campo del metamorfismo regionale, esiste una stretta corrispondenza tra orientazione e forma dell'ellissoide della suscettività magnetica e i piani e le lineazioni strutturali sviluppati dalle rocce deformate.

5. Possibili applicazioni dello studio della magnetizzazione naturale rimanente (NRM)

I dati relativi alla magnetizzazione naturale rimanente di campioni di roccia ed alle componenti di tale magnetizzazione sono tradizionalmente indicati nel loro complesso come dati paleomagnetici. Tali dati sono impiegati essenzialmente per ottenere la migliore stima del valore medio del campo geomagnetico relativo all'intervallo di tempo in cui le rocce acquisirono tali componenti di magnetizzazione. Le applicazioni spaziano in un vasto panorama di tematiche di ricerca, anche molto diverse tra loro, che comprendono:

– studi geodinamici a scala globale, con determinazione delle diverse posizioni ed orientazioni, nel corso dei tempi geologici, delle diverse placche litosferiche e quindi elaborazione di ricostruzioni paleogeografiche a scala planetaria;

– studi di geodinamica a scala regionale con identificazione e definizione di eventuali rotazioni di blocchi e strutture crostali intorno ad assi verticali;

– studi di stratigrafia magnetica, tradizionalmente efficaci nell'affiancare in modo indipendente altri metodi di datazione di successioni rocciose;

– studi sulla paleovariatione secolare del campo magnetico terrestre, che permettono di estendere notevolmente nel tempo le osservazioni strumentali storiche sulla variabilità del campo stesso;

– studi sulle caratteristiche geometriche e dinamiche del campo magnetico terrestre durante le inversioni di polarità, con possibilità di vincolare i modelli fisici di quei processi

LU13	DECL	INCL	K	α_{95}
	144.4	-56.2	117.27	4.3

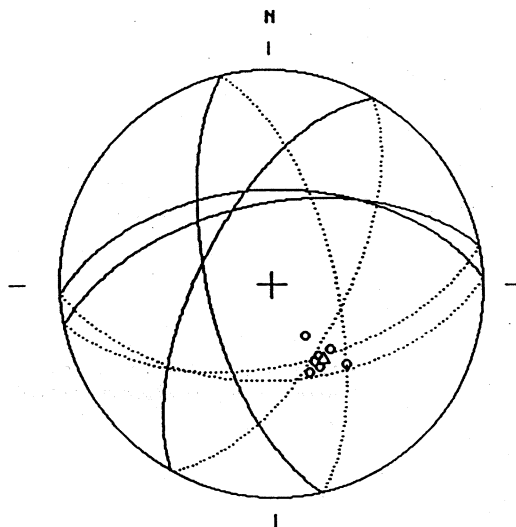


Fig. 8. Proiezione equiareale delle linee e dei piani di *best-fit* per i dati ottenuti dalla smagnetizzazione per tappe dei campioni prelevati nel sito LU13. Simbologia come in fig. 6b. L'analisi combinata dei dati è stata effettuata secondo il metodo descritto da McFadden e McElhinny (1988). In figura è rappresentato il punto medio calcolato (triangolo) e ne sono riportati declinazione, inclinazione e i parametri di dispersione K e α_{95} .

che, nel nucleo, ne sarebbero all'origine e ne regolerebbero le variazioni;

– studi di archeomagnetismo, volti principalmente alla datazione di materiale archeologico.

6. Temi avviati e programmi futuri

La quasi totalità delle possibili applicazioni degli studi di NRM e AMS sopra elencate ricadono nell'interesse diretto dell'Istituto Nazionale di Geofisica. Tra queste comunque si evidenziano quelle applicazioni più direttamente legate alla caratterizzazione della dinamica crostale nella regione italiana. Nella prima fase di attività del laboratorio si è quindi privilegiata l'acquisizione di nuovi dati paleo-

magnetici per la ricostruzione delle rotazioni che hanno accompagnato l'evoluzione geodinamica neogenica dell'Appennino. Dopo un'analisi preliminare delle formazioni argillose plio-pleistoceniche di alcuni bacini intrappenninici in Italia meridionale si è esaminata nel dettaglio la zona del «Bacino di Sant'Arcangelo», in Lucania, ove sono state determinate evidenze di una notevole rotazione antioraria nel corso del Pleistocene (Sagnotti, 1992). Studi analoghi saranno estesi ad altri bacini plio-pleistocenici dell'Italia centro-meridionale; in particolare l'attenzione sarà rivolta all'identificazione delle rotazioni più recenti e alla definizione di quali «blocchi» cristallini esse coinvolgono. Il progressivo incremento dei dati a disposizione su questo tema potrà contribuire a scandire l'evoluzione temporale dei movimenti intorno ad assi verticali che hanno contrassegnato la complessa evoluzione della catena appenninica. Inoltre, anche sulla base degli stimolanti risultati ottenuti nel bacino di Sant'Arcangelo (Sagnotti e Speranza, 1993), si intende incrementare l'uso dei dati di AMS per la determinazione dello stato di *strain* in formazioni plio-pleistoceniche collocate in aree con evidenze di attività tettonica recente.

Contemporaneamente allo sviluppo degli studi sopra delineati si cercherà in futuro di attivare anche linee di ricerca su altre tematiche. L'interesse maggiore è volto alle applicazioni del paleomagnetismo alla definizione delle caratteristiche «temporali» del campo

magnetico terrestre (inversioni, paleovariazioni secolari) e alla datazione di successioni rocceose. In altro campo, riteniamo particolarmente promettente l'applicazione degli studi di AMS alla definizione delle direzioni di flusso e delle modalità di messa in posto delle vulcaniti del margine tirrenico della Penisola.

BIBLIOGRAFIA

- FISHER, R.A. (1953): Dispersion on a sphere, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, **217**, 295-305.
- HROUDA, F. (1982): Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics, *Geophys. Surv.*, **5**, 37-82.
- JELINEK, V. (1978): Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens, *Stud. Geophys. Geod.*, **22**, 50-62.
- KIRSCHVINK, J.L. (1980): The least-square line and plane and the analysis of paleomagnetic data, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **62**, 699-718.
- MCFADDEN, P.L. e M.W. McELHINNY (1988): The combined analysis of remagnetization circles and direct observations in paleomagnetism, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **87**, 161-172.
- SAGNOTTI, L. (1992): Paleomagnetic evidence for a Pleistocene counterclockwise rotation of the Sant'Arcangelo basin, Southern Italy, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 135-138.
- SAGNOTTI, L. e F. SPERANZA (1993): Magnetic fabric analysis of the plio-pleistocene clayey units of the Sant'Arcangelo basin, Southern Italy, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **77**, 165-176.
- ZIJDVELD, J.D. (1967): Demagnetization of rocks: analysis of results, in *Methods in Paleomagnetism*, a cura di D.W. COLLINSON, K.M. CREER and S.K. RUNCORN (Elsevier, Amsterdam).