

F.M. ELTER (*), L. SCHIERA (**), E. SPINELLI (***)

CARATTERI GEOMETRICI DELLE PIEGHE ASSOCIATE ALLA FASE «POST-NAPPE» NELL'UNITÀ DI MONTICIANO - ROCCASTRADA NEL SOTTOSUOLO DELLE AREE GEOTERMICHE DI LARDERELLO E DEL M.TE AMIATA (TOSCANA MERIDIONALE)

Riassunto - Lo scopo di questa nota è di definire la distribuzione della Fase «Post-Nappe», nell'Unità di Monticiano-Roccastrada, nel sottosuolo di Larderello e del Monte Amiata (Fig. 1), nonostante la difficoltà nelle possibili correlazioni fra gli elementi strutturali in affioramento e nei sondaggi profondi. Sono stati impiegati due metodi: il primo utilizza lo studio morfologico delle strutture, mentre il secondo definisce il parametro «t». Sono state scelte le strutture plicative osservate nei litotipi filladici e metarenacei mentre sono state trascurati i litotipi a marcata competenza come le quarziti, le metabasiti e i paragneiss. È stata messa in rilievo la disomogenea distribuzione del parametro «t» in rapporto con la profondità; tale distribuzione ha permesso di individuare la presenza di diverse zone caratterizzate da una marcata deformazione sia all'interno delle formazioni, gruppi o complessi sia lungo le loro zone di contatto; viene proposta, in relazione anche ai dati noti in affioramento, l'ipotesi che tali zone di intensa deformazione siano correlabili a zone di taglio sin Fase «Post-Nappe».

Parole chiave - Fase «Post - Nappe», Pieghie, Zone di Taglio, Unità di Monticiano - Roccastrada, Aree di Larderello e del M.te Amiata.

Abstract - *The geometrical characters of the Post-Nappe folds in the Monticiano-Roccastrada Unit in the subsoil of the Larderello-M.te Amiata areas (Southern Tuscany).* In this paper the aim is to define the distribution of the Post-Nappe Phase in the Monticiano-Roccastrada Unit and in subsoil of the Larderello and Mt. Amiata areas (Fig. 1); the main difficulty lies in the lack of correlation between the outcropping structural elements and those found in boreholes. Two methods have been employed: the first considers the morphology of folds, whereas the second defines the «t». We selected folds only in the phyllites and metasandstones while discarding those in the more competent lithotypes such as quartzites, metabasites and paragneiss.

An heterogeneous distribution of the «t» parameter with depth was recognized; this distribution has enabled the identification of several highly deformed regions both in the formations, groups and complexes and along their respective contacts. In view of the latter and of data from outcrops, we propose that the areas of intense deformation can be correlated to Post-Nappe Phase shear zones.

Key words - Post-Nappe Phase, Folds, Shear Zones, Monticiano-Roccastrada Unit, Larderello - M.te Amiata Areas.



Fig. 1 - Ubicazione delle Aree Geotermiche di Larderello e del M.te Amiata. In nero sono contrassegnati gli affioramenti delle Successioni Paleozoiche.

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena - Via delle Cerchia, 3 - 53100 Siena.

(**) Via Uopini, 2 - 53100 Siena.

(***) Via Maligneto, 5 - 58020 Caldana - Grosseto.

Lavoro stampato con il contributo n° MURST 60%, titolare F. Elter.

LE FASI TETTONICHE NELL'APPENNINO SETTENTRIONALE A SUD DELL'ARNO

Il quadro strutturale dell'area a Sud dell'Arno è caratterizzato da due eventi tettonici di tipo duttile che precedono uno a carattere fragile.

Il primo evento tettonico (Fase «Sin-Nappe», Losi e Sandrelli, 1994; Elter e Sandrelli, 1994, 1995) è caratterizzato da una fase compressiva che genera sovrascorrimenti e rare pieghe con vergenza a Nord-Est. A questa fase è associata l'anisotropia planare principale che nei terreni della Falda Toscana e del Complesso Ligure si esplica come clivaggio di crenulazione (Elter e Sandrelli, 1995) fino ad una scistosità di flusso, mentre nei terreni metamorfici è di carattere più penetrativo e si esplica come scistosità (S_1 , Elter e Pandeli, 1990, 1991, 1993, 1994; Elter *et al.*, 1994; Pandeli *et al.*, 1994). Recenti studi sulla deformazione finita indicherebbero che la Fase «Sin-Nappe» si è esplicata in condizioni di taglio semplice (Elter e Meccheri, 1994).

Il secondo evento tettonico (Fase «Post-Nappe», Losi e Sandrelli, 1994; Elter e Sandrelli, 1994, 1995) è la strutturazione più evidente in tutta l'area: ad essa sono associate numerose strutture plicative alla scala da millimetrica a decametrica. Sono state individuate pieghe che mostrano vergenze sia orientali che occidentali; la loro diffusione oltre ad essere areale è anche verticale, poichè presenti in più livelli strutturali; esse infatti sono state riconosciute in formazioni sia delle unità di copertura (Complesso Ligure e Falda Toscana) che dell'Unità di Monticiano-Roccastrada (Elter e Sandrelli, 1994, 1995). L'evoluzione della Fase «Post-Nappe» si esplica con un processo di inversione tettonica (Elter *et al.*, 1995), rispetto alla Fase «Sin-Nappe», ed in condizioni di taglio semplice (Elter e Meccheri, 1994), sfruttando come superficie iniziale l'anisotropia planare precedente e trasponendola gradualmente, fino alla sua completa obliterazione.

I rapporti assiali fra le strutture plicative della Fase Sin-Nappe e le strutture plicative della Fase Post-Nappe osservati nell'Unità di Monticiano-Roccastrada affiorante, indicano rapporti di coassialità, tipo III (Vialon *et al.*, 1976), con assi a direzione appenninica (N 120° - N 140°).

INQUADRAMENTO METAMORFICO STRUTTURALE

Nell'Unità di Monticiano-Roccastrada è stata riconosciuta una distribuzione diversificata dei vari Eventi Metamorfico-Strutturali Alpini (Elter e Pandeli, 1991; Elter e Sandrelli, 1994), caratterizzata dalla presenza di due Domini Strutturali, DI e DII (Elter e Pandeli, 1991).

Nel Dominio I, sono riconoscibili due eventi deformativi: al primo (Fase «Sin-Nappe») evento è associata una scistosità penetrativa (S_1), mentre al successivo (Fase «Post-Nappe») un clivaggio (C_2) di crenulazione con variazione da «gradational boundairies» a «zonal discrete boundairies» (Borradaile *et al.*, 1985). Nel Dominio II la Fase «Post-Nappe» si trasforma da una crenulazione ad una scistosità penetrativa (S_2), di tipo continuo e spesso associata a piani S-C (Lister e

Snoke, 1984). Si evidenzia anche la presenza di una fase successiva e localizzata, che si esplica attraverso un clivaggio di crenulazione discontinuo.

Nel Dominio II, la Fase «Post-Nappe» può essere associata a strutture plicative non cilindriche con dispersione monoclinale dell'asse sul proprio piano (Turner e Weiss, 1963), con «Hinge line angle» (Skjernaa, 1989) compreso fra 40° e 90° (Elter, 1993), e riferibili a strutture di tipo «Sheath Folds» (Minning, 1979; Skjernaa, 1989).

L'area di Larderello farebbe parte del settore occidentale della Paleoaforme Appenninica, con strutture plicative «Post-Nappe» a vergenza occidentale (Iano, Rosia, Boccheggiano), mentre l'area del M.te Amiata farebbe parte del settore orientale della Paleoaforme Appenninica, con strutture plicative Post-Nappe a vergenze orientali (Elter e Sandrelli, 1995).

Le condizioni metamorfiche della Fase sia «Sin» che «Post-Nappe» sono ascrivibili alla facies degli scisti verdi (Franceschelli, 1980; Elter e Pandeli, 1990, 1991, 1994; Elter, 1993): la distribuzione in campo tridimensionale (intesa sia alla scala dell'affioramento che secondo i sondaggi) del metamorfismo è la medesima, man mano che si sposta verso le unità più profonde.

ANALISI GEOMETRICA DELLA DEFORMAZIONE DUTTILE

Dall'esame delle caratteristiche geometriche e morfologiche di una struttura e dalle caratteristiche meccaniche e litologiche delle rocce coinvolte nella deformazione, in relazione alle caratteristiche di pressione e temperatura, si possono trarre una serie di informazioni che portano a definire lo stile della deformazione.

Lo stile della deformazione di una piega è la combinazione di caratteristiche geometriche e morfologiche, tramite le quali possiamo distinguere un tipo di piega da un'altra.

Un elemento dello stile di una piega è la misura quantitativa o la descrizione qualitativa delle caratteristiche geometrico-morfologiche; un insieme di elementi dello stile di una piega permette la determinazione oggettiva di specifiche caratteristiche di differenti tipi di strutture plicative osservate in natura e quindi i corrispondenti stili di piegamento. In definitiva, un volta ricostruite le caratteristiche dello stile della deformazione possiamo correlare lo stile del piegamento con il meccanismo della formazione delle strutture.

Le strutture plicative associate alla Fase «Post-Nappe», nel sottosuolo sia di Larderello che del M.te Amiata, hanno dimensioni che variano da millimetriche a centimetriche, sempre con la scistosità S_2 di piano assiale ben visibile, sia macroscopicamente che microscopicamente.

Nel Dominio I, l'ampia variabilità morfologica di tali strutture, risulta anche dall'osservazione di pieghe del tipo «Kink folds», «Rounded folds», «Box folds» e «Polygonal folds» (Hobbs, *et al.* 1976).

Nel Dominio II abbiamo una variabilità meno marcata, caratterizzata da «Angular folds», «Similar folds», (Hobbs, *et al.*, 1976), e da «Pli composite de style semblable» (Nicolas, 1989), associate a «Poly defor-

med Buckled Quartz veins» (Borradaile *et al.*, 1985). Nel Dominio I, i piani assiali delle strutture plicative, sono variamente inclinati od orizzontali, mentre nel Dominio II, sono poco inclinati od orizzontali. Nulla si può dire invece, sull'andamento degli assi delle pieghe osservate e misurate sulle carote dei pozzi profondi, in quanto queste non sono orientate.

METODOLOGIE UTILIZZATE

Sono stati utilizzati i metodi di Twiss (1988) e di Hudleston (1973). Il primo si basa sull'utilizzo di tre parametri; dato il profilo di una piega tagliata ortogonalmente all'asse e individuata la superficie limite «s», si definiscono:

- M - distanza tra i due punti di inflessione «a» e «b»,
- A - distanza tra il punto di massima curvatura e il segmento M,
- t - rapporto tra A ed M/2;

per cui ne risulta che tanto più A sarà maggiore, più la piega tenderà all'isoclinale.

Il secondo metodo utilizza la ricostruzione di trenta morfologie di strutture plicative, ricostruite matematicamente attraverso i parametri «Shape» ed «Amplitude number».

ANALISI DEI DATI

Nella fig. 2 sono sintetizzati tutti i valori di « t_{med} » (Twiss, 1988) misurati nell'Area di Larderello e del M.te Amiata. I valori sono suddivisi per varie formazioni, gruppi o complessi dell'Unità di Monticiano-Roccastrada, e sono riportati alla quota riferita al livello del mare.

Dalla fig. 2 si osserva che i valori di «t» variano:

- nel Gruppo del Verrucano (G.V.) da 1.53 a 2.08 nell'area di Larderello,
- nel Gruppo del Verrucano (G.V.) da 1.16 a 2.68 nell'area del M.te Amiata;
- nelle Filladi e Quarziti del Torrente Mersino (F.Q.T.M.) da 0.15 a 2.90 nell'area di Larderello;
- nel Formazione A (Form. A) da 0.95 a 2.50 nell'area del M.te Amiata;
- nel Complesso Filladico Quarzítico (C.F.Q.) da 0.55 a 2.01 nell'area di Larderello;
- nel Complesso dei Micascisti (C.M.) da 0.80 a 5.9 nell'area di Larderello.

Dalla Fig. 2 si può osservare che i valori di « t_{med} » risultano maggiori nel G.V. e nel C.M., con valore più elevato nel C.M. per la zona di Larderello, e con valore più elevato nella Formazione A del M.te Amiata.

I valori di « t_{med} » inoltre presentano una distribuzione diversificata all'interno dei vari gruppi, formazioni o complessi. Questo è osservabile in fig. 2 e in fig. 3. Dalla fig. 2 si possono trarre alcune considerazioni: nell'area geotermica di Larderello, esistono profondità con valori di « t_{med} » fra loro confrontabili, indipendentemente dalle formazioni, gruppi o complessi considerati. A quota -2000, ad esempio, i valori di « t_{med} » in F.Q.T.M. ed in C.M. (0.95 e 0.96) sono fra loro confrontabili; così a quota -750, per i valori in G.V. e

F.Q.T.M. (1.53 e 1.63). Si possono osservare inoltre valori analoghi di « t_{med} » anche fra le due aree geotermiche: a quota, ad esempio, -1100 in C.F.Q. dell'area di Larderello abbiamo un valore di 1.16, valore analogo nel G.V. del M.te Amiata, alla stessa quota. Quanto osservato in fig. 2 viene ulteriormente messo in risalto dalla fig. 3 (distribuzione del parametro « t_{med} » in relazione alla profondità).

Si osservi come in tutte le formazioni, gruppi o complessi, abbiamo un andamento differenziato, caratterizzato da massimi e minimi. Ricordando che valori di «A» più elevati corrispondono a morfologie plicative isoclinali e esistono zone di deformazione più penetrativa, alla stessa quota, zone di massima deformazione e zone di minima deformazione, indipendentemente dalle formazioni, gruppi o complessi interessati. Si rilevano infatti:

- massimi di deformazione presenti a -1300/1600 m, e a -1800/2100 m, sia nell'area di Larderello sia nell'area del M.te Amiata;
- minimi di deformazione presenti a -1000/1100 m, a -1600/1700 m, e a -2200/2500 m, sia nell'area di Larderello sia nell'area del M.te Amiata.

Per quanto riguarda il metodo di Hudleston (1973), le strutture plicative della Fase Post-Nappe presentano i seguenti caratteri (Fig. 4):

- F.Q.T.M.: morfologia più comune B5/D4/D2
- C.F.Q.: morfologia più comune E5/B5/E3
- C.M.: morfologia più comune E5/C5/D4

In generale si tratta di pieghe con «Shape» ed «Amplitude number» sviluppate e tendenti all'isoclinale (classi 5), e con le cerniere sub-arrotondate (classi B, C, D ed E). Dalla Fig. 4 si osserva una certa omogeneità nella distribuzione di alcune classi morfologiche (B5, D3, D4 e E5) all'interno delle formazioni, gruppi o complessi dell'area geotermica di Larderello.

Per la classificazione delle strutture plicative del M.te Amiata, si rimanda al lavoro di Elter e Pandeli, 1991.

CONCLUSIONI

La distribuzione verticale dei valori di « t_{med} » individua zone con intensità di deformazione e distorsione variabile. Le pieghe con « t_{med} » elevato individuano strutture plicative con A>>M (strutture tendenti alla morfologia isoclinale); esse caratterizzano fasce di massima deformazione della Fase «Post Nappe», fasce localizzate al passaggio e/o all'interno delle varie formazioni, gruppi o complessi. In relazione a quanto osservato in superficie (Elter, 1993), per cui le pieghe della Fase «Post-Nappe» presentano assi con distribuzione monoclinale, piani S-C, strutture non cilindriche («Sheath e Shear folds») e assi coassiali alla Fase «Sin-Nappe», ed infine, caratteri di inversione tettonica (Elter *et al.*, 1994), possiamo ragionevolmente ipotizzare che, la distribuzione disomogenea dei valori di « t_{med} » più elevati coincida con zone di maggiore deformazione e distorsione (Vialon *et al.*, 1976; Simpson, 1986) riferibili a zone di taglio sin Fase «Post-Nappe». Tali zone di taglio si svilupperebbero sia all'interno delle formazioni, gruppi o complessi

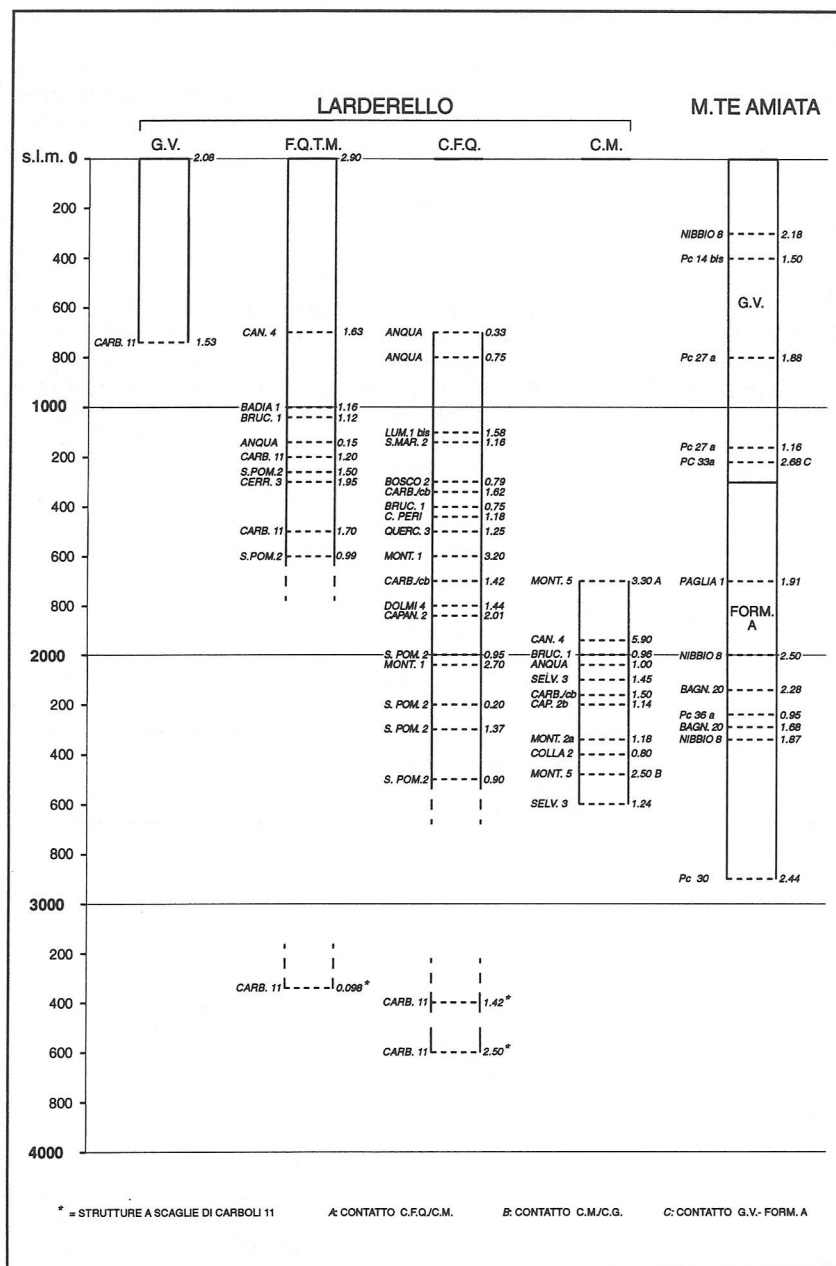


Fig. 2 - Distribuzione del parametro " t_{med} " nelle Aree Geotermiche di Larderello e del M.te Amiata. G.V.: Gruppo del Verrucano; F.Q.T.M.: Formazione delle Filladi e Quarziti del Torrente Mersino; C.F.Q.: Complesso Filladico Quarzítico; C.M.: Complesso dei Micascisti; Form. A: Formazione A. - BAGN. 20: Bagnore 20; BRUC. 1: Bruciano 1; C. PERI: Campo ai Peri; CAN. 4: Canneto 4; CAPAN. 2: Capannoli 2; CAP. 2B: Capannoli 2b; CARB./cb: Carboli C/bis; CARB. 11: Carboli 11; CERR. 3: Cerreta 3; LUM. 1 bis: Lumiera 1 bis; MONT. 1: Monteverdi 1; MONT. 2a: Monteverdi 2a; MONT. 5: Monteverdi 5; QUERC. 3: Quercenne 3; SELV. 3: Selvaccia 3; S. MAR. 2: San Martino 2; S. POM. 2: San Pompeo 2.

che lungo i contatti fra essi: nel primo caso avremo zone di taglio secondarie mentre nel secondo caso zone di taglio primarie.

I valori di " t_{med} " più elevati si osservano nel Complesso dei Micascisti (C.M.), indicando quindi una deformazione più marcata per questo complesso: considerando che esso presenta associazioni mineralogiche di AT e BP simili a quelle del Complesso degli Gneiss (Bertini *et al.*, 1994), e inoltre che le strutture milonitiche, come piani S-C e nastri di quarzo (Boullier e Bouchez, 1978), sono maggiormente sviluppate in questo litotipo (Elter e Pandeli, 1990), si può ipotizzare che parte del C.M. costituisca un oriz-

zonte milonitico di età Alpina, rappresentante il collegamento fra l'Unità di Monticiano-Roccastrada e il Complesso degli Gneiss.

Per l'area geotermica del M.te Amiata si osserva una distribuzione disomogenea del parametro " t_{med} ", che pur essendo confrontabile come valore medio, risulta essere maggiore sia al contatto fra il Gruppo del Verrucano e la Formazione A che all'interno delle formazioni, gruppi o complessi stessi. Vengono così rimarcati quei caratteri descritti per l'area geotermica di Larderello. Esiste inoltre una chiara correlazione fra i valori di " t_{med} " del Gruppo del Verrucano dell'area geotermica di Larderello e dell'area geotermica del

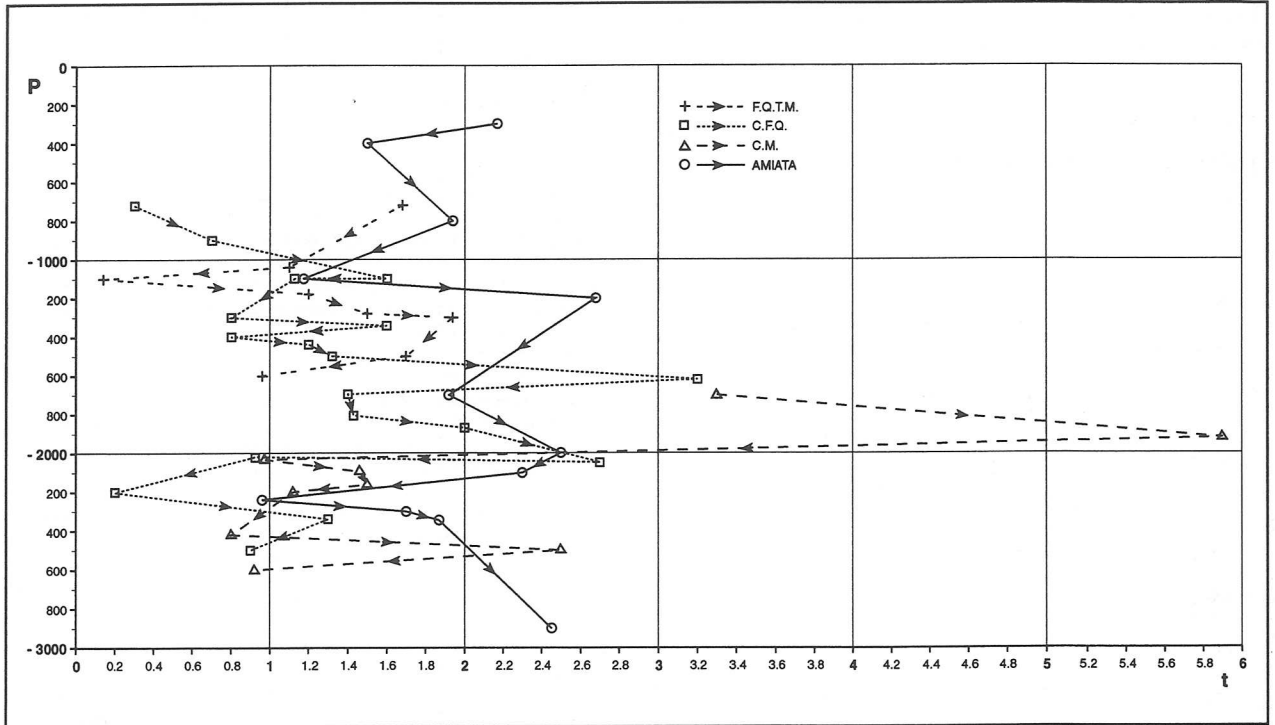


Fig. 3 - Distribuzione del parametro " t_{med} " Twiss (1988) in funzione della profondità, nei vari gruppi, formazioni o complessi.

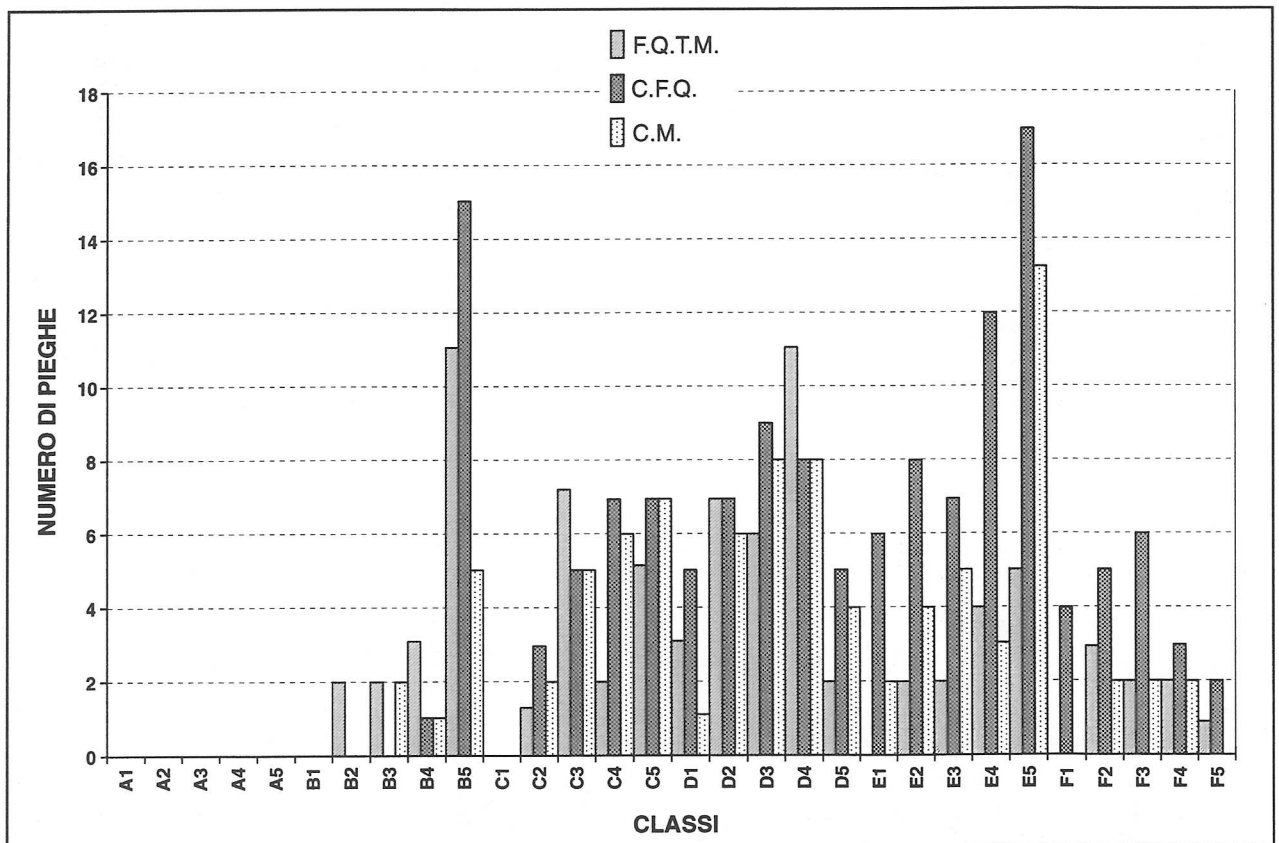


Fig. 4 - Distribuzione delle classi morfologiche di Hudleston (1973) nell'Area Geotectonica di Larderello.

M.te Amiata, che permette di indicare, per almeno questo gruppo l'uniformità della Fase «Post-Nappe».

RINGRAZIAMENTI

Il più vivo ringraziamento al Prof. P.C. Pertusati per la lettura critica del manoscritto.

BIBLIOGRAFIA

- Bertini, G., Elter, F.M. e Talarico, F., 1994. Evidenze di una fase estensionale pre-Triassica nel Complesso degli Gneiss nell'area Geotermica di Larderello (Toscana Meridionale). *Stud. geol. Camerti*, 1994/1: 129-137.
- Bertini, G., Cameli, G.M., Costantini, A., Decandia, F.A., Di Filippo, M., Dini, I., Elter, F.M., Lazzarotto, A., Liotta, D., Pandeli, E., Sandrelli, F. e Toro B., 1991. Struttura geologica fra i Monti di Campiglia e Rapolano Terme (Toscana Meridionale) stato attuale delle conoscenze e problematiche. *Stud. geol. Camerti*, 1991: 155-179.
- Borradaile, G.J., Bayly, M.B. e Mc Powell, C., 1985. *Atlas of Deformational and Metamorphic Rock Fabric* Springer-Verlag Editor, 310 pp.
- Boullier, A.M. e Bouchez, J.L., 1978. Le quartz en rubans dans les mylonites. *Bull. Soc. Geol. France*, 7: 253-262
- Elter, F.M., 1993. Segnalazione di pieghe tipo «Sheath» nella Formazione delle Filladi e Quarziti del Torrente Mersino (Colline Metallifere). *Boll. Soc. geol. ital.*, 112: 557-561.
- Elter, F.M. e Meccheri, M., 1994. Deformazione finita nella fase D1 dell'Orogenesi Alpina in Toscana Meridionale: contributo dall'analisi delle *reduction spot* nell'Unità di Monticiano-Roccastrada. *Boll. Soc. geol. ital.*, 113: 445-450.
- Elter, F.M. e Pandeli, E., 1990. Alpine and Hercynian orogenic phases in the basement rocks of the Northern Apennines (Larderello Geothermal Field, Southern Tuscany, Italy). *Ecol. geol. Helv.*, 83: 241-264.
- Elter, F.M. e Pandeli, E., 1991. Structural features of the metamorphic paleozoic-triassic sequences in deep geothermal drillings of the M.te Amiata (SE Tuscany, Italy). *Boll. Soc. geol. ital.*, 110: 511-522.
- Elter, F.M. e Pandeli, E., 1993. Alpine tectono-metamorphic framework of the Tuscan paleozoic (Southern Tuscany, Italy). *Ann. Tectonicae*, 7, 1: 71-84.
- Elter, F.M. e Pandeli, E., 1994. Caratteri petrografici e strutturali del basamento metamorfico nel sottosuolo dell'Area Geotermica di Travale - Radicondoli (Toscana Meridionale, Italia). *Stud. geol. Camerti*, 1994/1: 103-112.
- Elter, F.M. e Sandrelli, F., 1994. La Fase Post-Nappe nella Toscana Meridionale: nuova interpretazione dell'Appennino Settentrionale. *Atti ticin. sci. Terra*, 37: 173-193.
- Elter, F.M. e Sandrelli, F., 1995. Inquadramento strutturale dei Monti del Chianti. *Boll. Soc. geol. ital.*, 114: 537-547.
- Elter, F.M., Pascucci, V. e Sandrelli, F., 1993. Geologia a sud di Massa Marittima (Gr): studi preliminari. *Stud. geol. Camerti*, 1994/1: 57-64.
- Franceschelli, M., 1980. Lineamenti geologico-petrografici delle Formazioni metamorfiche paleozoiche affioranti nell'area di Boccheggiano (Toscana Meridionale). *Atti Soc. tosc. Sci. nat., Mem., Ser. A*, 87: 65-92.
- Hobbs, B.E., Means, W.D. e Williams, P.F., 1976. *An outline of Structural Geology*. Wiley et Sons Editors, 320 pp.
- Hudleston, P.J., 1973. Fold morphology and some geometrical implication of fold development. *Tectonophysics*, 16: 1-46.
- Lister, G.S. e Snoke, A.W., 1984. S-C mylonites. *J. struct. Geol.*, 3: 617-638.
- Losi, D. e Sandrelli, F., 1994. Carta Geologica dell'area S. Gusemè-Gaiole in Chianti (prov. di Siena). Scala 1/25000, Dip. Sc. Terra di Siena, Computer-Grafica B. Graziosi Siena.
- Minning, L.D., 1979. Structural analysis of sheath folds in a meta chert from Western Italian Alps. *J. struct. Geol.*, 1: 275-282.
- Nicolas, A., 1989. *Principes de tectoniques*. Masson Editors, 223 pp.
- Roberts, J.L., 1982. *Introduction to geological maps and structures*. Pergamon Press LTD.
- Pandeli, E., Gianelli, G., Puxeddu, M. e Elter, F.M., 1994. The Paleozoic basement of the Northern Apennines: stratigraphy, tectono-metamorphic evolution and Alpine Hydrothermal process. *Mem. Soc. geol. ital.*, 48: 627-654.
- Simpson, C., 1986. Determination of Movement Sense in Mylonites. *J. Geol. Educ.*, 34: 246-260.
- Skjerna, L., 1989. Tabular folds and sheath folds - definitions and conceptual models for their development, with the examples from Grapesvare area, Northern Sweden. *J. struct. Geol.*, 11: 689-703.
- Turner, J.F. e Weiss, L.C., 1963. *Structural analysis of metamorphic tectonites*. McGraw Hill Book, 420 pp.
- Twiss, R.J., 1988. Description and classification of folds in single surfaces. *J. struct. Geol.*, 10: 617-623.
- Vialon, P., Ruhland, M. e Grolier, J., 1976. *Elements de tectonique analytique*. Masson Editeur, 115 pp.

(ms. pres. il 30 gennaio 1996; ult. bozze il 20 giugno 1996)