

**STRESS MECCANICO E CRISTALLINITA' DEI MINERALI ARGILLOSI:
ESEMPI IN ROCCE NATURALMENTE DEFORMATE DELL'APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO(**)**

INDICE

RIASSUNTO	pag. 399
ABSTRACT	" 399
INTRODUZIONE	" 399
INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE	" 400
ANALISI MINERALOGICO-PETROGRAFICA	" 400
DISCUSSIONE DEI RISULTATI	" 402
INDAGINE MESO E MICROSTRUTTURALE	" 403
CONCLUSIONI	" 404
BIBLIOGRAFIA	" 405

RIASSUNTO

L'Appennino umbro-marchigiano è un esempio di catena costruita principalmente per deformazione di una copertura sedimentaria a forte contrasto di competenza. L'elemento strutturale principale è dato dai sovrascorrimenti i quali utilizzano, come orizzonti di scollamento, litologie ad elevato contenuto in minerali argillosi e che pertanto costituiscono livelli incompetenti all'interno della successione stratigrafica umbro-marchigiana. Le modificazioni macro e microscopiche cui sono sottoposte le rocce durante la messa in posto dei sovrascorrimenti sono state analizzate mettendo a confronto i risultati ottenuti con una metodologia basata sulla cristallinità dell'illite e della smectite e sul rapporto di intensità 002/001 (= Al/Mg + Fe) nelle illiti stesse, con quelli dell'analisi microstrutturale classica.

Le osservazioni sono state effettuate su campioni provenienti da un tratto di uno dei maggiori sovrascorrimenti dell'Appennino umbro-marchigiano (sovrascorrimento di Monte Cavallo-Monte Primo; CALAMITA & PIERANTONI, 1993) e confrontati con quelli provenienti da zone "indisturbate". Per i materiali "tettonizzati", l'apparente maggiore contenuto in ioni Fe + Mg rispetto ai "non disturbati" è determinato dalla presenza di smectite (o strati misti) disidratata e quindi collassata in conseguenza delle sollecitazioni meccaniche che hanno provveduto ad espellere molecole di acqua comprese nella struttura della smectite.

Inoltre, sulla base dei meccanismi deformativi osservati, tra cui indizi di deformazione plastica nei microfossili, localizzato *grain boundary migration* e geminazione della calcite, è ragionevole supporre che, all'interno della zona di taglio, si siano raggiunte temperature di 200°-250°.

ABSTRACT

In this work, data obtained along the shear zones by meso and microscopic structural analysis and studies on clay minerals (illite and smectite crystallinity) are compared.

The purpose of this work is: i) to characterize the mineralogy of different lithologies involved in the M. Cavallo-M. Primo thrust zone (sample area) and to compare this zone

(*)Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Camerino.

(**)Il lavoro è stato realizzato con il contributo di Fondi MURST 40%, responsabile prof. G. DEIANA. La dott.ssa C. INVERNIZZI ha usufruito di una Borsa di studio post-dottorato dell'Università di Camerino.

with an undeformed one; ii) to propose a method to evaluate mineralogical modifications based on the illite and smectite crystallinity index and on the illite intensity ratio 002/001 (= Al/Mg + Fe); iii) to compare results from mineralogical and microstructural analysis.

The Umbria-Marche Apennines are an example of a thrust-faulted chain affecting the sedimentary cover which has an high competence contrast.

In this area thrusts are the main structural features. They resulted in major shortening along detachments located in the marly levels of the sedimentary sequence, such as the Scaglia cinerea formation. This behaves like an incompetent level because of its high clay minerals content.

During thrusting, various deformation mechanisms occurred: they modified the macroscopic and microscopic structures of the rock. The mesoscopic aspect of the shear zones is mainly brittle and it can be described as S-C tectonites (LISTER & SNOKE, 1984).

Pressure solution is the most important mechanism of deformation and it produces large amounts of insoluble clay minerals concentrated along the solution cleavage surfaces. Progressive deformation is testified by the rotation of the cleavage planes until they became shear veins.

From accurate microscopic analysis (INVERNIZZI, 1994 and this volume), other deformation mechanisms have been recognized: cataclasis, probable grain boundary sliding (GBS), plastic deformation in fossils (evaluated with the Rf/phi technique), localized grain boundary migration (GBM), twinning in calcite crystals.

From the observed deformation mechanisms, temperature of about 200-250°C have been inferred inside the shear zone during the thrusts emplacement.

An accurate knowledge of mineralogical and petrographical characteristics of these rocks is necessary to evaluate their modifications during geological events. In this context, the determination of illite crystallinity gives information about diagenetic processes and anchizone metamorphism: in fact, variations in pressure and temperature, related to local tectonics, affect significantly the crystallinity index.

From this analysis we found an increase of Fe + Mg content in the tectonite, with respect to the undeformed rock. This is possibly due to the dehydration process of smectite and mixed layers minerals due to mechanical stress.

PAROLE CHIAVE: Meccanismi deformativi, Indici di cristallinità, Catena umbro-marchigiana.

KEY WORDS: Tectonic deformation, Crystallinity index, Umbro-Marchean Ridge.

INTRODUZIONE

Le rocce sottoposte a sollecitazione meccanica sono soggette a deformazioni che influenzano le strutture o l'orientazione spaziale dei minerali che le compongono. Questo processo può avvenire naturalmente, p. es. in zone sottoposte a processi di taglio, oppure può essere riprodotto in laboratorio.

Durante la messa in posto di un sovrascorrimento operano diversi meccanismi deformativi, che modificano la roccia sia macro che microscopicamente. Tra tali meccanismi, che variano in base alle condizioni di pressione e temperatura, al tasso di deformazione ed alla composizione mineralogica delle rocce stesse, particolare importanza riveste la dissoluzione per pressione che è all'origine del residuo insolubile di natura argillosa concentrato lungo le superfici di clivaggio stilolitico.

Lo studio delle rocce sedimentarie ad elevato contenuto pelitico e delle modificazioni che esse hanno subito durante gli eventi geologici non può prescindere, pertanto, da una approfondita conoscenza delle loro caratteristiche mineralogiche e petrografiche.

Particolare interesse riveste, in questo contesto, la determinazione della cristallinità dell'illite e della smectite che possono fornire informazioni sui processi diagenetici e metamorfici di anchizona, in considerazione del fatto che variazioni di temperatura e pressione, legate alla tettonica locale, possono incidere notevolmente sull'indice di cristallinità stesso (DUNOYER DE SE-GONZAC, 1970; KUBLER, 1974; FARABOLLINI, 1986-87; BONAZZI & COSTA, 1989 e relative bibliografie).

Le indagini svolte sono state finalizzate al confronto tra gli elementi strutturali della roccia deformata, rilevati con le tecniche classiche dell'indagine microstrutturale, e le modificazioni subite dai minerali argillosi all'interno della zona di taglio; ciò nell'intento di verificare la possibilità di utilizzare la cristallinità della smectite come indicatore delle condizioni deformative.

Il presente lavoro prende in considerazione campioni appartenenti alla formazione della *Scaglia cinerea* e della *Scaglia rossa*, provenienti dalla zona di taglio associata al sovrascorrimento di M. Cavallo-M. Primo (CALAMITA & PIERANTONI, 1993), nel tratto compreso tra il fiume Chienti ed il fiume Potenza, e li confronta con quelli provenienti da aree "non tettonizzate" poste ad oriente del sovrascorrimento esaminato (Fig. 1).

INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

Il sovrascorrimento di Monte Cavallo-Monte Primo, da cui provengono i campioni studiati, appartiene all'Appennino umbro-marchigiano settentrionale. Quest'ultimo è un esempio di catena post-collisionale costruitasi principalmente a spese dei sedimenti calcareo-marnosi mesozoico-paleogenici (successione umbro-marchigiana), appartenenti al paleomargine continentale apulo, deformato secondo uno stile a pieghe e sovrascorrimenti (BALLY *et alii*, 1986). I sovrascorrimenti sono scollati lungo livelli incompetenti, il principale dei quali è costituito dalla formazione delle *Anidriti di Burano* (Trias superiore), alla base della successione sedimentaria. Altre formazioni marnoso-argillose, tra cui il *Rosso ammonitico*, le *Marne a Fucoidi*, la *Scaglia cinerea* e lo *Schlier*, costituiscono livelli di scollamento via via più superficiali al tetto dei quali varia progressivamente la lunghezza d'onda e, talora, la complicazione delle strutture deformative.

Le zone di taglio associate ai sovrascorrimenti sono tutte piuttosto localizzate ed assai meglio sviluppate nelle formazioni marnose; anche geometricamente esse presentano delle caratteristiche comuni e vengono generalmente descritte come tettoniti S/C (LISTER & SNOKE, 1984). Al di fuori delle zone di taglio la successione sedimentaria è interessata solo da pieghe e cli-

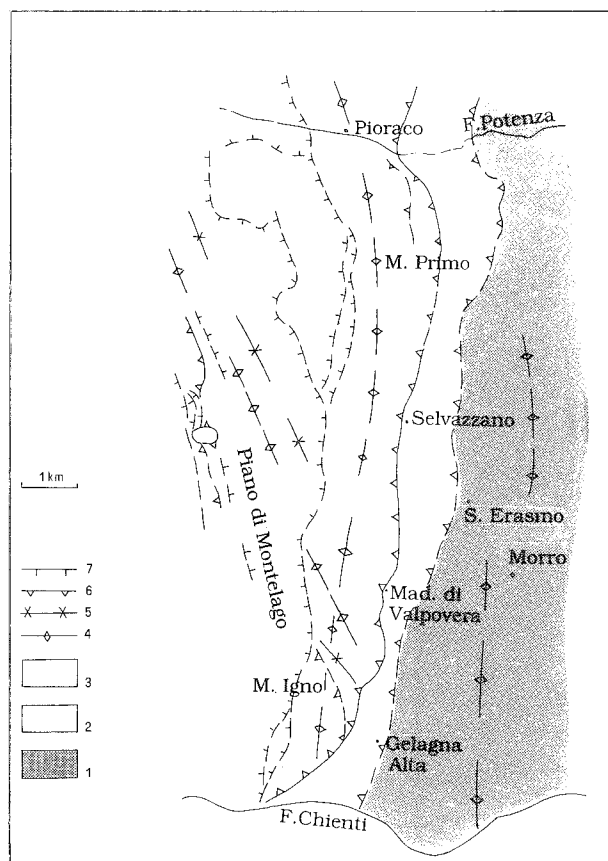


Fig. 1 - Schema strutturale del sovrascorrimento Monte Cavallo-Monte Primo (modificato da CALAMITA & PIERANTONI, 1993): 1) unità di letto; 2) elemento tettonico intermedio; 3) unità di tetto; 4) anticlinale; 5) sinclinale; 6) sovrascorrimento; 7) faglia diretta.

vaggio di piano assiale. Il sovrascorrimento di Monte Cavallo-Monte Primo si colloca in una posizione intermedia all'interno delle unità tettoniche umbro-marchigiane ed in particolare descrive il fronte della "ruga marchigiana interna" (Fig. 1). Ciò che lo caratterizza, rispetto ad altre zone di taglio, è la presenza di una roccia di faglia particolarmente deformata (Fig. 2) in relazione ad una serie di scaglie tettoniche che complicano il contatto tra il tetto ed il letto del sovrascorrimento stesso. Queste scaglie tettoniche, di dimensioni da metriche a chilometriche, coinvolgono le formazioni della *Scaglia rossa* e *cinerea* più volte ripetute tanto da produrre una "zona" di sovrascorrimento dello spessore di 3-400 metri. Il piano di taglio principale si estende in direzione NNW-SSE, nel tratto considerato, ed immerge con una inclinazione di 20-30° verso ovest.

ANALISI MINERALOGICO-PETROGRAFICA

Il problema della cristallinità dell'illite e della smectite è molto complesso e di non facile interpretazione: infatti si tratta di dare una quantificazione all'ordine strutturale di minerali tra i più comuni e frequenti nell'ambito delle rocce sedimentarie di natura argillosa e di tentarne una correlazione con lo stress meccanico subito dalla roccia.

L'interesse nella definizione del grado di cristallinità trova valido sostegno nella considerazione che i minerali argillosi, ed in particolare l'illite, mostrano una

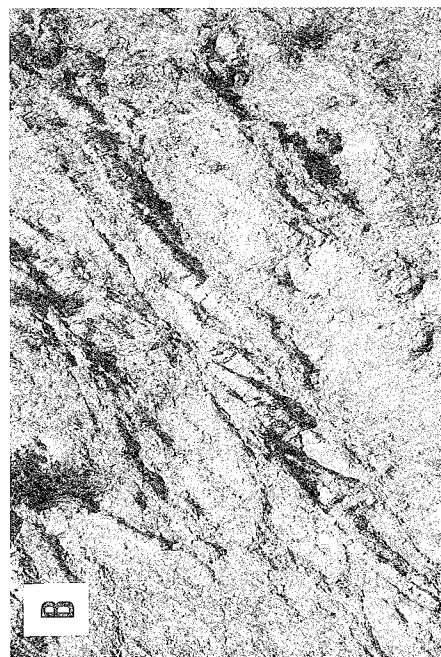


Fig. 2 - Zona di taglio associata al sovrascorrimento di Monte Cavallo-Monte Primo (Località Pioraco, formazioni della *Scaglia variegata e cinerea*): a) panoramica dell'affioramento; b) particolare della figura precedente: si osservano i piani di taglio e le superfici del clivaggio di dissoluzione per pressione e i piccoli duplex nei livelli più competenti.

particolare adattabilità alle condizioni chimico-fisiche ambientali consentendo perciò di "registrare" anche l'eventuale deformazione delle rocce. Molti autori (KUBLER, 1968, 1974 e 1990; DUNOYER DE SEGONZAC, 1970; FREY, 1970; WEBER, 1972; FREY *et alii*, 1980; CERRINA FERRONI *et alii*, 1984; FARABOLLINI, 1986-87; BONAZZI & COSTA, 1989; COSTA & BONAZZI, 1991 e relativa bibliografia) infatti, hanno cercato di utilizzare l'illite, o anche la clorite (MOLLI *et alii*, 1992) e la smectite (FARABOLLINI & INVERNIZZI, 1994), per cogliere i differenti gradi di evoluzione, precursori del metamorfismo, soprattutto dopo che BURST (1959) e WEAVER (1960), analizzando delle argille derivanti da sondaggi petroliferi, notarono numerose trasformazioni strutturali atte principalmente ad apportare un certo miglioramento della cristallinità dei minerali argillosi. E' tuttavia da ricordare che, secondo FREY (1987), il rapporto tra deformazione tettonica e cristallinità dell'illite (IK) non è ancora ben chiaro.

In questo lavoro è stato affrontato uno studio delle componenti pelitiche, appartenenti alla formazione della *Scaglia cinerea*, coinvolte in uno dei maggiori sovrascorrimenti umbro-marchigiani (Monte Cavallo-Monte Primo), focalizzando l'attenzione sulla determinazione degli indici di cristallinità della smectite e dell'illite, e sul rapporto tra i riflessi dei piani 002/001 dell'illite stessa: tali valori sono stati successivamente confrontati con quelli ottenuti da campioni litologicamente simili, ma provenienti da aree non deformate.

La scelta di indagare tali indici è legata al ai numerosi fattori che li influenzano (temperatura, pressione dei fluidi, velocità della deformazione, stress differenziale, chimismo del sedimento) a cui va anche aggiunta la composizione mineralogica dei materiali analizzati (FARABOLLINI, 1986-87): alto contenuto di calcite, smectite e strati misti, infatti, non permettono una stima attendibile dell'IK dell'illite.

E' stato pertanto condotto lo studio mineralogico, effettuato per diffrattometria ai raggi x di polveri seguendo le metodologie più comunemente adottate (BONAZZI *et alii*, 1984), a cui sono state apportate alcune modifiche in virtù dell'alto contenuto in calcite dei materiali analizzati (FARABOLLINI *et alii*, 1988).

I tracciati diffrattometrici, utilizzati per il riconoscimento delle varie fasi minerali, hanno permesso il calcolo dei seguenti indici (tabella 1 e 2):

- indice di cristallinità dell'illite, calcolata secondo il metodo di KUBLER (1964);
- indice di cristallinità della smectite (BISCAYE, 1965);
- rapporto 002/001 dell'illite stessa (ESQUEVIN, 1969);
- larghezza del picco dell'illite calcolato a metà della sua altezza.

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

La caratterizzazione mineralogico-petrografica delle litologie marnoso-argillose della *Scaglia cinerea* ha innanzitutto messo in evidenza che non esistono sostanziali differenze composizionali tra i materiali provenienti da aree tettonizzate e quelli "non disturbati"⁽¹⁾. La

⁽¹⁾Campioni "non tettonizzati": calcite 45-50%; quarzo 5%; minerali argillosi 50-55% (smectite 30-35%, illite 30-35%, I/Mo 15-20%, subordinatamente clorite e caolinite).

Campioni "tettonizzati": Calcite 55-60%; quarzo 5%; minerali argillosi 45-50% (smectite 40-45%, illite 35-40%, I/Mo 10-15%).

TABELLA 1 - Campioni indisturbati e loro indici campioni IK 002/001 IK I(h/2) Kubler illite smectite illite

campioni	IK Kubler	002/001 illite	IK smectite	I(h/2) illite
BSG1	8.00	0.50	0.40	3.5
BSG2	4.20	0.56	0.30	5.5
BSG3	7.00	0.42	0.20	4.0
BSG4	6.50	0.50	0.60	4.0
BSG5	5.00	0.50	0.60	2.5
SGB6	3.70	0.42	0.50	5.5
BSG7	3.75	0.47	0.50	4.5
BSG8	3.50	0.78	0.50	4.0
BSG9	3.00	0.60	0.50	4.0
BB10	6.75	0.42	0.37	5.0
BB11	5.70	0.52	0.48	5.0
BB12	9.00	0.62	0.61	7.0
BB13	7.30	0.73	0.48	4.0
BB14	3.60	0.58	0.61	5.0
BB15	14.50	0.77	0.31	3.5
BB16	10.50	0.58	0.61	5.5
BB17	7.00	0.49	0.50	3.5
BB18	11.30	0.50	0.50	4.0
BB19	12.30	0.59	0.48	5.5
BB20	6.20	0.62	0.70	5.5

media 002/001 = 0.56

TABELLA 2 - Campioni tettonizzati e loro indici campioni IK 002/001 IK I(h/2) Kubler illite smectite illite

campioni	IK Kubler	002/001 illite	IK smectite	I(h/2) illite
MO1	7.00	0.40	0.51	5.5
MO2	6.20	0.50	0.42	5.0
MO3	5.70	0.45	0.40	5.0
MO4	6.20	0.38	0.50	4.0
CP5	9.00	0.38	0.60	5.0
CP6	8.00	0.40	0.60	6.0
CP7	6.80	0.37	0.50	5.0
CP8	5.25	0.50	0.40	4.0
CP9	7.50	0.35	0.20	3.0
SE10	9.80	0.24	0.20	5.0
SE11	10.70	0.22	0.20	5.0
SE12	11.75	0.37	0.20	3.5
SE13	8.30	0.42	0.20	5.0

componente argillosa è data dalla seguente associazione: smectite, illite e strati misti illite/smectite con subordinata caolinite e clorite. Per la componente non argillosa, oltre alla costante ed evidente presenza di calcite e quarzo, sono stati individuati feldspati, dolomite e cristobalite ed occasionalmente jarosite, baritina e pirite.

La presenza, in tutti i campioni analizzati (tettonizzati e non), di una associazione costituita da illite + smectite + strati misti I/Mo ± clorite ± caolinite è indicativa di condizioni al limite tra diagenesi ed anchizona (KISCH, 1987). Tuttavia la partecipazione percentuale dei singoli minerali varia da campione a campione, non permettendo di chiarire le condizioni di P/T caratteristiche.

E' inoltre importante far notare la costante abbondante presenza della smectite, che si aggira mediamente

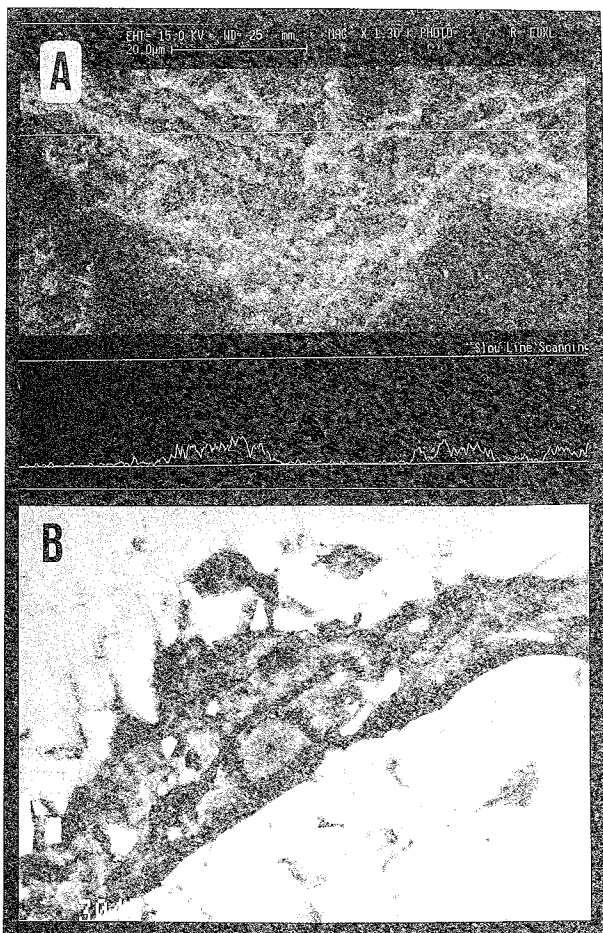


Fig. 4 - A) EDX line drawing attraverso una superficie stilolitica: i picchi del diagramma in basso evidenziano la presenza di silicio. B) Immagine SEM - Back Scatter che mostra la concentrazione di minerali insolubili (componenti scure) lungo una superficie stilolitica. Sono presenti anche frammenti di roccia madre, ormai isolati all'interno della superficie stilolitica (v. frecce).

Scaglia rossa sia in sezione sottile al microscopio ottico che al SEM (INVERNIZZI, 1994 e questo volume), evidenziano anche la presenza di meccanismi deformativi di tipo plastico tra cui: probabile scorrimento intergranulare, *grain boundary migration* (GBM) localizzato, isorientazione e deformazione dei microfossili, diffusa geminazione delle fibre di calcite. In particolare, recenti studi sulla formazione di geminati polisintetici nella calcite sottoposta a sollecitazioni meccaniche (BURKHARD, 1993) hanno messo in evidenza l'importanza prevalente, rispetto ad altri fattori (pressione, tasso di deformazione ecc.), del fattore temperatura nel determinare il tipo di geminati prodotti (Fig. 5). Geminati di tipo II e III, secondo la classificazione proposta da BURKHARD (1993), osservati in alcuni campioni provenienti da questa zona di taglio, sarebbero indicativi di temperature anche fino a 250°C. Del resto, meccanismi di deformazione plastica come il GBM, pur dipendendo anche dallo strain rate e dalla presenza di fluidi nel sistema, risentono notevolmente delle condizioni di temperatura e si attivano, in calcite, solo al di sopra dei 200-250°C (BURKHARD, 1993; RAMSAY & HUBER, 1983).

Sulla base delle osservazioni suddette è ragionevole pensare che si siano raggiunte temperature fino a

200-250°C all'interno della zona di taglio, durante la messa in posto dei sovrascorrimenti.

Sono presenti, inoltre, fenomeni di fratturazione idraulica e riaperture delle superfici stilolitiche testimoniate dalla crescita di fibre di calcite perpendicolari alle pareti delle fratture. Queste strutture sono indicative di un incremento della pressione dei fluidi nel sistema (INVERNIZZI, questo volume).

CONCLUSIONI

Questo studio, a carattere preliminare, ha messo a confronto due tecniche di indagine, quella mineralogico-petrografica e quella microstrutturale, al fine di ricercare possibili relazioni tra lo sviluppo di talune microstrutture tettoniche e le modificazioni del reticolo dei minerali argillosi nelle zone di taglio, con il variare dei parametri di pressione e temperatura.

L'analisi mineralogica innanzitutto suggerisce la possibilità di valutare il rapporto 002/001 dell'illite, qualora la presenza di strati misti di tipo I/Mo sia elevata; inoltre, la stessa ha evidenziato la presenza di smectite "contratta" nei materiali tettonizzati. Questa sarebbe da imputare alle sollecitazioni meccaniche subite dai materiali che avrebbero espulso le molecole di acqua comprese nella struttura provocando una totale disidratazione in gran parte dei suoi elementi.

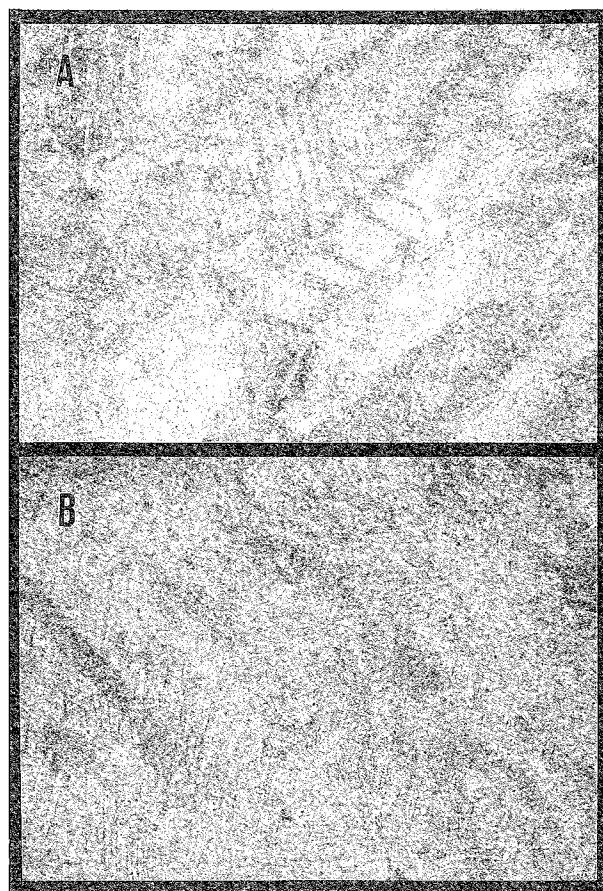


Fig. 5 - Esempi di geminazione della calcite in vene di taglio (campioni provenienti dal sito di Valpovera): A) geminazione di tipo II (geminati spessi e/o lentiformi) e B) geminazione di tipo III (geminati curvi e/o geminati rigeminati al loro interno; BURKHARD, 1993).

I risultati dell'analisi microstrutturale rivelano la presenza, accanto a diffusi fenomeni di dissoluzione per pressione e cataclasi, di meccanismi deformativi di tipo plastico e di strutture dovute all'incremento della pressione dei fluidi nel sistema. I primi indicherebbero, durante la messa in posto del sovrascorrimento di M. Cavallo-M. Primo, condizioni di temperatura superiori a 200°C all'interno della zona di taglio. Proprio la disidratazione della smectite può aver contribuito in modo rilevante all'aumento dei fluidi nel sistema, facilitando alcuni meccanismi di deformazione plastica (in particolare GBM). In alternativa, qualora tale disidratazione fosse avvenuta nei momenti finali della deformazione progressiva, essa potrebbe aver generato sovrappressione dei fluidi e contribuito a produrre i fenomeni di fratturazione idraulica e riapertura delle superfici del clivaggio e delle vene di taglio.

E' dunque possibile mettere in relazione le trasformazioni del reticolo della smectite e le variazioni dei valori del rapporto 002/001 dell'illite in presenza di smectite con le condizioni di pressione e di temperatura che hanno prodotto certi tipi di deformazione plastica del reticolo della calcite e/o con le variazioni di pressione dei fluidi nel sistema?

Studi ulteriori, in altri contesti geologici, saranno necessari al fine di verificare la validità delle interpretazioni dei processi deformativi proposte in questo lavoro, per quanto concerne le rocce sedimentarie a prevalente litologia marnoso-calcareo.

BIBLIOGRAFIA

- BALLY A.W., BURBI L., COOPER C. & GHELARDONI R. (1986) - *Balanced Section and seismic reflection profiles across the Central Apennines*. Mem. Soc. Geol. It., 35, 270-310.
- BONAZZI A. & COSTA E. (1989) - *Influenza della deformazione sul valore di cristallinità dell'illite analizzata su formazioni dell'Appennino settentrionale*. Atti Tic. Sc. Terra, 32, 57-70.
- BONAZZI A., SALVIOLI MARIANI E. & VERNIA L. (1984) - *Tecniche di determinazione dell'indice di cristallinità dell'illite in campioni di argille*. Miner. Petrogr. Acta., 28, 89-99.
- BISCAYE P.E. (1965) - *Mineralogy and Sedimentation of recent Deep-Sea Clay in the Atlantic Ocean and adjacent Seas and Oceans*. Geol. Soc. Am. Bull., 76, 803-832.
- BURKHARD M. (1993) - *Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review*. Journ. Struct. Geol., 15, 351-368.
- BURST J.F. (1959) - *Postdiagenetic clay-mineral environmental relationship in the Gulf coast Eocene*. Proc. Nat. Conf. Clays Clay Minerals, 327-341.
- CALAMITA F. & PIERANTONI P.P. (1993) - *Il sovrascorrimento di M. Cavallo-M. Primo (Appennino umbro-marchigiano)*. Boll. Soc. Geol. It., 112, 825-835.
- CERRINA FERRONI A., PLESI G., FANELLI G., LEONI L. & MARTINELLI P. (1984) - *Contributo alla conoscenza dei processi metamorfici di grado molto basso (anchimetamorfismo) a carico della falda toscana nell'area del ricoprimento apuano*. Boll. Soc. Geol. It., 102, 269-280.
- COSTA E. & BONAZZI A. (1991) - *Influence of deformation on illite crystallinity*. Boll. Soc. Geol. It., 110, 631-638.
- DUNOYER DE SEGONZAC (1970) - *The transformation of clay minerals during diagenesis and low-grade metamorphism: a review*. Sedimentology, 15, 281-346.
- ESQUEVIN J. (1969) - *Influence de la composition chimique des illites sur la cristallinité*. Bull. Centre Rech. Pau S.N.P.A., 3, 147-154.
- FARABOLLINI P. (1986-87) - *Caratterizzazione mineralogico-petrografica dei materiali argillosi nelle zone connesse con i sovrascorrimenti umbro-marchigiani. Correlazione con i materiali sottoposti a sollecitazione meccanica e quelli non disturbati*. Tesi di laurea inedita, Università di Camerino.
- FARABOLLINI P. & INVERNIZZI C. (1994) - *Illite and smectite crystallinity as a parameter for the evaluation of mechanical stress: an example from the Umbria-Marche Apennines*. Poster Congr. Naz. S.G.I., Bari.
- FARABOLLINI P., MATTIAS P. & PARIS E. (1988) - *Metodologie di studio dei minerali argillosi delle rocce sedimentarie*. Università di Camerino, Int. Report.
- FREY M. (1970) - *The step diagenesis to metamorphism in pelitic rocks during Alpine orogenesis*. Sedimentology, 15, 261-279.
- FREY M. (1987) - *Very low grade metamorphism of clastic sedimentary rocks*. In: M. FREY (Ed.), "Low-temperature metamorphism". Blackie, Glasgow, 9-58.
- FREY M., TEICHMULLER M., TEICHMULLER R., KUNZI B., BREIT-SCHMIDT A. & GRUNER U. (1980) - *Very low grade metamorphism in external parts of central Alps: illite crystallinity, coal rank and fluid inclusion data*. Eclogae Geol. Helv., 73, 173-203.
- KISCH H.J. (1987) - *Correlation between indicators of very low-grade metamorphism*. In: FREY M. Ed., Low-Temperature metamorphism, Blackie, Glasgow, 227-300.
- KUBLER B. (1964) - *Les argiles, indicateurs de métamorphisme*. Rev. Inst. Franc. Petroleum, 19, 1093-1112.
- KUBLER B. (1968) - *Evaluation quantitative du métamorphisme par la cristallinité de l'illite. Etat des progrès réalisés ces dernières années*. Bull. Centre Rech. Pau SNPA, 2, 385-397.
- KUBLER B. (1974) - *Diagenèse, anchimetamorphisme et métamorphisme. Les argiles, minéraux index dans la diagenèse et le métamorphisme; la cristallinité de métamorphisme de la matière organique; comparaison avec les facies à zeolites*. Bull. Centre Rech. Pau, Inst. Nat. de la Rech. Scien., Quebec.
- KUBLER B. (1990) - *Cristallinité de l'illite et mixed-layers: brève révision*. Schw. Miner. Petrogr. Mitt., 70, 89-93.
- INVERNIZZI C. (1994) - *Low temperature deformation in naturally deformed marly limestones from the Umbria-Marche Apennines (Central Italy)*. Annales Tectonicae, 7 (2), 119-133.
- INVERNIZZI C. (1995) - *Storia della deformazione in zone di taglio compressive dell'Appennino umbro-marchigiano ricostruita con il contributo dell'analisi microstrutturale*. Presente volume.
- LISTER G.S. & SNOKE A.W. (1984) - *S-C Mylonites*. Journ. Struct. Geol., 6, 617-638.
- MOLLI G., PANDOLFI L. & TAMPONI M. (1992) - *Cristallinità di illite e clonite nelle unità liguri dell'alta Val Trebbia (Appennino settentrionale)*. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A, 99, 79-92.
- RAMSAY J.G. & HUBER M.I. (1983) - *The techniques of Modern Structural Geology*. Academic Press.
- WEAVER C.E. (1960) - *Possible uses of clay minerals in search for oil*. Bull. Am. Ass. Geol., 44, 1505-1518.
- WEBER K. (1972) - *Notes on determination of illite crystallinity*. N. Jahrb. Miner. Abh., 6, 267-276.

