

3.2. – ETÀ DEL METAMORFISMO

Datazioni su minerali di età alpina nell'area delle Dolomiti dell'Engadina sono state effettuate da THÖNI (1980a; 1980b; 1981; 1983; 1986) e THÖNI & HOINKES (1987), nella Falda Silvretta da THÖNI (1981), FLISCH (1986), SPIESS (1987) e HURFORD *et alii* (1989). A tali autori e a SCHMID & HAAS (1989) si rimanda per una discussione più ampia dell'argomento.

Dalla distribuzione regionale delle età ricavate con i metodi K/Ar e Rb/Sr su miche neofornate, si può affermare che l'evento metamorfico responsabile della retrocessione delle paragenesi erciniche e della crescita di nuovi minerali è attribuibile al Cretaceo superiore. Le miche sincinematiche nelle Miloniti della Val Venosta hanno anch'esse un'età variabile tra i 70 e i 100 Ma, mentre il metamorfismo e la foliazione nelle formazioni di Chazforà e Ruina della Falda di S-charl in Val Müstair hanno un'età di circa 90 Ma. L'utilizzazione del metodo $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ in queste rocce ha fornito risultati analoghi (THÖNI & MILLER, 1987, 90 Ma).

Datazioni nel basamento della Falda Silvretta hanno ugualmente fornito età comprese tra 80 e 110 Ma.

3.3. – DISCUSSIONE

Sulla base dei dati geocronologici disponibili è possibile affermare che durante il Cretaceo superiore si ha il metamorfismo della Falda dell'Ötztal, il sovrascorrimento lungo l'Accavallamento di Slingia, la formazione delle Miloniti della Val Venosta e il metamorfismo nelle sottostanti Falda di Campo, Falda di S-charl e Basamento di Sesvenna.

Come vedremo in seguito, il proseguimento delle Miloniti della Val Venosta può essere tracciato ulteriormente verso W nell'area delle Dolomiti dell'Engadina lungo l'Accavallamento dello Zembrù e l'Accavallamento Trupchun-Braulio; questi accavallamenti sono responsabili dell'attuale struttura a falde e dello sviluppo di pieghe nella Falda dell'Ortles. È perciò ragionevole supporre che:

a) l'attività lungo l'Accavallamento dello Zembrù e l'Accavallamento Trupchun-Braulio sia contemporanea con quella lungo l'Accavallamento di Slingia, cioè del Cretaceo superiore;

b) che il metamorfismo riconosciuto all'interno della Falda dell'Ortles sia anch'esso dovuto alle fasi coaline (fase D1).

Essendo originati dal medesimo evento deformativo, i valori approssimativi di temperatura dedotti dalle misure di cristallinità dell'illite nella Falda

dell'Ortles, possono essere confrontati con quelli ricavati dalle paragenesi mineralogiche nella Falda di S-charl e nel Basamento di Sesvenna (fig. 5).

Un'importante osservazione già effettuata nella Falda dell'Ötztal e nelle Miloniti della Val Venosta può essere confermata nelle Dolomiti dell'Engadina: il grado metamorfico è progrado verso E.

Un gradiente nel metamorfismo è osservabile anche nella Falda Silvretta. Avvicinandosi alla finestra dell'Engadina infatti sono attualmente esposti livelli sempre più profondi della Falda Silvretta, portati alla superficie durante la fase di sollevamento terziarie legate ai movimenti lungo la Linea dell'Engadina.

4. – ANALISI MICROSTRUTTURALE E TESSITURALE

Al fine di ricostruire i movimenti relativi tra le varie falde particolare attenzione è stata prestata allo studio degli indicatori cinematici presenti nelle miloniti lungo le varie superfici di accavallamento.

Gli indicatori cinematici più frequenti sono: porfiroclasti asimmetrici, foliazioni complesse, orientazioni preferenziali della forma dei granuli, orientazioni cristallografiche preferenziali (fig. 8).

Porfiroclasti asimmetrici: appartenenti a questa categoria sono stati riconosciuti «*mica fish*» (fig. 8a) (EISBACHER, 1970; LISTER & SNOKE, 1984), clasti tipo σ (SIMPSON & SCHMID, 1983; PASSCHIER & SIMPSON, 1986), clasti tipo δ , clasti con dissoluzione (fig. 8b), orientazioni preferenziali indotte dalla presenza di clasti rigidi (GARCIA CELMA, 1982).

Foliazioni complesse: con questo termine si intende la presenza di foliazioni sviluppatasi contemporaneamente a quella milonitica principale. I più comuni tipi di foliazioni complesse utilizzate per determinare il senso di movimento sono legate allo sviluppo di superfici S-C (BERTHÉ *et alii*, 1979b; LISTER & SNOKE, 1984) e allo sviluppo di «*shear band*» (BERTHÉ *et alii*, 1979a; PLATT & VISSERS, 1980; WHITE *et alii*, 1980) fig. 8c. Con questo termine si intendono in questo lavoro discrete zone di taglio presenti in miloniti e con movimento sintetico rispetto al senso generale di trasporto. Il termine «*extensional crenulation cleavage*» viene invece riservato per un qualsiasi clivaggio di crenulazione sul quale sia possibile riconoscere movimenti normali. La differenza tra i due tipi di superfici è evidenziata dal fatto che le «*shear band*» sono sin-milonitiche, molto discontinue e dopo breve tratto si parallelizzano con la foliazione milonitica (fig. 8c). Nel caso di un «*extensional crenulation*

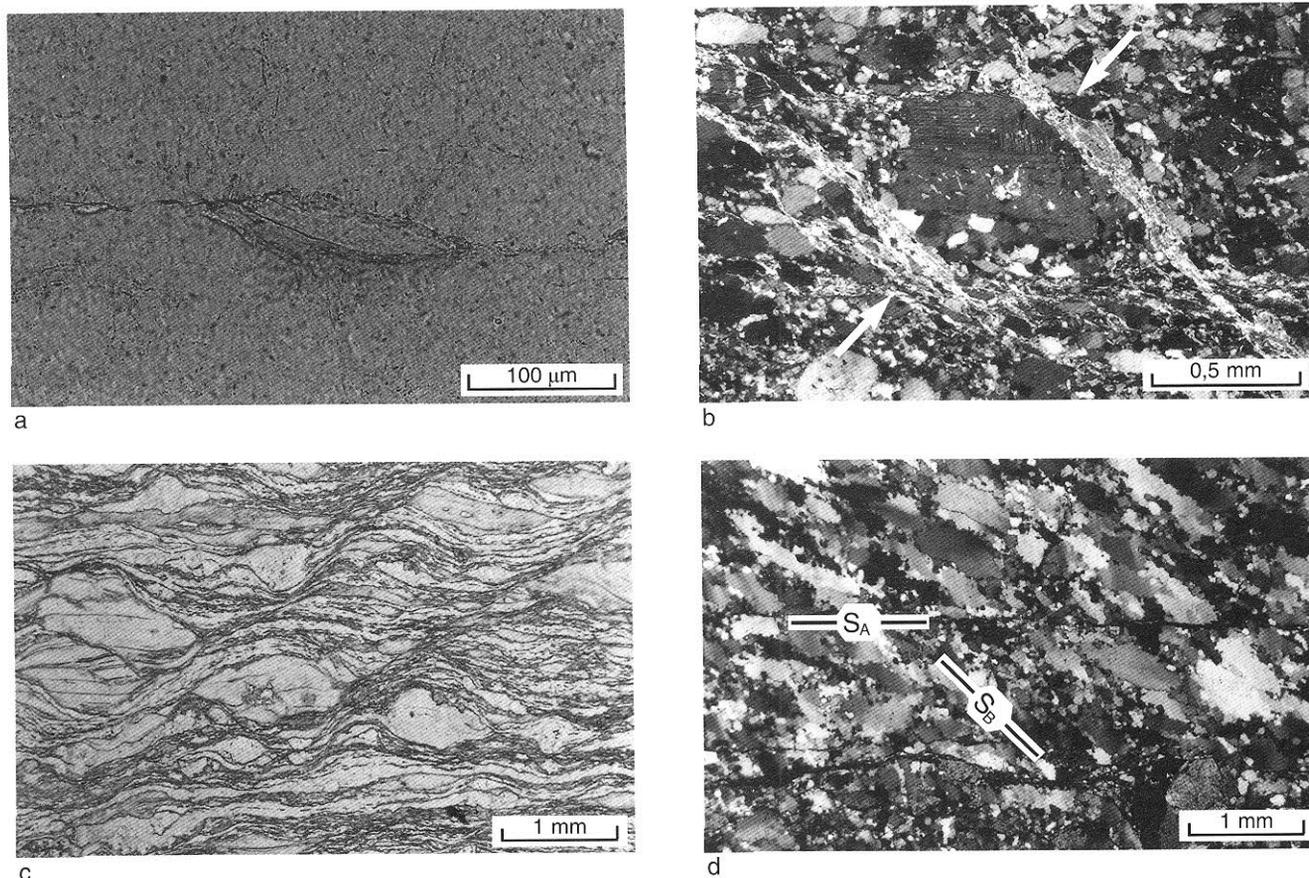


Fig. 8 – Indicatori cinematici riconosciuti nell'area studiata. Tutte le foto, anche nelle figure seguenti, rappresentano sezioni ortogonali alla foliazione e parallele alla lineazione, orientate con E a destra e W a sinistra. Il senso di taglio è sinistrale negli esempi qui riportati, indicando cioè un trasporto tettonico verso W. (a) Porfiroclasto di mica («mica-fish») in quarzo-miloniti, Zona a scaglie dell'Umbrail-Chavalatsch (P. Chavalatsch). (b) Porfiroclasto di feldspato con dissoluzione, quarzo-miloniti lungo l'Accavallamento dello Zembrù, Val Zembrù. Attorno al porfiroclasto è possibile osservare due zone in cui si ha dissoluzione arricchite nel materiale relativamente meno solubile, di solito miche nel caso di quarzo-miloniti. Il materiale insolubile si concentra attorno al porfiroclasto ortogonalmente alla direzione di σ_1 (ινδίατα δαλλε ζρεγγε). (c) Shear bands, miloniti base Silvretta, Fourcla da l'Uertsch. (d) Quarzo-miloniti Linea dello Zembrù, Zumpanell. L'allineamento di cristalli di mica definisce la foliazione milonitica macroscopicamente visibile (S_A), l'orientazione preferenziale della forma dei cristalli di quarzo ricristallizzati dinamicamente è obliqua rispetto alla foliazione milonitica e definisce una seconda foliazione (S_B) osservabile solamente in sezione sottile.

– Shear-sense indicators. All micrographs are sections cut parallel to the lineation and perpendicular to the foliation. E is always on the right and W on the left. The inferred sinistral sense of shear indicates a «top-to-the-West» transport direction. (a) Porphyroblast («mica-fish») in quartz mylonites in the Umbrail-Chavalatsch imbricates (P. Chavalatsch). (b) Feldspar porphyroblast in quartz-feldspar mylonites along the Zembrù thrust, Val Zembrù. Note accumulation of white mica crystals indicating dissolution, the σ_1 direction is inferred to be perpendicular to the dissolution surfaces. (c) Shear-bands in quartz mylonite at the basis of the Silvretta nappe, Fourcla da l'Uertsch. (d) Fully recrystallized quartz mylonite along the Zembrù thrust, Zumpanell. Mica flakes mark the macroscopic foliation (S_A). Dynamic recrystallization leads to a strong grain boundary preferred orientation (S_B) oblique to the macroscopic foliation.

cleavage» le superfici hanno una continuità maggiore e tagliano indifferentemente ogni foliazione precedente; il loro sviluppo non è perciò contemporaneo a quello della foliazione principale.

Orientazioni preferenziali della forma dei granuli: in livelli ricchi in quarzo in quarzo-miloniti (fig. 8d) e in calcite-miloniti (fig. 21d) si osserva frequentemente che i singoli granuli sono ricristallizzati dinamicamente ed allungati obliquamente rispetto alla foliazione milonitica principale. La direzione di allungamento dei granuli dà un'indicazione sul senso di taglio, ma non rappresenta l'orientazione dell'ellisse dello strain finito della roccia. Per questo motivo non è stata adottata per le microstrutture svi-

luppatesi in rocce milonitiche, la terminologia «S-C» (BERTHÉ *et alii*, 1979b; LISTER & SNOKE, 1984), ma si è preferito indicare in modo generico con S_A la foliazione milonitica principale e con S_B la foliazione definita dall'orientazione preferenziale dei granuli ricristallizzati (fig. 8d).

Orientazioni cristallografiche preferenziali: lo sviluppo di orientazioni cristallografiche preferenziali verrà trattato più estesamente nel capitolo riguardante le tessiture che si sviluppano lungo le varie superfici di accavallamento. Al fine di determinare il senso di movimento, la distribuzione asimmetrica dell'orientazione degli assi c rispetto alla foliazione milonitica è di per se sufficiente.

In fig. 9 sono riportate le direzioni di trasporto riconosciute nell'area studiata; esse derivano dall'osservazione degli indicatori cinematici sopra descritti. La prima fase deformativa (D1, fase Trupchum) è caratterizzata da una direzione generale di trasporto verso NW; più rare sono invece le evidenze di trasporto legate a movimenti post-D1 verso E. Poiché in questi ultimi casi è più difficile riscontrare lo sviluppo di tessiture e microstrutture legate ad una deformazione plastica, in questo capitolo lo studio microstrutturale e tessiturale è limitato solamente alle miloniti che si sviluppano lungo gli accavallamenti D1.

In questo lavoro con il termine «microstrutture» si intendono tutti i caratteri di una roccia osservabili a scala microscopica come la presenza di una foliazione, forma ed orientazione dei granuli, evidenze di deformazione (es. «deformation bands», «subgrain»), morfologia dei contorni dei granuli, ecc. Con il termine «tessitura» si intende invece l'orientazione cristallografica preferenziale dei minerali costituenti la roccia. Per l'uso di termini quali «milonite», «cataclaste», «fragile», «duttile», «plastico», sono state seguite le definizioni di RUTTER (1986) e SCHMID & HANDY (1991).

Le tessiture osservate sono state interpretate sulla base delle seguenti evidenze:

a) è la ricristallizzazione dinamica (= sintettonica) che induce lo sviluppo di orientazioni cristallografiche preferenziali. Cristalli con un'orientazione cristallografica non favorevole per produrre uno scivolamento su piani con basso «critical resolved shear stress» (POIRIER, 1985) sono destinati a scomparire facilmente in quanto sono cristalli con un'alta densità di dislocazioni. Questi individui ricristallizzano più facilmente, in favore di altri cristalli favorevolmente orientati.

b) durante una storia deformativa essenzialmente per taglio semplice progressivo, in cui vi sia ricristallizzazione sintettonica, i vari granuli tendono progressivamente ad orientarsi in modo che i piani reticolari su cui si ha più facilmente scivolamento («slip planes») siano paralleli alla superficie di taglio e la direzione lungo cui si ha più facilmente scivolamento parallela alla direzione di trasporto (ETCHECOPAR, 1977; SCHMID & CASEY, 1986). Il piano reticolare su cui si ha scivolamento e la direzione in esso contenuta lungo cui si ha scivolamento definiscono un «sistema di scivolamento» («slip system»). Per una discussione più completa si rimanda all'ampia letteratura esistente sull'argomento (LISTER *et alii*, 1978; BOUCHEZ *et alii*, 1983; SCHMID & CASEY, 1986; URAI *et alii*, 1986; KNIPE, 1989; DRURY & URAI, 1990; LAW, 1990; WENK & CHRISTIE, 1991).

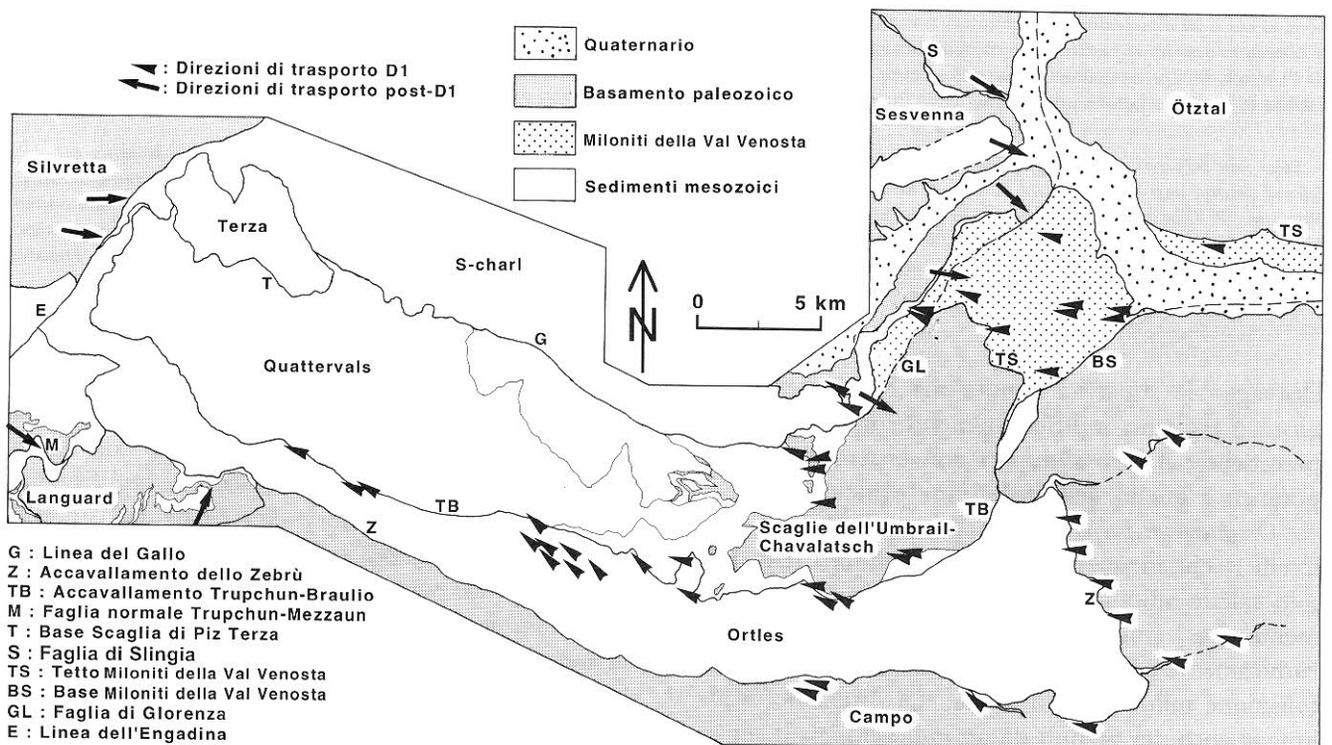


Fig. 9 - Direzioni di trasporto ricavate dallo studio degli indicatori cinematici in quarzo-miloniti (Accavallamento dello Zebrù e Miloniti della Val Venosta) e in calcite-miloniti (Accavallamento Trupchun-Braulio). Le frecce indicano la direzione di trasporto della parte sovrascorsa.

- Sense of shear as determined by microfabric analysis of mylonites. Arrows point to the transport direction of the hanging wall.

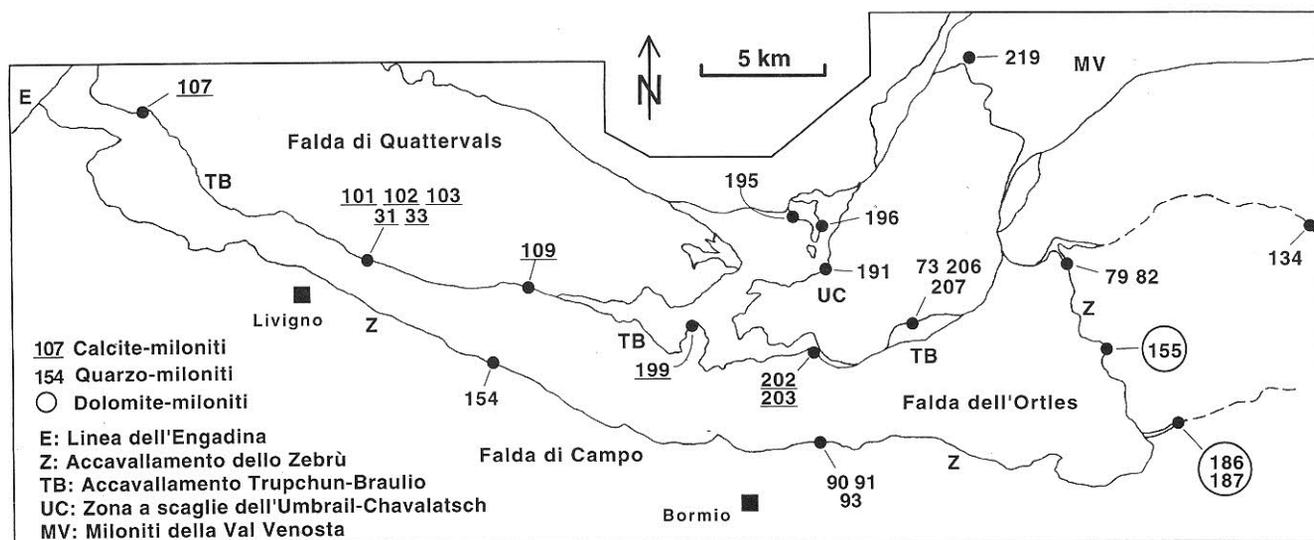


Fig. 10 - Campioni lungo l'Accavallamento dello Zebrù, l'Accavallamento Trupchun-Braulio e nella Zona a scaglie dell'Umbrail-Chavalatsch.

- Samples from the Zebrù thrust, the Trupchun-Braulio thrust and the Umbrail-Chavalatsch imbricates.

4.1. - MICROSTRUTTURE E TESSITURE LUNGO L'ACCAVALLAMENTO DELLO ZEBRÙ

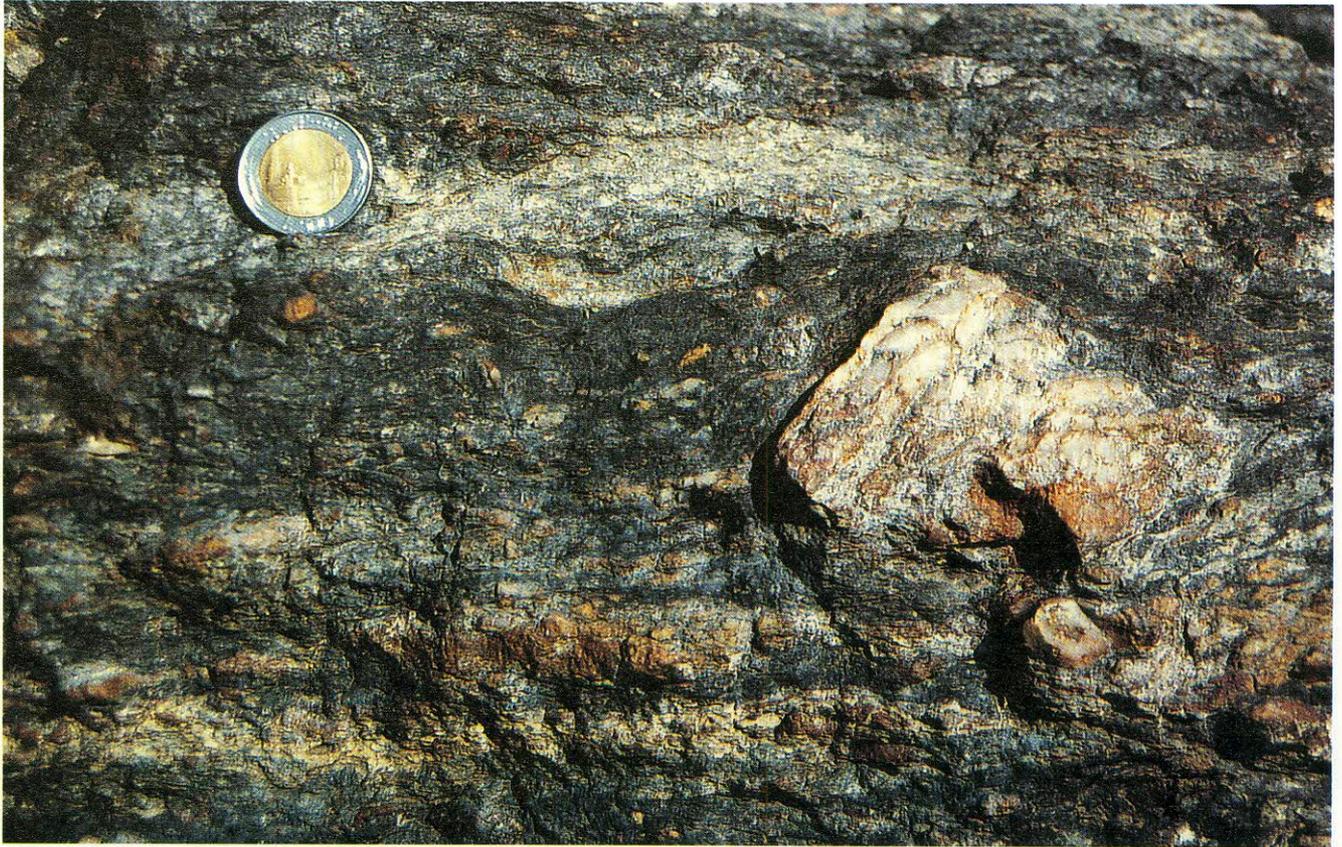
A causa delle non buone condizioni di affioramento, osservazioni lungo l'Accavallamento dello Zebrù possono essere fatte solamente lungo la parte centro-orientale della linea: nei pressi di Monte Trela, in Val Zebrù e in Valle Solda (fig. 10)

Nei pressi di M. Trela lungo la Linea dello Zebrù è possibile osservare lo sovrascorrimento della Dolomia Principale della Falda dell'Ortles sul basamento della Falda di Campo. In questo affioramento si sviluppano cataclasiti lungo il contatto (fig. 11) con una foliazione molto penetrativa e una lineazione orientata E-W. I clasti rappresentano frammenti di rocce appartenenti al basamento sottostante, con una scistosità ercinica ben evidente e discordante con quella delle cataclasiti. Spesso i clasti sono costituiti quasi esclusivamente da aggregati di quarzo e una foliazione precedente è difficilmente riconoscibile; anche in questo caso però è possibile affermare che rappresentano vecchi aggregati ricristallizzati durante il metamorfismo ercinico. Questi cristalli di quarzo mostrano infatti evidenze di ricristallizzazione sintettonica per «*grain boundary migration*», con formazione di granuli di notevoli dimensioni, indicativa di una temperatura che non si raggiunge sicuramente in quest'area durante il metamorfismo alpino.

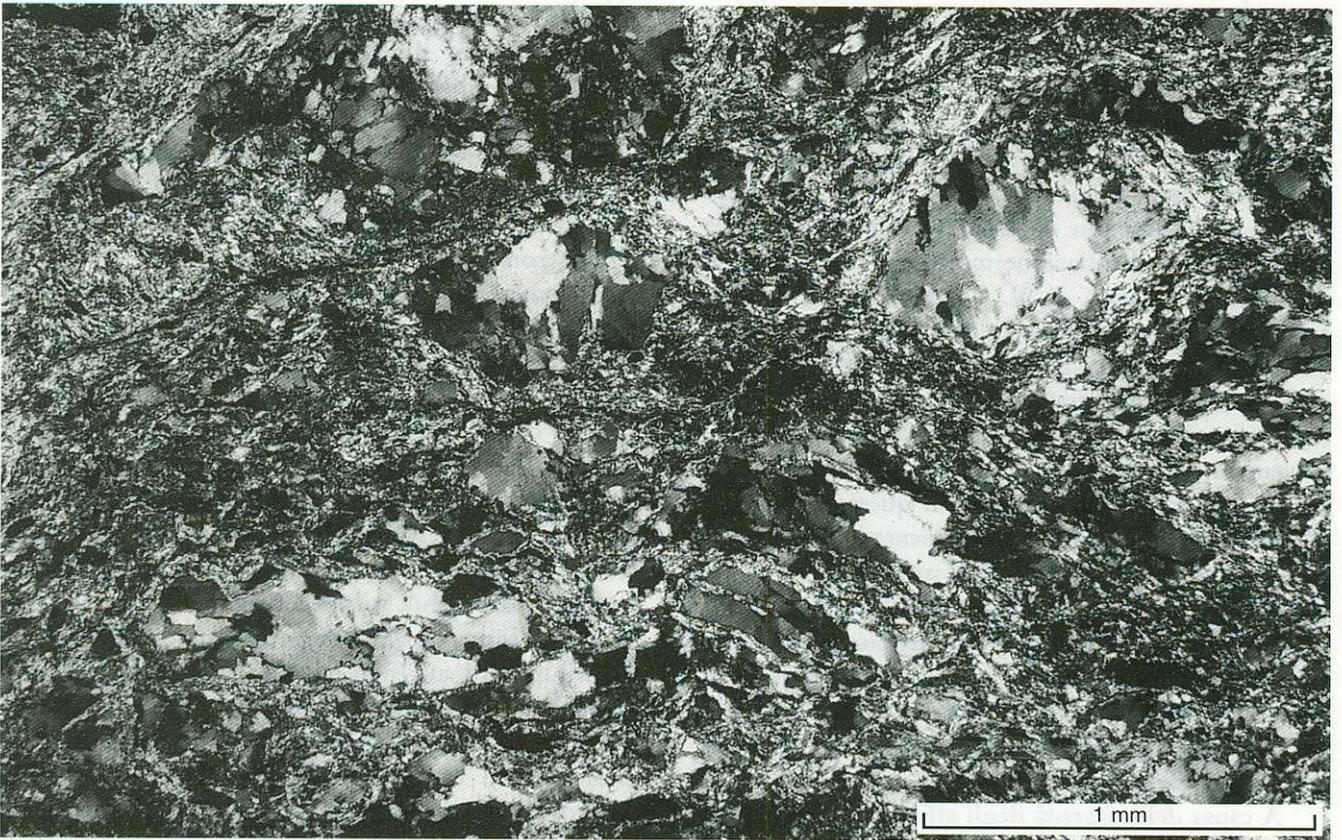
A causa della scarsità degli affioramenti, ulteriori osservazioni sulle deformazioni che si sviluppano lungo questo accavallamento possono essere fatte solamente 10 km più a E, in Val Zebrù. Ottime

esposizioni si hanno in Valle Uzza, una valle laterale della Val Zebrù, a NE di Bormio. In questo affioramento è possibile osservare lo sviluppo di quarzo-miloniti per uno spessore di oltre 10 metri (fig. 12a). La foliazione ha immersione verso N ed è presente una lineazione mineralogica orientata circa E-W. Le quarzo-miloniti sono caratterizzate da granuli con un allungamento obliquo rispetto alla foliazione milonitica (fig. 12b) e da orientazioni cristallografiche preferenziali che indicano un senso generale di movimento sinistrale (verso W). La deformazione si sviluppa in facies scisti verdi, e la ricristallizzazione dinamica nel quarzo avviene mediante rotazione.

Alcune osservazioni molto importanti per lo studio dello sviluppo delle tessiture in quarzo-miloniti in generale può essere fatto in quest'area. Il campione 93 (fig. 13a) è costituito quasi esclusivamente da porfiroclasti di quarzo (asse maggiore > 1mm), alcuni di aspetto globulare, altri di forma leggermente allungata, immersi in una matrice a grana più fine ricristallizzata dinamicamente (diametro medio ca. 40 µm). All'interno dei porfiroclasti sono osservabili solo «*deformation bands*»; verso la periferia del granulo però si osserva dapprima lo sviluppo di subgrain e poi la formazione di nuovi granuli di piccole dimensioni che circondano completamente il porfiroclasto originario («*core-mantle structures*»). In base a queste osservazioni si può affermare che la matrice deriva dalla ricristallizzazione dinamica per rotazione di vecchi granuli di quarzo. Nel campione 91, raccolto nel solito affioramento a pochi metri dal campione 93 (fig. 13b,



a



b

Fig. 11 - (a) Cataclasite lungo l'Accavallamento dello Zebrù, M. Trela, Campione 154. (b) Idem, in sezione sottile.

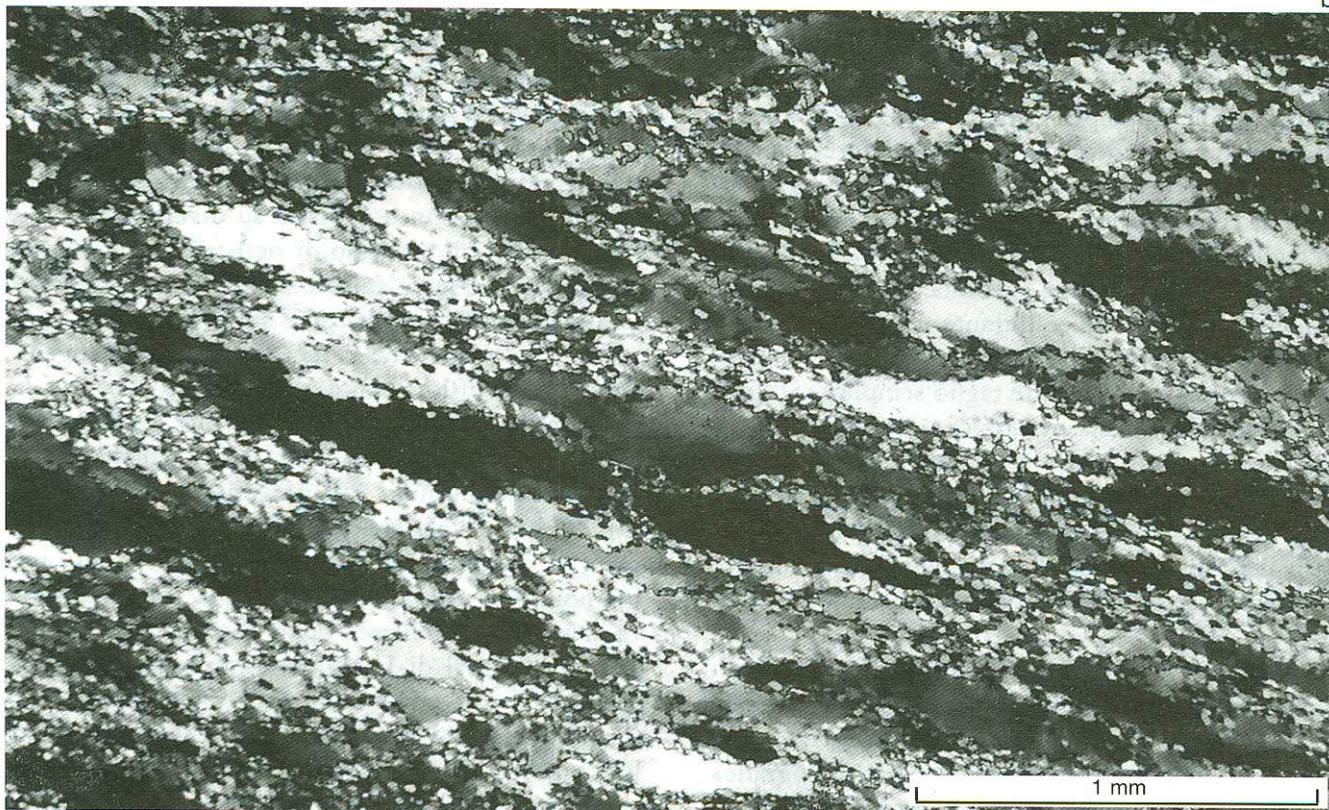
(a) Cataclasite along the Zebrù thrust, M. Trela, Sample 154. (b) The same, thin section.



a

Fig. 12 - (a) Quarzo-milonite lungo l'Accavallamento dello Zebrù, Valle Uzza (Bormio). (b) La stessa in sezione sottile, campione 90. La foliazione milonitica è parallela al lato lungo della foto, una seconda foliazione obliqua è definita dall'orientazione preferenziale della forma dei granuli.

- (a) *Quartz mylonite along the Zebrù thrust, Valle Uzza (near Bormio).*
 (b) *The same in thin section, Sample 90. The macroscopic mylonitic foliation is parallel to the long side of the photograph, oblique is the preferred orientation of the grain shape.*



b

13c, 13d), la microstruttura è analoga a quella del campione 93, con porfiroclasti circondati da una matrice di quarzo ricristallizzato dinamicamente; qui è però presente nella parte centrale della sezione sottile un livello dello spessore di circa 4 mm a granulometria più fine, in cui la ricristallizzazione è stata completa ed i porfiroclasti sono del tutto assenti. La microstruttura del campione 91 è perciò meno omogenea rispetto a quella del campione 93.

In fig. 14 sono riportate le orientazioni degli assi c del quarzo nei campioni 91 e 93 misurate al tavolino universale. Nel campione 93 è stata misurata separatamente l'orientazione cristallografica dei porfiroclasti (fig. 14c) e dei granuli ricristallizzati presenti nell'immediato intorno dei porfiroclasti (fig. 14d). Nel campione 91 sono stati invece misurati i porfiroclasti (fig. 14a) ed i granuli presenti nel livello totalmente ricristallizzato (fig. 14b). In entrambi i campioni si osserva una diversa distribuzione degli assi c : i porfiroclasti hanno una distribuzione tipo «cross girdle» mentre i granuli più piccoli ricristallizzati dinamicamente hanno una distribuzione tipo «single girdle». L'orientazione degli assi c nei porfiroclasti presenta solo una debole asimmetria rispetto alla foliazione principale, nei granuli ricristallizzati invece questa asimmetria è più evidente. In entrambi i campioni viene confermato il senso di movimento verso W già dedotto da altri indicatori cinematici.

Generalmente questo tipo di variazione della distribuzione degli assi c nel quarzo (passaggio «cross girdle»-«simple girdle») viene osservata in miloniti avvicinandosi alla zona più deformata, cioè in prossimità della superficie di accavallamento oppure in corrispondenza della parte centrale di zone di taglio (LAW *et alii*, 1986). Questa transizione può venire interpretata come un aumento della componente di taglio semplice durante una deformazione progressiva, oppure come effetto di un aumento della deformazione durante taglio semplice (SCHMID & CASEY, 1986). In questo caso però la diversa orientazione degli assi c viene osservata all'interno del solito campione, implicando che anche alla scala della sezione sottile vi sono inomogeneità, con livelli deformati principalmente per taglio semplice e livelli invece deformati principalmente per taglio puro.

Microstrutture e tessiture in quarzo-miloniti con porfiroclasti in matrice a grana più fine sono state descritte da vari autori: alcuni non riscontrano una rilevante differenza tra l'orientazione cristallografica dei porfiroclasti e della matrice (Law, 1986), altri

invece (SAHA, 1989; KIRSCHNER & TEYSSIER, 1991; HIPPERTT & BORBA, 1992) descrivono distribuzione tipo «cross girdle» per i porfiroclasti e tipo «single girdle» per la matrice.

Negli esempi riportati da questi ultimi autori si tratta sempre di miloniti con una bassa percentuale di porfiroclasti rispetto alla matrice, indicante uno stadio molto avanzato di ricristallizzazione. Questo non è assolutamente il caso per il campione 93. Qui l'alta percentuale di porfiroclasti rispetto alla matrice indica che siamo all'inizio del processo di milonizzazione, ma nonostante questo i granuli ricristallizzati hanno ugualmente una distribuzione degli assi c tipo «single girdle».

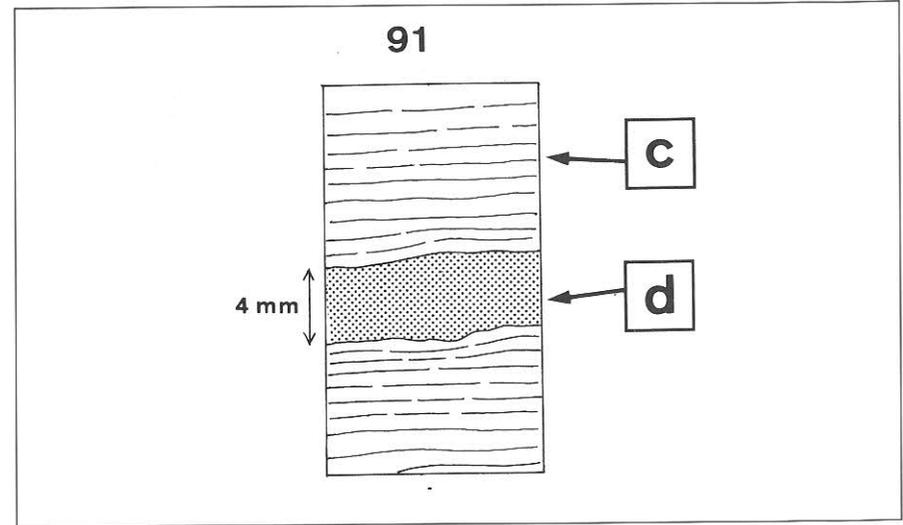
In base a queste considerazioni è possibile affermare che una distribuzione degli assi c tipo «single girdle» non è esclusivamente legata agli stadi finali di una deformazione milonitica, ma si può formare anche all'inizio del processo di milonizzazione. Si può supporre che appena la ricristallizzazione dinamica inizia, i porfiroclasti con orientazione non favorevole subiscano ricristallizzazione per rotazione originando nuovi granuli, se il tipo di deformazione è in questo istante essenzialmente per taglio semplice progressivo gli assi c nei nuovi granuli acquisiranno subito una distribuzione tipo «single girdle».

Ulteriori informazioni possono essere ricavate dagli stereogrammi di fig. 14. Nei due stereogrammi relativi ai granuli di dimensioni minori (fig. 14b e 14d) si può notare una differenza: il campione 93 ha il massimo alla periferia (assi c con giacitura orizzontale), mentre il campione 91 ha due massimi in posizione centrale (assi c con giacitura verticale e fortemente inclinata). La diversa distribuzione può essere spiegata con un'attività su diversi piani reticolari durante il processo di ricristallizzazione: si ha essenzialmente scivolamento sulle basi nel campione 93, scivolamento sui prismi e sui rombi per il campione 91. Il fatto che i due campioni provengano dallo stesso affioramento esclude però che sia la temperatura il parametro discriminante, come invece spesso osservato in condizioni sperimentali.

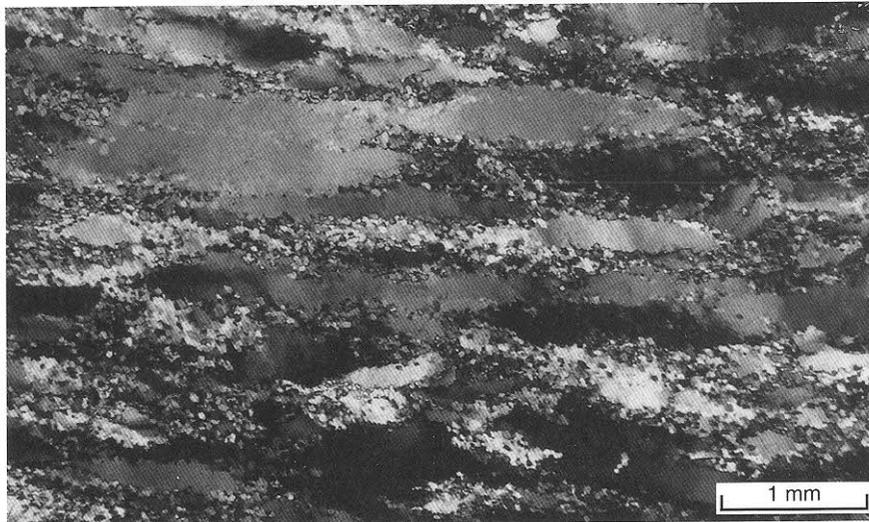
Quarzo-miloniti si ritrovano ancora più a E lungo la linea dello Zebrù e anche in questo caso, il quarzo ricristallizza per rotazione. Come già notato da Andreatta (1952), una zona milonitica si prolunga dall'area dello Zumpanell e prosegue fino in Val di Lasa; queste miloniti vengono qui considerate come strettamente legate ai movimenti lungo la Linea dello Zebrù. Lungo questa linea in Val di Lasa si sviluppano microstrutture caratteristiche di una deformazione di più alta tem-



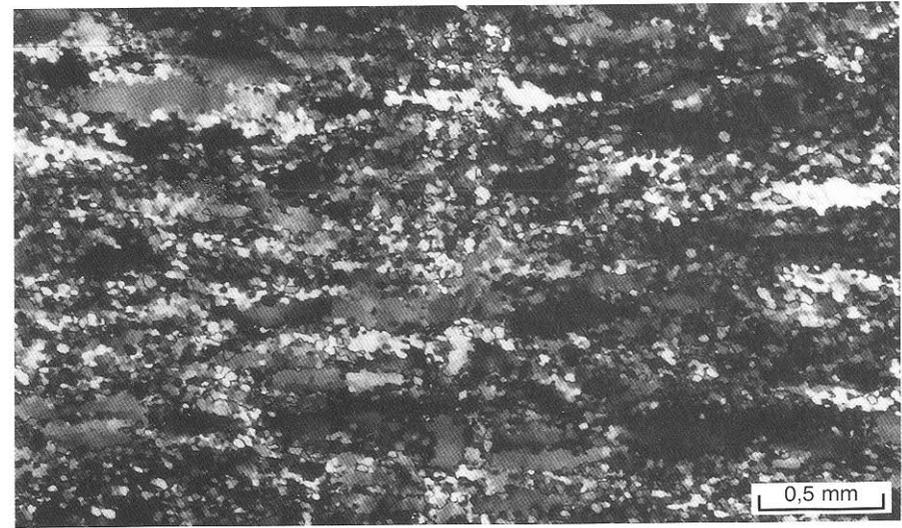
a



b



c



d

Fig. 13 - (a) Campione 93, Accavallamento dello Zembrù, Val Zembrù. Porfiroclasti di quarzo in una matrice formata da quarzo ricristallizzato dinamicamente. La foliazione milonitica (S_A) è parallela al lato lungo della foto, l'allungamento dei porfiroclasti è obliquo e definisce una seconda foliazione (S_B), E è sulla destra. (b) Microstruttura osservata nel campione 91, il dominio «c» rappresenta la porzione in cui sono presenti porfiroclasti e granuli ricristallizzati, il dominio «d» indica il livello completamente ricristallizzato dinamicamente. (c) Particolare del dominio «c» Campione 91, Accavallamento dello Zembrù, Val Zembrù. Porfiroclasti allungati parallelamente alla foliazione milonitica, E è sulla destra. (d) Particolare del dominio «d». Livello completamente ricristallizzato dinamicamente all'interno del campione 91.

- (a) Sample 93. Quartz mylonite from the Zembrù thrust. Quartz porphyroclasts in a dynamically recrystallized quartz matrix. S_A is the macroscopic mylonitic foliation, S_B is defined by the preferred orientation of elongated grain. E is on the right. (b) Sketch of a thin section from sample 91, Zembrù thrust, Val Zembrù. The «c» domain is characterized by quartz porphyroclasts in a dynamically recrystallized quartz matrix; in the «d» domain only recrystallized quartz grains are present. (c) Microstructure of the «c» domain. (d) Microstructure of the «d» domain.

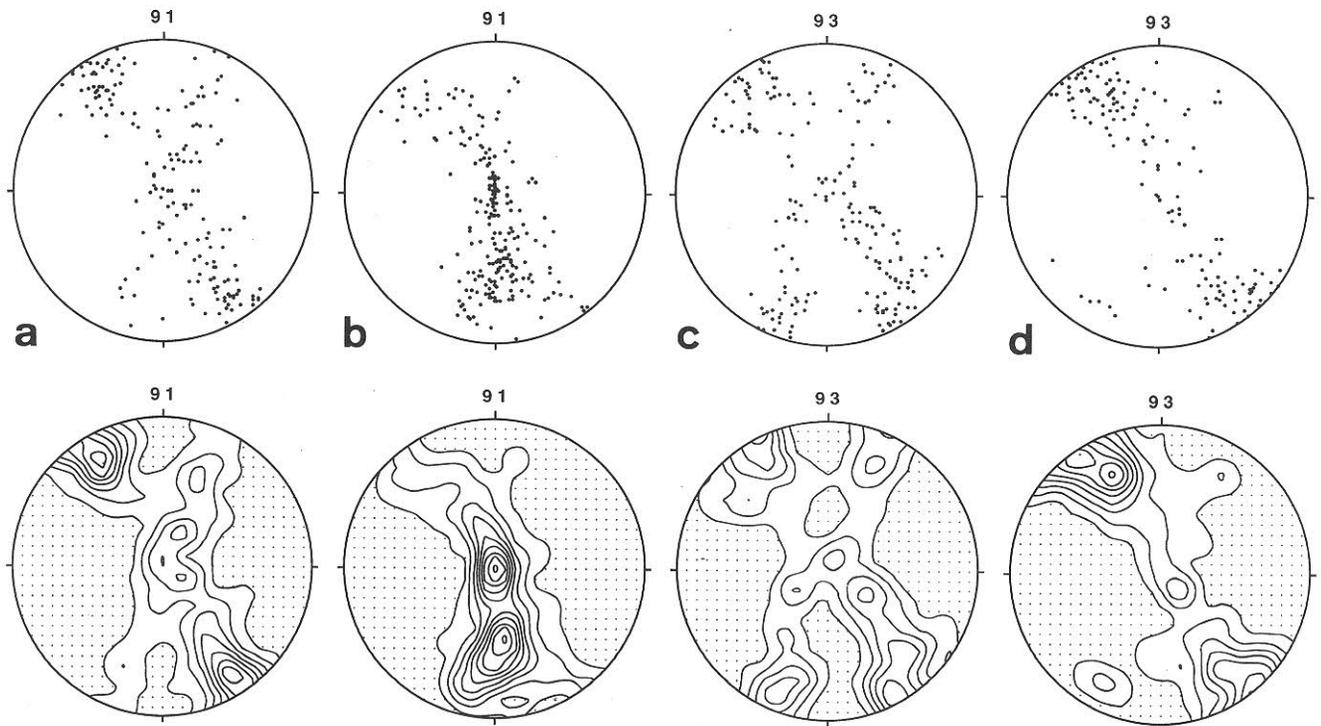


Fig. 14 – Orientazione degli assi c del quarzo nei campioni 91 e 93 misurati otticamente al tavolino universale (a-d) e relativi contour (in basso). In tutti gli stereogrammi la foliazione milonitica è verticale ed orientata E-W, la lineazione è orizzontale, E è a destra e W a sinistra. Il senso di taglio è sinistrale («top-W») per entrambi i campioni. Le isolinee negli stereogrammi con contour rappresentano multipli di una distribuzione uniforme. L'intervallo tra le varie isolinee è in tutti gli stereogrammi 1.0 volte la distribuzione uniforme, aree con valori inferiori a 0.5 sono rappresentate con un punteggiato (contour: 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, ...). (a) Campione 91, porfiroclasti, 168 misure, dominio «c» in fig. 13b. (b) Campione 91, granuli ricristallizzati dinamicamente, 216 misure, dominio «d» in fig. 13b. (c) Campione 93, porfiroclasti, 181 misure. (d) Campione 93, granuli ricristallizzati dinamicamente, 145 misure.

– Quartz c -axis textures optically measured on a universal stage from sample 91 and sample 93. Data are plotted on the lower hemisphere, equal area stereographic projections, with the foliation aligned vertically E-W and the lineation horizontal. E is on the right. A sinistral («top-to-the-west») sense of shear is inferred for both samples. The contours are multiples of a uniform distribution, the contour interval is 1.0. Areas with density less than 0.5 are stippled (0.5, 1.5, 2.5, 3.5, ...). (a) Sample 91, only porphyroclasts, 168 data, «c» domain of fig. 13. (b) Sample 91, recrystallized matrix, 216 data, «d» domain of fig. 13. (c) Sample 93, porphyroclasts, 181 data. (d) Sample 93, recrystallized matrix, 145 data.

peratura. Il quarzo mostra granuli di dimensioni maggiori ed evidenze di ricristallizzazione dinamica per migrazione del limite dei granuli (fig. 15); è possibile stimare perciò una temperatura di deformazione in quest'area maggiore di 400° C (WERLING, 1992). L'allungamento dei granuli rispetto alla foliazione principale indica ancora un senso di trasporto verso W.

Rimangono a questo punto da discutere le rocce affioranti lungo l'Accavallamento dello Zebrù nei pressi di Punta Alta/Hochleitenspitze nell'area dello Zumpanell (campioni 79 e 82 in fig. 10), dove importanti mineralizzazioni a magnesite (HAMMER, 1909; ANDREATTA, 1957; BURCKHARD, 1966) sono state sfruttate commercialmente in passato.

In quest'area lungo l'Accavallamento dello Zebrù sia la Dolomia Principale appartenente alla Fal-

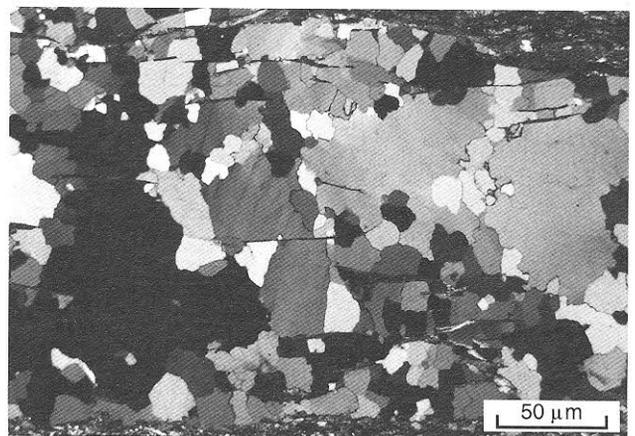


Fig. 15 – «Grain boundary migration» in quarzo-miloniti alpine in Val di Lasa. Falda di Campo, campione 134.

– Grain boundary migration in alpine quartz mylonite. Campo nappe, sample 134, Val di Lasa.

da dell'Ortles, sia il basamento cristallino della Falda di Campo, non presentano evidenze di deformazione plastica, ma la deformazione avviene principalmente per cataclasi. In fig. 16 sono riportate le microstrutture riconosciute nel basamento cristallino avvicinandosi progressivamente all'Accavallamento dello Zebrù. In fig. 16a si riconoscono grossi clasti di basamento completamente cataclastico, immersi in una matrice fine scura. Talvolta questi clasti mostrano al loro interno evidenze di una deformazione plastica precedente all'evento cataclastico, testimoniata dalla presenza di «grain boundary migration» nel quarzo. (fig. 16b). Avvicinandosi al contatto tettonico (fig. 16c, d) diminuisce la percentuale di frammenti di rocce del cristallino e aumenta quella della matrice. La matrice è composta da minerali a grana molto fine difficilmente risolvibili al microscopio, probabilmente sericite e materiale grafico.

Le microstrutture che si sviluppano nel basamento immediatamente a contatto con l'Accavallamento dello Zebrù possono venire interpretate come il risultato di reazioni e variazioni di fase che avvengono nella roccia durante un evento deformativo (WHITE & KNIPE, 1978). Durante i movimenti lungo l'Accavallamento dello Zebrù vi è stata sicuramente in quest'area un'importante circolazione di fluidi testimoniata dalle importanti mineralizzazioni. Questi fluidi dovevano produrre una diffusa alterazione nelle rocce del basamento, ricche in feldspati, originando così materiale sericitico. L'abbondanza di fillosilicati facilita, durante la deformazione, una localizzazione del movimento lungo tali livelli piuttosto che una deformazione plastica nel quarzo. In questo modo le miloniti formatesi negli stadi iniziali della deformazione possono venire cataclastate e si ritrovano ora solamente come clasti isolati. Cataclasi e scivolamento tra i granuli sono quindi il meccanismo deformativo principale, producendo ancora una variazione di volume e facilitando ulteriormente l'accesso di fluidi e la formazione di nuova sericite. Le zone a grana più fine rappresentano perciò livelli ove questo processo è più avanzato e dove si concentra maggiormente la deformazione.

Concludendo, l'Accavallamento dello Zebrù è un sovrascorrimento con senso di trasporto verso NW. In un profilo E-W è possibile osservare la transizione cataclasi-deformazione plastica nel quarzo. A W la cataclasi è il principale meccanismo deformativo operante, a E prevale invece la deformazione plastica. Questo implica un aumento verso E della temperatura durante la deformazione, come già osservato dalla distribuzione delle temperature del metamorfismo alpino.

4.2. — MICROSTRUTTURE E TESSITURE LUNGO L'ACCAVALLAMENTO TRUPCHUN-BRAULIO

Lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio, tra la Val Trupchun (a W) e la Valle del Braulio (a E) le litologie carbonatiche della Falda dell'Ortles (Formazione di Allgäu, Formazione di Kössen, Plattenkalk) vengono sovrascorse dalla Dolomia Principale della Falda di Quattervals e dalla Dolomia Principale appartenente alla Zona a scaglie dell'Umbrail-Chavalatsch (Scaglia dello Stelvio). Lungo questa parte dell'accavallamento si osserva un'intensa deformazione con formazione di cataclasi e calcite-miloniti nelle formazioni della Falda dell'Ortles (footwall), mentre la sovrastante Dolomia Principale rimane praticamente indeformata.

Lungo la parte più orientale dell'accavallamento, tra il Passo dello Stelvio e la Valle di Trafoi, non è stata osservata alcuna evidenza di deformazione plastica. Ciò è dovuto fatto che in questo tratto dell'Accavallamento Trupchun-Braulio sono a contatto la Dolomia Principale della Scaglia dello Stelvio (Zona a Scaglie dell'Umbrail-Chavalatsch) e la Dolomia Principale della Falda dell'Ortles, e la loro deformazione è essenzialmente cataclastica.

I campioni raccolti lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio e discussi in seguito sono riportati in fig. 10 ed in tab. 2.

4.2.1. — *Microstrutture e tessiture in rocce carbonatiche*

Sebbene numerosi siano i lavori sulle microstrutture osservate in rocce carbonatiche deformate, lo sviluppo di orientazioni cristallografiche preferenziali è stato studiato in rocce carbonatiche deformate sperimentalmente in laboratorio (TURNER *et alii*, 1956; WENK *et alii*, 1973; CASEY *et alii*, 1978; WAGNER *et alii*, 1982; KERN & WENK, 1983; SCHMID *et alii*, 1987; WENK *et alii*, 1987; DE BRESSER & SPIERS, 1993) e in misura molto minore in rocce deformate naturalmente (Wenk, 1985a; SCHMID *et alii*, 1987).

Tessiture complete di rocce carbonatiche deformate naturalmente non sono frequenti nella letteratura geologica; la maggiore parte degli autori riporta solo l'orientazione degli assi *c* o dei piani *a* e solo in pochi lavori sono riportate anche altre orientazioni cristallografiche (SCHMID *et alii*, 1981b; BEHRMANN, 1983; DIETRICH & SONG, 1984; HEITZMANN, 1987; SCHMID *et alii*, 1987; DE ROO *et alii*, 1992; ERSKINE *et alii*, 1993). I campioni descritti da questi autori provengono da assetti strutturali differenti (aree intensamente piegate, zone di taglio, superfici di accavallamento) e risultano deformati in condizioni molto diverse tra loro.

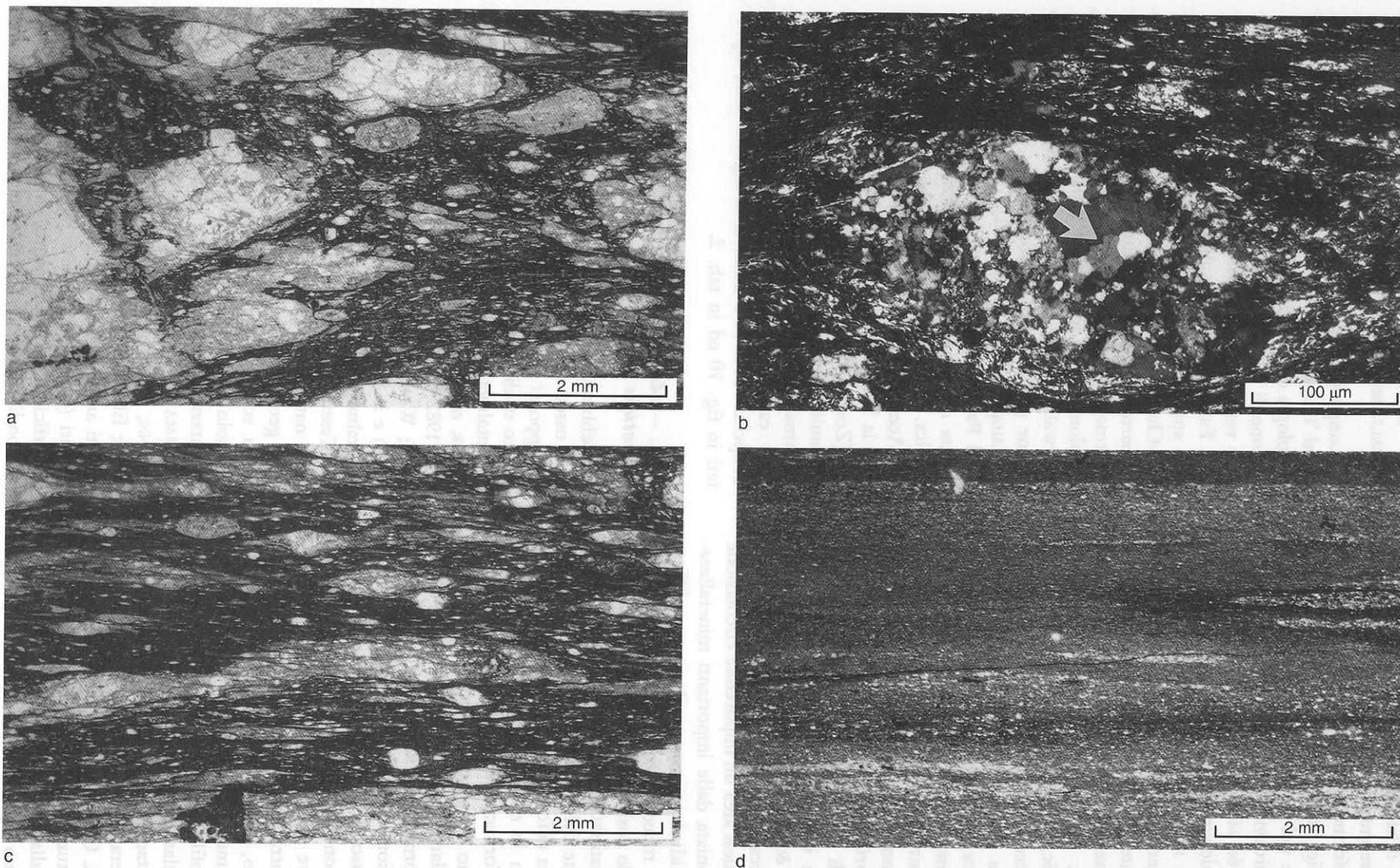


Fig. 16 – Cataclasiti lungo la Linea dello Zebrù nell'area dello Zumpanell. Si noti la variazione delle dimensioni dei clasti avvicinandosi alla superficie di accavallamento (a) Clasti di dimensioni millimetriche a circa 10 m dal contatto tettonico. Campione 82A. (b) I clasti rappresentano parti del basamento cristallino sottostante e parti di quarzo-miloniti alpine con quarzo ricristallizzato per «grain boundary migration» (indicato dalla freccia). Campione 82A (c) Clasti di dimensioni minori rispetto ad (a), a pochi metri di distanza dal contatto. Campione 79. (d) Cataclasite foliata lungo l'Accavallamento dello Zebrù. Campione 79A.

– *Cataclasites along the Zebrù thrust, Zumpanell. Note grain size reduction approaching to the thrust plane. (a) Sample 82A, 10 m below the thrust plane. Large clasts in a fine-grained matrix. (b) Clasts of the underlying Paleozoic basement and portion of alpine quartz mylonite (plastic deformation is testified by grain boundary migration in quartz, see arrow). (c) Small-size clasts near the thrust plane, sample 79. (d) Foliated cataclasite, sample 79A.*

TAB. 2 - *Campioni lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio*
- Sample along the Trupchun-Braulio thrust

Camp. n°	Località	Foliazione	Lineazione	Meccanismo deformativo (1)	θ (2)	ω° (3)	β° (4)
107	Val Trupchun	8/26		a (b)		-2°	
103	Valle Alpisella	3/60	295/24 *	b (c)	5°	-6°	-11°
102	Valle Alpisella	10/47		b (c)	20°	-4°	-24°
101	Valle Alpisella	28/58	281/4 *	b (c)	17°	+6°	-11°
33	Valle Alpisella	30/48		b (c)	0°	+5°	+5°
31	Valle Alpisella	28/48	289/20 *	c (b)	20°	+2°	-18°
109	Valle di Fraele	73/85	161/25	c (d)	non misurato	non misurato	non misurato
199	Valle Forcola	4/51	327/45	c (d)	0°	+18°	+18°
202	Valle del Braulio	24/11	311/3	c	0°	-11°	-11°
203	Valle del Braulio	32/7	312/2	c	0°	-14°	-14°

(*) Direzione ortogonale all'intersezione tra la superficie di accavallamento e la foliazione milonitica.

(1) Principale meccanismo deformativo operante, tra parentesi quello di minore importanza: a = Cataclasis, b = Pressure solution, c = Crystal plasticity, d = Viscous grain boundary sliding.

(2) Angolo tra la foliazione e la superficie di accavallamento.

(3) Orientazione degli assi ϵ rispetto alla normale alla foliazione (vedi fig. 23c).

(4) Orientazione degli assi ϵ rispetto alla normale alla superficie di accavallamento (vedi fig. 23c).

Lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio esiste la possibilità di effettuare osservazioni sulle microstrutture e sulle tessiture che si sviluppano in rocce carbonatiche in condizioni di temperatura crescente da W verso E. Di seguito vengono inizialmente descritte le microstrutture e quindi le tessiture osservate.

4.2.2. - *Microstrutture nelle cataclasi*

Per osservare gli effetti che la deformazione ha su rocce carbonatiche è molto importante considerare quale sia il materiale di partenza. In fig. 17a è riportato un tipico esempio di calcare indeformato della Formazione di Allgäu (wackestone) nella Falda dell'Ortles.

Rocce cataclastiche sono presenti lungo la Linea Trupchun-Braulio in Val Trupchun (campione 107, fig. 17b). Mentre la Dolomia Principale della Falda di Quattervals è indeformata, i calcari della Formazione di Allgäu della Falda dell'Ortles formano alcuni decimetri di cataclasi lungo il contatto. Il campione 107 è stato raccolto esattamente lungo la superficie di accavallamento. In sezione sottile (fig. 17b) si può notare come sia costituito esclusivamente da clasti carbonatici di forma arrotondata, alcuni derivanti da calcari micritici, altri composti da cristalli di calcite di grosse dimensioni rappresentanti probabilmente il riempimento di vecchie vene, altri infine formati da frammenti di vecchie cataclasi. Sulla base di quest'ultima osservazione

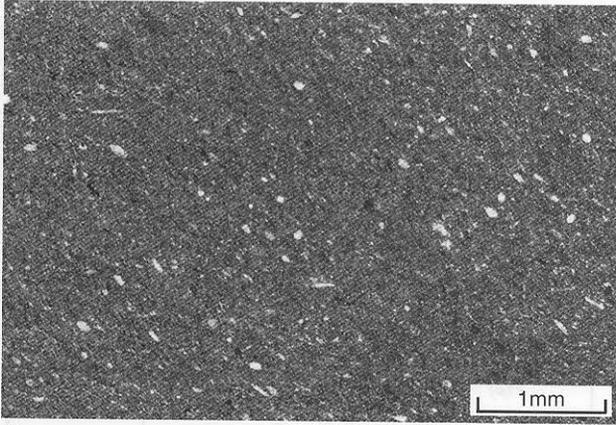
è possibile supporre che il movimento lungo la Linea Trupchun-Braulio sia stato discontinuo, con periodi di non attività che hanno permesso il consolidamento delle cataclasi precedentemente formatesi.

La presenza nelle cataclasi di superfici di dissoluzione, orientate E-W, conferiscono alla roccia una debole foliazione alla scala dell'affioramento (fig. 17b).

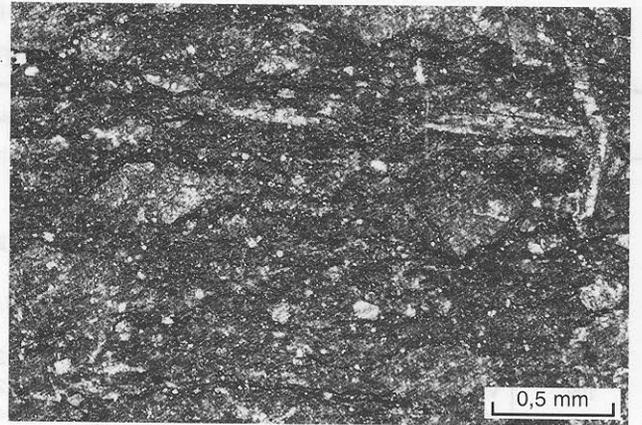
4.2.3. - *Microstrutture in calcite-miloniti*

Lungo la parte centrale della Linea Trupchun-Braulio, tra il Lago di Livigno (Valle Rossa) e il Passo dello Stelvio, affiorano calcite-miloniti. Le migliori esposizioni si hanno in Valle Alpisella, Valle Forcola e nella Valle del Braulio (fig. 10, tab 2).

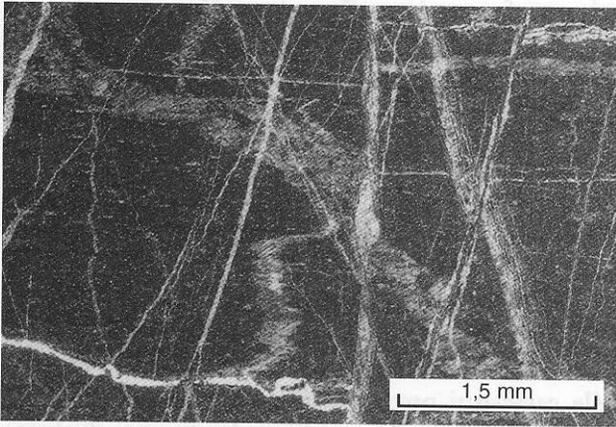
Al fine di studiare lo sviluppo di queste miloniti partendo dal materiale indeformato, è stato condotto uno studio di dettaglio sull'affioramento di Valle Alpisella (fig. 18a) da cui provengono i campioni 31, 33, 101, 102 e 103. I campioni 101, 31 e 33 sono stati raccolti in prossimità della superficie di accavallamento, gli altri (102 e 103) a distanza crescente, procedendo verso la roccia indeformata. In questo affioramento le calcite-miloniti hanno lo spessore di circa un metro e una foliazione ben evidente, inclinata in media di 20° rispetto alla superficie di accavallamento (direzione di trasporto verso W). Le microstrutture che si sviluppano in queste miloniti sono descritte partendo dal campione più distante dalla superficie di accavallamento ed avvicinandoci ad essa.



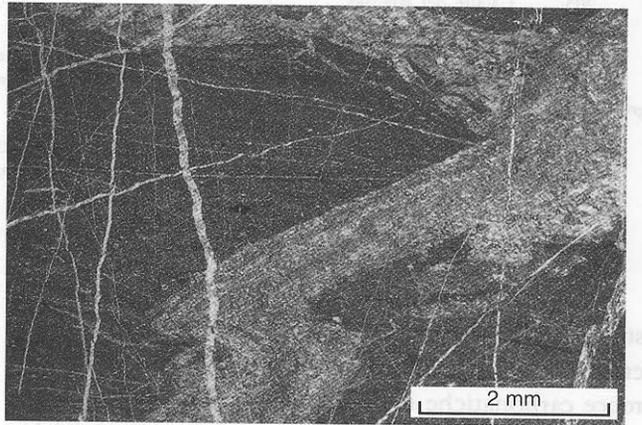
a



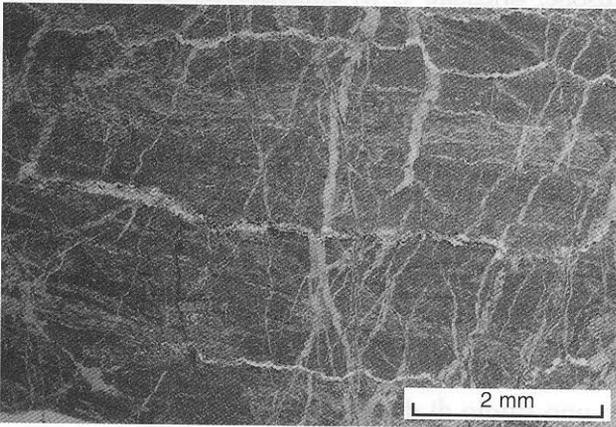
b



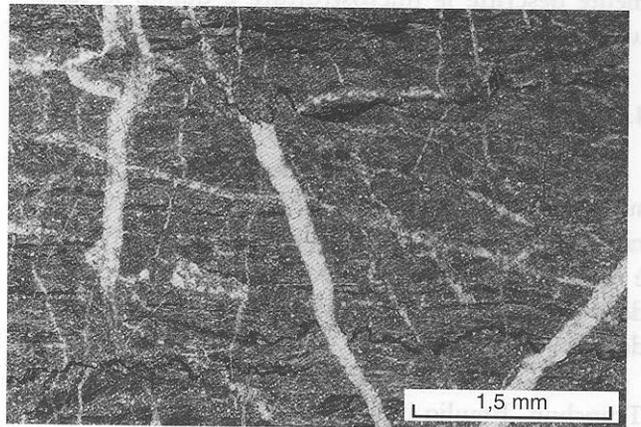
c



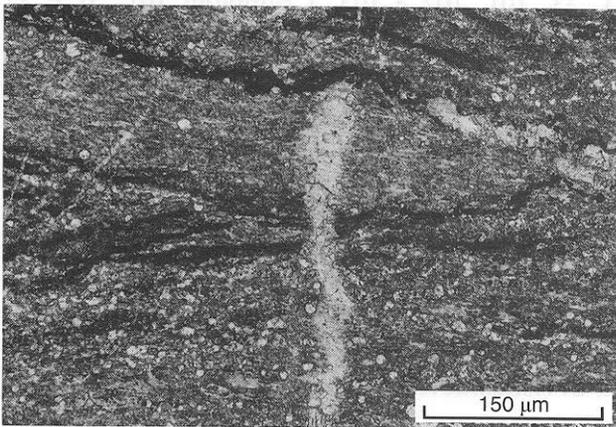
d



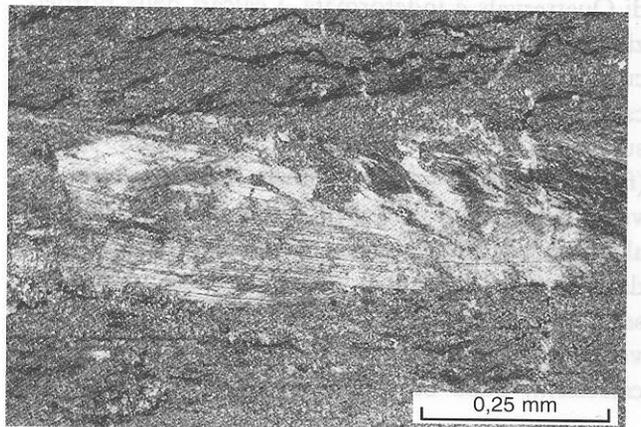
e



f



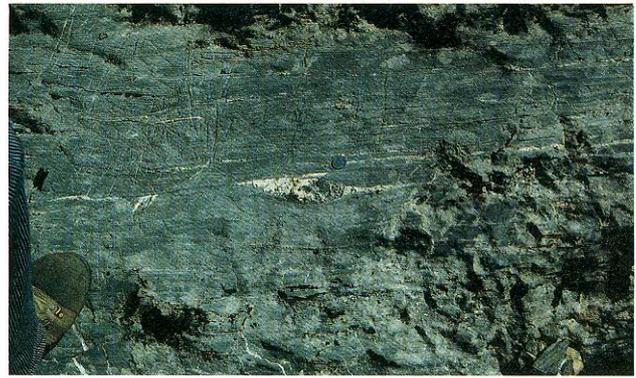
g



h



a



b

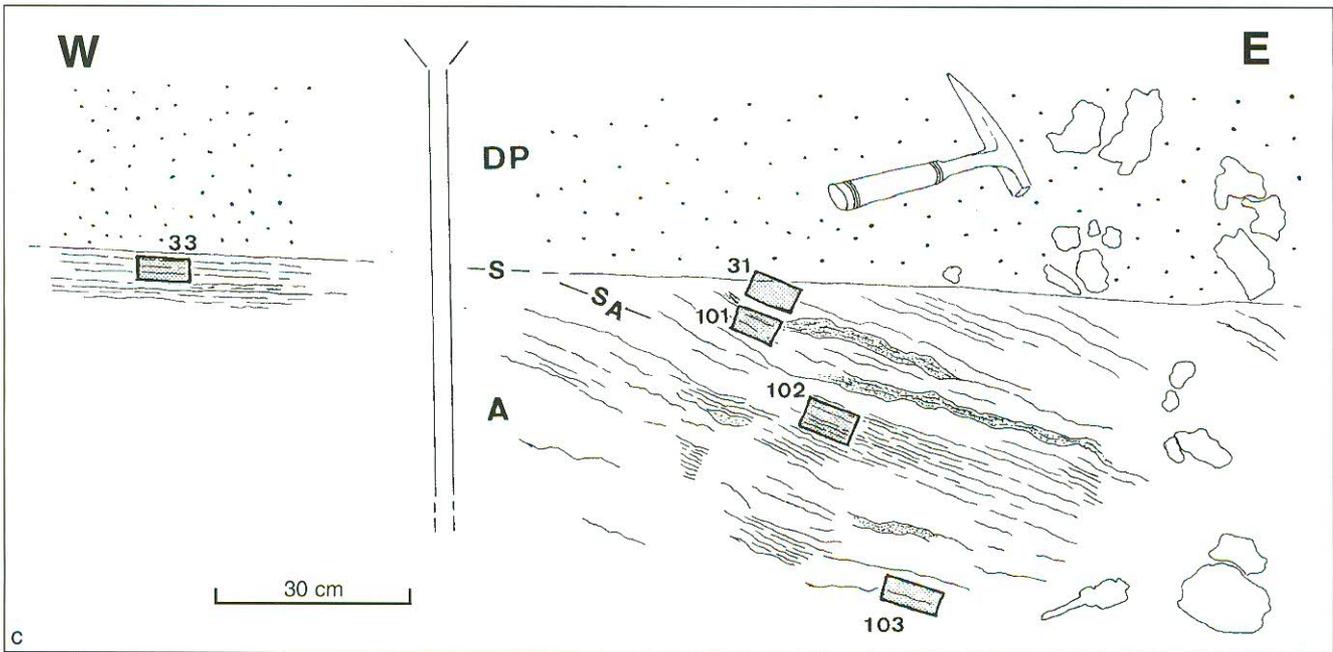


Fig. 18 - (a) Calcite-miloniti lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio, Valle Alpisella. La Dolomia Principale della Falda di Quaternals sovrascorre in questo affioramento con un contatto netto la Formazione di Allgäu della Falda dell'Ortles. (b) Calcite-miloniti lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio, Valle del Braulio. In prossimità di questo affioramento sono stati raccolti i campioni 202 e 203 (c) Disegno dell'affioramento in (a) con indicata la posizione in cui sono stati raccolti i campioni 103, 102, 101 e 31. È indicata schematicamente anche la geometria dell'affioramento adiacente, distante circa una decina di metri, in cui è stato raccolto il campione 33. La scala è la stessa per entrambi gli affioramenti. DP: Dolomia Principale della Falda di Quaternals, A: Formazione di Allgäu della Falda dell'Ortles.

- (a) Calcite mylonites from the Trupchun-Braulio thrust, Valle Alpisella. The Dolomia Principale/Hauptdolomit of the Quaternals nappe override along a sharp thrust plane the Allgäu Formation of the Ortler nappe. (b) Calcite mylonites from the Trupchun-Braulio thrust, Valle del Braulio. Near this outcrop are collected sample 202 and 203. (c) Drawing of the outcrop in (a), with position of the samples discussed in the text. DP: Dolomia Principale/Hauptdolomit of the Quaternals nappe, A: Allgäu Formation of the Ortler nappe.

Fig. 17 - (a) Calcare indeformato della Formazione di Allgäu, Membro di Trupchun, Valle Alpisella. (b) Cataclasite lungo l'Accavallamento Trupchun Braulio, campione 107, Formazione di Allgäu, Val Trupchun. (c) Campione 103, Valle Alpisella. La foliazione riconoscibile in campagna è parallela al lato lungo della foto. Si noti la presenza di varie generazioni di vene subortogonali alla foliazione. (d) Campione 103, Valle Alpisella. Le vene subverticali, più giovani, tagliano quelle più vecchie, piegate e riorientate parallelamente alla foliazione. (e) Campione 102, Valle Alpisella. (f) Campione 101, Valle Alpisella. (g) Campione 101, Valle Alpisella. Vene che tagliano e vengono tagliate dalle superfici di dissoluzione. (h) Campione 101, Valle Alpisella. Parte di una vena completamente trasposta lungo la foliazione (E-W nella foto).

- Undeformed limestone of the Allgäu Formation, Trupchun Member, Valle Alpisella. (b) Cataclasite along the Trupchun-Braulio thrust, sample 107, Allgäu Formation, Val Trupchun. (c) Sample 103, Allgäu Formation, Valle Alpisella. The macroscopic foliation is parallel to the long edge of the photograph. Note calcite veins perpendicular to the foliation. (d) Sample 103, Valle Alpisella. Younger veins are straight and perpendicular to the foliation, they cut older veins folded and reoriented parallel to the foliation. (e) Sample 102, Valle Alpisella. (f) Sample 101, Valle Alpisella. (g) Sample 101, Valle Alpisella. Calcite veins either cut the stylolitic seams (i.e. the macroscopic mylonitic foliation) and are cut by the stylolitic seams. (h) Sample 101, Valle Alpisella. Portion of an old calcite vein, now parallel to the mylonitic foliation.

Nel campione 103 (fig. 17c) si osservano diverse generazioni di vene riempite da calcite; i relativi rapporti di sovrapposizione indicano che le vene formatesi per ultime hanno un andamento rettilineo ed ortogonale alle superfici di dissoluzione che definiscono la foliazione macroscopica. Queste vene sono riempite da cristalli di calcite non deformati di dimensioni molto maggiori rispetto a quelli della matrice (fig. 19a, b); esse tagliano vene precedentemente piegate (fig. 17c, 17d), i cui cristalli di calcite risultano completamente geminati (fig. 19c), con formazione di subgrain lungo i piani di geminazione.

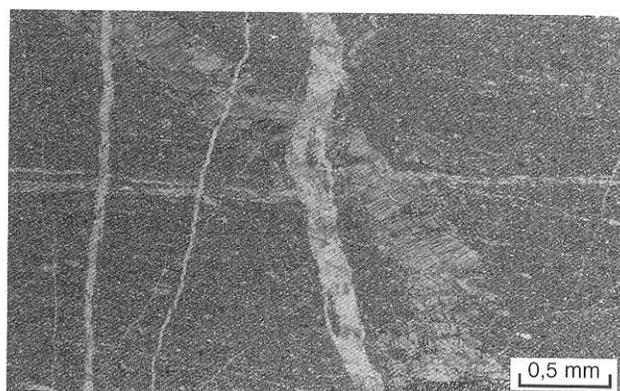
Avvicinandoci alla superficie di accavallamento (campioni 102 e 101, fig. 17e, 17f), i processi di dissoluzione e precipitazione («pressure solution») diventano sempre più importanti ed il volume di roccia rappresentato da vene diventa sempre maggiore rispetto alla matrice. In sezione sottile le superfici di dissoluzione che rappresentano la foliazione più evidente alla scala dell'affioramento sono tagliate ortogonalmente da vene o a loro volta le tagliano (fig. 17g); sulla base di questa evidenza è possibile affermare che il processo di dissoluzione lungo i giunti stilolitici avviene contemporaneamente alla precipitazione del materiale carbonatico in vene. In questi campioni si riconoscono spesso porzioni isolate di vecchie vene completamente trasposte lungo la foliazione (fig. 17h).

Nei campioni 31 e 33, raccolti lungo la superficie di accavallamento (fig. 20a, 20b), la percentuale di vecchie vene parallele alla foliazione è molto maggiore rispetto ai campioni precedenti. In alcuni punti esse rappresentano la quasi totalità della roccia (fig. 20c). Queste vene risultano completamente geminate, talvolta con formazione di subgrain lungo i piani di geminazione. Nel campione 33 (fig. 20d) la matrice della roccia è costituita da granuli di calcite ricristallizzati dinamicamente, non più dalla micrite originaria. Sulla base di queste osservazioni si può dunque affermare che lungo la superficie di accavallamento la deformazione plastica rappresenta il principale meccanismo deformativo, sebbene dissoluzione e precipitazione siano sempre presenti.

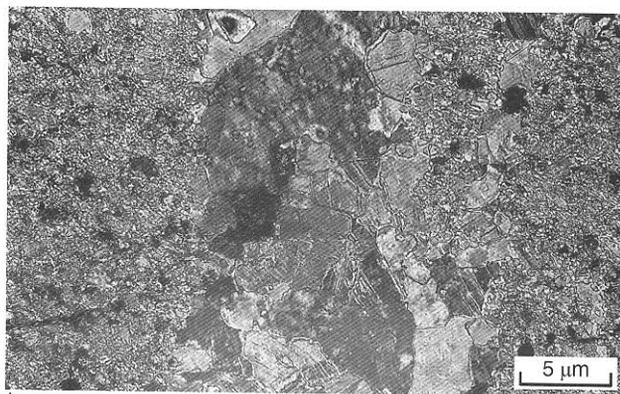
In conclusione l'affioramento di Valle Alpisella (fig. 18a) mostra la transizione da una zona a basso strain, in cui prevale «pressure solution» a una zona ad alto strain, in cui prevale ricristallizzazione plastica.

L'evidenza che dissoluzione e precipitazione avvengono contemporaneamente implica che il riempimento delle vene in prossimità dell'accavallamento sia derivato dalla dissoluzione della matrice circostante.

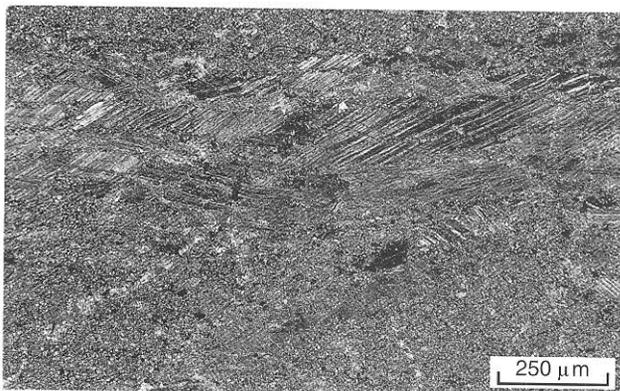
In prossimità della superficie di accavallamento la deformazione plastica prevale; i porfiroclasti di calcite nei campioni 31 e 33 non rappresentano per-



a



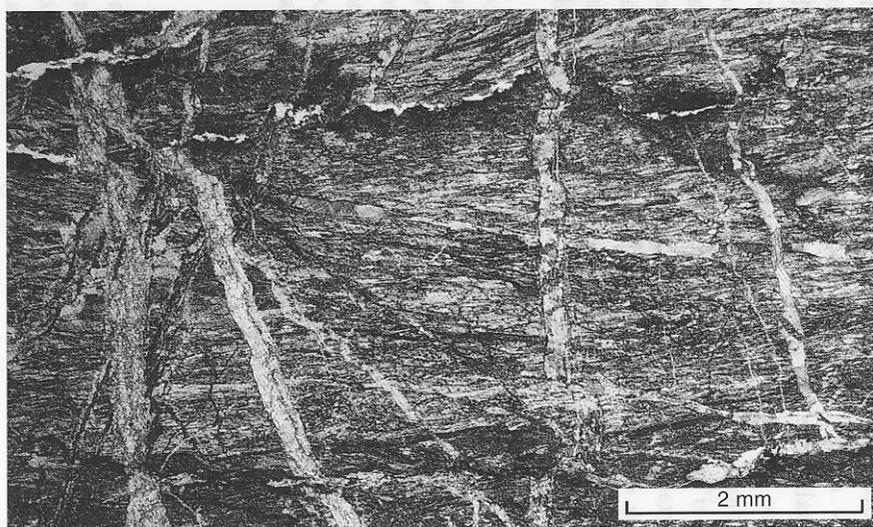
b



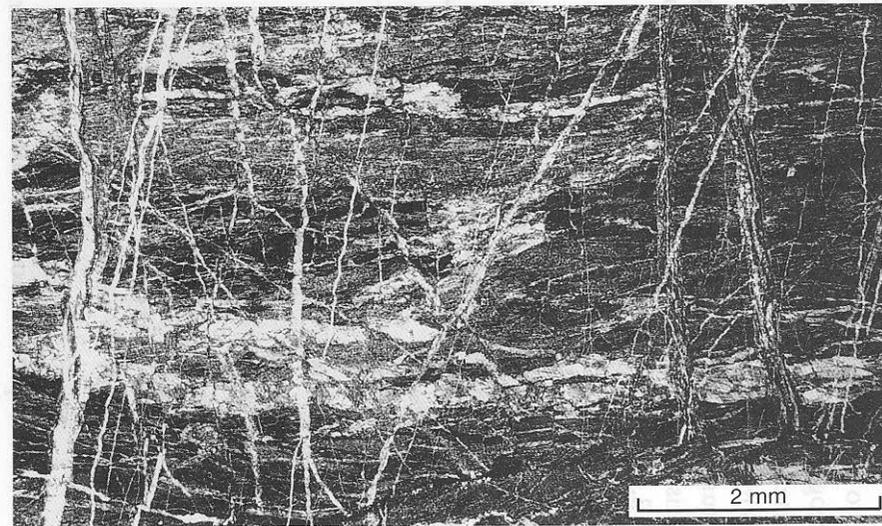
c

Fig. 19 – Calcite miloniti lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio. Campione 103, Valle Alpisella. Rapporti tra due generazioni di vene. (b) Campione 103, Valle Alpisella. Ultima generazione di vene, sub-verticali, indeformate. (c) Campione 103, Valle Alpisella. Vecchie vene completamente geminate e parallele alla foliazione milonitica.

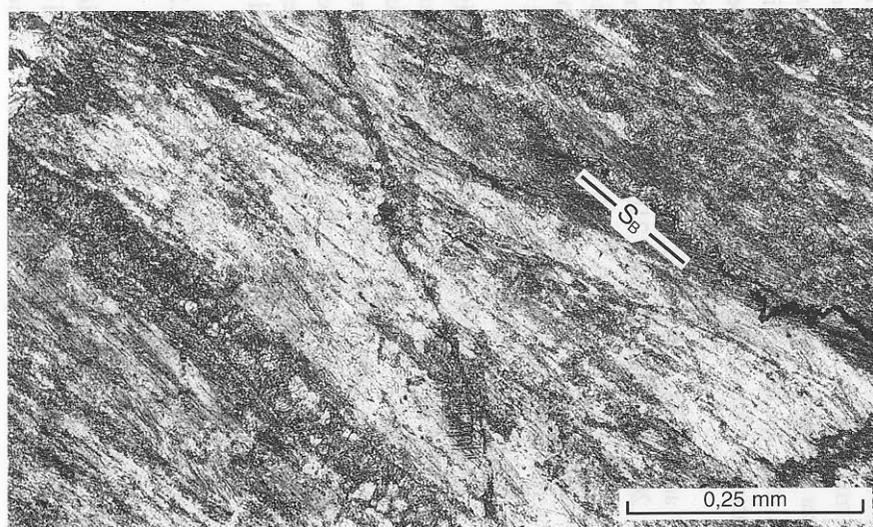
– Calcite mylonites from the Trupchun-Braulio thrust. (a) Sample 103, Valle Alpisella. Superposition of two veins. (b) Sample 103, Valle Alpisella. Younger veins, perpendicular to foliation and with no twinned crystals. (c) Sample 103, Valle Alpisella. Older veins are folded and rotated parallel to the mylonitic foliation, calcite crystal are now completely twinned.



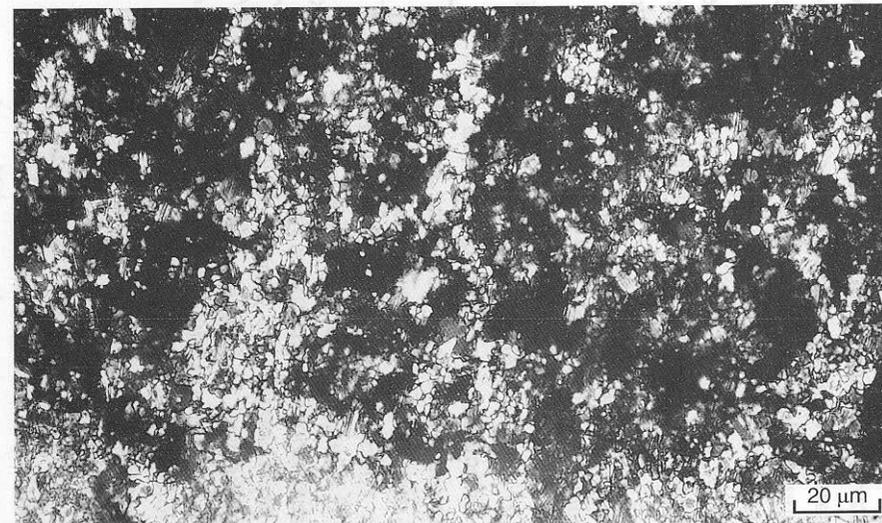
a



b



c



d

Fig. 20 – Calcite miloniti lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio. (a) Campione 31, Valle Alpisella. Dissoluzione e riprecipitazione sintettonica. (b) Campione 33, Valle Alpisella. Dissoluzione e riprecipitazione sintettonica. (c) Campione 31, Valle Alpisella. Vene di calcite completamente deformate e trasposte lungo la foliazione milonitica. (d) Campione 33, Valle Alpisella. Calcite ricristallizzata dinamicamente nella «matrice». La foliazione in questa foto è parallela al lato corto della foto.

– Calcite mylonites from the Trupchun-Braulio thrust. (a) Sample 31, Valle Alpisella, syntectonic pressure-solution. (b) Sample 33, Valle Alpisella, syntectonic pressure-solution. (c) Sample 31, Valle Alpisella. Calcite veins dynamically recrystallized and rotated parallel to the mylonitic foliation. (d) Sample 33, Valle Alpisella. Recrystallized matrix. Foliation is vertical, parallel to the short edge of the photograph.

ciò granuli originari (es. fossili) né sono il prodotto di una ricristallizzazione sintettonica o statica. Essi rappresentano parti di vene sintettoniche quasi completamente obliterate da vari processi di ricristallizzazione dinamica e completamente trasposte lungo la foliazione; lungo la superficie di accavallamento essi possono rappresentare la quasi totalità della roccia.

Più a E, in Valle di Fraele (campione 109, fig. 21a) e in Valle Forcola (campione 199, fig. 21b), l'Accavallamento Trupchun-Braulio è caratterizzato da calcite-miloniti a grana molto fine, con foliazione ben evidente e orientazione obliqua dei granuli rispetto alla foliazione principale. In queste miloniti non si osserva dissoluzione, né precipitazione, né geminazioni: la roccia è del tutto ricristallizzata dinamicamente. È interessante notare come nel campione 199 le dimensioni dei granuli e l'angolo che l'allungamento preferenziale dei granuli fa con la foliazione milonitica vari in funzione della percentuale di impurità presenti (grafite?) (fig. 21c). Dove vi è una maggiore concentrazione di impurità, le dimensioni dei granuli e l'angolo tra foliazione e allungamento dei granuli è minore rispetto ai livelli costituiti da calcite più o meno pura. Microstrutture di questo tipo sono state riconosciute anche in rocce polifasiche deformate sperimentalmente (Olgaard, 1990), e in questi casi si dimostra che la localizzazione della deformazione in determinati livelli è legata alla presenza di variazioni composizionali iniziali nella roccia, non ad un cambiamento dei meccanismi deformativi durante la deformazione sintettonica.

Ancora più ad oriente, in Valle del Braulio (campioni 202, 203, fig. 121d, 21e, 21f), lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio sono ancora presenti calcite-miloniti con foliazione milonitica ben sviluppata e orientazione obliqua dei granuli. A differenza dei campioni precedenti (109 e 199), in questo caso i granuli maggiori mostrano evidenze di un'intensa geminazione ed è presente una matrice a grana più fine completamente ricristallizzata. Il fenomeno della geminazione è posteriore rispetto alla foliazione milonitica e non oblitera del tutto l'allungamento preferenziale acquisito in precedenza dai granuli.

4.2.4. – Tessiture: metodologia di studio

Le tessiture presenti nelle calcite-miloniti descritte in precedenza sono state misurate con goniometro a raggi X; solo il campione 31 presenta porfiroclasti di dimensioni sufficienti per uno studio al

tavolino universale. Per le misurazioni a raggi X è stato utilizzato un goniometro Siemens D5000; lo stereogramma di ogni riflesso è il risultato della combinazione della misurazione in riflessione (fino a $\chi = 80^\circ$) ed in trasmissione (χ tra 80 e 90°). Tutte le tessiture misurate sono riportate in fig. 22; gli indici cristallografici dei piani misurati sono indicati in tab. 3.

TAB. 3 - *Principali sistemi di scivolamento nella calcite*

– Main slip systems in calcite

Sistema	Piano*	Direzione*	Molteplicità*
Geminati <i>e</i>	e {1018}	$\langle e:a \rangle \langle 40\bar{4}1 \rangle$	3
<i>r</i> slip	r {1014}	$\langle r:f \rangle \langle 2021 \rangle$	3
<i>f</i> slip	f {1012}	$\langle r:f \rangle \langle 0221 \rangle \langle 2201 \rangle$	6
<i>a</i> slip	a {1210}	$\langle r:f \rangle \langle 2021 \rangle$	3
basale	(0001)	$\langle a \rangle \langle 1120 \rangle$	3

* Notazione Miller-Bravais, cella strutturale esagonale.

In tutti i campioni sono state misurate sezioni tagliate ortogonalmente alla foliazione e parallelamente alla lineazione. Nel caso in cui la lineazione non era evidente, i campioni sono stati tagliati ortogonalmente alla foliazione e parallelamente alla direzione di trasporto, ottenuta come direzione perpendicolare all'intersezione tra foliazione e superficie d'accavallamento. Per i vari campioni è stato riportato in tab. 2 l'angolo che la direzione del massimo degli assi *c* fa con la normale alla foliazione e con la normale alla superficie di accavallamento. Per la definizione del segno di tali angoli si veda fig. 23c.

Nell'interpretazione delle tessiture viene assunto che il processo di dissoluzione e precipitazione non contribuisca allo sviluppo di orientazioni preferenziali. Lo studio al tavolino universale ha mostrato infatti che i cristalli di calcite presenti nelle vene non hanno alcuna orientazione preferenziale. Le tessiture misurate sono perciò originate da processi di geminazione o deformazione plastica.

4.2.5. – Tessiture in cataclasi

Negli stereogrammi di fig. 22 relativi al campione 107 è possibile osservare una debole tessitura. Si può affermare quindi che cataclasi non è l'unico meccanismo deformativo che ha agito nella roccia.

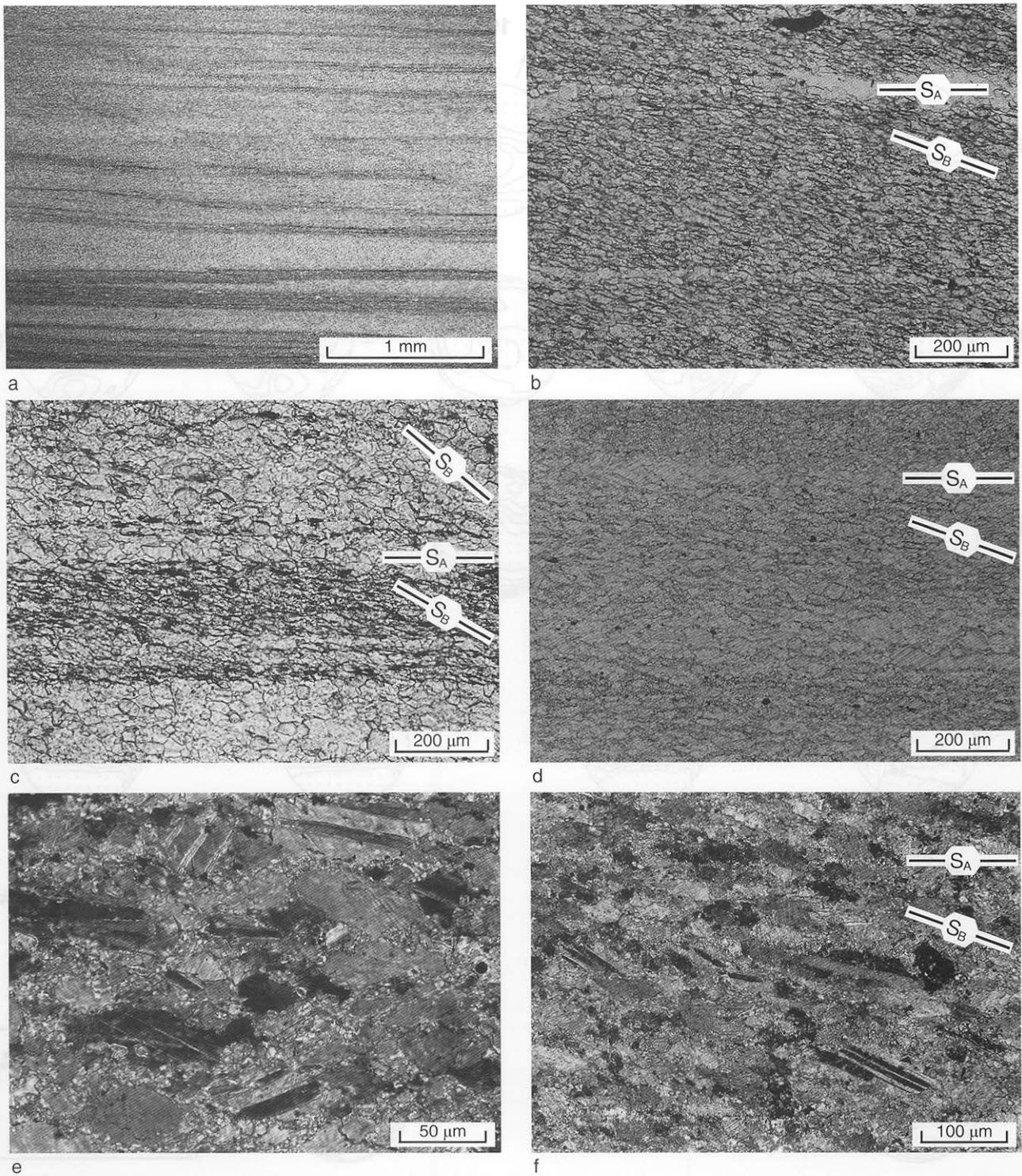


Fig. 21 - (a) Calcite-mylonite lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio. Campione 109, Valle di Frael. (b) Calcite-mylonite lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio. Campione 199, Valle Forcola. (c) Variazione della dimensione e della direzione di allungamento dei granuli con la percentuale di impurità presente. Campione 199, Valle Forcola. (d) Calcite-mylonite lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio. Campione 202, Valle del Braulio. Si noti anche in questo caso l'allungamento preferenziale dei granuli (S_B) obliquo rispetto alla foliazione milonitica principale (S_A). (e) Calcite-mylonite lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio. Campione 203, Valle del Braulio. (f) Campione 203, Valle del Braulio. Distribuzione bimodale delle dimensioni dei granuli, è presente una matrice costituita da cristalli di piccole dimensioni ricristallizzati dinamicamente mentre i cristalli di dimensioni maggiori risultano completamente geminati.

- (a) Calcite mylonite along the Thrupchun-Braulio thrust. Sample 109, Valle di Frael. (b) Calcite mylonite along the Thrupchun-Braulio thrust. Sample 199, Valle Forcola. (c) Grain size variation in calcite mylonites. Sample 199, Valle Forcola. Pure calcite layers are coarser in comparison with impurity rich (graphite, sericite, etc.) one. Note the different elongation direction of grains (S_B) in the coarse and fine layer respect to the mylonitic foliation (S_A). (d) Calcite mylonite along the Thrupchun-Braulio thrust. Sample 202, Valle del Braulio. S_B is the elongation direction of the dynamically recrystallized grains, oblique to the mylonitic foliation S_A . (e) Calcite mylonite along the Thrupchun-Braulio thrust. Sample 203, Valle del Braulio. (f) Sample 203, Valle del Braulio. Dynamically recrystallized fine grained matrix; and larger calcite grains, now quite completely twinned.

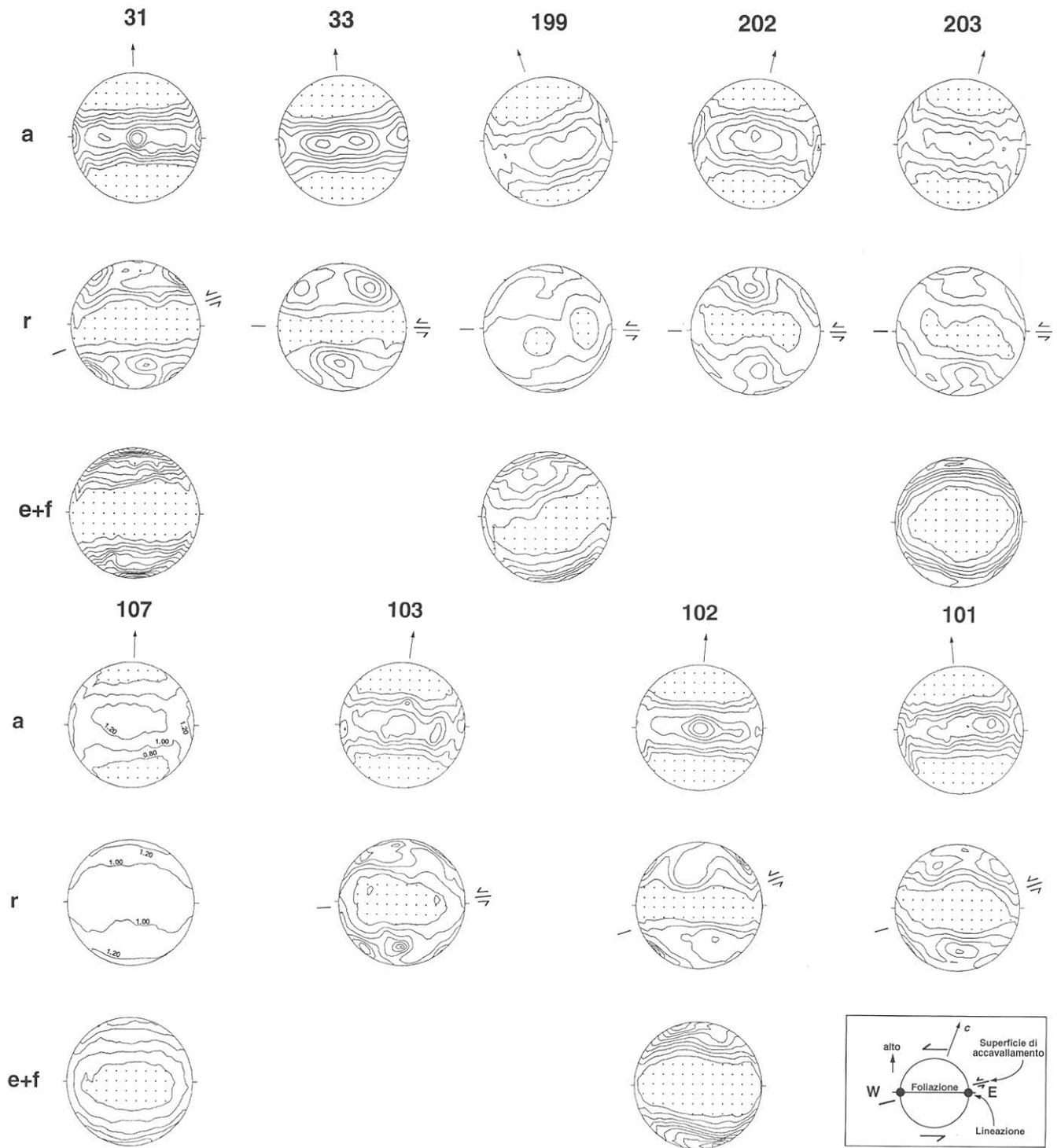


Fig. 22 – Tessiture in calcite-myloniti lungo la Linea Trupchun-Braulio. Per ogni campione è indicata la distribuzione dei piani *a*, dei piani *r* e per taluni campioni lo stereogramma combinato dei piani *e* ed *f*. Tutti gli stereogrammi sono proiezioni equiaree sulla semisfera inferiore, la direzione E-W corrisponde alla traccia della foliazione e la lineazione è orizzontale. Relativamente alle coordinate geografiche tutti gli stereogrammi sono orientati avendo Est a destra e Ovest a sinistra, il senso di taglio per tutti gli stereogrammi è sinistrale, l'orientazione della superficie di accavallamento relativamente alla foliazione è indicata dalla coppia di frecce. Le isolinee rappresentano multipli di una distribuzione uniforme. L'intervallo tra le varie isolinee è 0.2 volte la distribuzione uniforme, aree con valori inferiori a 0.8 sono rappresentate con un punteggiato (contour: 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, ...). La freccia riportata negli stereogrammi dei piani *a* indica la direzione del massimo degli assi *c* ricavato come direzione normale alla direzione del grande cerchio sul quale si disperdono i piani *a*.

– Measured textures (a planes, r planes, e + f planes) of calcite mylonites along the Trupchun-Braulio thrust. The contours are given in multiples of an uniform distribution, the contour interval is 0.2, stippled areas have a density of less than 0.8. Lower hemisphere, equal area projection. Foliation is E-W vertical, lineation E-W horizontal, E is on the right and W on the left. Arrows indicate the orientation of the thrust plane respect to the mylonitic foliation (see fig. 18). Shear sense is sinistral. The arrow in the a planes stereograms indicates the orientation of the c-axis maximum, derived as the normal to the a planes distribution.

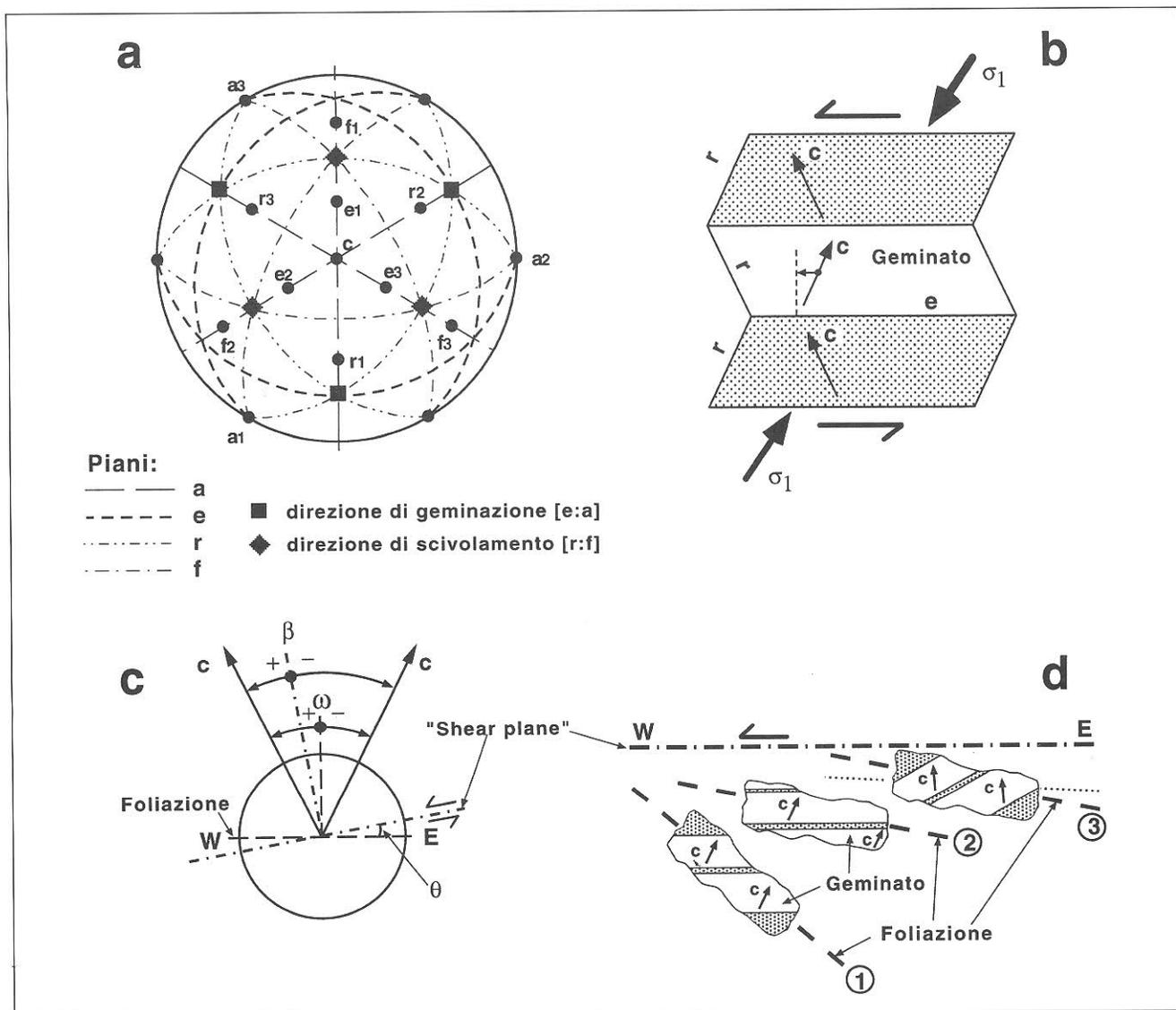


Fig. 23 - (a) Principali piani e direzioni cristallografiche nella calcite, (b) sezione attraverso un cristallo geminato di calcite parallelamente ai piani reticolari *a*. In grigio è rappresentata la parte indeformata con l'orientazione cristallografica originaria, al centro è la parte geminata. Si noti la riorientazione di *c* nella parte geminata nel senso opposto al senso di taglio applicato. Il vettore che unisce *c* nella parte geminata con la normale ai piani di geminazione *e* è stato usato per determinare il senso di taglio imposto ai singoli porfiroclasti del campione 31 (vedi fig. 26). (c) Definizione dell'angolo ω tra l'orientazione del massimo degli assi *c* e la normale alla foliazione e definizione dell'angolo β tra orientazione degli assi *c* e la normale alla superficie di accavallamento. L'orientazione degli assi *c* è determinata quale direzione ortogonale alla distribuzione dei piani *a*. Gli angoli sono considerati positivi in senso antiorario (assi *c* riorientati nella direzione del senso di taglio) e negativi in senso orario. (d) Orientazione di cristalli di calcite quasi completamente geminati relativamente alla superficie di accavallamento («shear plane»). La forma allungata dei granuli definisce la foliazione milonitica macroscopica. L'orientazione degli assi *c* nella parte geminata del cristallo (in bianco) nei vari casi è riportata. La situazione «1» rappresenta un caso in cui la foliazione si forma con un angolo di 40° con la superficie di accavallamento e in cui i piani di geminazione attivi sono paralleli alla superficie di accavallamento. In questa situazione gli assi *c* risultano ruotati nella direzione di trasporto se si prende come riferimento la foliazione milonitica. Nella situazione «2» la foliazione si forma con un angolo di soli 10° con la superficie di accavallamento, i piani di geminazione attivi sono ancora quelli paralleli alla superficie di accavallamento. In questo caso gli assi risultano orientati in senso contrario rispetto alla direzione di trasporto relativamente alla foliazione milonitica. Nella situazione «3» è rappresentata una successiva evoluzione di quanto rappresentato in «1». Al proseguire della deformazione il solito cristallo viene ruotato e il suo asse maggiore forma ora un angolo di 10° con la superficie di accavallamento. Se contemporaneamente la foliazione ruota più velocemente del porfiroclasto (orientazione rappresentata dalla linea punteggiata) rispetto ad essa gli assi *c* dei porfiroclasti risulteranno ortogonali.

- (a) Main crystallographic directions in calcite, (b) Section of a calcite crystal parallel to a planes. Gray is the host crystal, white the twinned volume. Note *c* axis reorientation opposite to shear direction due to twinning. Vector joining the *c* axis of the twinned part with the normal to *e* plane show the sense of shear during twinning (see fig. 26). (c) Definition of the ω angle between *c* axis maximum and normal to the thrust plane. *C* axis direction is inferred as the direction perpendicular to a planes distribution. Angle are positive in counterclockwise sense, i.e. in the shear direction. (d) Relationships between twinned calcite crystals and the thrust plane (=shear plane). The elongation direction of the grains defines the macroscopic mylonitic foliation. In position «1» the mylonitic foliation makes a high angle (40°) with the thrust plane and the *e* planes are parallel to the thrust plane. If the reference system is the foliation, the *c* axes result to be rotated against the shear direction. In position «2» foliation makes an angle of only 10° with the thrust plane and again the *c* axes result to be rotated against the shear direction. Position «3» results from position «1» only after a rigid counterclockwise rotation of the grain. In this case the *c* axes result to be rotated in the shear direction if the reference system is again the mylonitic foliation.

In questo campione infatti i poli dei piani a si distribuiscono su di un grande cerchio e il massimo degli assi c , ad esso ortogonale, si orienta perciò quasi perpendicolarmente alla foliazione, facendo un piccolo angolo (2°) rispetto alla normale alla foliazione.

La grana finissima del materiale non permette nessuna osservazione più precisa circa l'origine della tessitura. Non è possibile perciò stabilire se la debole orientazione si sia originata:

a) in seguito ad una deformazione sintettonica plastica nei cristalli che costituiscono la matrice;

b) dalla deformazione plastica dei soli cristalli di più grandi dimensioni, mentre il resto della roccia si deforma per cataclasi;

c) se sia dovuta ad un'isorientazione dei cristalli della matrice ricristallizzati in seguito a fenomeni di dissoluzione e precipitazione in un campo di stress orientato.

4.2.6. – *Tessiture in calcite-miloniti*

Nei campioni 31, 33, 101, 102 e 103 provenienti dal medesimo affioramento (fig. 18c), la foliazione milonitica è ben sviluppata e forma un angolo di 20° con la superficie di accavallamento; quest'ultima viene interpretata come la superficie lungo cui si ha avuto movimento (shear plane) durante la formazione delle calcite-miloniti. In questo affioramento siamo perciò nella situazione estremamente favorevole in cui conosciamo la direzione di movimento, il piano lungo cui questo movimento avviene e l'orientazione della foliazione milonitica. L'orientazione della superficie di accavallamento rispetto alla foliazione milonitica per i vari campioni è riportata negli stereogrammi relativi ai piani r in fig. 22; il diverso angolo nei vari campioni è attribuibile a locali variazioni dell'orientazione della superficie milonitica.

Osserviamo dapprima l'orientazione degli assi c nei campioni 103 e 102, raccolti a maggiore distanza dal contatto tettonico.

In entrambi i casi gli assi c sono orientati in senso opposto a quello di taglio presente, questa è una situazione comune in rocce carbonatiche deformate per geminazione (TURNER & WEISS, 1963; SCHMID *et alii*, 1981b; DIETRICH & SONG, 1984; SCHMID *et alii*, 1987; WENK *et alii*, 1987). Dall'analisi microstrutturale è però difficile affermare se tale processo sia stato attivo in tutto il volume della roccia. Si tratta infatti di rocce a grana molto fine e il processo di geminazione è molto influenzato

dalle dimensioni dei granuli: cristalli di grandi dimensioni possono venire facilmente geminati, mentre granuli di dimensioni minori si deformano attivamente scivolamenti su altri piani reticolari (r -slip, f -slip, a -slip) oppure usando altri processi deformativi intergranulari. La grande quantità di materiale carbonatico riprecipitato in vene è formato da cristalli di calcite che hanno dimensioni molto maggiori della matrice e possono quindi essere facilmente geminati. Essi contribuiscono allo sviluppo delle orientazioni preferenziali riconosciute. Durante il piegamento delle vene e la loro trasposizione lungo la foliazione, anche la matrice deve venire necessariamente deformata; data la granulometria molto fine è probabile però che essa si deformi con uno scivolamento di granulo su granulo con concomitanti fenomeni di diffusione, non partecipando così allo sviluppo di orientazioni cristallografiche preferenziali. Lo sviluppo delle tessiture dei campioni 103 e 102 viene interpretato perciò come l'effetto della deformazione plastica per geminazione su vene originatesi da fenomeni sintettonici di dissoluzione/precipitazione («pressure solution»).

Prendiamo ora in considerazione l'orientazione degli assi c nel campione 101. Nello stereogramma relativo è possibile osservare come in questo caso essi siano orientati nella direzione del senso di taglio: questo tipo di tessitura è classicamente spiegato invocando processi deformativi diversi da quello di geminazione (SCHMID *et alii*, 1987; WENK *et alii*, 1987; LAFRANCE *et alii*, 1994). Ciò è in contrasto con le osservazioni microstrutturali che indicano una situazione simile a quella dei campioni 103 e 102, con sicure evidenze di geminazione nei cristalli di calcite di grandi dimensioni. L'orientazione degli assi c contrasta perciò con le evidenze microstrutturali. Torneremo su questo problema più avanti.

Esaminiamo ora l'orientazione dei piani r , e , e f nei campioni 107, 103, 102 e 101 in fig. 22. I primi due mostrano una debole orientazione preferenziale di difficile interpretazione. Nel campione 102 i piani r mostrano tre massimi distinti, uno di intensità maggiore disposto orizzontale alla periferia e altri due di intensità minore nella parte centrale dello stereogramma. Nello stereogramma relativo ai piani e e f si può vedere inoltre come sia presente un massimo periferico. Dato il maggiore contributo di intensità dei piani c rispetto ai piani f durante una misurazione a raggi X, questo massimo viene interpretato come un massimo dei piani e . La fig. 24a mostra l'unica orientazione cristallografica possibile che soddisfa le osservazioni precedenti.

Essa è stata ottenuta ruotando tutti gli elementi cristallografici della calcite (vedi fig. 23a) fino a farli coincidere con i massimi effettivamente misurati. Con questa orientazione cristallografica si può vedere come i massimi r_2 e r_3 di fig. 24a corrispondano ai massimi presenti nello stereogramma di fig. 22 e come il piano di geminazione e_1 formi un angolo di circa 20° con la foliazione milonitica. Il piano di geminazione e_1 è dunque parallelo alla superficie di accavallamento. È perciò possibile interpretare la tessitura del campione 102 come dovuta ad una deformazione per geminazione; tale processo avviene attivando preferibilmente i piani e , originariamente paralleli alla superficie lungo cui avviene il movimento tettonico. L'assenza di un massimo dei piani r parallelamente alla superficie di accavallamento esclude scivolamenti lungo i piani r («*r-slip*»). Una tessitura analoga è osservata nel campione 101.

Il campione 33 è stato raccolto ad alcuni metri di distanza dai campioni 101, 102 e 103; la foliazione milonitica presente è questo caso parallela alla superficie di accavallamento. Si può perciò supporre che in questo caso l'angolo tra «*shear plane*» e foliazione sia prossimo a zero. Gli assi c sono subortogonali alla foliazione, ma leggermente ruotati nella direzione del senso di taglio ($\omega = +3^\circ$), negli stereogrammi relativi ai piani a ed ai piani r sono osservabili tre massimi ben distinti. Anche in questo caso si può supporre che la tessitura sia descrivibile

con una singola orientazione cristallografica preferenziale. In fig. 24b è riportata l'orientazione cristallografica preferenziale ricavata dalla tessitura del campione 33: nessuno dei tre massimi di r è esattamente posizionato alla periferia, facendo supporre che scivolamento lungo questi piani non sia il processo di deformazione principale in questo campione, allo stesso modo una rotazione degli assi c in senso positivo e la non posizione di un massimo dei piani e alla periferia esclude anche il processo di geminazione come processo principale di deformazione. In fig. 24b è possibile osservare come i tre massimi dei piani a siano localizzati su un grande cerchio subparallelo alla foliazione milonitica, con una differenza di orientazione rispetto alla foliazione di soli 3° . Un massimo dei piani a è ubicato esattamente alla periferia, in una posizione coincidente con la lineazione di estensione osservata. Il fatto che il piano ortogonale a c e contenente i tre massimi di a sia subparallelo alla foliazione e il fatto che un asse a sia parallelo alla lineazione rendono possibile l'interpretazione di questa tessitura ammettendo uno slip basale nella direzione «*a*»; sebbene «*a*» sia una possibile direzione di scivolamento nella calcite (PATERSON, 1979), evidenze di slip basale in tale direzione sono state riconosciute raramente, sia in condizioni sperimentali (GRIGGS *et alii*, 1960; SCHMID *et alii*, 1987; DE BRESSER & SPIERS, 1993), che in rocce deformate naturalmente (TURNER & OROZOCO, 1976).

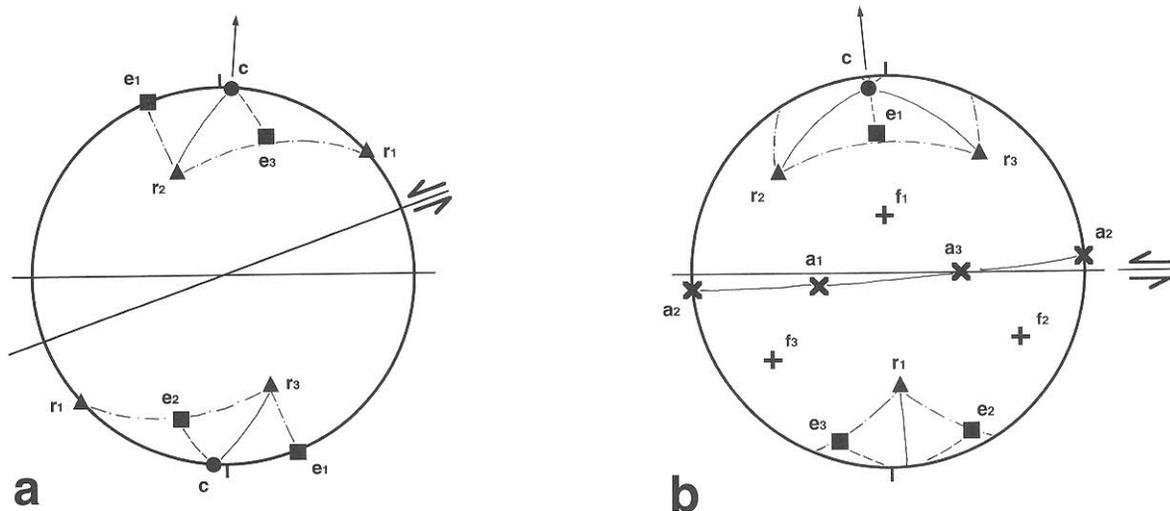


Fig. 24 - (a) Orientazione cristallografica preferenziale ricavata dalla tessitura del campione 102, rappresenta un'orientazione favorevole per geminazione lungo i piani e . Con le frecce è riportata l'orientazione della superficie di accavallamento rispetto alla foliazione effettivamente osservata sul terreno. (b) Orientazione cristallografica preferenziale ricavata dalla tessitura del campione 33, indica un'orientazione favorevole per scivolamento lungo le basi nella direzione a .

- (a) Crystallographic preferred orientation derived from the texture of sample 102. It is interpreted as the favoured crystal orientation for twinning along e planes. Arrows indicate orientation of the thrust plane respect to the mylonitic foliation, here vertical E-W. (b) Favoured crystallographic preferred orientation derived from texture of sample 33, indicating basis slip in the a direction as the main slip system operating.

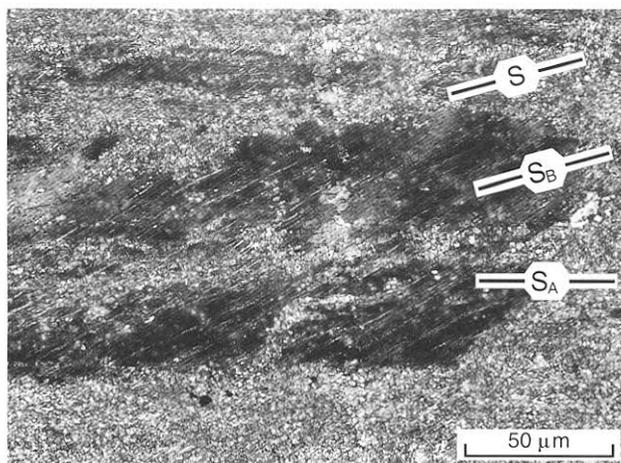
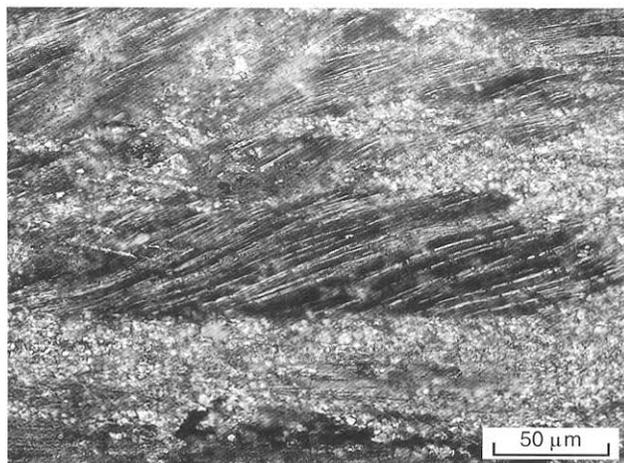


Fig. 25 - (a) e (b) Porzioni di vene sintettoniche di calcite completamente geminate e orientate parallelamente alla foliazione milonitica (S_A). Accavallamento Trupchun-Braulio, Valle Alpisella, campione 31. I piani e lungo cui avviene geminazione (S_B) immergono costantemente verso W, a sinistra nelle foto, S rappresenta l'orientazione della superficie di accavallamento.

- (a) and (b) Trupchun-Braulio thrust, Valle Alpisella, sample 31. Large calcite crystals of syntectonic veins now completely twinned and elongated parallel to the mylonitic foliation (S_A). e planes (S_B in the photo) are left-dipping, namely toward the W in actual geographical coordinates. S is the orientation of the thrust plane.

La tessitura del campione 31 invece non può essere descritta con una singola orientazione cristallografica: la distribuzione dei piani a è parallela alla foliazione e i piani r ed $e+f$ mostrano massimi alla periferia dello stereogramma. La microstruttura è composta da porfiroclasti di dimensioni maggiori di $100\ \mu\text{m}$, completamente geminati, in una matrice a grana estremamente fine. Analogamente a quanto già osservato precedentemente, i porfiroclasti sono verosimilmente porzioni di vecchie vene, mentre la matrice rappresenta almeno in parte il risultato della ricristallizzazione dinamica delle vene stesse e della micrite originaria. Nei porfiroclasti maggiori sono più evidenti le tracce dei piani di geminazione (fig. 25): l'angolo che essi formano con l'asse c è quasi sempre prossimo a 26° : si tratta perciò di geminati e . In sezione sottile è possibile osservare come in tutti i porfiroclasti i piani di geminazione immergano sempre verso W; questa osservazione permette di affermare che i cristalli sono stati sottoposti al processo di geminazione in condizioni deformative non coassiali (taglio semplice). Il senso di taglio cui sono stati sottoposti i porfiroclasti è stato determinato con il metodo di DIETRICH & SONG (1984) (fig. 26). Contrariamente a quanto proposto da questi autori, i vettori in fig. 26 uniscono c nella parte geminata del cristallo con il polo del relativo piano e (fig. 23b); trattandosi di cristalli completamente geminati, è risultato così più facile determinare al tavolino universale l'orientazione di c nella parte geminata che non nella parte non geminata del cristallo. Il risultato è coerente con il senso di

trasporto verso W dedotto dagli altri indicatori cinematici. Se consideriamo l'orientazione della sezione sottile rispetto alla superficie di accavallamento (fig. 18c, fig. 25b), si può vedere come la foliazione formi un angolo di circa 20° con quest'ultima, ciò significa che superficie di accavallamento e piani di geminazione sono subparalleli. Questo subparallelismo può essere spiegato supponendo che il processo di geminazione abbia potuto interessare completamente granuli («*twin boundary migration*») in cui una serie di piani e erano favorevolmente orientati rispetto a S_1 e cioè parallelamente alla superficie lungo cui si ha movimento. Nei granuli in cui i piani e non erano favorevolmente orientati rispetto a S_1 non c'è stata geminazione, ma invece formazione precoce di subgrain e ricristallizzazione dinamica.

Sulla base di tutte queste osservazioni, possono essere fatte alcune considerazioni di carattere generale che ci possono aiutare nell'interpretazione della tessitura dei campioni 101 e 31. In entrambi i casi, la microstruttura indicherebbe una deformazione per geminazione, mentre la riorientazione di c nel senso di taglio farebbe supporre un altro tipo di deformazione plastica. La deformazione di rocce carbonatiche alla base della superficie di accavallamento produce granuli di grandi dimensioni (porfiroclasti) con forma allungata che definiscono la foliazione macroscopicamente visibile, obliqua rispetto alla superficie di accavallamento. Questi granuli sono stati completamente geminati attivando i piani e con un'orientazione subparallela alla direzione di accavallamento. Gli assi c dei porfiroclasti risulteranno

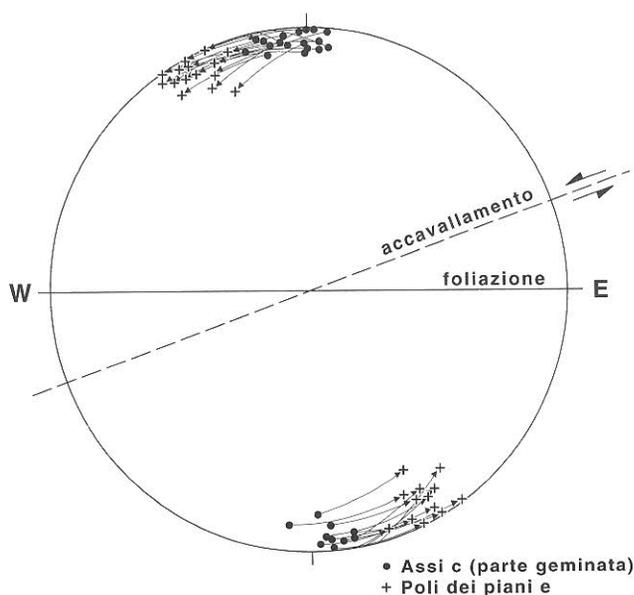


Fig. 26 – Determinazione del senso di movimento lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio utilizzando il metodo di DIETRICH & SONG (1984) sui porfiroclasti geminati del campione 31 (fig. 25). I punti rappresentano l'orientazione degli assi c nella parte geminata, le croci rappresentano i poli dei piani di geminazione e . Differentemente rispetto alla procedura indicata da DIETRICH & SONG (1984), le misurazioni sono state effettuate nella parte geminata. In questo caso il vettore che unisce l'asse c del porfiroclasto con il polo del piano e lungo cui è avvenuta la geminazione rappresenta il senso di taglio cui è stato sottoposto il singolo porfiroclasto. Nel campione esaminato tutti i porfiroclasti risultano essere stati geminati durante un movimento sinistrale, cioè «top-W».

– Results of the DIETRICH & SONG (1984) method to deduce the sense of shear from twinned porphyroclasts. Sample 31. For each calcite grain the orientation of the c axis of the twinned part (crosses) and the orientation of the e plane (square) is measured with an universal stage microscope. Different from DIETRICH & SONG method, measures of the c axis are here made in the twinned part of the crystal, not in the host. The sense of shear is therefore given by the vector that goes from the c axis to the pole of the e plane. All the measured porphyroclasts show a «top-to-the-W» shear sense.

riorientati nella direzione opposta al senso di taglio solamente se si assumono come superfici di riferimento i piani di geminazione e (fig. 23d); se invece si assume come superficie di riferimento la foliazione milonitica, la situazione può cambiare a seconda dell'angolo che tale foliazione fa con la superficie di accavallamento. Se l'angolo è grande ($> 26^\circ$, caso 1 in fig. 23d) gli assi c nella parte geminata dei cristalli di calcite appariranno ruotati in senso antiorario, cioè nella direzione del senso di taglio; se l'angolo più piccolo (caso 2 in fig. 23d), gli assi risulteranno riorientati in senso opposto a quello di taglio, cioè orario.

Un'altra complicazione è rappresentata dalla possibilità che i porfiroclasti vengano passivamente ruotati durante la deformazione. Il processo di geminazione per ragioni cristallografiche può accomodare solo una piccola parte dello strain applicato ($\gamma_{\max} = 0.69$), il resto deve necessariamente originare fenomeni di ricristallizzazione dinamica. È perciò probabile che i porfiroclasti ruotino durante un processo deformativo, mentre la ricristallizzazione dinamica interessa solamente la parte esterna del cristallo e la matrice (la geometria risultante è schematizzata in fig. 23d, porfiroclasto in posizione 3). Il porfiroblasto è geminato durante gli stadi iniziali della deformazione ed i piani di geminazione e sono orientati parallelamente alla superficie di accavallamento (orientazione 1): successivamente è ruotato passivamente e assume l'orientazione 3. A questo punto, i piani di geminazione risulteranno più inclinati della superficie di accavallamento. È interessante notare come anche nel caso 3 gli assi c siano orientati nella direzione del senso di

taglio se si prende come riferimento la foliazione milonitica. Un piccolo angolo tra l'orientazione dei piani di geminazione e la superficie di accavallamento è osservabile anche nel campione 31 (fig. 25b).

Si può perciò dedurre che tessiture con assi c orientati nella direzione di σ_1 siano sicuramente indicative di una deformazione per geminazione, mentre tessiture con assi c orientati nel senso di taglio rispetto alla foliazione milonitica non siano necessariamente il prodotto di una deformazione plastica con attivazione di diversi sistemi di scivolamento. Tali tessiture possono essere dovute alla presenza di cristalli geminati in un momento in cui la foliazione milonitica era disposta a grande angolo rispetto alla superficie di accavallamento (o ai limiti della zona di taglio) (fig. 23d, posizione 1).

Vediamo ora le tessiture che si sviluppano in settori più orientali dell'Accavallamento Trupchun-Braulio. Come abbiamo già discusso, l'aumento di temperatura durante la deformazione fa sì che la ricristallizzazione dinamica obliteri ogni microstruttura precedente. Sul terreno la foliazione milonitica è parallela alla superficie di accavallamento: si può perciò assumere che la foliazione sia anche la superficie di scivolamento. La tessitura non può essere descritta in questo caso (campione 199) con un'unica orientazione cristallografica: i granuli non possiedono la solita orientazione cristallografica preferenziale e diversi sistemi di scivolamento vengono utilizzati durante la deformazione. Gli assi c formano un grande angolo ($\omega = +16^\circ$) rispetto alla normale alla foliazione, tale orientazione è tipica per

tessiture in cui si ha scivolamento sulle basi nella direzione «a» (SCHMID *et alii*, 1987). Se prendiamo in considerazione i piani r si vede come essi si dispongano parallelamente alla foliazione milonitica; è possibile perciò dedurre che lo scivolamento su r sia ugualmente importante in queste miloniti. La mancanza di informazioni sugli altri elementi cristallografici rende difficile una discussione più precisa dei sistemi di scivolamento utilizzati in questo campione, ma si può sicuramente escludere una deformazione per geminazione.

A questo punto prendiamo in considerazione due campioni (202 e 203) raccolti ancora più a E, nella Valle del Braulio.

È già stato notato in precedenza come in questi campioni il processo di geminazione si sovrappone durante le fasi finali della deformazione su una microstruttura derivante da ricristallizzazione dinamica. In entrambi i campioni le tessiture misurate risultano quelle tipiche di una deformazione per geminazione, gli assi ϵ sono ruotati in senso opposto rispetto alla direzione di trasporto e i piani r mostrano la distribuzione già osservata per il campione 102 con un massimo di r alla periferia e due massimi nel centro dello stereogramma, simmetrici rispetto al piano di geminazione (fig. 24a). Questo è il tipo di tessitura più comunemente riportato in letteratura e già discusso da SCHMID *et alii* (1987): le microstrutture indicano una ricristallizzazione dinamica con rotazione e ricristallizzazione, mentre le tessiture indicano invece solo geminazione. È verosimile che la roccia abbia precedentemente subito ricristallizzazione dinamica e solo negli stadi finali una deformazione per geminazione. La geminazione è legata perciò agli ultimi movimenti lungo la Linea Trupchun-Braulio ed oblitera completamente ogni tessitura precedente. Il fatto che il processo di geminazione non introduca importanti distorsioni nella forma esterna dei granuli fa sì che le vecchie microstrutture siano ancora localmente conservate (foliazione milonitica, allungamento obliquo dei granuli, ecc.).

Sulla base dello studio microstrutturale e tessiturale compiuto è perciò possibile affermare che l'Accavallamento Trupchun-Braulio è un accavallamento con senso di trasporto verso NW. In un profilo NE-SW è possibile osservare la transizione cataclasi-deformazione plastica nelle calcite-miloniti che si sviluppano lungo di esso. A W la cataclasi è il principale meccanismo deformativo operante, a E prevale invece la deformazione plastica. Questo implica, come già osservato per

l'Accavallamento dello Zebrù, un aumento verso E della temperatura durante la deformazione D1 alpina.

In un affioramento alla base dell'Accavallamento Trupchun-Braulio in Valle Alpisella è stato possibile osservare il progressivo sviluppo di calcite-miloniti partendo dalla roccia indeformata. Avvicinandosi alla superficie di accavallamento si osserva inizialmente solo dissoluzione e precipitazione del materiale carbonatico in vene. Allo stesso tempo le vene vengono deformate in modo plastico e trasposte parallelamente alla foliazione milonitica. Il processo di dissoluzione, precipitazione e deformazione delle vene precedentemente formatesi aumenta progressivamente di importanza avvicinandosi al contatto tettonico. Immediatamente alla base dell'accavallamento le rocce milonitiche sono costituite quasi esclusivamente da vene sintettoniche successivamente deformate. In questo punto la deformazione plastica è il meccanismo deformativo più importante.

Il cambiamento del meccanismo deformativo principale avvicinandosi al contatto tettonico è probabilmente indotto dalla variazione di granulometria e dalla diminuzione del volume interstiziale che si produce con il meccanismo di dissoluzione e rideposizione: tale processo può avere luogo infatti fino a quando nella roccia è presente una buona percentuale della matrice originaria a grana molto fine. Quando invece la maggiore parte della roccia è formata dai cristalli di grandi dimensioni (vecchie vene), lo stress applicato è accomodato dalla deformazione plastica con ricristallizzazione sintettonica delle vene.

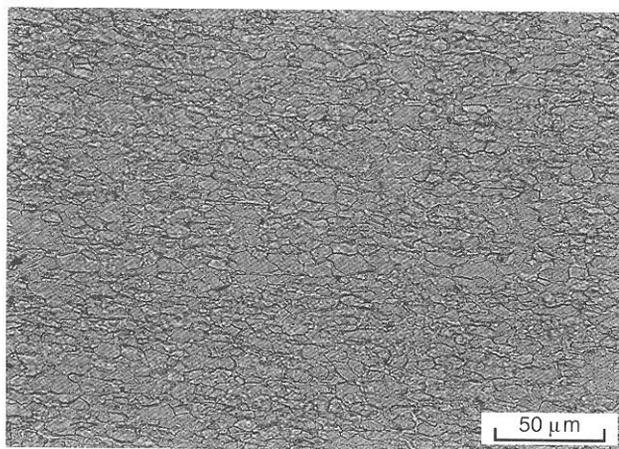


Fig. 27 – Dolomite-miloniti lungo l'Accavallamento dello zebrù, Valle Solda. Campione 187.

– Dolomite mylonites along the Zebrù thrust, Valle Solda, sample 187.

4.3. - TESSITURE IN DOLOMITE-MILONITI LUNGO L'ACCAVALLAMENTO DELLO ZEBRÙ

Lungo l'Accavallamento dello Zebrù in Valle Solda sono presenti miloniti a composizione dolomitica simili in affioramento e nelle microstrutture alle calcite-miloniti dell'Accavallamento Trupchun-Braulio (fig. 27). La foliazione milonitica è ben sviluppata e l'allungamento obliquo dei granuli indica un movimento verso W. I granuli non presentano evidenze di geminazione. La presenza di una microstruttura legata ad una deformazione plastica assieme ad un'ottima orientazione cristallografica preferenziale escludono fenomeni di dolomitizzazione secondari su originarie calcite-miloniti. Le miloniti rappresentano perciò il prodotto della de-

mazione plastica su dolomie. In questo punto dell'Accavallamento dello Zebrù la Dolomia Principale della Falda dell'Ortles sovrascorre il basamento della Falda di Campo. È interessante notare come in questo affioramento sia la Dolomia Principale a deformarsi in modo plastico mentre il basamento sottostante mostri solamente rare evidenze di cataclasi. La temperatura stimata in quest'area durante la deformazione è attorno ai 400°C; in letteratura deformazione plastica di rocce dolomitiche viene segnalata a temperature nettamente maggiori, a partire dalla facies anfibolitica.

In queste dolomite-miloniti si sviluppa anche un'orientazione cristallografica preferenziale (fig. 28). Sulla base dei riflessi misurati non

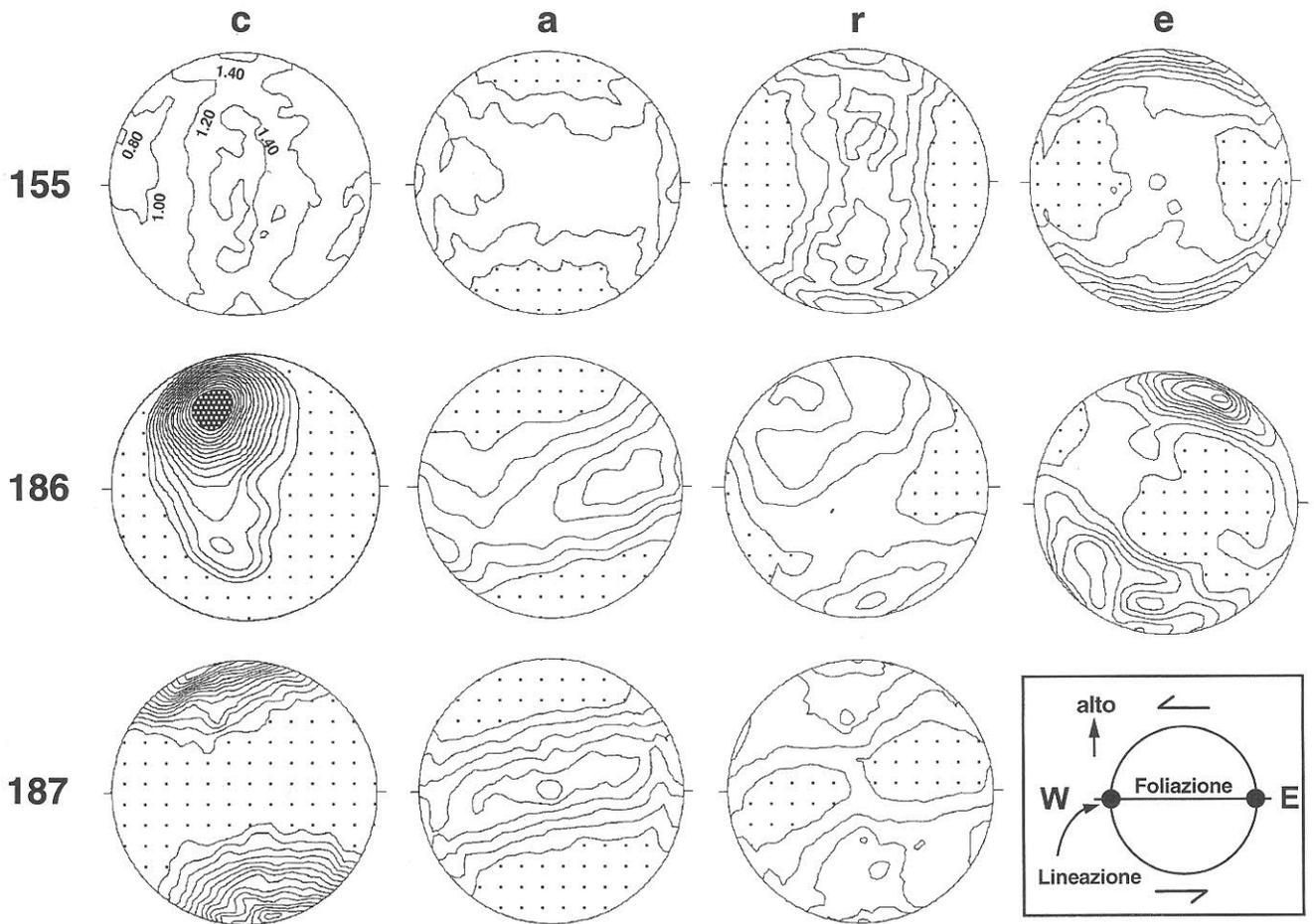


Fig. 28 - Tessiture in dolomite-miloniti lungo l'Accavallamento dello Zebrù in Valle Solda. Per ogni campione è indicata la distribuzione degli assi *c*, dei piani *a*, dei piani *r* e dei piani *e*. Tutti gli stereogrammi sono proiezioni equiarea sulla semisfera inferiore, la direzione E-W corrisponde alla traccia della foliazione e la lineazione è orizzontale. Relativamente alle coordinate geografiche tutti gli stereogrammi sono orientati avendo Est a destra e Ovest a sinistra, il senso di taglio per tutti gli stereogrammi è sinistrale. Le isolinee rappresentano multipli di una distribuzione uniforme. L'intervallo tra le varie isolinee è 0.2 volte la distribuzione uniforme, aree con valori inferiori a 0.8 sono rappresentate con un punteggiato (contour: 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, ...). Il massimo degli assi *c* del campione 186 raggiunge un valore di 4.54 volte la distribuzione uniforme (in grigio).

- Measured textures of dolomites mylonites from the Zebrù thrust, Valle Solda. Orientation of *c* axis, *a* direction, and *r* and *e* planes are reported; equal area projection, lower hemisphere; foliation is E-W vertical, lineation E-W horizontal. E is on the right, W on the left, sense of shear for all the samples deduced from field observation is sinistral for all the samples. The contours are given in multiples of an uniform distribution, the contour interval is 0.2, stippled areas have a density of less than 0.8. Lower hemisphere, equal area projection. Foliation is E-W vertical, lineation E-W horizontal, E is on the right and W on the left. Maximum of the *c* axes distribution in sample 186 is 4.54 times the uniform distribution.

è possibile fare considerazioni sui sistemi di scivolamento attivi durante la ricristallizzazione sin-tettonica. Un confronto con altre tessiture non è stato possibile in quanto in letteratura non sono riportate finora orientazioni cristallografiche complete di dolomiti deformate in condizioni naturali.

Il confronto delle tessiture misurate con i risultati ottenuti da altri autori deformando sperimentalmente dolomie e singoli cristalli di dolomite non è immediato (WENK, 1985a, e riferimenti bibliografici). Sulla base dei dati disponibili non è perciò possibile stabilire quali siano i sistemi di scivolamento attivi durante la ricristallizzazione dinamica delle dolomite-miloniti presenti lungo l'Accavallamento dello Zebrù. La misurazione di ulteriori riflessi e lo studio tramite ODF (Orientation Distribution Function; WENK, 1985) dell'orientazione delle varie direzioni cristallografiche rispetto alla foliazione e alla lineazione del campione, possono portare nuovi importanti contributi per la soluzione del problema.

4.4. — MICROSTRUTTURE NELLA ZONA A SCAGLIE DELL'UMBRAIL-CHAVALATSCH

Nella Zona a scaglie dell'Umbrail-Chavalatsch sono presenti quarzo-miloniti alla base del cristallino di Piz Lad (campioni 195, 196, 191) e tra il Cristallino del Braulio e la Scaglia dello Stelvio immediatamente a E del Passo dello Stelvio (campioni 73, 26, 207). Anche in questo caso è possibile osservare una variazione delle microstrutture lungo un profilo E-W. Nel campione più occidentale (campione 195, fig. 29a) vene e porfiroclasti di quarzo sono deformati solo debolmente. Nei cristalli di maggiori dimensioni è possibile riconoscere solamente «*deformation bands*» ed inizio di «*bulging*» al contatto tra i granuli. Nel camp. 196, raccolto più ad E, vi sono maggiori evidenze di «*bulging*» e formazione di nuovi granuli (fig. 29b). Ancora più ad E (camp. 191, fig. 29c) i granuli hanno una forma più allungata e sviluppano sub-grain al loro interno. Questi granuli sono immersi in una matrice più fine, formata da cristalli di quarzo ricristallizzati dinamicamente per rotazione. Ancora più ad E (fig. 29d), i porfiroclasti risultano maggiormente allungati e tutto il volume della roccia è interessato dalla deformazione plastica. Al Passo dello Stelvio si osserva lungo il contatto tettonico una fascia di quarzo-miloniti spessa alcuni metri. Le microstrutture sono qui caratterizzate da granuli di quarzo di forma estremamente allungata

(fig. 29e) che evolvono nella formazione di livelli di quarzo completamente ricristallizzati dinamicamente (fig. 29f). Anche in questo caso la ricristallizzazione avviene per rotazione e il senso di movimento è «*top-to-the-W*» (fig. 29g). Sebbene la maggior parte di queste miloniti indichi un senso di trasporto verso W, in questo affioramento sono presenti miloniti con strutture «*a domini*»: all'interno di una stessa sezione sottile sono infatti spesso osservabili alternanze tra livelli di quarzo con assi c ruotati sia in senso sinistrale che in senso destrale. Ugualmente diffuse sono «*shear band*» coniugate (fig. 29h), indicative di una componente di taglio puro.

Concludendo, anche nella Zona a scaglie dell'Umbrail-Chavalatsch è possibile riconoscere un aumento della temperatura verso E durante la deformazione. Questa variazione è testimoniata dalla transizione da «*dislocation glide*» (a W) a «*dislocation creep*» (a E) in quarzo-miloniti.

4.5. — MICROSTRUTTURE E TESSITURE NELLE MILONITI DELLA VAL VENOSTA

Come discusso in dettaglio più avanti, le Miloniti della Val Venosta («*intra-basement shear zone*» di Schmid & Haas, 1989) trovano la loro continuazione verso SW alla base della Zona a Scaglie dell'Umbrail-Chavalatsch e lungo l'Accavallamento Trupchun-Braulio. Esse affiorano estesamente tra la Val Venosta, la Valle di Trafoi e la Val Müstair.

Si tratta di quarzo-miloniti che derivano dalla ricristallizzazione dinamica in facies scisti verdi di rocce del basamento (fig. 30a). Il grado metamorfico è testimoniato dalla crescita di clorite e mica bianca nelle ombre di pressione dei porfiroclasti. La ricristallizzazione del quarzo avviene tramite il meccanismo di rotazione; nei campioni studiati non sono mai state osservate evidenze di «*grain boundary migration*». Il senso di movimento dedotto dallo studio di queste miloniti, consistente in tutta l'area, indica un trasporto verso W (fig. 9).

Particolarmente interessanti si sono rivelate la microstruttura e la tessitura del campione 219, raccolto lungo la cresta immediatamente a N di P. Chavalatsch (fig. 30b, c). Si tratta di un livello centimetrico di quarzo puro, probabilmente una vena, completamente ricristallizzato dinamicamente, in cui è ben evidente una lineazione orientata circa E-W (291/27). In sezione sottile esso risulta ricristallizzato completamente per rotazione, con una dimensione media dei granuli di circa 30 μm .

L'allungamento dei granuli (S_B in fig. 30c) rispetto alla foliazione milonitica (S_A) indica un senso di trasporto verso W. Già lo studio al microscopio ottico permette di riconoscere la forte asimmetria nell'orientazione degli assi c del quarzo rispetto alla foliazione, ad ulteriore conferma del senso di taglio sinistrale; la tessitura della roccia è costituita da vari domini paralleli alla foliazione, in ciascuno dei quali l'orientazione degli assi c è leggermente diversa rispetto a quella dei domini adiacenti.

La tessitura in tre aree del campione 219 è stata misurata tramite goniometro a raggi X. Le tre aree misurate sono indicate con 219 (1), 219 (2) e 219 (3) in fig. 32i. Al microscopio ottico è stato possibile fare alcune considerazioni sulle aree misurate: la misura dell'area 219 (1) rappresenta un dominio in cui gli assi c hanno la stessa orientazione, la misura dell'area 219 (2) è stata effettuata su di una sezione parallela alla prima, in cui il medesimo dominio ha uno spessore minore; le aree adiacenti contribuiscono perciò alla tessitura. La misura dell'area 219 (3) è stata fatta nell'area immediatamente adiacente al dominio precedente. Con queste premesse è possibile supporre che l'area 219 (1) e l'area 219 (3) abbiano due tessiture diverse, mentre l'area 219 (2) abbia una tessitura intermedia tra le due. Per questo motivo verrà prima discussa la tessitura 219 (1), poi la 219 (3) ed infine la 219 (2).

Le tessiture sono state misurate al goniometro a raggi X e successivamente ricalcolate tramite ODF (Orientation Distribution Function) (SCHMID *et alii*, 1981a; WENK, 1985b). I risultati sono illustrati in fig. 31.

Da una prima analisi della fig. 31 si nota che:

a) la tessitura dell'area (1) (= 219(1)) può essere considerata l'espressione di una forte orientazione cristallografica preferenziale; non solo gli assi c sono isorientati, ma anche i piani a , m , r e α ; tutti i granuli hanno perciò la stessa orientazione («single crystal orientation»);

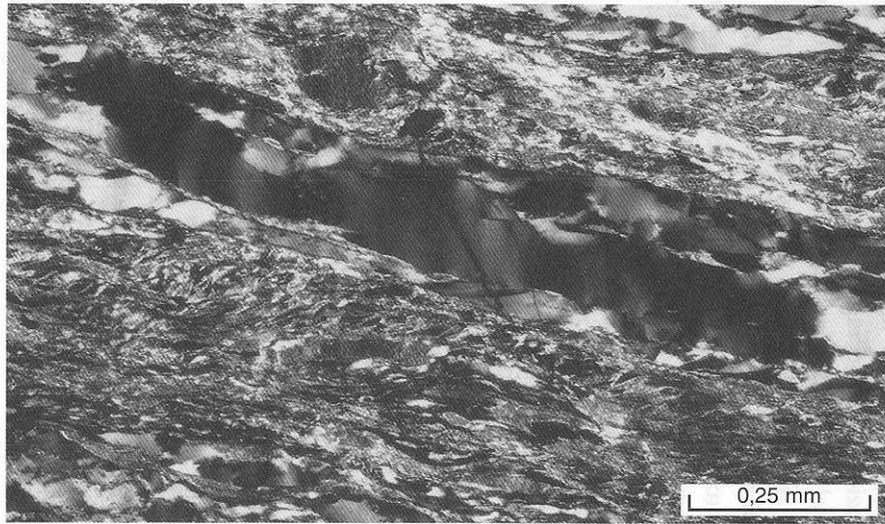
b) le tessiture misurate nelle aree (2) (= 219(2)) e (3) (= 219(3)) testimoniano ugualmente una forte orientazione cristallografica, ma con alcune differenze. Gli assi c mostrano in entrambi i casi una maggiore dispersione rispetto all'area (1) mentre il massimo di a situato alla periferia, ha un'intensità molto maggiore rispetto all'area (1). Sulla base di queste considerazioni si può supporre che nell'area (1) i cristalli si deformino utilizzando un solo sistema di scivolamento, mentre nell'area

(2) e (3) ne vengano utilizzati più di uno contemporaneamente. In tutti i casi la direzione di scivolamento è «a».

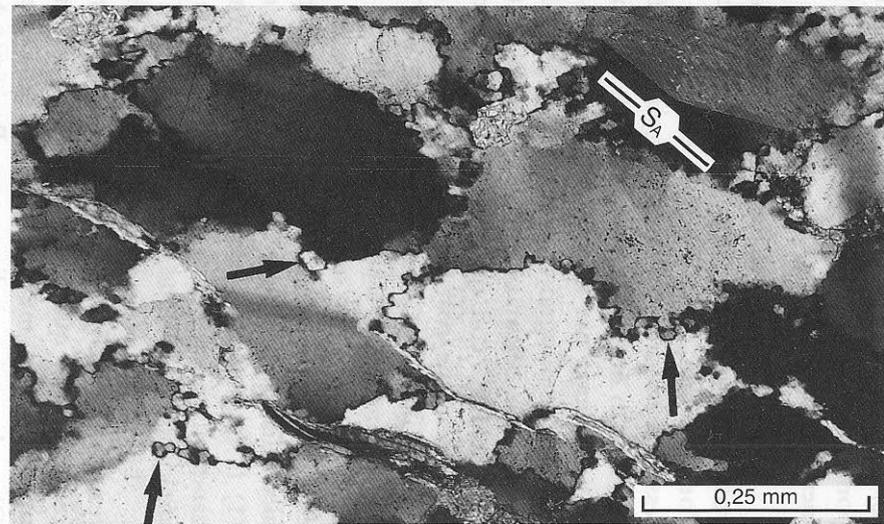
Al fine di stabilire quali siano i sistemi di scivolamento attivi nei vari domini è stata ricostruita l'orientazione cristallografica compatibile con la tessitura misurata in ogni singola area (fig. 32). Ciò è stato ottenuto, analogamente a quanto fatto in precedenza per la calcite, ruotando le varie direzioni cristallografiche del quarzo (fig. 32a) fino ad avere le orientazioni dei piani a , m e degli assi c coincidenti con quelle effettivamente misurate. L'orientazione così ricavata per l'area (1) è riportata in fig. 32d. Come si può vedere, nell'area (1) il massimo degli assi c è alla periferia e ruotato nella direzione del senso di taglio, questo implica che il piano reticolare ortogonale a c è subparallelo alla foliazione milonitica. Ne deriva che nell'area (1) la quasi totalità dei cristalli si deforma utilizzando il sistema di scivolamento basale («basal slip») nella direzione «a».

Lo stesso procedimento è stato applicato alla tessitura 219 (3) (fig. 32c). Qui la situazione è più complicata in quanto gli assi c non mostrano un massimo unico, ma è presente una certa dispersione. Oltre al massimo indicato con «Posizione A» è presente anche un massimo in posizione centrale (Posizione B) che raggiunge un valore pari a quattro volte la distribuzione uniforme. Il fatto però che i piani a ed i piani m mostrino tre massimi ben distinti su di un grande cerchio ortogonale al massimo principale degli assi c della Posizione A fa supporre che l'orientazione riportata in fig. 32e sia quella posseduta dalla maggiore parte dei cristalli nell'area (3), cioè con i rombi negativi α paralleli alla foliazione. L'orientazione cristallografica dei cristalli con gli assi c al centro dello stereogramma è riportata in fig. 32f. Essa è stata ottenuta avendo come vincoli la posizione degli assi c (al centro) e di un massimo dei piani a parallelo alla lineazione macroscopica. In questo caso sono i prismi di primo ordine m ad essere orientati parallelamente alla foliazione. In conclusione la tessitura misurata nell'area 219 (3) è data dal contributo dell'orientazione cristallografica riportata in fig. 32e e in fig. 32f. Esse sono riportate assieme in fig. 32g.

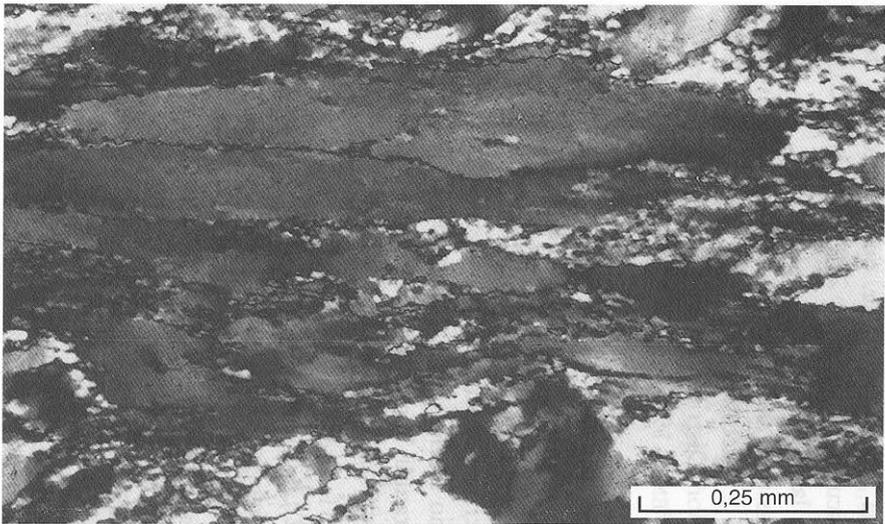
La tessitura misurata nell'area (2) può essere semplicemente considerata come una tessitura di transizione tra quelle misurate in (1) e in (3). Tale tessitura può essere infatti interpretata come risultante dal contributo dell'orientazione cristallografica della Posizione A dell'area (1) (fig. 32d) e del-



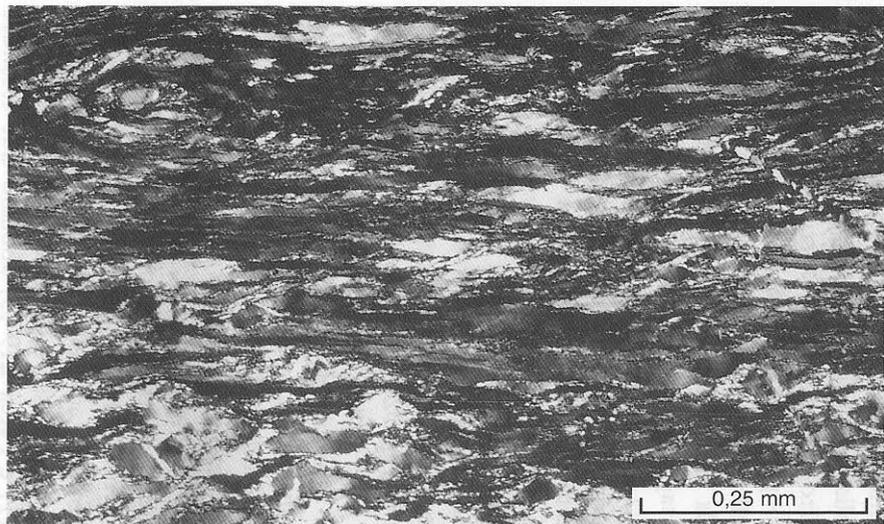
a



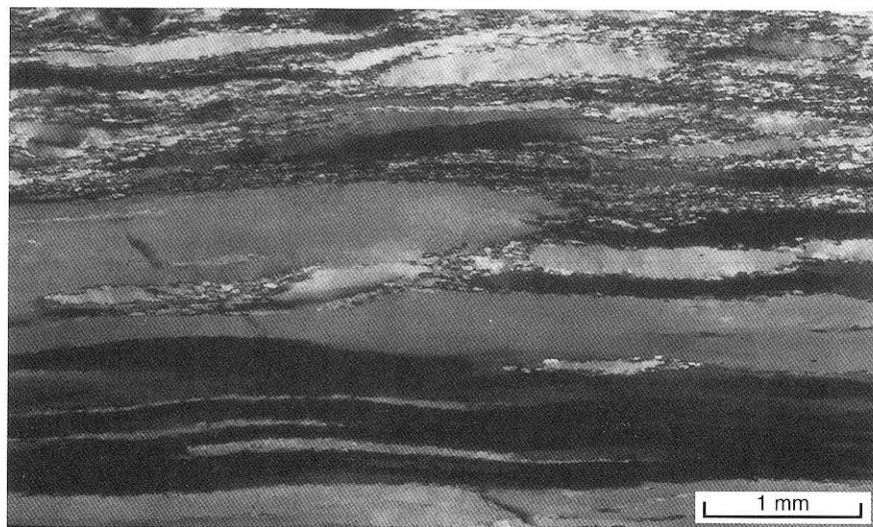
b



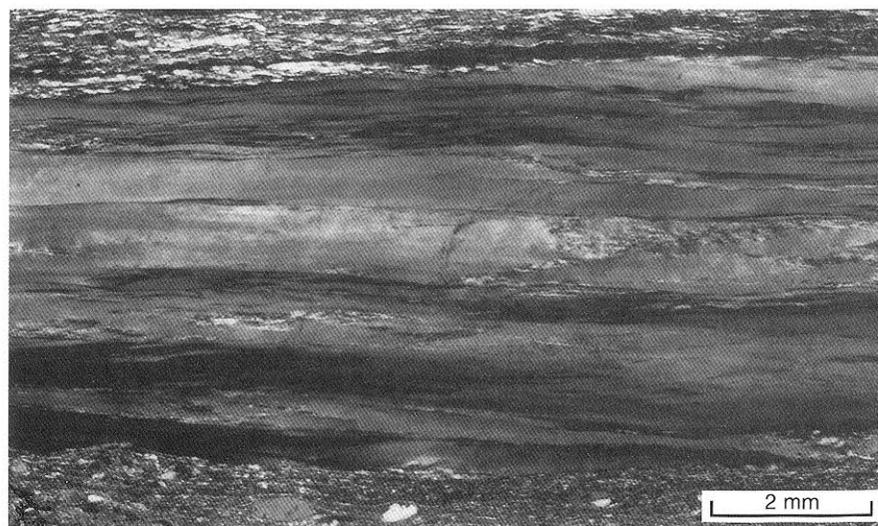
c



d



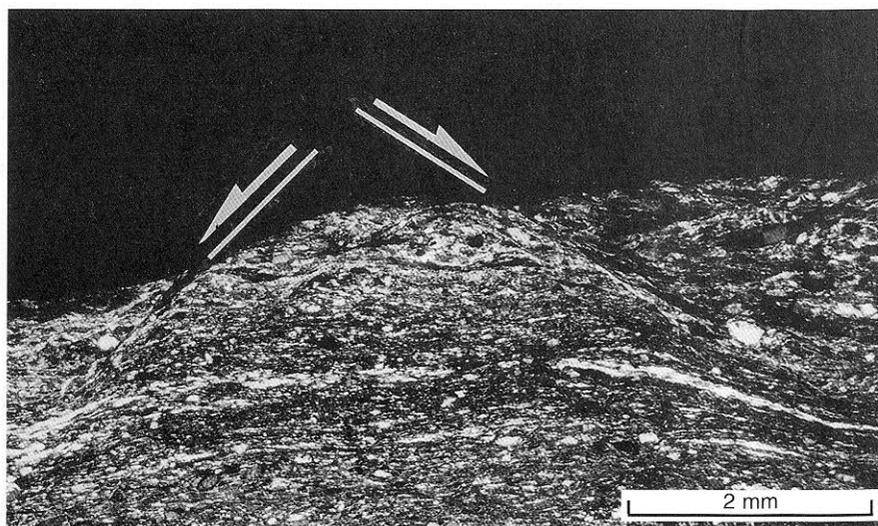
e



f



g



h

Fig. 29 – Quarzo-miloniti nella Zona a scaglie dell'Umbrail-Chavalatsch. In (a) e (b) la foliazione principale (S_A) è obliqua rispetto al lato lungo della foto, nelle altre foto è parallela al lato lungo della foto. (a) Campione 195, Piz Lad. (b) Campione 196, Piz Rims. Il processo di bulging porta alla formazione di nuovi granuli, indicati dalle frecce. (c) Campione 191, Piz Umbrail. (d) Campione 191, Piz Umbrail. (e) Campione 206, Passo dello Stelvio. (f) Campione 73, Passo dello Stelvio. (g) Campione 207, Passo dello Stelvio. (h) Campione 73, Passo dello Stelvio.

– Quartz mylonites from the Umbrail-Chavalatsch imbricates. In (a) and (b) the macroscopic mylonitic foliation (S_A) is oblique to the long edge of the photograph, in all the other photographs is parallel. (a) Sample 105, Piz lad. (b) Sample 196 (Piz Rims). Syntectonic recrystallization involving bulging led to subgrain formation (indicated by the arrow). (c) Sample 191, Piz Umbrail. (d) Sample 191, Piz Umbrail. (e) Sample 206, Passo dello Stelvio|Stilfserjoch. (f) Sample 73, Passo dello Stelvio|Stilfserjoch. (g) Sample 207, Passo dello Stelvio|Stilfserjoch. (h) Sample 73, Passo dello Stelvio|Stilfserjoch.

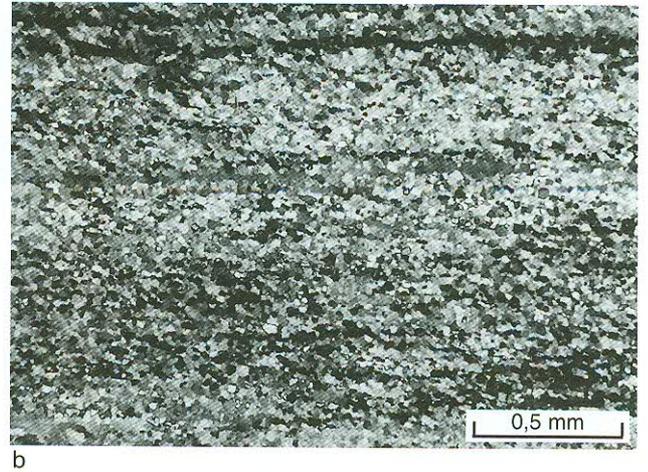
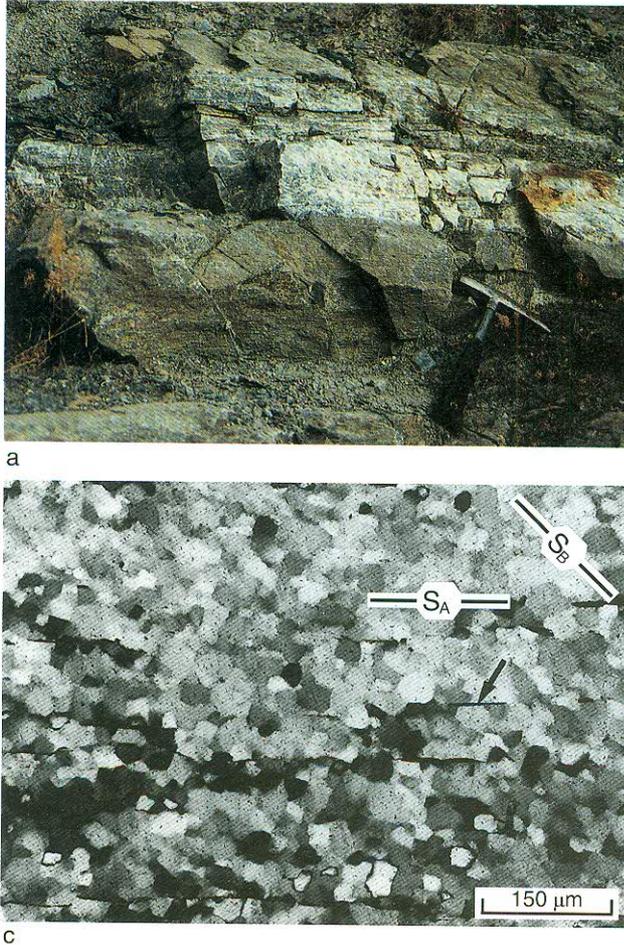


Fig. 30 – Miloniti della Val Venosta. (a) Quarzo-miloniti presso Montoni di Agümes/ Grossmontoni. (b) Quarzo-milonite, campione 219, N di P. Chavalatsch. (c) idem. La foliazione milonitica principale (S_A) è definita dall'allineamento di miche indicate dalla freccia.

– Vinschgau mylonites. (a) Quartz mylonite from Montoni di Agümes/Grossmontoni. (b) Quartz mylonite, sample 219, N of P. Chavalatsch. (c) The same as in (b), the macroscopically visible mylonitic foliation (S_A) is marked by mica flakes (see arrow), an oblique grain fabric also develop (S_B).

l'orientazione della Posizione A dell'area (3) (fig. 32e). In fig. 32h è rappresentata la sovrapposizione delle due orientazioni, per essere più facilmente confrontate con la tessitura effettivamente misurata.

Sulla base di queste considerazioni si possono trarre le seguenti conclusioni:

a) Rotazione è il principale meccanismo di ricristallizzazione sintettonica nelle Miloniti della Val Venosta nell'area studiata;

b) durante la ricristallizzazione dinamica nel campione 219 si formano domini paralleli alla foliazione milonitica in cui sono attivi differenti sistemi di scivolamento;

c) le tessiture misurate hanno permesso di riconoscere i vari sistemi di scivolamento presenti;

d) nell'area (1) si ha scivolamento lungo le basi nella direzione «a»;

e) nell'area (3) si ha principalmente scivolamento lungo i rombi negativi α nella direzione «a» e, secondariamente, lungo i prismi di primo ordine m nella direzione «a»;

f) nell'area misurata (2) sono presenti i contributi di tutte le orientazioni precedenti.

5. – TETTONICA

La Falda dell'Ortles riveste un ruolo chiave nell'interpretazione della geometria e dell'evoluzione tettonica dell'intera area delle Dolomiti dell'Engadina. Solo in essa, infatti, sono conservati importanti spessori di sedimenti post-norici (Formazione di Kössen-Formazione di Allgäu) in cui è possibile osservare strutture plicative, lineazioni d'estensione, miloniti, ecc. che permettono un dettagliato studio strutturale di campagna e un'analisi della cinematica dei movimenti. In tutte le altre falde la presenza di grandi spessori di Dolomia Principale (> 1000 m), a maggiore competenza, limita lo sviluppo di tali strutture; nelle falde di basamento la strutturazione pre-alpina rende difficile uno studio degli effetti della tettonica alpina.