

FRANCESCO PAOLO SASSI*, BRUNO ZANETTIN*, G. ZIRPOLI*

QUADRO DELLA STORIA TERMICA ALPINA NELLE ALPI ORIENTALI

RIASSUNTO. — Nelle Alpi Orientali italiane sono documentabili i seguenti processi metamorfici alpini:

- a) metamorfismo cretaceo (~ 100 m.a.) nelle rocce di fondo oceanico, legato a gradienti termici di circa $10-15^\circ \text{C/km}$ (scisti blu, eclogiti);
- b) metamorfismo cretaceo (~ 100 m.a.) nelle rocce austridiche dell'area Monteneve-Brenner-mesozoikum e in parte nell'austroalpino a Sud della Finestra dei Tauri, legato a gradienti termici di circa $28-30^\circ \text{C/km}$ (zoneografia della zona della clorite fino alla zona della staurolite);
- c) metamorfismo paleogenico (~ 40 m.a.) nelle rocce pennidiche e nel margine settentrionale dell'austroalpino a Sud dei Tauri, legato a gradienti termici di circa $28-30^\circ \text{C/km}$ (zoneografia dalla zona della clorite alla zona della staurolite);
- d) metamorfismo presso il limite Oligocene-Miocene (~ 20 m.a.), probabilmente a diffusione regionale ma documentabile solo localmente dove esistono situazioni geologiche particolari (parte bassa della facies degli scisti verdi; gradiente termico non stimabile).

Per ciascuno di questi processi, viene anche discusso l'inquadramento geodinamico.

ABSTRACT. — The following metamorphic processes can be distinguished in the Italian Eastern Alps:

- a) Cretaceous metamorphism (~ 100 m.y.) in the ocean floor rocks (Pennides) linked to thermal gradients of $10-15^\circ \text{C/km}$ (blue schists, eclogites);
- b) Cretaceous metamorphism (~ 100 m.y.) in the Schneeberg-Brennermesozoikum region and probably in some areas south of the Tauern Window (Austrides), linked to thermal gradients of $28-30^\circ \text{C/km}$ (from the chlorite- to the staurolite-zone);
- c) Paleogenic metamorphism (~ 40 m.y.) in the Pennides and in the northern austridic block south of the Tauern Window, linked to thermal gradients of $28-30^\circ \text{C/km}$ (from the chlorite- to the staurolite-zone);
- d) metamorphism approx. at the Oligocene-Miocene boundary; probably it is regionally widespread, but it is detectable only locally, where particular geological situations occur (low greenschist facies; unknown thermal gradient).

These metamorphic events are discussed also from the geodynamic viewpoint.

Introduzione

La storia termica alpina nelle Alpi Orientali è alquanto complessa e non del tutto chiarita. Se ne dà qui di seguito il quadro fondamentale, cercando di tenere separati i dati dalle interpretazioni. Per ogni evento metamorfico si tenterà di fornire — nei limiti di quanto finora noto — il gradiente termico, la distribuzione

(*) Istituto di Mineralogia e Petrologia dell'Università di Padova, e Centro di Studi per i Problemi dell'Orogeno delle Alpi Orientali del C.N.R., Padova.

areale (Fig. 1) ed il contesto geodinamico. Ci riferiremo prevalentemente al settore italiano delle Alpi Orientali, ma, per completare il quadro, saremo costretti ad utilizzare anche alcuni dati riguardanti le Alpi Austriache.

Nell'esposizione seguiremo il criterio cronologico, e quindi descriveremo uno dopo l'altro i seguenti processi metamorfici:

- 1) metamorfismo di alta pressione-bassa temperatura (d'ora in poi qui indicato per brevità con la sigla HP/LT) presente nelle rocce che costituivano il fondo dell'oceano; età cretacea; Pennidi;

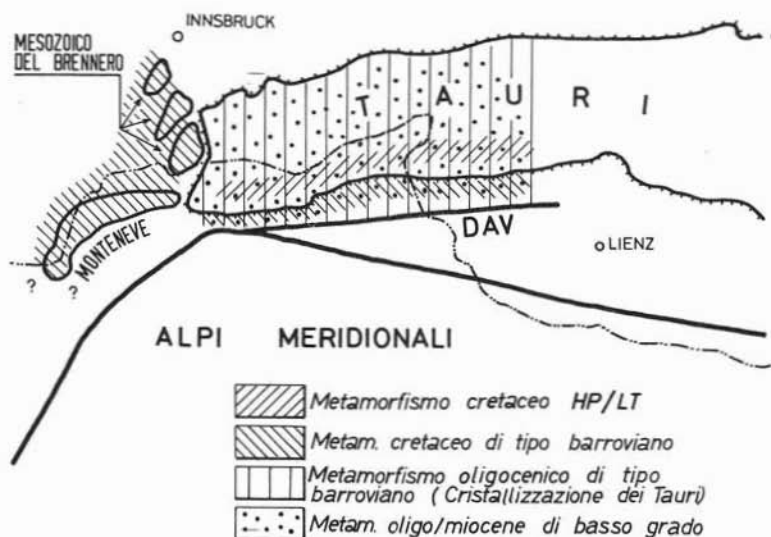


Fig. 1. — Schema della distribuzione dei vari metamorfismi alpini in parte delle Alpi Orientali. La rappresentazione è solo schematica e in qualche caso ipotetica (v. testo).

- 2) metamorfismo progrado di tipo barroviano nell'area Monteneve-Mesozoico del Brennero; età cretacea; Austridi;
- 3) metamorfismo progrado di tipo barroviano nella Finestra dei Tauri (Pennidi) e in parte del margine austriaco; età paleogenica, presso il limite Eocene-Oligocene;
- 4) metamorfismo di basso grado ben documentato geologicamente solo in alcune zone austriache al margine con la Finestra dei Tauri, ma verosimilmente presente anche nella stessa Finestra; possibile età presso il limite miocene-oligocene.

Non viene invece qui preso in considerazione il metamorfismo alpino di alto gradiente termico, che secondo HAWKESWORTH (1976) avrebbe prodotto in età cretacea un'isograda andalusite-sillimanite. La sua esistenza infatti non è documentata a sufficienza; anzi, abbiamo motivi per ritenere che tali paragenesi mineralogiche appartengano in realtà al ciclo ercinico.

La Fig. 1 rappresenta molto schematicamente le aree di distribuzione di questi quattro processi metamorfici, sulla base dei dati attualmente disponibili.

1 - Metamorfismo cretaceo HP/LT (Pennidi)

Nelle rocce basiche rappresentanti i prodotti metamorfici delle magmatiti di fondo oceanico sono stati messi in evidenza effetti metamorfici di alta pressione e bassa temperatura, sia pure sotto forma di relitti rispetto al successivo metamorfismo regionale di più alto gradiente termico e di più alta temperatura.

Si tratta di nuclei glaucofanici (fra gli altri: BIANCHI & DAL PIAZ, 1934; HOLLAND & RICHARDSON, 1979), di relitti eclogitici (ABRAHAM et al., 1974; MILLER, 1974, 1976) e di tracce di lawsonite completamente pseudomorfosate da mica chiara (FRY, 1973). I valori di gradiente termico stimabili sulla base delle associazioni mineralogiche cadono nell'intervallo 10-15° C/km.

L'età di questo metamorfismo potrebbe essere posta intorno ai 110 m.a., sia sulla base della datazione radiometrica di un glaucofane (JÄGER, 1973) e sia sulla base di vincoli cronologici relativi all'evoluzione geodinamica del bacino oceanico e dei margini continentali che lo delimitavano.

Età più recenti (70-50 m.a.) sono state ottenute da RAITH et al. (1978) mediante analisi K/Ar su anfiboli alcalini. Tali valori di età però potrebbero, a nostro avviso, essere stati influenzati dalla storia termica successiva, e quindi rappresentare piuttosto delle età miste, parzialmente ringiovanite.

Tuttavia il problema della definizione cronologica di questo metamorfismo rimane ancora aperto, anche se nessun dubbio permane sulla sua età cretacea.

2 - Metamorfismo cretaceo di tipo barroviano (Austridi)

A) Nell'area *Monteneve-Mesozoico del Brennero*, fino praticamente a Innsbruck, vi sono le prove geologiche, petrologiche e radiometriche di un evento metamorfico alpino di notevole importanza sia per quanto riguarda vastità dell'area interessata che intervallo di temperature metamorfiche.

Questo metamorfismo è stato a lungo oggetto di controversie nel senso che, se fuori discussione è sempre stata ovviamente l'età alpina del metamorfismo in facies degli scisti verdi presenti nel Permomesozoico (Tribulaun, Serles, Kalkkogel), discutibile per l'insufficienza di dati geologici risolutivi era l'inserimento, in questo stesso evento, degli effetti metamorfici in facies anfibolitica presenti nelle rocce del tratto di Monteneve. Il dibattito su questo problema può ora essere considerato sostanzialmente concluso, da quando:

- ZANETTIN (1971) e ZANETTIN & JUSTIN-VISENTIN (1971) hanno accertato la presenza di paragenesi in facies anfibolitica entro rocce permo-eotriassiche;
- JUSTIN-VISENTIN & ZANETTIN (1973) hanno dimostrato sulla base di criteri tessiturali che durante il metamorfismo alpino furono raggiunte nel tratto di Monteneve temperature tali da indurre la reazione paragonite + quarzo → cianite + albite — H₂O segnalata da PURTSCHELLER et al. (1972);
- SATIR (1975), HOERNES & FRIEDRICHSEN (1978 a, b) e HOINKES (1978) hanno accer-

tato, con dati radiometrici, isotopici e petrologici rispettivamente, che il metamorfismo alpino nel tratto di Monteneve ha raggiunto certamente temperature intorno ai 500° C; addirittura HOERNES & FRIEDRICHSEN (1978 a, b) precisano che temperature alpine fino ai 600° C possono essere ammesse nelle rocce di Monteneve sulla base dei loro dati.

Tutto ciò, in aggiunta al fatto che le età di raffreddamento Rb/Sr e K/Ar delle biotiti di Monteneve e del Permo-mesozoico del Brennero danno uguali valori intorno agli 80 m.a. (MILLER et al., 1967; SCHMIDT et al., 1967; SATIR, 1975) indica che tutta questa regione (fig. 1) fu coinvolta da un unico evento metamorfico alpino che sviluppò una zonation che va dalla parte bassa della facies degli scisti verdi fin ben dentro la facies anfibolitica. Questo metamorfismo si sarebbe esplicato anche sul basamento in facies anfibolitica pre-alpina, determinando parziali ricristallizzazioni e neoblastesi: si spiega in tal modo, fra l'altro, il fatto che la zonatura dei granati (DE PIERI & GALETTI, 1972) indica nel basamento una storia poli-metamorfica e in Monteneve una storia mono-metamorfica ZANETTIN & JUSTIN-VISENTIN, 1971).

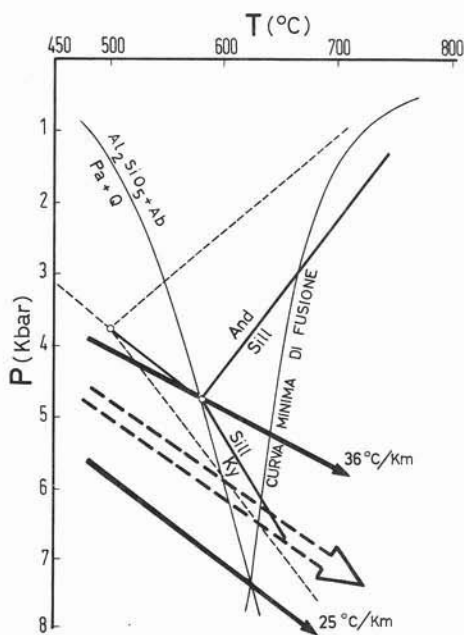


Fig. 2. — La freccia larga tratteggiata indica il più probabile gradiente termico relativo al metamorfismo cretaceo di Monteneve e a quello oligocenico della Finestra dei Tauri.

Il valore del gradiente termico metamorfico doveva essere nel campo dei valori comunemente considerati intermedi, come suggerito dalla presenza di cianite nei livelli ricchi in Al e dai valori di b_0 delle miche chiare potassiche (SASSI, 1972). Riferendoci al punto triplo di Al_2SiO_5 stabilito sperimentalmente da HOLDAWAY (1971), che viene attualmente ritenuto più attendibile degli altri, o meglio riferendoci a quello empiricamente proposto da GREENWOOD (1976) a circa $T = 570^\circ\text{C}$ e $P = 4,7\text{ kb}$ che meglio soddisfa le situazioni naturali, il gradiente del metamorfismo cretaceo di Monteneve-Mesozoico del Brennero dovrebbe aver avuto un valore decisamente inferiore a 36°C/km . D'altra parte, il fatto che la reazione $\text{Pg} + \text{Qz} \rightarrow \text{Ky} + \text{Ab} + \text{H}_2\text{O}$ sia avvenuta al di fuori di un contesto anatettico suggerisce un limite inferiore per il gradiente termico, limite che va posto a circa 26°C/km (Fig. 2). In conclusione, valori intorno a $28\text{-}30^\circ\text{C/km}$ sono da noi ritenuti più probabili.

Quindi le stime di pressione intorno a 4 kb riportate da HELBIG & SCHMIDT (1978), stime che darebbero per Monteneve ($T = 550^\circ\text{C}$) un gradiente di

41-38° C/km, se vanno bene per il metamorfismo ercinico (BÖGEL et al., 1979; SASSI & ZIRPOLI, 1979), sono chiaramente inaccettabili per questo metamorfismo alpino.

L'età di questo evento metamorfico è stata posta da SATIR (1975), sulla base di età Rb/Sr e K/Ar delle miche chiare, nell'intervallo 120-100 m.a., cioè presso il limite fra Cretaceo inferiore e superiore. Tuttavia esso potrebbe essere un po' più recente, ma non più di 90 m.a.

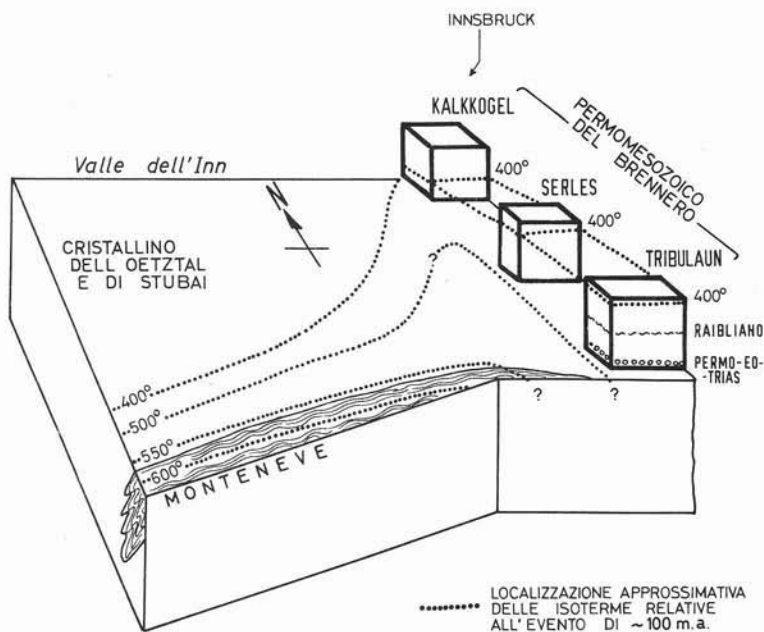


Fig. 3. — Andamento approssimativo delle superfici isoterme relative al metamorfismo cretaceo.

La Fig. 3 mostra a grandi linee la zoneografia approssimativa della struttura termica legata a questo evento, quale risulta dalla combinazione di due schizzi di HOERNES & FRIEDRICHSEN (1978) e di BORSI et al. (1980 a) rispettivamente, e da una loro rielaborazione anche sulla base di dati sulla zoneografia in senso verticale presente nel Tribulaun (SASSI, ined.). È interessante notare la morfologia a dorsale relativamente stretta e lunga di questa struttura termica cretacea.

Nell'ambito del quadro sopra formulato, l'età di sedimentazione del complesso di Monteneve potrebbe non essere permomesozoica — come precedentemente ipotizzato da ZANETTIN & JUSTIN-VISENTIN (1971) al semplice scopo di puntualizzare che tale complesso, ben delimitato rispetto alle rocce incassanti, costituisce una sequenza di copertura più recente del circostante substrato (paragneiss delle Breonie a nord, di Mules-Merano a sud) ma paleozoica. Esso verosimilmente rappresenta una sequenza sostanzialmente silurico-devonica confrontabile con i complessi filladici del Turntaler, della Gailtal, ecc., e con le serie semimetamorfiche della Carnia. Ciò

fra l'altro potrebbe implicare che le filladi di Steinach (SASSI & MENEGAZZO, 1971) rappresentano oggi le metapeliti di Monteneve quali erano prima del metamorfismo cretaceo, e quindi che la messa in posto della Falda di Steinach, certamente alpina, è anteriore al Cretaceo Superiore. Alternativamente, le rocce della Falda di Steinach — pur essendo l'equivalente di quelle del Tratto di Monteneve — prima del loro sovrascorrimento si trovavano al di fuori dei volumi rocciosi interessati dal metamorfismo cretaceo, e cioè o a sud dell'attuale Tratto di Monteneve o in livelli crostali più alti.

B) Il processo metamorfico finora descritto potrebbe aver interessato anche le *rocce austriache a sud della Finestra dei Tauri*: infatti, alcuni dati radiometrici rendono plausibile una tale ipotesi, che però rimane ancora da dimostrare.

Più precisamente, in Valle Aurina, nell'Austroalpino lungo il margine della Finestra dei Tauri, sono state ottenute età Rb/Sr di muscoviti intorno a 60-65 m.a. (BORSI et al., 1973). Tali valori potrebbero rappresentare:

- a) o età di cristallizzazione;
- b) o età parzialmente ringiovanite di miche coalpine;
- c) o infine età parzialmente ringiovanite di miche erciniche.

L'ipotesi *a* implicherebbe l'esistenza di un metamorfismo cretaceo superiore in questa regione. Le ipotesi *b* e *c* vanno viste alla luce del fatto che durante l'Oligocene, come verrà detto più avanti, questa regione fu sottoposta a temperature certamente superiori a 300° C, e probabilmente prossime (ma non superiori) a 500° C. Quindi la possibilità che miche preesistenti siano state parzialmente ringiovanite esiste, ma non è dato per ora di sapere se tali miche fossero tutte erciniche o almeno in parte anche eo-alpine.

Quanto sopra esposto è sufficiente per capire che il problema è ancora aperto, e che l'esistenza del metamorfismo cretaceo nelle aree austriache italiane a nord della linea Deferreger-Anterselva-Valles (SASSI et al., 1974; BORSI et al., 1978) va considerata per ora solo come una possibilità. Tuttavia, se si tiene conto dei risultati ottenuti più ad oriente (ad es., FRANK et al., 1976; HAWKESWORTH, 1976; MORAU, 1977), tale possibilità diventa più concreta, perchè valori di età di raffreddamento di biotiti e muscoviti intorno a 80 m.a. sono stati trovati con relativa frequenza.

3 - Metamorfismo paleogenico di tipo barroviano (= « Cristallizzazione dei Tauri »)

A) Nel *Pennidico* della Finestra dei Tauri il metamorfismo prevalente è quello terziario (= « Tauernkristallization »). Esso ha prodotto una zoneografia metamorfica che è stata definita sia sulla base delle associazioni mineralogiche, che mediante le variazioni del contenuto in An dei plagioclasti in rocce contenenti epidoto (MORTEANI & RAASE, 1974), le variazioni strutturali del feldspato potassico (RAASE & MORTEANI, 1976), le variazioni di frazionamento isotopico dell'ossigeno fra mine-

rali cogenetici (HOERNES & FRIEDRICHSEN, 1978; FRIEDRICHSEN & MORTEANI, 1979).

La morfologia della struttura termica che risulta da ciascuno di questi metodi paleotermometrici è sostanzialmente identica, con superfici isoterme concentriche grossolanamente parallele ai margini della Finestra dei Tauri (Fig. 4). Tale morfologia corrisponde a una dorsale termica, con asse sostanzialmente E-W e con zona assiale coincidente con la fascia più nucleare della finestra.

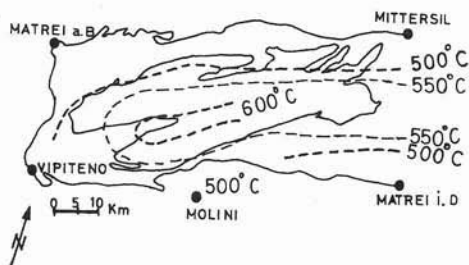


Fig. 4. — Andamento delle superfici isoterme relative al metamorfismo dei Tauri (da HOERNES & FRIEDRICHSEN, 1974).

Le temperature massime raggiunte nell'attuale livello d'erosione superano i 600° C (HOERNES & FRIEDRICHSEN, 1978; FRIEDRICHSEN & MORTEANI, 1979), con comparsa di cianite + staurolite (DE VECCHI et al., 1971) e con le reazioni di breakdown di margarite e di paragonite + quarzo (MORTEANI, 1971, 1974; RAITH, 1971; RAASE, 1972; HOERNES, 1973; ACKERMAND & MORTEANI, 1973). Tuttavia, la maggior parte delle rocce mesozoiche ora affioranti nella Finestra dei Tauri rimase durante questo metamorfismo a temperature da facies degli scisti verdi.

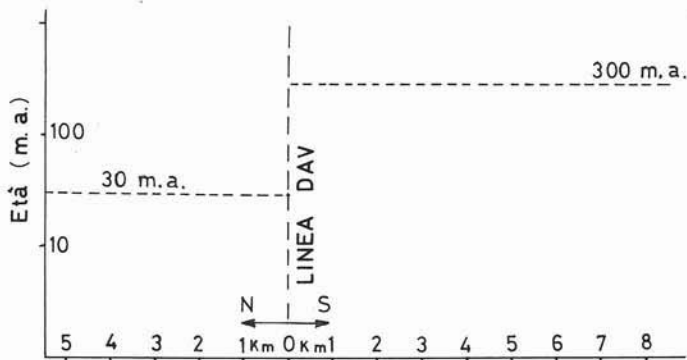


Fig. 5. — La linea tettonica Deferegger-Anterselva-Valles (DAV) è elemento separatore fra il blocco austriaco interessato dal metamorfismo oligocenico (a nord della linea) e quello nel quale sono rimaste invariate le età erciniche della biotite (a sud della linea) (da BORSI et al., 1978).

Per quanto riguarda il gradiente termico, le analogie fra questo metamorfismo paleogenico ed il metamorfismo cretaceo di Monteneve sono notevoli. Infatti, anche in questo caso da un lato la presenza di cianite suggerisce valori inferiori a 36° C/km, dall'altro il fatto che la reazione paragonite + quarzo si sviluppò in assenza di fenomenologie d'anatessi suggerisce valori più alti di 26° C/km. Quindi i valori di 28-30° C/km sono da ritenere verosimili.

Per quanto riguarda l'età, questo metamorfismo viene riferito a 36-40 m.a. fa, sulla base di datazioni radiometriche (SATIR, 1975 e bibl. in esso citata).

B) Nell'*Austroalpino* a sud della Finestra dei Tauri effetti termici coevi e petrologicamente congruenti sono stati messi in evidenza nel settore italiano da BORSI et al. (1973, 1978). Si tratta di ricristallizzazioni metamorfiche la cui esistenza è dimostrata su basi radiometriche (metodo Rb/Sr su biotiti e muscoviti) e che in parte risultano di difficile analisi tessiturale in quanto sono sovrapposte ad una situazione pre-alpina complessa, polimetamorfica o quanto meno polifase.

Fra gli effetti di questo metamorfismo alpino vanno inseriti:

- la cristallizzazione o riequilibrio di miche chiare potassiche relativamente ricche in celadonite (SASSI et al., 1978);
- la cristallizzazione di cianite in minuti aggregati (BELLIENI, 1974);
- la ricristallizzazione metamorfica degli gneiss aplitici permiani affioranti in Valle Aurina (BORSI et al., 1980 b).

Questi effetti, come tutti gli altri osservati, sono congruenti col gradiente termico « intermedio » prima stimato per il metamorfismo paleogenico dei Tauri (28-30° C/km).

La contemporaneità fra questi effetti metamorfici austridici e la Tauernkristallization è indicata dai dati radiometrici di BORSI et al. (1978 a; v. anche SASSI et al., 1978). Infatti, molte biotiti danno valori di età Rb/Sr di raffreddamento intorno ai 30 m.a., valori che per varie ragioni non possono essere riferiti in maniera ovvia né al metamorfismo cretaceo né a quello miocenico descritto al prossimo paragrafo.

Tale contemporaneità indica che al limite Eocene-Oligocene le Austridi e le Pennidi erano in posizione reciproca tale da essere interessate da una struttura termica unica.

È da notare che nei livelli ora affioranti questi effetti metamorfici sono localizzati in un blocco austridico limitato verso sud da un'importante linea tettonica (Deferegger-Anterselva-Valles: DAL PIAZ, 1934; SASSI et al., 1974), come indicato in Fig. 5. Pur essendoci qualche indizio che a maggior profondità anche le Austridi a sud di questa linea abbiano subito un certo riscaldamento (BORSI et al., 1978 a), la rapida scomparsa all'attuale livello erosivo degli effetti di riscaldamento alpino può suggerire o che il blocco a sud della DAV si è abbassato dopo questo metamorfismo o, più probabilmente, che le isoterme legate a questo metamorfismo erano molto inclinate almeno nelle Austridi a sud dei Tauri.

4 - Metamorfismo di basso grado presso il limite Oligo-Miocene (Austridi e Pennidi)

Nelle rocce austridiche presso il margine con la Finestra dei Tauri affiorano in varie aree filoni discordanti di varia composizione, con prevalenza di tipi intermedi ed acidi, che attraversano anche il limite tettonico fra Austridi e Pennidi « cucendolo ». La messa in posto di questi filoni è dunque posteriore a quella delle falde ed al metamorfismo dei Tauri.

Questi filoni sono metamorfici, con paragenesi di bassa temperatura (parte

bassa della facies degli scisti verdi), ed il loro metamorfismo è — per quanto sopra detto — chiaramente posteriore alla Tauernkristallization.

Quindi questi filoni, la cui segnalazione e prima interpretazione è dovuta a SCOLARI & ZIRPOLI (1972), consentono di riconoscere cono criteri geo-petrologici un altro evento metamorfico alpino, i cui effetti difficilmente sarebbero riconoscibili nei paragneiss incassanti (SCOLARI & ZIRPOLI, 1973). Al medesimo evento metamorfico vanno attribuite le deboli ricristallizzazioni visibili in alcune parti dei plutoni oligocenici (età di messa in posto 30 m.a.: BORSI et al., 1978 b, 1979) dell'allineamento Vedrette di Ries-Rensen.

Di particolare rilievo è il fatto che tale evento metamorfico non può essere considerato solo un processo termico. Esso infatti produsse anche scistosità, come si desume dalla evidente — anche se non molto netta a causa della scarsità di minerali scistogeni — tessitura orientata dei filoni a cavallo del limite Austridi-Pennidi.

Il gradiente termico di questo metamorfismo non può essere stimato, a causa della mancanza di dati certi sui valori di pressione.

Misure dirette dell'età di questo evento nelle Austridi mancano ancora, ma dalle età di raffreddamento della biotite disponibili in letteratura si può desumere che esso non può essere più recente di 18 m.a. (BORSI et al., 1973, 1978 a; SASSI et al., 1978).

Nel Pennidico invece età radiometriche di mica chiara e di orneblenda intorno ai 20-22 m.a. possono essere considerate età di cristallizzazione (RAITH et al., 1978), e quindi datazioni dirette di questo evento metamorfico tardo alpino oltre che prova che esso ha interessato ampiamente anche il Pennidico. Anche qui è però difficile stabilire la esatta distribuzione ed i caratteri petrologici di questo debole metamorfismo, a causa sia del suo basso grado che del fatto che esso è sovrainposto su una già complessa situazione microstrutturale. Tuttavia la distribuzione dei valori recenti di età radiometrica autorizza l'ipotesi che tale metamorfismo tardoalpino non ha avuto una distribuzione molto dissimile da quello paleogenico.

5 - Inquadramento geodinamico dei vari processi metamorfici alpini delle Alpi Orientali

Riassumendo, i processi metamorfici documentati nelle Alpi Orientali sono i seguenti:

- A) metamorfismo cretaceo (circa 100 m.a.) nelle rocce di fondo oceanico, legate a gradienti termici di circa 10-15° C/km (scisti blu eclogiti);
- B) metamorfismo cretaceo (circa 100 m.a.) nelle rocce austriache dell'area Monteneve-Mesozoico del Brennero e verosimilmente in parti dell'austroalpino a sud e a est della Finestra dei Tauri, legato a gradienti termici di circa 28-30° C/km (zoneografia dalla zona della clorite fino alla zona della staurolite);
- C) metamorfismo paleogenico (circa 40 m.a.) nelle rocce pennidiche e nel margine settentrionale dell'austroalpino a sud dei Tauri, legato a gradienti termici di

circa 28-30° C/km (zoneografia della zona della clorite alla zona della staurolite);

- D) metamorfismo presso il limite oligocene-miocene (20 m.a. circa) probabilmente a diffusione regionale ma documentabile solo localmente dove esistono situazioni geologiche particolari (parte bassa della facies degli scisti verdi; gradiente termico non stimabile).

Esaminiamo ora, per ciascuno di questi processi, quali sono le implicazioni geodinamiche imposte dai vincoli petrologici e paleogeotermici. Nel fare ciò, utilizzeremo il modello corrente di «plate tectonics», ma senza voler significare che detto modello sia l'unico possibile per spiegare l'evoluzione geodinamica delle Alpi Orientali.

A) Il metamorfismo cretaceo di HP/LT implica un sovraccarico di almeno 30 km, che si spiega bene con una situazione di subduzione. Che nel tardo cretaceo inferiore ci fosse una situazione geodinamica di questo tipo è comunemente ammesso sulla base di altre considerazioni. Quindi il valore di quanto è stato sopra riportato per questo evento metamorfico è congruente con il quadro geologico generale. Va notato che verosimilmente la situazione di subduzione si è protratta per un certo periodo di tempo (p. es. 130-80 m.a. secondo FRISCH, 1978). Quindi la piastra subdotta può aver avuto il tempo di riscaldarsi e di essere perciò gradualmente interessata da metamorfismo progressivo sotto alta pressione.

B) Di più difficile interpretazione geodinamica è il metamorfismo cretaceo presente nell'Austroalpino, per il quale un carattere molto indicativo è, a nostro avviso, la forma a stretto belt della zona di più alta temperatura. Fra i possibili modelli alternativi citiamo i seguenti:

1) questo metamorfismo, proprio perchè esclusivo della placca soprastante quella subdotta, potrebbe rappresentare il belt metamorfico appaiato al belt di HP/LT. Un dato a sfavore di questa interpretazione potrebbe però essere rappresentato dalla contemporaneità, che sembra stretta sulla base dei dati cronologici disponibili, fra questi due metamorfismi. A favore, d'altra parte, potrebbe essere addotto il fatto che nell'Austroalpino a sud dei Tauri le età radiometriche pertinenti sembrano sgranarsi in un intervallo di tempo relativamente largo (110-60 m.a.: BORSI et al., 1974; HAWKESWORTH, 1976) e che il gradiente termico legato a questo evento è, per quanto basso, più alto di quello del belt di HP/LT;

2) questo metamorfismo richiede comunque un sovraccarico tettonico di almeno una ventina di km. Ciò suggerisce che anch'esso implica una situazione simile a quella di subduzione ma con carico inferiore rispetto a quello del belt di HP/LT e — almeno per quanto riguarda l'area di Monteneve-Brennermesozoikum — in assenza di adiacente oceano. Potrebbe essersi trattato di una invaginatura intracrostale, come schematizzato in Fig. 6. Un modello per spiegare la formazione di tale invaginatura potrebbe essere basato sull'evoluzione, in regime

di convergenza, di una sinclinale molto profonda di filladi paleozoiche in zona di forte debolezza crostale. Tale quadro cinematico potrebbe anche fornire una soluzione al problema della messa in posto della Falda di Steinach, falda che si è piazzata anteriormente al metamorfismo cretaceo ma che geometricamente ben si collega alla zona di Monteneve (SASSI & MENEGAZZO, 1971).

Allo stato attuale delle conoscenze il secondo modello ci sembra — per quanto ancora solo abbozzato — più probabile del primo. Siamo però ben lungi dal ritenere che il problema dell'interpretazione geodinamica di questo metamorfismo sia in via di risoluzione. Manca infatti ancora un elemento molto importante, e cioè la conoscenza dell'esatta distribuzione e della precisa cronologia di questo metamorfismo a sud e ad est della Finestra dei Tauri.

C) Il metamorfismo paleogenico presenta anch'esso una problematica che finora sembra essere sfuggita all'attenzione di molti studiosi.

1) Anzitutto va notato che esso è troppo più recente di quello di HP/LT per poter essere collegato ad esso in un unico semplicistico ciclo;

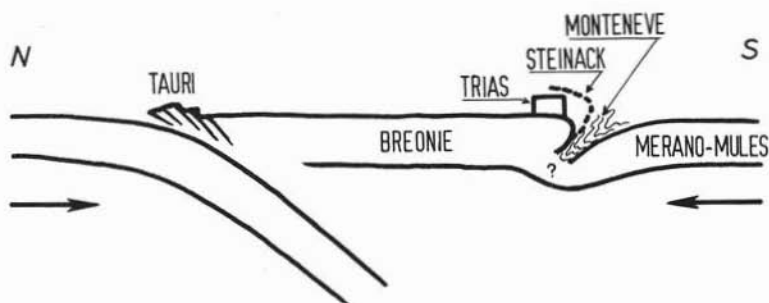


Fig. 6. — Ipotesi sull'origine del metamorfismo cretaceo di Monteneve. La rappresentazione è solo estremamente schematica e, più che rappresentare un modello, vuole provocare discussioni sull'argomento.

2) inoltre, esso è localizzato nelle rocce pennidiche (cioè nella piastra subdotta), e quindi non trova spiegazione nel semplicistico modello di tettonica a placche con piano di subduzione posto fra il Pennidico e l'Austridico e immergente verso sud, modello coralmente accettato. Secondo i canoni delle plate-tectonics, un metamorfismo di questo tipo si colloca solo nella piastra sovrastante quella subdotta (MIYASHIRO, 1972; ERNST, 1975).

Questi due tipi di considerazioni suggeriscono la necessità di invocare un secondo momento di subduzione:

- più recente, cioè tale che esso possa implicare un acme termico di 40 m.a. fa nella piastra sovrastante il piano di Benioff;
- con piano di subduzione immergente a sud ma posto più a nord della Finestra dei Tauri, così che il Pennidico sia diventato parte della piastra sovrastante quella subdotta.

È difficile trovare prove concrete di ciò, per il fatto che a nord della Finestra dei Tauri non si nota nessun indizio affiorante di questo nuovo piano di subduzione; tuttavia ciò può essere dovuto alla complessa tettonica successiva. È però importante notare che altri motivi hanno indotto altri autori ad invocare una nuova subduzione (v. rassegna di ROEDER & BÖGEL, 1978), e per giunta a nord della Finestra dei Tauri e in età compatibile con quanto da noi sopra esposto (FRISCH, 1978).

Nell'ambito di questa interpretazione trova una facile spiegazione anche la formazione dei magmi granitoidi di 30 m.a., che hanno generato l'allineamento plutonico intraaustriaco di Rensen-M. Alto-Rio Vena-Cima di Vila-Vedrette di Ries (SASSI et al., 1974; BORSI et al., 1978 a, b; 1979).

D) Il metamorfismo presso il limite oligocene-miocene è, sulla base dei dati disponibili, di difficile inquadramento geodinamico poichè non sono noti nè il relativo gradiente termico nè l'esatta distribuzione. Pertanto il grado di libertà per le speculazioni è tanto elevato da sconsigliare ogni ipotesi. Tuttavia, il fatto che esso è documentabile almeno in parte delle Austridi e almeno in parte della Finestra dei Tauri suggerisce la necessità di invocare al limite oligocene-miocene una situazione geodinamica tale da provocare un nuovo episodio di aumento del flusso di calore su scala regionale. A quest'ultima anomalia termica ed al successivo intergioco sollevamento/erosione sarebbero poi legate le età radiometriche di raffreddamento delle miche, che nelle Alpi Orientali raggiungono i valori più bassi nella fascia nucleare dei Tauri, senza mai scendere ai di sotto di 15 m.a. (RAITH et al., 1978).

Concludiamo sottolineando che, come nelle Alpi Occidentali (FREY et al., 1974), l'evoluzione geodinamica alpina è scandita anche nelle Alpi Orientali da crisi termiche cronologicamente ben separate alle quali corrispondono particolari regimi geodinamici. Ciò significa che la costruzione dell'edificio alpino è dovuta ad un susseguirsi di parossismi piuttosto che ad una « attività » dinamica e termica continua (TRÜMPY, 1973). Il ripetersi di tali parossismi, ogni volta con caratteri peculiari e non ben noti, deve rendere cauti nell'uso *sic et simpliciter* del semplicistico modello di plate-tectonics.

BIBLIOGRAFIA

- ABRAHM E., HÖRMANN P.K., RAITH M. (1974) - *Progressive metamorphism of basic rocks from the southern Hobe Tauern area. Tyrol (Austria)*. N. Jb. Miner. Abh., 122, 1-35.
- ACKERMANN D. & MORTEANI G. (1973) - *Occurrence and Breakdown of Paragonite and Margarite in the Greiner Schiefer Series (Zillertal Alps, Tyrol)*. Contr. Miner. Petrol., 40, 293-304.
- BELLIENI G. (1974) - *Sugli aggregati microgranulari di cianite esistenti nei micascisti austridici a nord-ovest di Brunico (Alto Adige)*. Studi Trentini Sc. Nat., 51, 105-112.
- BIANCHI A. & DAL PIAZ G.E. (1934) - *Studi geologici e petrografici sull'Alto Adige Orientale e Regioni limitrofe*. Mem. Ist. Geol. R. Univ. Padova, 10.

- BÖGEL H., MORTEANI G., SASSI F.P., SATIR M. & SCHMIDT K. (1979) - *The Hercynian and pre-Hercynian Development of the Eastern Alps. Report on a meeting*. N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 159, 82-112.
- BORSI S., DEL MORO A., SASSI F.P. & ZIRPOLI G. (1973) - *Metamorphic evolution of the Austridic rocks to the south of the Tauern Window (Eastern Alps): radiometric and geo-petrologic data*. Mem. Soc. Geol. Ital., 12, 549-571.
- BORSI S., DEL MORO A., SASSI F.P., ZANFERRARI A. & ZIRPOLI G. (1978 a) - *New geo-petrologic and radiometric data on the Alpine history of the Austridic continental margin south of the Tauern Window (Eastern Alps)*. Mem. Sci. Geol. Univ. Padova, 32, 20 p.
- BORSI S., DEL MORO A., SASSI F.P. & ZIRPOLI G. (1978 b) - *On the age of the periadriatic Rensen massif (Eastern Alps)*. N. Jb. Geol. Paläont. Mh., 1978/5, 267-272.
- BORSI S., DEL MORO A., SASSI F.P. & ZIRPOLI G. (1979) - *On the age of the Vedrette di Ries (Riesferner) massif and its geodynamics significance*. Geol. Rundschau, 68, 41-60.
- BORSI S., DEL MORO A., SASSI F.P. & ZIRPOLI G. (1980 a) - *New petrographic and radiometric data on the Oetzal and Stubai orthogneisses (Eastern Alps)*. N. Jb. Miner. Mh., 1980/2, 75-87.
- BORSI S., DEL MORO A., SASSI F.P., VISONÀ D. & ZIRPOLI G. (1980 b) - *On the existence of Hercynian Aplites and Pegmatites in the Aurina Valley (Austrides, Eastern Alps)*. N. Jb. Miner. Mh. (in stampa).
- DE PIERI R. & GALETTI G. (1972) - *Analisi alla microsonda di granati zonati in scisti austro-alpini delle valli Fosse, Passiria e Ridanna (Alto Adige)*. Mem. Ist. Geol. Miner. Univ. Padova, 29, 33 p.
- DE VECCHI GP., JUSTIN-VISENTIN E. & SASSI F.P. (1971) - *Analisi microstrutturali degli scisti Raibliani del Tribulaum, degli scisti post-ercinici del Greiner e degli scisti di Monteneve in Alto Adige*. Mem. Ist. Geol. Miner. Univ. Padova, 29, 25 p.
- ERNST W.G. (1975) - *Metamorphism and plate tectonic regimes*. Benchmark Papers in Geology, Dowden, Hutchinson, Ross eds., Stroudsburg.
- FRANK W., KLEIM P., NOWY W., SCHARBERT S. (1976) - *Die datierung geologischer Ereignisse in Altkristallin der Gleinalpe (Steiermark) mit der Rb/Sr-Methode*. Tschermarks Miner. Petr. Mitt., 23, 191-203.
- FREY M., HUNZIKER J.C., FRANK W., BOCQUET J., DAL PIAZ G.V., JÄGER E. & NIGGLI E. (1974) - *Alpine Metamorphism of the Alps. A Review*. Schweiz. Miner. Petr. Mitt., 54, 247-290.
- FRIEDRICHSEN H. & MORTEANI G. (1979) - *Oxygen and hydrogen isotope studies on minerals from Alpine fissures and their gneissic host rocks, Western Tauern Window (Austria)*. Contr. Miner. Petrol., 70, 149-152.
- FRISCH W. (1976) - *Ein Model zur alpidischen Evolution und Orogenese des Tauernfenster*. Geol. Rundschau, 65, 375-393.
- FRISCH W. (1978) - *A Plate Tectonics Model of the Eastern Alps*. In: CLOOS, ROEDER, SCHMIDT eds., Stuttgart, Alps, Apennines Hellenides, 167-172.
- FRY N. (1973) - *Lawsonite pseudomorphed in Tauern greenschist*. Miner. Mag., 39, 121-122.
- GREENWOOD H.J. (1976) - *Metamorphism at Moderate Temperatures and Pressures*. In: BAILEY and MACDONALD eds., London, The evolution of the Crystalline Rocks, 187-259.
- HAWKESWORTH C. (1976) - *Rb/Sr Geochronology in the Eastern Alps*. Contr. Miner. Petrol., 54, 225-244.
- HELBIG P. & SCHMIDT K. (1978) - *Zur Tektonik Petrogenese am W-Ende des Schneeberg Zuges (Ostalpen)*. Jahrb. Geol. B.-A., 121/2, 177-217.
- HOERNES S. (1973) - *Untersuchungen zur Metamorphose in den westlichen Hohen Tauern (Österreich)*. Tschermarks Min. Petr. Mitt., 20, 81-106.
- HOERNES S. & FRIEDRICHSEN H. (1974) - *Oxygen isotope studies on metamorphic rocks of the Western Hobe Tauern area (Austria)*. Schweiz. Miner. Petr. Mitt., 54, 769-788.
- HOERNES S. & FRIEDRICHSEN H. (1978) - *Oxygen isotope Studies of the Austroalpine and Penninic Units of the Eastern Alps*. In: Alps, Apennines Hellenides, CLOOS, ROEDER, SCHMIDT eds., Stuttgart, 127-131.

- HOERNES S. & FRIEDRICHSEN H. (1978) - *Oxygen and hydrogen isotope study of the polymetamorphic area of the Northern Ötztal-Stubai Alps (Tyrol)*. Contr. Miner. Petrol., 67, 305-315.
- HOINKES G. (1978) - *Zur Mineralchemie und Metamorphose toniger und mergeliger Zwischenlagen in Marmoren des südwestlichen Schneebergerzuges (Ötztaler Alpen, Südtirol)*. N. Jb. Miner. Abh., 131, 272-303.
- HOLDWAY M. J. (1971) - *Stability of andalusite and the aluminum silicate phase diagram*. Am. Journ. Sci., 271, 97-131.
- HOLLAND T.J.B. & RICHARDSON S.W. (1979) - *Amphibole zonation in metabasites as a guide to the evolution of metamorphic conditions*. Contr. Miner. Petrol., 70, 143-148.
- JÄGER E. (1973) - *Die alpine Orogenese im Lichte der radiometrischen Altersbestimmung*. Eclogae geol. Helv., 66, 11-21.
- JUSTIN-VAISENTIN E. & ZANETTIN B. (1973) - *On the Age of the White Mica Porphyroblasts in the Schneeberger Schists*. Contr. Miner. Petrol., 39, 341-342.
- MILLER CH. (1974) - *On the metamorphism of the eclogites and high grade blueschists from the Penninic Terrain of the Tauern Window, Austria*. Schweiz. Miner. Petr. Mitt., 54, 371-384.
- MILLER CH. (1976) - *Zur Metamorphose der eklogitischen Gesteine der Hohen Tauern*. Fortschr. Miner., 54, 60.
- MILLER D. S., JÄGER E. & SCHMIDT K. (1967) - *Rb/Sr-Altersbestimmungen an Biotiten der Raibler Schichten des Brenner Mesozoikums und am Muskowitgranitgneis von Vent (Ötztaler Alpen)*. Eclogae geol. Helv., 60, 537-541.
- MIYASHIRO A. (1972) - *Metamorphism and related magmatism in plate tectonics*. Am. Journ. Sci., 272, 629-656.
- MIYASHIRO A. (1973) - *Paired and unpaired metamorphic belts*. Tectonophysics, 17, 241-254.
- MORAU W. (1977) - *K/Ar ages from the Kor- and Saualpe, SE-Austria*. ECOG, V, Pisa.
- MORTEANI G. (1971) - *Gliederung und Metamorphose der Serien zwischen Stilluptal und Schlegeistal (Zillertaler Alpen, Nordtirol)*. Verh. Geol. B.A., 287-314.
- MORTEANI G. (1974) - *Exkursion B9, Petrology of the Tauern Window, Austrian Alps*. Fortschr. Miner., 52, 195-220.
- MORTEANI G. & RAASE P. (1974) - *Metamorphic plagioclase crystallization and zones of equal anorthite content in epidote-bearing amphibole-free rocks of the Western Tauernfenster, Eastern Alps*. Lithos, 7, 101-111.
- PURTSCHELLER F., HOERNES S. & BROWN G. C. (1972) - *An example of occurrence and breakdown of Paragonite*. Contr. Miner. petrol., 35, 34-42.
- RAASE P. (1972) - *Petrographie und Geologie des Oberen Zillergrundes und Sondergrundes (Zillertaler Alpen, Österreich)*. Unpubl. Doctor's Thesis, Univ. Kiel, 164 p.
- RAASE P. & MORTEANI G. (1976) - *The potassic feldspar in metamorphic rocks of the Western Hohen Tauern area, Eastern Alps*. Geol. Rundschau, 65, 422-436.
- RAITH M. (1971) - *Seriengliederung und Metamorphose im Östlichen Zillertaler Hauptkamm (Tirol, Österreich)*. Verh. Geol. B.A., 163-207.
- RAITH M. (1976) - *The Al-Fe (III) Epidote Miscibility Gap in a Metamorphic Profile Through the Penninic Series of the Tauern Window, Austria*. Contr. Miner. Petrol., 57, 99-117.
- RAITH M., RAASE P., KREUZER H. & MÜLLER P. (1978) - *The age of the Alpidic Metamorphism in the western Tauern Window Austrian Alps, according to Radiometric Dating*. In: « Alps, Apennines Hellenides », CLOOS, ROEDER, SCHMIDT eds., 140-148.
- ROEDER D. & BÖGEL H. (1978) - *Geodynamic interpretation of the Alps*. In: « Alps, Apennines Hellenides », CLOOS, ROEDER, SCHMIDT eds., 191-212.
- SASSI F. P. (1972) - *The petrological and geological significance of the values of potassic white micas in low-grade metamorphic rocks. An application to the Eastern Alps*. Tschermsk. Miner. Petr. Mitt., 18, 105-113.
- SASSI F. P. & MENEGAZZO L. (1971) - *Contributo alla conoscenza della falda di Steinach (Brennero)*. Mem. Ist. Geol. Miner. Univ. Padova, 29, 27 p.
- SASSI F. P., ZANFERRARI A., ZIRPOLI G., BORSI S. & DEL MORO A. (1974) - *The Austrides to the south of the Tauern Window and the periadriatic lineament between Mules and Mautben*. N. Jb. Geol. Paläont. Mh., 421-434.

- SASSI F.P., BORSI S., DEL MORO A., ZANFERRARI A. & ZIRPOLI G. (1978) - *Contribution to the Geodynamic interpretations in the Eastern Alps*. In: « Alps, Apennines Hellenides », CLOOS, ROEDER, SCHMIDT eds., 154-160.
- SASSI F.P. & ZIRPOLI G. (1979) - *Stato delle conoscenze sulla storia pre-Ercinica delle Alpi Orientali*. Mem. Soc. Geol. Ital., 20, 9-18.
- SATIR M. (1975) - *Die Entwicklungsgeschichte der westlichen Hohen Tauern und der südlichen Ötztalmasse auf grund von radiometrischen Altersbestimmungen*. Mem. Ist. Geol. Miner. Univ. Padova, 30, 82 p.
- SCHMIDT K., JÄGER E., GRÜNENFELDER M., GRÖGLER N. (1967) - *Rb-Sr- und U-Pb-Altersbestimmungen aus Proben des Oetztalkristallins und des Schneeberger Zuges*. Eclogae geol. Helv., 60, 530-536.
- SCOLARI A. & ZIRPOLI G. (1972) - *Filoni tarsoalpini metamorfici negli scisti austridici e pennidici della Val di Valles*. Mem. Ist. Geol. Miner. Univ. Padova, 29, 32 p.
- SCOLARI A. & ZIRPOLI G. (1973) - *Effetti del metamorfismo alpino sugli scisti austridici della Val di Valles (Alto Adige) e confronto con l'evoluzione dei contigui scisti pennidici*. Mem. Acc. Pat. SS.LL.AA., 85, 19-48.
- TRÜMPY R. (1973) - *The timing of orogenic event in the Central Alps*. In: « Gravity and tectonics », K. A. DE JONG and R. SCHOLTEN eds., J. Wiley, 229-251.
- ZANETTIN B. (1971) - *Recent geological investigation in Southern Tyrol. Alto Adige: Eastern Alps*. Verh. Geol. B.A., 315-325.
- ZANETTIN B. & JUSTIN-VISENTIN E. (1971) - *Considerazioni geologico-petrologiche sul «Tratto di Monteneve» («Schneeberg Gesteinzug») (Alto Adige)*. Mem. Ist. Geol. Miner. Univ. Padova, 29, 41 p.