

NOTE

CIRO ANDREATTA

APPUNTI SUL METAMORFISMO: I MOBILIZZAZIONE E MOVIMENTI DI MATERIA NEL METAMORFISMO TETTONICO

Introduzione.

Fra i problemi la cui soluzione può portare un notevole progresso alle idee ed alle conoscenze del metamorfismo in senso generale, la mobilizzazione di materia occupa senz'altro uno dei primi posti. In questi ultimi anni si nota un notevole rifiorire di studi sopra questo interessante argomento, mentre soltanto pochi anni fa era un problema poco dibattuto e forse poco sentito. Però, in realtà, nei tempi passati non sono mancati studiosi che si sono occupati più o meno profondamente del movimento di materia durante la cristallizzazione in generale e durante il metamorfismo in particolare.

Non ho intenzione di fare una rassegna storica della produzione scientifica che riguarda il problema in discussione; vorrei però ricordare due studiosi, uno italiano ed uno austriaco, che hanno trattato con acutezza qualche aspetto del problema.

Fra il 1867 e il 1905 per quasi 40 anni, LUIGI BOMBICCI, dalla cattedra bolognese, diffondeva le sue idee sull'accrescimento e le associazioni di cristalli. Nei Suoi numerosissimi lavori sono descritti con minuziosa precisione molti fatti geometrici riscontrati in cristalli e in aggregati cristallini, dipendenti dalle modalità di accrescimento, e sono esposte considerazioni circa le verosimili condizioni di ambiente che determinarono accrescimenti ed associazioni. Alcune deduzioni del BOMBICCI si rivelano come idee di un vero precursore ed è strano constatare come il Suo nome sia così sistematicamente ignorato dagli studiosi e come alcune Sue interessanti esperienze siano cadute completamente nel dimenticatoio. In proposito vorrei ricordare che si devono al BOMBICCI ed a Lui solo le idee sulla tettonica per colamento di masse plastiche, che attualmente sono rimesse a nuovo da molti ricercatori di tettonica.

Le vedute del BOMBICCI sono veramente notevoli per quell'epoca, anche se talora possono sembrare un pò fantasiose.

Molto più recenti sono le elaborazioni di BECKE che nel 1923, come conclusione di alcuni Suoi lavori e relazioni, pubblicava una nota che ha un titolo quasi identico a quello dell'argomento proposto come tema di questa riunione: « Stoffwanderung bei der Metamorphose ». Il BECKE riconosce, contrariamente alle precedenti dominanti idee, che durante un metamorfismo una roccia può cambiare di composizione e che le migrazioni di materia vi rappresentano un ruolo importante. Al pregevole lavoro di BECKE rimando per le citazioni bibliografiche, particolarmente dei lavori del GOLDSCHMIDT.

Nel periodo di tempo intercorrente fra i lavori di BOMBICCI ed i lavori di BECKE si è avuta la importante evoluzione di idee prodotta dalla diffusione delle ricerche chimiche su minerali e su rocce e dall'accettazione dei concetti della geochimica. Sulla base di questa constatazione ci si può domandare se è avvenuto, dopo i lavori di BECKE, qualche altra netta evoluzione nel campo delle scienze mineralogico-geologiche, che possa giustificare altri punti di vista del problema della mobilizzazione di materia nel metamorfismo, punti di vista che uniti al notevole progresso conseguito in altri 30 anni di ricerche e studi, possono portare una luce nuova nell'argomento.

Questi nuovi punti di vista esistono, a mio modo di vedere, e sono espressi dalle attuali conoscenze di cristallografia e di struttura dei cristalli. Si vedrà in seguito quale può essere la nuova luce portata da queste conoscenze al problema trattato.

Movimento di materia.

Premesso che per metamorfismo si deve intendere, almeno secondo la mia opinione, un processo di petrogenesi con ricristallizzazione e spesso accompagnato da trasformazione di minerali e che ricristallizzazione e trasformazione sono sufficienti per caratterizzare un processo metamorfico, non resta che ammettere anche che ogni metamorfismo deve necessariamente essere accompagnato da movimenti di materia.

La ricristallizzazione senza cambiamento di composizione chimica o con cambiamento dovuto ad apporto o ad asporto di materia o ad ambedue, come possono essere la cloritizzazione di bio-

titi e di granati, la sericitizzazione di plagioclasì, la biotitizzazione, la silicizzazione e tanti altri fatti caratteristici di un processo metamorfico, non sono assolutamente spiegabili senza il concorso di un movimento qualsiasi di materia sia pure anche piccolissimo. In ognuno di questi processi si ha la nascita di cristalli, cioè di nuovi reticoli cristallini.

È questo un fatto essenziale che può aiutare nello stabilire le modalità con le quali avvengono i movimenti di materia in un metamorfismo e quelle trasformazioni che generalmente si tende a schematizzare in reazioni chimiche più o meno convenzionali. Le attuali conoscenze di cristallografia, applicate alle più ampie osservazioni petrografiche e geologiche, possono inquadrare adeguatamente le possibilità di movimenti di materia nel metamorfismo che sono: diffusione « secca » di ioni, circolazione in soluzioni acquose o in uno stato sopracritico.

Limitando le considerazioni alla mobilitazione e al movimento della materia entro un complesso roccioso sottoposto a metamorfismo, è logico che si deve escludere un apporto notevole e sostanziale di materia dall'esterno del complesso stesso. L'intervento immediato o mediato di un magma determina una diffusione di sostanze dal magma alle rocce incassanti e queste possono venire arricchite di uno o più elementi e forse anche impoverite di altri, per opera delle correnti pneumatolitiche ed idrotermali. La trattazione dei problemi relativi al movimento di materia in un metamorfismo di contatto è perciò da tenere separata, almeno parzialmente, dalla trattazione dei processi di mobilitazione nel metamorfismo tettonico. È per questa ragione che limito per ora le mie considerazioni a quest'ultimo tipo di metamorfismo.

Tuttavia si deve riconoscere che l'ambiente chimico-fisico nel quale si vanno originando nuovi individui cristallini, cioè nuovi reticoli, può essere casualmente molto simile fra un metamorfismo di contatto ed un metamorfismo tettonico, ma non può essere mai perfettamente eguale. Se eguali possono essere la composizione chimica, la temperatura e le condizioni di pressione idrostatica, nel puro metamorfismo di contatto mancherà totalmente il movimento direzionale che è da ritenere essenziale nel puro metamorfismo tettonico. Naturalmente, si possono verificare casi di metamorfismi misti, nei quali una massa rocciosa permeata e imbevuta da soluzioni idrotermali di origine magmatica, viene contemporaneamente coinvolta in una fase tettonica con conseguenti movimenti.

Nel metamorfismo tettonico di tipo puro, cioè nel quale non si verifichi apporto di materia da masse magmatiche, occorre riferire alla composizione globale di una determinata formazione gli elementi o le sostanze che vengono mobilizzati. L'osservazione petrografica delle rocce metamorfiche tettoniche ci dimostra che si possono formare durante un metamorfismo minerali che contengono tutti gli elementi chimici più diffusi nelle rocce.

Movimenti di ioni.

La nascita e l'accrescimento di un cristallo durante una ricristallizzazione è determinata dalla sistemazione nello spazio di ioni o di gruppi ionici, come avviene in qualsiasi formazione di cristalli di sostanze inorganiche, tolte poche eccezioni. Se lo sviluppo finale di una mobilizzazione di materia è la sistemazione di ioni o gruppi ionici, vuol dire che questi devono esistere nell'ambiente stesso della mobilizzazione; vuol dire cioè che si tratta in definitiva di una mobilizzazione ionica.

Questa ricostruzione a ritroso delle modalità con cui avvengono le mobilizzazioni metamorfiche, può essere utilmente seguita ad una fase precedente. Trattandosi di movimento di ioni, questi si possono ammettere migrare allo stato diciamo « secco » senza il concorso di acqua, oppure come fase dispersa entro una corrente acquosa allo stato liquido o allo stato sopracritico.

E' noto che in diverse epoche successive dello sviluppo delle scienze geologico petrografiche, sono state affacciate ipotesi petrogenetiche basate sopra una diffusione « secca » di ioni, allo stato solido. Ma tali idee sono state in genere accolte poco favorevolmente, opponendosi ad essere accettate come ipotesi petrogenetiche il fatto che la velocità di diffusione è troppo bassa per poter interessare intere masse rocciose. Inoltre mi pare che se si fosse inquadrato il fenomeno della diffusione « secca » di ioni nelle attuali conoscenze di cristallografia e soprattutto dei reticoli cristallini dei silicati, le difficoltà di attribuire importanza petrogenetica al fenomeno stesso sarebbero aumentate notevolmente. •

Tuttavia, in una semplice ricristallizzazione si può e direi anzi che si deve ammettere un movimento di ioni senza il passaggio di questi in una fase dispersa: ma questo si deve ammettere non su scala rilevante dell'ordine di grandezza delle masse rocciose. Secondo il mio parere, i movimenti « secchi » di ioni

possono verificarsi solo entro l'ambito dello spazio che può interessare un cristallo o pochi cristalli vicini.

Sappiamo che calore e deformazioni meccaniche producono aumento delle oscillazioni o spostamento delle particelle di un reticolo cristallino tali da far sì che esse si vengano a svincolare dalle loro posizioni medie, liberandosi e conseguentemente venendosi a trovare nella condizione di produrre un nuovo edificio spaziale. Questa visione della ricristallizzazione ci mostra tale processo come una risistemazione spaziale di particelle mediante movimenti limitati. E tutti i petrografi conoscono la grande frequenza di queste ricristallizzazioni, sia per semplice azione del calore, nelle aureole di metamorfismo di contatto, sia per azione della compressione nettamente unilaterale nella epizona (fratturazioni e successive cristallizzazioni di granuli di quarzo e di calcite, geminazioni per compressione della calcite, ecc.).

Movimento di soluzioni ioniche.

Ma la completa ricristallizzazione di una roccia deve necessariamente essere accompagnata da movimenti di materia ben più ampi dell'ambito di un cristallo o di pochi cristalli. In questi casi la materia si deve muovere sotto forma di ioni o di gruppi ionici trascinati in una corrente acqua, almeno nelle zone superiori di metamorfismo.

In favore di una vera circolazione di ioni in soluzione non stanno soltanto la constatazione della difficile migrazione « secca » di ioni, ma anche due altre considerazioni basate su dati di fatto.

Anzitutto il fatto che tutte le rocce contengono acqua in quantità variabili ma sempre relativamente notevoli. Quest'acqua impregna le rocce giacendo nelle più fini fratturazioni, nelle porosità, negli interstizi fra i granuli cristallini e persino entro il reticolo cristallino; essa è facilmente rimossa e messa in circolazione dall'azione di forze esterne e la sua velocità di circolazione è tanto più bassa quanto più minuti sono gli spazi nei quali è contenuta. Non è necessario che qui ricordi le leggi di circolazione delle acque nelle falde acquifere sotterranee. In tutte le rocce variamente impregnate di acqua, persino nelle rocce argillose, le forze di gravità e di capillarità riescono a far circolare l'acqua, sia pure talora con velocità minime, e con l'acqua gli ioni che essa tiene in soluzione. Secondo il mio parere, la spinta unidirezionale che

agisce entro l'ambito delle correnti tettoniche deve far muovere anzitutto l'acqua che impregna una roccia. Su questa possibilità di movimento ritornerò in seguito.

A ulteriore conferma di una circolazione di ioni in soluzione nel metamorfismo della zona più alta, sta il fatto che i minerali che si vanno originando durante il metamorfismo stesso sono in buona parte caratterizzati dalla presenza di gruppi OH nel reticolo cristallino. Il fenomeno così vasto della sericitizzazione dei plagioclasti in epizona non si può spiegare che con l'immissione di OH nel reticolo dei plagioclasti sotto l'influsso di un movimento secondo una determinata direzione (vedasi ANDREATTA, 1954 a); analoghe conclusioni si debbono trarre dalle trasformazioni dei pirosseni in anfiboli nella mesozona, degli anfiboli in cloriti nella epizona, dei granati in cloriti in epizona, ecc.

I fatti brevemente sopra ricordati mi sembra che portino concordemente alla conclusione che nel metamorfismo tettonico, almeno in epi e in mesozona, deve aversi una circolazione di acqua e cioè di soluzioni ioniche.

Rimozione di materia nelle alterazioni sperimentali.

Per avere un'idea delle modalità con le quali avvengono le mobilitazioni nel metamorfismo, credo che sia utile accennare alle mobilitazioni di materia che avvengono alla superficie ad opera delle acque. Con ciò non voglio ammettere che la « solubilità » di un minerale possa essere la stessa alle diverse profondità: le diverse condizioni ambientali di temperatura e di pressione modificano notevolmente la « solubilità ». Ma le modalità generali, anzi direi i principi fondamentali, secondo i quali avviene l'attacco e la distruzione di un reticolo cristallino ad opera dell'acqua, devono necessariamente essere le stesse alle più varie condizioni di ambiente.

Lo studio dell'alterazione superficiale dei minerali costituenti le rocce è da lungo tempo oggetto di ricerche da parte di molti studiosi. Nell'Istituto di Mineralogia e Petrografia di Bologna si stanno studiando dal 1946 teoricamente e sperimentalmente i comportamenti di vari minerali al dilavamento operato da semplice acqua distillata a temperatura di 10-20° e continuato per 15-30 giorni con acqua sempre rinnovata.

I risultati dei lavori miei e di miei allievi (ANDREATTA 1948 e 1949, PIRANI 1952, EMILIANI 1952, TOMBA 1953 e ricerche inedite) portano alla costante conclusione che l'acqua rimuove gradualmente e successivamente dal reticolo cristallino i cationi più grossi e più debolmente legati e che poi passa alla distruzione dello stesso reticolo asportando silice ed allumina sotto forma di gruppi di coordinazione.

Facile e quasi immediata è la mobilitazione di K e di Na, seguita dalla mobilitazione di Ca, Mg e poi successivamente di Fe⁺⁺ e Fe⁺⁺⁺. L'impalcatura fondamentale costituita dai poliedri di coordinazione tetraedrici e ottaedrici, centrati da Si e da Al, viene abbattuta negli ultimi stadi della distruzione del reticolo cristallino. Nei singoli granuli cristallini delle polveri sottoposte a sperimentazione, questa alterazione procede dalla periferia verso il centro, man mano che l'acqua può attaccare strati successivamente più profondi del reticolo. Se l'acqua non è in movimento, l'attacco degli strati successivi a quelli superficiali viene notevolmente rallentato.

Movimento di materia nel metamorfismo tettonico.

Queste conclusioni mi pare che si possano applicare anche alle mobilitazioni nell'ambiente di metamorfismo, naturalmente tenendo debito conto della forte diversità delle condizioni di temperatura e di pressione che possono modificare il rapporto fra l'azione dell'acqua e dei suoi ioni e la resistenza delle particelle ad essere strappate dal reticolo cristallino.

Le idee espresse da alcuni Autori in passato, particolarmente dal BECKE e dal GOLDSCHMIDT, ammettevano una certa selettività nella mobilitazione della materia nel metamorfismo. GOLDSCHMIDT riconosceva un movimento di alcali, di calce e di silice da ammassi intrusivi verso le filladi incassanti, con una contemporanea rimozione di acqua da queste ultime. BECKE ammetteva una analoga migrazione di alcali e silice dalle parti laminate marginali della massa dei « gneis centrali dei Tauri » verso le rocce incassanti. Non solo, ma il BECKE faceva un passo più avanti col supporre una migrazione di calce dalle rocce incassanti verso il

« gneis centrale » e dubitativamente anche di allumina addirittura nei due sensi opposti. Ambedue gli Autori vedevano nei movimenti di materia la tendenza delle masse rocciose colpite da un metamorfismo ad uniformare e persino ad eguagliare le loro composizioni chimiche.

Come si vede, i due Autori concordano nell'ammettere, sulla base di numerose analisi chimiche, un movimento di sostanze molto in grande, da masse rocciose ad altre.

Ad analoghe conclusioni sono arrivato anch'io durante lo studio dettagliato del materiale petrografico di alcune regioni del gruppo dell'Ortles e in particolare della Val di Peio, sulla quale sto preparando una grossa memoria: ortogneis di tipo granitico si dimostrano impoveriti di alcali durante un metamorfismo di mesozona, mentre i parascisti incassanti presentano un arricchimento in alcali.

In base alle attuali conoscenze di cristallochimica e di strutturalistica è da ritenere, anche riferendosi ai risultati sperimentali ottenuti nel campo dell'alterazione superficiale dei minerali delle rocce, che dai reticoli dei minerali vengano mobilitizzati ioni e gruppi ionici ad opera di acqua e che la mobilitizzazione avvenga selettivamente, in base alle proprietà di ioni e gruppi ionici.

Dalle osservazioni petrografiche si deduce che la rimozione e la mobilitizzazione di ioni e gruppi ionici nel metamorfismo non si limita alla parte superficiale di un reticolo cristallino, ma può approfondirsi variamente nel suo interno, probabilmente in base alle condizioni di pressione e di temperatura.

La mobilitizzazione selettiva porta all'origine di soluzioni che contengono ioni liberi, come Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Fe^{++} , e aggregati di ioni in coordinazione tetraedrica (SiO_4) e (Al X_4) e ottaedrica Al X_6 ($\text{X} = \text{O}, \text{OH}$). Dunque si deve ammettere una circolazione di soluzioni contenenti questi ioni e gruppi ionici in variabile rapporto, non solo in base alla composizione delle rocce interessate al metamorfismo, ma anche in relazione alle condizioni ambientali. Secondo il mio parere, cioè, è da ritenere probabile che le soluzioni circolanti abbiano composizione diversa in rapporto alla zona di profondità nella quale avviene il metamorfismo a parità di composizione delle rocce.

A questo proposito sarà opportuno ricordare brevemente

qualche fatto specificamente osservato nei metamorfismi tettonici delle diverse zone di profondità ⁽¹⁾.

Mobilizzazione e separazione selettive.

E' comune idea che i componenti più solubili e mobilizzabili nel metamorfismo siano quelli che danno più frequentemente vene e filoncelli entro un complesso relativamente omogeneo di rocce. ESKOLA (1939) afferma che la silice è il materiale più mobile nel metamorfismo ed i filoni e le vene di quarzo sono i più espressivi prodotti della differenziazione metamorfica. Ciò è vero solo in apparenza: nelle vene e filoni noi vediamo solo quella materia che è bensì stata mobilizzata con maggiore facilità, ma che ha trovato altresì le condizioni ambientali adatte a separarsi, direi quasi a precipitare, dalle soluzioni circolanti. Queste condizioni che facilitano la separazione non sono soltanto i fattori classici, temperatura e pressione, ma anche la relativa concentrazione fra i diversi ioni ed il pH delle soluzioni stesse.

Silice. Nel gruppo dell'Ortles ho potuto fare una interessante osservazione, a proposito della mobilizzazione della silice, e siccome ho avuto occasione di vederla confermata in altre zone delle Alpi, ritengo che essa costituisca una constatazione di valore generale. In base a numerose analisi di rocce delle tre formazioni fondamentali di parascisti della parte meridionale del gruppo dell'Ortles, tenendo conto della composizione delle stesse come si osserva in grande sul terreno e della scelta opportunamente fatta dei campioni in modo che essi siano il più possibile rappresentativi delle rispettive formazioni, ho constatato che nel loro complesso le tre formazioni di *paragneis e micascisti di catazona superiore*, di *micascisti e paragneis di meso-epizona* e delle *filladi quarzifere* hanno sostanzialmente la stessa composizione chimica. Malgrado questo fatto, vene e lenti di quarzo sono frequentissime e diffuse ovunque nella formazione delle filladi quarzifere, sono

⁽¹⁾ In un lavoro in corso di preparazione dimostrerò l'opportunità, sia per il significato genetico che per quello geologico, di usare ancora la distinzione degli ambienti di metamorfismo tettonico e delle rocce di cata — meso — ed epizona, anziché basarsi esclusivamente su concetti di facies metamorfiche e di facies mineralogiche.

più scarse nella formazione di meso-epizona e diventano direi addirittura rare nella formazione di catazona; mentre all'analisi mineralogica paragneis e micascisti di catazona si rivelano leggermente più quarzosi delle rocce delle altre due formazioni.

Si noti in particolare che il quarzo delle abbondantissime vene e lenti entro le filladi si presenta sempre del tipo bianco ialino o bianco latteo caratteristico dei quarzi di termalità relativamente bassa; mentre le rare vene di quarzo della formazione di catazona sono formate da tipi variamente grigiastri indicanti termalità alta.

Dunque nella catazona (superiore), a temperatura verosimilmente abbastanza alta, si è avuta una generale *dispersione* della silice nell'intero complesso roccioso, mentre nella epizona nella quale si originò l'attuale compagine ⁽¹⁾ delle filladi quarzifere, a temperature basse, si ebbe una *essudazione in vene e lenti* del quarzo stesso, cioè una concentrazione localizzata.

Questo dato di fatto, che io ritengo di valore generale, permette di concludere che la silice viene mobilizzata abbondantemente sia in catazona che in epizona, ma che solo in quest'ultima trova le condizioni ambientali adatte per una separazione in vene e lenti, soprattutto nelle ultime fasi del metamorfismo di epizona, dato che molte vene e filoni si dimostrano come riempimento di fratture di distensione. Queste condizioni sono evidentemente la bassa temperatura che determina la diminuzione della solubilità del quarzo, e forse anche il minore valore del pH e della pressione, particolarmente della pressione unidirezionale nella fase di distensione.

In conclusione, oltre che una mobilizzazione selettiva, nel metamorfismo si ha anche una separazione e cristallizzazione selettiva e secondo la zona di profondità.

In quanto alla modalità di circolazione della silice durante il metamorfismo, io ritengo che essa avvenga in vere soluzioni ioniche, come avviene nella prima fase dell'alterazione superficiale (v. ANDREATTA, 1948).

Feldispati-miche chiare-clinozoisite. Metalli alcalini e calcio sono facilmente mobilizzabili in tutte le zone di metamorfismo, ma forse

(1) Uso il termine « compagine » per indicare comprensivamente tessitura e struttura, in analogia ai termini tedesco « Gefüge » e inglese « Fabric ».

più in quelle profonde (particolarmente per il calcio) che in epizona. Essi circolano in soluzioni ioniche e si fissano in reticoli cristallini in maniera diversa secondo le condizioni ambientali dominanti a diverse profondità.

E' noto il generale processo di *michefazione* ed *epidotizzazione dei plagioclas*i in epizona (ANDREATTA, 1954 a); questi diffusi minerali, che possono cristallizzare e sono stabili in catazona, in epizona vengono letteralmente « riempiti » di lamelle di sericite se si tratta di termini poco calciferi, di lamelle di sericite e cristallini di clinozoisite se si tratta di termini mediamente calciferi, di soli cristalli di clinozoisite se si tratta di termini fortemente calciferi. Molto frequentemente i cristalli di plagioclasio vengono completamente distrutti in epizona con un processo che si può seguire nei diversi stadi di sviluppo, con precise osservazioni petrografiche. Dapprima la compressione unidirezionale determina solo lievi movimenti differenziali e nascita di lamelle sericitiche scarse entro piani di sfaldatura facile; segue una diffusa fratturazione dei plagioclas e lungo le fratture cristallizzano lamelle sericitiche; poi i plagioclas vengono frantumati, aumentano le lamelle di sericite e inizia la cristallizzazione di quarzo.

Sempre le lamelle micacee si orientano in maniera di facilitare il movimento di scivolamento entro piani, cioè nascono disponendosi col piano (001) parallelo al piano di scorrimento. Già nei primi stadi di sviluppo del processo si può notare l'orientarsi dei microliti micacei entro i piani di sfaldatura più facili (001) e (010) dei cristalli ospitanti; successivamente anche nei piani di meno facile sfaldatura (110) e ($1\bar{1}0$) (ANDREATTA, 1933-34) e persino entro (150) e ($1\bar{5}0$). Queste orientazioni regolate delle lamelle di sericite nei cristalli di plagioclas sono state ormai riconosciute in rocce delle più diverse parti della terra (ANDREATTA, 1954 a) tanto da potersi definire come leggi di valore generale.

Procedendo ulteriormente il processo della michefazione dei plagioclas, si può osservare la loro distruzione totale, con trasformazione in un aggregato di granuli di quarzo e di lamelle di sericite (qualche volta accompagnata da cloriti) e che queste lamelle si orientano tutte nei piani di scistosità che si vanno sviluppando sotto l'influsso delle compressioni unidirezionali. Anche i cristalli di quarzo si formano con un orientamento preferito.

La epidotizzazione dei plagioclas più calciferi si sviluppa con le stesse modalità e l'accrescimento dei nuovi cristalli avviene con

orientazione regolata, come si può osservare al microscopio (fin'ora però non è stata possibile una dimostrazione con diagrammi strutturali delle leggi di questa orientazione).

Tutte queste osservazioni sulla graduale trasformazione dei plagioclasti in epizona, dimostrano particolarmente alcuni fatti precisi.

1. La mobilitazione di materia avviene sia ai bordi che nell'interno dei cristalli di plagioclasti fino dai primi stadi di sviluppo del metamorfismo.

2. Tutti gli ioni del reticolo dei plagioclasti sono interessati con intensità diversa alla mobilitazione e la formazione dei cristalli di sericite e di epidoti implica la ricostruzione a nuovo dei reticoli cristallini, tali che non possono derivare per semplici rimaneggiamenti locali del primitivo reticolo dei plagioclasti, nel senso delle « reazioni topochimiche ». Nei reticoli dei plagioclasti devono avvenire diverse trasformazioni, le più importanti delle quali sono:

a) apporto di elementi dell'acqua e ricostruzione dell'edificio strutturale attorno agli atomi di Al, che passano dalla coordinazione 4 a quella 6, con conseguente rimaneggiamento dell'impalcatura dei tetrasilicati per passare rispettivamente a quella dei fillosilicati e dei nesosilicati;

b) allontanamento di una parte di alcali e di silice, inizialmente soprattutto del sodio; il calcio e il potassio sono fissati forse completamente nei cristalli di clinozoisite e di sericite; talora anche la silice, dopo evidente mobilitazione, non si allontana che di poco, essendo frequente la formazione dei cristalli di quarzo;

c) i cristalli dei minerali di neoformazione sono originati da aggregamento di ioni e di gruppi ionici (sotto forma di poliedri di coordinazione) che si legano sotto l'influsso costante del movimento imposto dalla compressione unidirezionale; i movimenti sono differenziali lungo i piani di sfaldatura dei plagioclasti e diventano notevoli quando si sviluppano lungo piani di scorrimento dell'intera roccia, cioè lungo le superfici di scistosità (caso generalmente coincidente con la distruzione totale dei plagioclasti); il quadro vettoriale di movimenti determina, secondo il mio parere, un generale isorientamento in piani di ioni e gruppi ionici e così l'origine dei reticoli dei fillosilicati e l'orientazione dei cristalli.

In questa azione generale del movimento sulla orientazione di ioni e gruppi ionici per dare origine a reticoli cristallini, è da vedere una delle fondamentali caratteristiche della circolazione di materia e della cristallizzazione conseguente alla mobilizzazione di materia nel metamorfismo tettonico di epizona.

In zone più profonde di metamorfismo, nelle quali si rigenerano i plagioclasti, la mobilizzazione più intensa di materia è complicata dalla venuta di alcali e di silice dalle zone di granitizzazione. Se vogliamo ammettere la ricostruzione dei reticoli dei plagioclasti è necessario ammettere pure la distruzione del reticolo dei fillosilicati (che potrebbero anche essere rappresentati da minerali argillosi), l'apporto di alcali, di silice e forse anche di calcio e l'allontanamento dei componenti dell'acqua verso le zone superiori di metamorfismo. In altre parole, nelle zone profonde si avrebbe una mobilizzazione con effetti opposti a quelli passati in rassegna in precedenza. Non tutti i fillosilicati sono tuttavia instabili in zone profonde e almeno la biotite si può rigenerare.

Silicati di alluminio. Significativa e abbastanza analoga alla michefazione dei plagioclasti, è la *trasformazione in sericite di cianite e di sillimanite in epizona*. Essa fu da me diffusamente osservata in paragneis e micascisti della formazione di catazona affiorante nella fascia meridionale del gruppo dell'Ortles, e precisamente in parascisti dimostranti evidente azione di un metamorfismo di epizona sovrapposto al prevalente metamorfismo di catazona superiore (ANDREATTA, 1954 *b*). E' nota la trasformazione dei due suddetti minerali in minerali argillosi nell'alterazione superficiale.

Nella michefazione di cianite e di sillimanite deve avvenire una distruzione del reticolo di questi minerali e una costruzione del reticolo dei fillosilicati, per probabile apporto di alcali e di silice e forse allontanamento di Al. Come ho accennato recentemente (ANDREATTA, 1954 *a*), le sericiti che derivano da plagioclasti e da cianite-sillimanite non sono necessariamente tanto ricche di alcali quanto vogliono le composizioni teoriche di muscovite e di paragonite. E' da ritenere che tali sericiti siano tipi di idromiche.

Nelle zone profonde di metamorfismo (e nelle aureole di contatto) l'origine di cristalli di Al_2SiO_5 , spesso a spese di minerali

argillosi e di idromiche, deve procedere con un lavoro intimo di reticoli e con un movimento di ioni in senso opposto al sopra accennato.

Si potrebbe continuare nelle interpretazioni dei movimenti di materia nella distruzione e nella ricostruzione di reticoli cristallini di minerali instabili rispettivamente stabili nelle diverse zone di metamorfismo tettonico: in tutti i casi si deduce una mobilitazione selettiva di materia sotto forma di ioni e gruppi ionici, migrazioni degli stessi e costruzioni di reticoli cristallini stabili nelle condizioni dominanti nelle diverse zone di profondità.

Dunque la selettività è da vedere sia nelle operazioni di rimozione con svincolo dal reticolo cristallino (in ordine frequente di facilità decrescente K, Na, Ca, Mg, Fe⁺⁺, ecc.), sia nelle migrazioni di materia allo stato di soluzioni ioniche.

Migrazioni direzionali di materia e isorientazione dei cristalli nascenti

Ho accennato al fatto che il metamorfismo tettonico è caratterizzato dall'ambiente di movimento delle correnti tettoniche: credo che sia logico ammettere che questo movimento abbia influenza sulla circolazione di materia in soluzione. Prescindendo dalla circolazione entro eventuali fratture, è da ritenere che tutta la compagine della roccia sia impregnata da soluzioni e queste soluzioni devono trovare nei piani di scorrimento laminare la più facile via di migrazione. Si deve ammettere pure che la forza che determina lo scorrimento laminare sia la causa che fa muovere le stesse soluzioni, tanto che si dovrebbe parlare di una specie di *circolazione forzata e orientata*.

Molti decenni di lavoro condotto da molti ricercatori di tutto il mondo, con analisi e con interpretazioni delle strutture orientate di rocce metamorfiche, hanno dimostrato senza dubbio alcuno che i cristalli di ogni specie mineralogica si trovano orientati in maniera da avere un piano cristallografico di massima densità di particelle del loro reticolo cristallino (perciò un piano di scorrimento e spesso di sfaldatura), parallelo o subparallelo alle superfici di scistosità.

Secondo il mio parere, nelle rocce di metamorfismo tettonico queste orientazioni comuni dei cristalli non sono dovute a movimento in solido dei singoli individui cristallini, che dovrebbero ruotare finchè si vengano a trovare nella posizione adatta allo

scorrimento (come l'orientamento dei cristalli nelle tessiture fluidali), tranne che in qualche tipo di milonite. L'isorientazione dei cristalli è da riferire all'influenza del movimento di scorrimento sopra la costruzione dei reticoli cristallini che si vanno formando durante un metamorfismo tettonico.

Nello scorrimento laminare entro una corrente tettonica è evidente che la materia si deve muovere obbedendo al movimento generale, cioè le soluzioni devono scorrere nei piani di scivolamento e gli stessi ioni e gruppi ionici devono fare altrettanto. Ho già dimostrato (ANDREATTA, 1948) come, secondo il mio modo di vedere, si originano i reticoli dei fillosilicati durante l'alterazione superficiale dei minerali: aggregati tetraedrici SiO_4 e ottaedrici AlX_6 ($\text{X} = \text{O}, \text{OH}$) si associano in piani per formare lembi o frammenti di pacchetti di strati a tetraedri dei minerali argillosi. In modo analogo si devono originare i reticoli di idrossidi.

Lo stesso aggregarsi di ioni e di gruppi tetraedrici e ottaedrici a dare strati piani del reticolo delle miche, deve avvenire con analoghe modalità sotto l'influsso del movimento dominante nel metamorfismo tettonico. Nella epizona, dove più intensa si fa sentire l'azione del movimento, si originano e sono stabili prevalentemente minerali della categoria dei fillosilicati, quali: miche chiare da feldispati e da Al_2SiO_5 , cloriti da biotite, da pirosseni, da anfiboli, da olivina, da granati. Fanno eccezione gli epidoti ed i minerali ubiquitari quarzo e calcite.

Le tensioni prodotte dal movimento nelle correnti tettoniche, oltre che agire nel senso di convogliare con direzioni definite la materia mobilizzata in soluzione, potrebbero anche fare sentire la loro influenza fino a produrre polarizzazioni negli ioni e facilitare così la costruzione dei reticoli stratificati.

Non si deve però credere che lo scorrere della materia nelle correnti tettoniche avvenga per movimento laminare strettamente in piani. Giustamente si parla di *superfici di scistosità* anziché di piani di scistosità e tutti i rilevatori di zone a scisti cristallini sanno quanto frequenti siano ondulazioni, increspature, arricciamenti e persino contorcimenti delle superfici di scistosità.

Come nelle correnti liquide che vediamo scorrere alla superficie della terra, anche nelle correnti tettoniche si devono formare tutte quelle irregolarità nello scorrimento di materia che si traducono nelle suddette variazioni di orientazione delle superfici di scistosità.

Tali irregolarità si devono spingere fino nella più minuta compagine del complesso in movimento, in modo da produrre deviazioni, vortici, tasche morte, ecc. e come ultimo risultato portare alla costruzione di reticoli di cristalli aventi piani di maggiore densità di particelle variamente inclinati rispetto ad un piano medio di scorrimento di una piccola zona della compagine.

Sono noti gli esempi di deviazione dalla orientazione media dei cristalli di miche in vicinanza di grossi porfiroblasti di granato, di anfiboli, di staurolite, ecc.

In queste irregolarità di orientamento si deve però sempre distinguere ciò che è il prodotto di una unica fase di movimento e di cristallizzazione da ciò che risulta per la sovrapposizione di più atti metamorfici.

*
* *

Sulla base di numerose osservazioni, di ricerche sperimentali e di deduzioni ricavate dalla conoscenza attuale delle proprietà del reticolo cristallino e dell'accrescimento dei cristalli, si può concludere quindi che durante un metamorfismo tettonico avviene una mobilitazione di materia sotto forma di soluzione acquosa di ioni e gruppi ionici, strappati selettivamente dai reticoli di minerali precedenti in rapporto alle condizioni di ambiente dominanti nelle diverse zone di metamorfismo. Dopo tale mobilitazione, ioni e gruppi ionici migrano seguendo prevalentemente la direzione di movimento della corrente tettonica con tutte le sue irregolarità. Verificandosi le condizioni favorevoli di ambiente, ioni e gruppi ionici si riuniscono in reticoli cristallini di minerali stabili alle diverse zone di profondità, reticoli che si orientano durante l'accrescimento in maniera da opporre la minima resistenza al movimento stesso, cioè disponendosi con i piani cristallografici di maggiore densità di particelle parallelamente alle superfici di scorrimento delle correnti tettoniche, naturalmente adattandosi a tutte le irregolarità delle stesse. Si formano in tale maniera le compagini orientate delle rocce di metamorfismo tettonico.

BIBLIOGRAFIA

- C. ANDREATTA - 1933, *Analisi strutturali di rocce metamorfiche, III. La disposizione dei microliti micacei nei plagioclasti di ortogneis*, «Periodico di Mineralogia», 4, 375-392, Roma.
- 1934, *Disposizione dei microliti micacei in plagioclasti di rocce intrusive (Analisi strutturali di rocce, IV)*, «Periodico di Mineralogia», 5, 217-235, Roma.
- 1948, *L'origine dei reticoli a strati nell'alterazione dei minerali costituenti le rocce*, «Period. di Min.», 16, 269-297, Roma.
- 1949, *Sopra l'alterazione delle miche* «Rendic. Soc. Miner. It.» 6. pp. 9, Pavia.
- (1954 a), *Ueber die Verglimmerung der Plagioclase in der tektonischen Metamorphose*, «Tschermaks Min. u. Petr. Mitt.», 4, 350-359.
- (1954 b), *La Val Peio e la catena Vioz-Cevedale: Studio geo-petro-tettonico e minerario di una parte del massiccio dell'Ortles*, «Acta Geologica Alpina», 5, Bologna.
- F. BECKE - 1916, *Fortschritte auf dem Gebiete der Metamorphose*, «Fortschritte der Min., Krist. und Petr.», 5, 210-264, Jena.
- 1923, *Stoffwanderung bei der Metamorphose*, «Tschermaks Min. und Petr. Mitt.», 36, 25-41, Wien.
- L. BOMBICCI - Serie completa dei lavori esistente nell'Istituto di Mineralogia e Petrografia dell'Università di Bologna.
- F. EMILIANI - 1952, *I minerali del gruppo dell'Ortler - VI. Biotite di Val di Bresimo e sua solubilità*, «Rend. Acc. Naz. Lincei, Cl. Sc. fis., mat. e nat.», 13, 173-176, Roma.
- P. ESKOLA - 1939, *Die Metamorphen Gesteine* (in T. F. W. BARTH-C. W. CORRENS-P. ESKOLA, *Die Entstehung der Gesteine*), Springer, Berlin.
- R. PIRANI - 1952, *I minerali del gruppo dell'Ortler, - IV. Antofillite e actinolite di Val di Bresimo, solubilità di questa actinolite*, «Rend. Acc. Naz. Lincei, Cl. Sc. fis., mat. e nat.», 13, 83-88, Roma.
- A. M. TOMBA - 1953, *I minerali del gruppo dell'Ortler - VII. Microclino della pegmatite di Val Martello e sua solubilità*, «Rend. Acc. Naz. Lincei, Cl. Sc. fis., mat. e nat.», 15, 203-206, Roma.