

NORIS MORANDI*, LUCIANO POPPI*, GIANLUIGI FELICE*

LE SERPENTINITI DI SASSO DELLA MANTESCA
E DI S. ZANOBI
(APPENNINO EMILIANO)**

RIASSUNTO. — Lo studio petrografico delle serpentinitì di Sasso della Mantesca e di S. Zanobi e le indagini cristallochimiche condotte sui minerali principali delle stesse hanno permesso di individuare delle strutture residue e dei termini della famiglia del serpentino che possono essere correlati a precisi momenti minerogenetici. I risultati delle indagini, condotte con l'uso del microscopio elettronico in trasmissione e a scansione, della diffrazione elettronica, della microsonda, delle analisi diffrattometrica, termica (DTG e DTA) e di assorbimento all'IR, si possono così riassumere:

- 1) le plaghe bastitiche sono costituite da lizardite in cristalli tabulari, isorientati, ad alto contenuto in Al_2O_3 ($\sim 4\%$) con granulometria ridotta e con un sensibile disordine strutturale; le plaghe giallastre, omogenee, non chiaramente sfaldabili, presentano una composizione vicina a quella di un serpentino teorico e risultano in prevalenza costituite da lizardite tabulare isodiametrica e listiforme;
- 2) il materiale serpentinoso che va a formare le microvene disposte a reticolato si differenzia per composizione chimica e mineralogica da quello che costituisce il riempimento delle maglie affusolate di detto reticolato. Il primo tipo di materiale è caratterizzato da Fe^{+++} , scarso contenuto in Al_2O_3 ($< 0,5\%$), prevalente clinocrisotilo, strutturalmente ordinato; il secondo da Fe^{++} , contenuto maggiore di Al_2O_3 e prevalente lizardite;
- 3) il materiale serpentinoso in vene macroscopiche è di due tipi diversi: a) ortocrisotilo connesso ad un fenomeno di ricristallizzazione per effetto di alte pressioni di carico; b) clinocrisotilo associato a lizardite poligonale, connessi ad un processo idrotermale.

Sulla base delle osservazioni petrografiche e dei dati analitici, viene suggerito uno schema genetico delle serpentinitì appenniniche, articolato in fasi successive di serpentinnizzazione.

ABSTRACT. — The petrographic study of the serpentinite rocks coming from Sasso della Mantesca and S. Zanobi and the crystal-chemical analyses of the serpentine group minerals show that the serpentine polymorphs are linked to particular pseudomorphic textures and assume a genetic meaning. The samples were examined by X-ray diffraction, thermal analyses (DTA and DTG), scanning and transmission electron microscopy, IR absorption spectroscopy, microprobe and chemical tests. The results are:

- 1) the bastites contain structurally disordered lizardite crystals with high Al_2O_3 content ($\sim 4\%$); the yellowish areas contain isodiametric and/or lath-like lizardite crystals with a limited isomorphous replacement in the chemical composition;
- 2) the mesh rims of the serpentinite rocks consist mainly of structurally ordered chrysotile $2M_{c1}$ with Fe^{3+} and a low Al_2O_3 content ($< 0.5\%$); the mesh cells consist of prevailing lizardite $1T$ with Fe^{2+} and an higher Al_2O_3 content;
- 3) the macroscopic veins are composed of two different types of serpentine materials: a) chrysotile $20r_{c1}$, connected to a recrystallization process; b) chrysotile $2M_{c1}$ + polygonal serpentine, connected to an hydrothermal process.

A genetic mechanism of the serpentinitic rocks from the northern Apennine is discussed.

* Istituto di Mineralogia e Petrografia dell'Università di Bologna. ** Lavoro eseguito con il contributo finanziario del C.N.R. (contratto n. 76.00123.05).

Introduzione

Nelle località Sasso della Mantesca e Sasso di S. Zanobi (F.° 98, Tav. I.G.M. ISE, Passo della Raticosa) si individuano alcuni affioramenti di modeste dimensioni (lunghezza massima di 100 m.) di rocce ofiolitiche, del tipo serpentiniti, immerse nelle « argille scagliose ». Queste rocce serpentinitiche sono massive, del tipo « ranocchiaia » e associate a gabbro eufotide in località Sasso della Mantesca; sono ampiamente brecciate e a volte miste a frammenti poligenici in località Sasso di S. Zanobi.

Le ricerche più recenti di impostazione petrografica relative a queste serpentiniti sono dovute a GAZZI (1956), a PELLIZZER (1961) e a BOCCHI et al. (1976). Tutti questi studi si limitano alla descrizione delle rocce in sezione sottile e ne definiscono i minerali costituenti sulla base del solo riconoscimento ottico. Una delle lacune che inevitabilmente conseguono alla limitatezza di questo strumento d'indagine mineralogica è la definizione imprecisa dei termini della famiglia del serpentino: si continua infatti a segnalare la presenza di antigorite quando una semplice indagine diffrattometrica basterebbe per escluderla; inoltre non appaiono distinzioni tra crisotilo e lizardite e quindi risulta difficile se non deviate attribuire significati genetici alle associazioni mineralogiche finora segnalate in tali rocce.

Scopo del presente lavoro è quello di individuare con i più recenti metodi di indagine mineralogica tutti i termini della famiglia del serpentino, variamente associati, per dare loro un significato genetico che possa aiutare ad inquadrare le serpentiniti nel complesso problema delle ofioliti appenniniche.

Descrizione petrografica

I campioni di serpentinite raccolti si possono distinguere macroscopicamente in due gruppi:

- 1) serpentiniti con lamelle bastitiche (prevalenti a Sasso di S. Zanobi);
- 2) serpentiniti tipo « ranocchiaia » (prevalenti a Sasso della Mantesca).

Quelle del primo gruppo si presentano compatte e relativamente tenere, di colore verde scuro. Su di un fondo quasi nero e finemente granuloso sono immersi individui di bastite verde scuro, con dimensioni variabili (da qualche millimetro fino a due o tre cm. di lunghezza) e con ampie superfici lamellari a riflessi madreperlacci. La struttura è solo apparentemente paragonabile alla porfirica ma da caso a caso variano i rapporti quantitativi tra la « massa di fondo » e i « megacristalli ». Questi ultimi, quando non sono chiaramente bastitici, presentano delle colorazioni dal verde al verde-giallo chiaro con sfaldabilità poco accentuata.

Le serpentiniti tipo « ranocchiaia » si presentano compatte e costituite da plaghe giallo-verdastre a contorni arrotondati, immerse in una matrice nera. Spesso sono presenti vene isorientate di crisotilo 2Or_{c1} in individui allungati e disposti perpendicolarmente alle pareti della vena (MORANDI, 1977).

Ambedue i tipi di serpentiniti sono interessati da vistose vene (fino a 2 o 3 cm. di spessore) di materiale serpentinoso da verde a giallo-avorio (MORANDI, 1977) che costituiscono un reticolato irregolare che favorisce la degradabilità delle masse rociose, sottoposte all'azione degli agenti atmosferici.

Lo studio petrografico effettuato su sezioni sottili e su superfici lucide ha permesso di rilevare la completa serpentinnizzazione della roccia primaria e ha portato a riconoscere alcune tessiture residue che possono portare a conclusioni genetiche. Tutti i campioni hanno una tessitura pseudoporfirica in cui i « megacristalli » a contorni arrotondati e lobati, rappresentano il prodotto di una completa serpentinnizzazione di individui idiomorfi e ben sviluppati di olivina, ortopirosseni e/o clinopirosseni. Il processo di serpentinnizzazione ha lasciato a volte inalterati elementi morfologici tipici: contorni e superfici di frattura per l'olivina, evidenti tracce di sfaldatura per i pirosseni. La accentuata sfaldabilità di questi ultimi è riconoscibile in quanto il processo di serpentinnizzazione ne ha evidenziato i piani di sviluppo. Quest'ultima caratteristica fornisce, in scala macroscopica, l'aspetto bastitico a detti « megacristalli ». Nei diversi campioni presi in considerazione varia notevolmente il rapporto quantitativo tra ex olivina ed ex pirosseni, ma in linea di massima la prima prevale nelle serpentiniti tipo « ranocchiaia » e viceversa.

Frequenti inoltre sono le plaghe a spinello con dimensioni massime intorno al mm. Al microscopio (sia per riflessione che per trasparenza) è possibile osservare che lo spinello ha contorni lobati e rientranti e che è sempre circondato da un materiale bianco-verdolino trasparente, di tipo cloritico che sfuma poi nella massa serpentinoso di fondo della serpentinite.

La « matrice di fondo » riconoscibile nella tessitura pseudoporfirica di queste rocce presenta caratteristiche costanti nei vari campioni:

- a) un reticolato a maglie affusolate di microvene contenenti cristalli aciculari di α -serpentino normali alle pareti e contenenti inoltre magnetite in criptogranulazioni disposte con maggiore frequenza nel corpo centrale di ciascuna vena;
- b) il materiale di riempimento delle maglie affusolate è ancora di tipo serpentinoso, raramente cloritico, criptocristallino, con colori di interferenza bassissimi; talvolta, quando la cristallinità aumenta, presenta la tipica tessitura a clessidra con frequenti zonature concentriche; mancano totalmente le criptogranulazioni a magnetite che caratterizzano invece le microvene; non sono peraltro riconoscibili caratteri tessiturali o morfologici che possano far pensare a preesistenti individui cristallini.

Indagini cristallografiche

Le indagini cristallografiche sono state condotte su frazioni separate a mano dai vari campioni e ritenute significative per un possibile quadro genetico. Queste frazioni corrispondono a:

- a) plaghe bastitiche corrispondenti ai « megacristalli » di pirosseni completamente serpentinnizzati;

- b) plaghe di colore da giallo-chiaro fino a verde-scuro, poco sfaldabili, corrispondenti ai « megacristalli » delle serpentiniti tipo « ranocchiaia »;
- c) « matrice di fondo » di colore scuro, macroscopicamente omogenea e microscopicamente costituita da un insieme di vene a reticolato con maglie fusiformi, riempite da un materiale serpentinoso criptocristallino, simile alla porzione b);
- d) vene a ortocrisotilo;
- e) « vene verdi » a clinocrisotilo + lizardite poligonale.

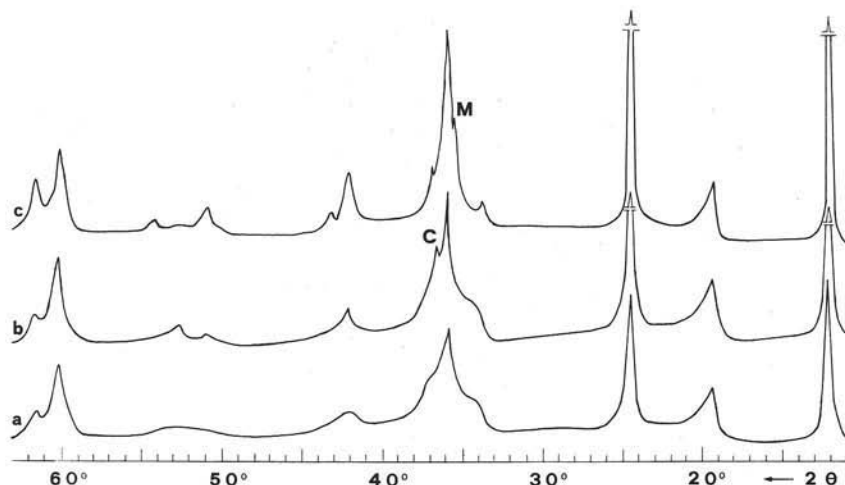


Fig. 1. — Schema dei diffrattogrammi delle frazioni *a*, *b*, *c* di tre campioni rappresentativi di serpentiniti. Sono indicati i riflessi più significativi di clinocrisotilo (C) e di magnetite (M). $\text{CuK}\alpha$: preparati disorientati.

Le ultime due frazioni sono state già esaminate e definite dal punto di vista cristallografico (MORANDI, 1977). Le analisi relative alle prime tre frazioni sono state condotte su cinque campioni: quando i dati ottenuti per i vari campioni sono paragonabili vengono qui riportati quelli relativi al più rappresentativo; se invece i dati sono discordanti, vengono riportati in toto. Le metodologie utilizzate sono quelle descritte da MORANDI (1977).

In microscopia elettronica per trasmissione il materiale serpentinoso della frazione *a*) risulta costituito da individui tabulari, a contorni frastagliati e con dimensioni molto inferiori al μm . La diffrazione elettronica presenta sempre le macchie con disposizione esagonale senza mai rivelare le microstrutture tipiche dell'antigorite. La frazione *b*) risulta molto simile alla precedente: l'unica differenza è che ai cristalli tabulari, prevalenti, sono associati individui listiformi o addirittura cilindrici, poco sviluppati in lunghezza, con caratteristiche paragonabili a quelle già commentate da GIUSEPPETTI et al. (1963) e da MORANDI e POPPI (1976). La frazione *c*) presenta cristalli con dimensioni maggiori ($\sim 1 \mu\text{m}$) rispetto alle prime due e, dal punto di vista morfologico, prevalgono gli individui listiformi o cilindrici tozzi segnalati nella frazione *b*). Quest'ultimo tipo di cristalli presenta una

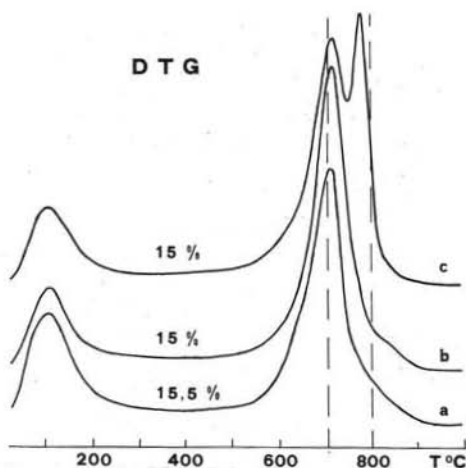


Fig. 2. — Curve DTG delle frazioni *a*, *b*, *c* di tre campioni rappresentativi di serpentinite. I numeri al centro indicano le percentuali di perdita in peso da 20° C a 1000° C. Velocità di riscaldamento 50° C/min.

la frazione *b*) è caratterizzata dallo stesso componente in associazione con clinocrisotilo (vedasi il riflesso indicato nella fig. 1); la frazione *c*) risulta infine costituita dall'associazione lizardite + clinocrisotilo + magnetite. In quest'ultima frazione i

diffrazione elettronica tipica del crisotilo $2M_{c1}$ con reticolo ad impalcatura ordinata e non elicoidale; qualche debole macchia extra nelle stratolinee dispari di primo ordine potrebbe suggerire l'ipotesi della presenza di qualche dominio di serpentino poligonale.

Lo studio diffrattometrico dei preparati disorientati ha permesso di osservare che in tutte le frazioni è assente l'antigorite e sono presenti sia la lizardite che il clinocrisotilo. In fig. 1 sono riportati tre diffrattogrammi rappresentativi delle singole frazioni. In particolare nella frazione *a*), esclusivamente costituita da lizardite, compaiono riflessi slargati e mal definiti, indicando una ridotta granulometria e forse un sensibile disordine strutturale;

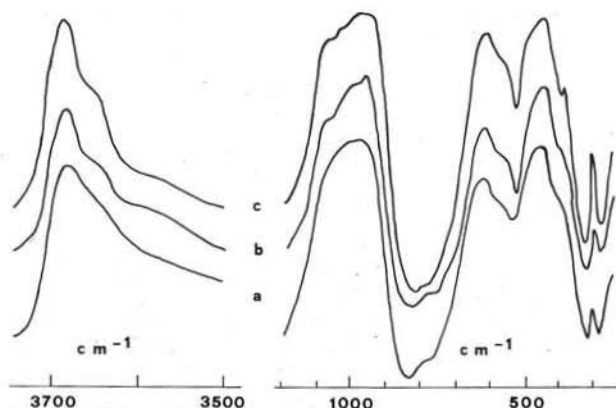


Fig. 3. — Spettri IR delle frazioni *a*, *b*, *c* di tre campioni rappresentativi di serpentinite. I campioni sono stati preriscaldati a 200° C per 20 ore.

due componenti serpentinosi sono rivelati da riflessi nitidi e intensi indicando una granulometria e/o un ordine strutturale superiori a quelli delle altre due frazioni.

Lo studio termico (DTA, TG, DTG) ha rivelato nelle due frazioni *a*) e *b*) di tutti i campioni una perdita in peso (0,7% in media), corrispondente ad una reazione endotermica per disidratazione, nell'intervallo di temperatura da 20° C a 50° C.

Nella frazione *c*) la corrispondente perdita è più contenuta (0,5% in media) per effetto forse di una più ridotta attività di superficie dei singoli individui cristallini, già risultati di dimensioni ed ordine strutturale più elevato. La seconda reazione endotermica, conseguente al processo di deossidrilazione differenzia ancora una volta le frazioni *a*) e *b*) dalla frazione *c*): quest'ultima è caratterizzata da una doppia reazione molto evidente nella curva DTG (fig. 2). La perdita registrata tra 700° C e 710° C nelle frazioni *a*) e *b*) è attribuibile al componente lizarditico; la coppia di picchi (a 710° C e 770° C) della frazione *c*) potrebbe invece essere attribuibile ad una associazione clinocrisotilo + lizardite poligonale in analogia con quanto osservato nelle « vene verdi » degli stessi campioni (MORANDI, 1977).

I risultati di tutte le analisi fino ad ora discusse concordano con quelli ottenuti dagli spettri di assorbimento IR: in fig. 3 vengono riportati gli spettri delle frazioni *a*), *b*), *c*) di tre campioni rappresentativi. Nell'intervallo 3700-3600 cm⁻¹ si può osservare che le due bande di assorbimento, dovute a « OH stretching », sono distinte nella frazione *c*), sono invece progressivamente più slargate ed indistinte nelle frazioni *b*) ed *a*): su queste ultime incide evidentemente il fattore « disordine » strutturale che si realizza nel reticolo con un disordine nella forza e nell'orientamento dei legami ossidrilici. Il « disordine » strutturale si realizza inoltre con una riduzione dell'effettiva simmetria dello strato tetraedrico nella lizardite come dimostrano le bande di assorbimento IR progressivamente indistinte nell'intervallo 1100-950 cm⁻¹ per le frazioni *c*), *b*), *a*) rispettivamente.

Sulla base di questo insieme di risultati si può concludere che:

- 1) le plaghe bastitiche sono costituite da lizardite tabulare a ridotta granulometria e con un sensibile disordine strutturale;
- 2) le plaghe giallastre delle serpentiniti tipo « ranocchiaia » contengono assieme a lizardite tabulare, anche lizardite listiforme e subordinatamente clinocrisotilo in cristalli cilindrici tozzi (1);
- 3) la « matrice di fondo » è costituita dall'insieme clinocrisotilo + lizardite tabulare e forse poligonale, caratterizzati da un sensibile ordine strutturale.

Le indagini di tipo chimico su tutte le frazioni esaminate sono state condotte usando diverse metodologie:

- 1) analisi chimica quantitativa di tipo ponderale su quelle frazioni che davano garanzie sufficienti di purezza (come per esempio la frazione bastitica, le vene ad ortocrisotilo e le « vene verdi »);
- 2) analisi chimica semiquantitativa, condotta su aree ben definite della roccia serpentinoso mediante il microanalizzatore combinato al microscopio elettronico a scansione (tipo Cambridge S4 del Macaulay Institute for soil Research of Aberdeen, UK), usando il metodo dello standard di confronto. Il numero delle aree esplorate è sempre superiore a dieci e i dati riportati per ogni frazione ne costituiscono la media;

(1) Non è escluso che quest'ultimo componente sia da imputare ad un possibile inquinamento della frazione interessata con le microvene della « matrice di fondo ».

TABELLA 1
Analisi chimiche

	1	2	3	4	5
SiO ₂	38,6	39,0	39,5	40,8	40,6
Al ₂ O ₃	4,3	0,4	0,4	1,5	2,0
Fe ₂ O ₃ tot.	7,9	7,0	6,3	3,7	2,8
MgO	33,8	37,8	39,9	39,0	41,2
H ₂ O _{tot.} (°)	15,0	n.d.	n.d.	15,0	13,5
Totale	99,6	84,2	86,1	100,0	100,1

(°) Determinata in TG su frazioni pure. 1 - frazione bastitica (ex pirosseni). 2 - ex olivina. 3 - matrice di fondo. 4 - vene a ortocrisotilo. 5 - vene verdi.

TABELLA 2
Schematizzazione dei processi genetici delle serpentiniti

Ambienti e fenomeni		Prodotti
Magma ultrabásico a forte profondità (mantello?)		crystalli di olivina, pirosseni e spinelli in equilibrio col fuso
risalita della massa ultrabásica verso la superficie; ingresso di H ₂ O (oceanica?) nel sistema		serpentinizzazione isochimica e formazione di lizardite particolare
facies metamorfica delle zeoliti	seppellimento; forte mobilitazione di materia; pressioni orientate; ambiente ossidante	microvene a reticolato con maglie affusolate; mobilizzazione di Mg e Fe
	ulteriore seppellimento; aumento della pressione di carico; ricristallizzazione del serpentino	vene isoorientate ad ortocrisotilo
azione dinamometamorfica		deformazione megacrystalli
regressione metamorfica; fessure a rete per rilascio di pressione; idrotermalismo come fase tardiva del metamorfismo		vene verdi a clinocristotilo + lizardite poligonale ben cristallizzati; arricchimento in Mg; mineralizzazioni

3) analisi chimica qualitativa di confronto eseguita su aree prestabilite col microscopio ottico utilizzando la stessa apparecchiatura indicata al punto 2.

I risultati delle analisi chimiche quantitative e semiquantitative (riferite ai soli ossidi principali) sono riportati in tab. 1 in cui ogni dato analitico rappresenta la media di valori ottenuti con diverse metodologie e su frazioni provenienti da campioni diversi. L'esigenza di ottenere dei dati che fossero indicativi del chimismo dei vari termini del serpentino e del complesso fenomeno di mobilizzazione di elementi chimici principali che ha investito le rocce durante la trasformazione, ha suggerito di limitare i dati analitici a quattro ossidi principali. Da prove eseguite occasionalmente si è visto comunque che elementi come Ca, Na, K e Ti sono presenti in quantità nettamente inferiore a 0,5 % espressa in ossidi e che Mn, Ni e Cr sono sempre presenti ma ai livelli quantitativi di elementi minori e quindi scarsamente caratterizzanti. Il Fe è riportato come Fe_2O_3 in conseguenza delle metodologie di analisi. I valori di $\text{H}_2\text{O}_{\text{tot}}$ corrispondono alla perdita totale alla calcinazione, registrata su frazioni pure.

La frazione bastitica (tab. 1 col. 1) è caratterizzata da un alto contenuto medio in Al_2O_3 (i valori estremi vanno da 5 % a 3 %) e da un contenuto in MgO inferiore a quello medio delle serpentiniti appenniniche (Bocchi et al., 1976; Beccaluva et al., 1973). L'alto contenuto in Al_2O_3 non è imputabile a porzioni pirosseniche residue (come è stato invece rilevato da Bertolani e Capedri, 1966, in serpentiniti dell'appennino reggiano) poichè l'esame diffrattometrico delle frazioni bastitiche non segnala la presenza di riflessi attribuibili a pirosseni e in più la distribuzione di Al su tutta la superficie di plaghe bastitiche è risultata uniforme nelle analisi qualitative alla microsonda. È facile dedurre quindi come un simile contenuto in Al nel reticolo della lizardite possa provocare distorsioni e scompensi tali da motivare ampiamente il disordine reticolare, documentato in precedenza. L'elevato contenuto medio in Fe_2O_3 è motivato dal fatto che qualche individuo bastitico presenta, in corrispondenza delle superfici di sfaldatura, microgranuli di minerali opachi: dove questi non esistono, il valore in ossido oscilla intorno a 6,4 %.

L'analisi della colonna 2 (Tab. 1) si riferisce alla media di dieci analisi semiquantitative alla microsonda su « megacrystalli » definiti ex-olivine per le particolari strutture residue ⁽²⁾. I risultati analitici si avvicinano a quelli di un termine serpentinoso puro.

Le analisi che si riferiscono quindi ai « megacrystalli » lasciano poco margine ad ipotesi di allochimismo nel processo di serpentinnizzazione degli stessi.

L'analisi della colonna 3 (Tab. 1) si riferisce alla media di dieci analisi semiquantitative alla microsonda effettuate sulla « matrice di fondo » a maglie affusolate. Il significato esclusivamente statistico di queste analisi è messo chiaramente in evidenza da un particolare di questa « matrice di fondo », vista al microscopio elettronico a scansione su un preparato levigato (fig. 4). In queste immagini le porzioni

(2) L'alto tenore in Fe è imputabile a criptogranulazioni di opachi.

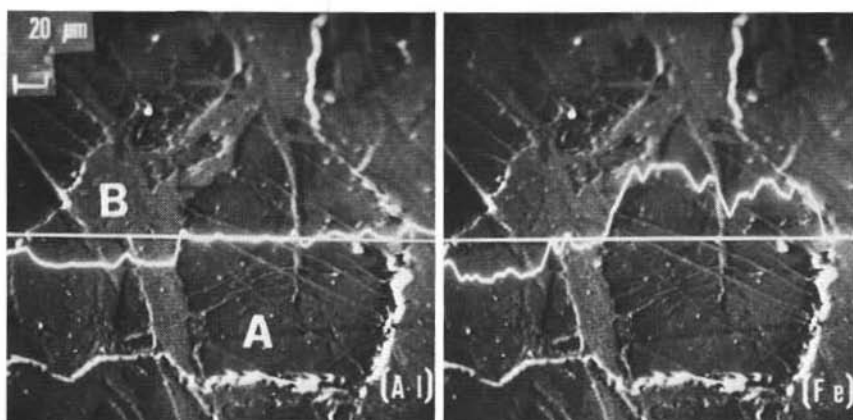


Fig. 4. — Immagini ad elettroni riflessi di una sezione lucidata di serpentinite. Analisi qualitative della radiazione X $AlK\alpha$ e rispettivamente $FeK\alpha$ condotte sulla linea orizzontale indicata al centro. A e B indicano aree distinte per composizione chimica ed aspetto tessiturale (spiegazione nel testo).

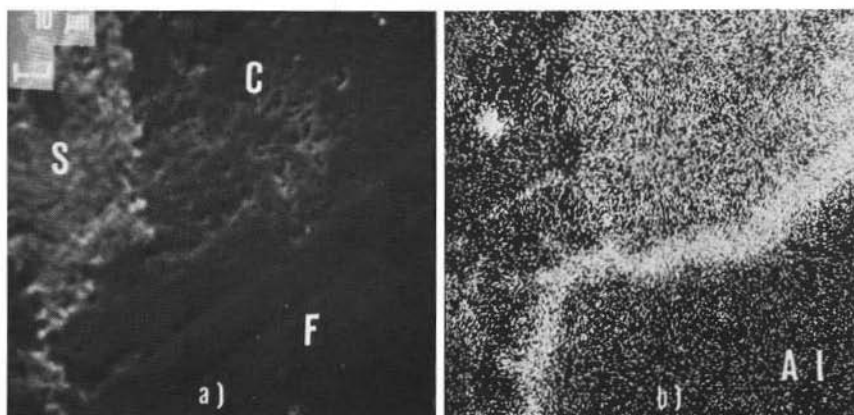


Fig. 5. — Microfotografie di una sezione lucidata di serpentinite: a) immagine ad elettroni riflessi; b) distribuzione di Al. S, C, F indicano aree a diversa composizione mineralogica (spiegazione nel testo).

indicate con A e B si distinguono per il diverso rilievo. B corrisponde alle vene a reticolato con maglie affusolate e A rappresenta il materiale di riempimento delle maglie stesse (quello che al microscopio ottico ha spesso struttura a clessidra e presenta una ridottissima potenza birifrattiva). Le porzioni indicate con A sono attraversate da microvene e nell'insieme risultano essere un materiale serpentinoso scampato alla mobilizzazione testimoniata dal reticolato a maglie (porzione B). L'analisi qualitativa di confronto effettuata per Al, Fe (fig. 4) e Mg sul tracciato indicato dal segmento orizzontale dimostra chiaramente che esistono differenze sensibili di contenuti nelle due porzioni A e B: il materiale di riempimento delle maglie è più ricco in Al e Fe ed è più povero in Mg rispetto alle vene che lo circondano e che lo permeano, presupponendo quindi una più facile mobilizzazione del Mg rispetto agli altri due componenti. Le differenze di chimismo tra le porzioni A e B

si collegano bene anche ai risultati delle indagini strutturali che indicano per l'intera frazione « matrice di fondo » una miscela di lizardite isodiametrica e listiforme (probabilmente nella frazione A) e di clinocrisotilo, strutturalmente ordinato (probabilmente nella frazione B).

I dati della colonna 4 e 5 (tab. 1) si riferiscono alla media di dieci analisi semiquantitative alla microsonda, effettuate su vene ad ortocrisotilo delle serpentiniti tipo « ranocchiaia » e rispettivamente su vene verdi macroscopiche. Le vene ad ortocrisotilo presentano una composizione costante nei vari campioni e molto prossima a quella di un serpentino teorico. Le vene verdi, invece, presentano le seguenti variazioni dai valori medi: SiO_2 da 41,5 % a 39,1 %; Al_2O_3 da 3,1 % a 1,3 %; Fe_2O_3 da 4,1 % a 1,9 %; MgO da 42,1 % a 40,0 %. Queste fluttuazioni sono dovute sia al grado di trasformazione per weathering (MORANDI, 1977) sia alla presenza di zonature di colore e cristallinità ai bordi esterni delle singole vene. A queste zonature corrispondono sensibili variazioni di contenuto in Al e Fe, come dimostrato dagli studi alla microsonda (MORANDI, 1977).

Con l'aiuto del microanalizzatore abbinato al microscopio elettronico a scansione si è potuto osservare infine la distribuzione degli elementi chimici principali in corrispondenza delle plaghe a spinello. La fig. 5a e b riporta l'immagine ad elettroni riflessi e rispettivamente la distribuzione di Al in un esempio significativo (per brevità non si riportano le distribuzioni degli altri elementi principali pur essendo significative). Da questo tipo d'indagine si è visto che:

- 1) le masse di spinello (S, nella fig. 5) sono costituite in prevalenza da Fe e subordinatamente da Al, Cr, Mg, Mn;
- 2) il materiale color verde pallido (C) che circonda la plaga a spinello, potrebbe essere di tipo cloritico dato il sensibile tenore in Al; questo materiale risulta poi essere contornato da una striscia arricchita in Al che funge da zona di passaggio verso la massa serpentinoso di fondo (F, nella fig. 5).

Queste osservazioni fanno supporre che le stesse condizioni chimico-fisiche che hanno determinato la fase principale di serpentinizzazione della massa ultrabasica abbiano innescato, senza condurlo a termine, una trasformazione di tipo allochimico dello spinello in clorite; la striscia arricchita in Al potrebbe essere interpretata come un fronte di reazione che ha favorito la cloritizzazione.

Considerazioni conclusive

L'esame petrografico delle serpentiniti di Sasso della Mantessa e di S. Zanobi, le indagini cristallografiche sui minerali di tipo serpentinoso che le compongono e infine le osservazioni già scaturite in un precedente lavoro (MORANDI, 1977) permettono di ipotizzare per queste rocce uno schema genetico articolabile in varie fasi.

I fase - La struttura pseudoporfirica delle serpentiniti esaminate presuppone come fase iniziale la segregazione dei cosiddetti « megacristalli » (olivina, pirosseni e spinelli) da un magma ultrabasico e il successivo rapido consolidamento della

« massa di fondo ». Data la totale assenza di strutture residue nella « massa di fondo » delle serpentiniti è difficile ricostruire la cristallinità del materiale prodotto durante l'ultimo atto del consolidamento. In tutti i casi però questo atto sarebbe correlabile alla risalita di una massa ultrabasica verso più alti livelli della crosta, dove si possono registrare sensibili riduzioni della temperatura e della pressione, con un probabile aumento della disponibilità di H_2O . Le variazioni termodinamiche, probabilmente associate all'aggiunta di H_2O al sistema ⁽³⁾, avrebbero provocato una sostanziale instabilità di tutte le fasi cristalline preformate, sottoponendole ad un processo di completa serpentinizazione. Lo studio petrografico testimonia questo processo e dimostra in aggiunta che si è trattato di una trasformazione topotattica delle fasi cristalline anidre in lizardite. Inoltre le frequenti strutture a clessidra osservate nel materiale di riempimento delle maglie della « massa di fondo » possono far pensare ad una formazione diretta di lizardite da una massa fusa residua o da una massa criptocristallina, non più in equilibrio.

Un simile processo di serpentinizazione non prevede mobilizzazione di materia e risulta quindi caratterizzato da un congelamento del chimismo dei reticoli dei minerali primari. Le indagini petrografiche e cristallografiche mostrano infatti che la lizardite formatasi in questa fase presenta un chimismo anomalo e inoltre le variazioni di contenuto in Al_2O_3 e di ordine strutturale sono direttamente correlabili con la natura del minerale da cui risulta derivata.

Il fase - Se si pensa alle particolari caratteristiche della matrice di fondo delle serpentiniti (microvene a reticolato con maglie affusolate) si può ipotizzare un'ulteriore fase di serpentinizazione, caratterizzata da una forte azione penetrante di convogli liquido-gassosi. Tale azione provocherebbe una forte mobilizzazione di materia senza escludere un'azione di estrazione selettiva di elementi chimici dai reticoli serpentinosi già formati.

È in questa fase che si sono formate le microvene caratterizzate dalla paragenesi α -serpentina (prevalentemente clinocrisotilo strutturalmente ordinato) + magnetite. L'intreccio di queste microvene e la tendenza all'isorientamento in due direzioni preferite, formanti sempre tra loro angoli vicini a 120° , suggeriscono che la mobilizzazione di materia sia avvenuta col contributo di pressioni orientate. Per inquadrare meglio questa fase bisogna aggiungere un particolare curioso: durante le analisi eseguite con la microsonda sulla « matrice di fondo », il pennello puntiforme del fascio elettronico trasformava in rosso scuro il colore verde del materiale di riempimento delle maglie formate dal reticolato di vene e lasciava inalterato il colore delle vene stesse. Se tale arrossamento è imputabile (come appare verosimile) ad una ossidazione di Fe^{2+} coordinato ottaedricamente nel reticolo serpentinoso, risulta possibile fornire una valutazione qualitativa della pO_2 esistente durante le due fasi di serpentinizazione della matrice di fondo. Il materiale di riempimento

(3) La provenienza e la disponibilità dell' H_2O nel processo di serpentinizazione delle peridotiti sono molto discusse (vedasi COLEMAN, 1977) pur essendo concordemente invocato il suo ruolo per giustificare la serpentinizazione in senso lato.

delle maglie, subendo l'arrossamento e contenendo quindi Fe^{2+} si sarebbe formato in condizioni non ossidanti nella prima fase della serpentinizzazione. Al contrario sarebbe stato ossidante l'ambiente in cui è avvenuta la seconda fase della serpentinizzazione, dove cioè ha preso origine il serpentino delle microvene (che non subisce arrossamento) e la magnetite.

III fase - Le vene isoorientate di crisotilo, già descritte in un lavoro precedente (MORANDI, 1977), sono tardive rispetto alle precedenti fasi minerogenetiche e sono imputabili ad un episodio in cui temperatura e pressione di carico hanno raggiunto valori tali da provocare la parziale instabilità dei reticoli serpentinosi già formati. Si sono creati così dei letti (probabilmente dove l'azione dinamica era più accentuata) o delle zone lentiformi in cui si è avuta una vera e propria ricristallizzazione del materiale serpentinoso formando di conseguenza un'impalcatura cristallina ad un'elevata simmetria (ortorombica) e una morfologia tubulare con elevato ordine reticolare. Le condizioni termodinamiche che caratterizzano questa fase sono riconducibili a quelle della facies metamorfica delle zeoliti. Frequenti deformazioni osservate nelle plaghe bastitiche e nelle stesse vene a ortocrisotilo testimonierebbero poi una successiva azione tettonica.

IV fase - Un successivo processo distensivo, associato forse ad un'azione di contrazione per raffreddamento delle serpentiniti stesse, deve aver provocato una fitta rete di fessure o di potenziali superfici di facile penetrabilità. Questa caratteristica ha poi favorito l'ultimo atto minerogenetico che ha caratterizzato queste serpentiniti: il riempimento di fratture con fasi idrate separate da soluzioni idrotermali. Le vene verdi e/o avorio a clinocrisotilo + lizardite con morfologia poligonale (MORANDI, 1977) e la presenza più rara di mineralizzazioni in vene a clorite o talco o solfuri sono una riprova di quest'ultima fase non più distintamente metamorfica.

A conclusione delle precedenti considerazioni, si propone lo schema evolutivo illustrato in tab. 2, riguardante i processi genetici delle serpentiniti di Sasso della Manteca e di S. Zanobi.

Questa ricostruzione è il risultato di una metodologia di studio che permette di correlare osservazioni petrografiche con indagini cristallochimiche. È nostro intendimento estendere tale procedura a tutti gli affioramenti principali delle serpentiniti appenniniche per fornire uno schema interpretativo della loro genesi che abbia una validità generale e non circoscritta.

BIBLIOGRAFIA

- BECCALUVA L., EMILIANI F., VENTURELLI G., ZERBI M. (1973) - *Ca, Fe, Mg, Mn, Cr, Ni, Co, distribution in some ultramafic rocks outcropping in the northern Apennines with some geological remarks*. Ateneo Parm., Acta Natur., 9 (1), 69-98.
- BERTOLANI M., CAPEDE S. (1966) - *Le ofioliti nelle province di Modena e Reggio Emilia*. Atti Soc. Nat. Matem. Modena, 97, 3-52.
- BOCCHI G., CALANCHI N., DAL RIO G., VIANELLO G. (1976) - *Studio chimico-petrografico delle ofioliti comprese tra le valli del T. Sillaro e del F. Panaro (Appennino Bolognese-Modenese)*. Atti Acc. Sc. Ist. Bologna, Cl. Sc. Fis., Rend., ser. 13, 3 (1), 165-200.
- COLEMAN R. G. (1977) - *Emplacement and metamorphism of ophiolites*. Rend. Soc. It. Miner. Petrogr., 33 (1), 161-190.
- GAZZI P. (1956) - *Serpentiniti ed idrotermaliti a prevalenti carbonati nelle alte valli dell'Idice e del Sillaro (Nota preliminare)*. Rend. Soc. Min. It., Anno XII, 143-149.
- GIUSEPPETTI G., TADINI C., VENIALE F. (1963) - *Ulteriore ritrovamento della lizardite in prodotti di alterazione di rocce serpentinitiche (Impruneta - Firenze)*. Rend. Soc. Min. It., 19, 123-141.
- MORANDI N., FELICE G. (1977) - *Significance of the serpentine minerals coming from veins in serpentinite rocks*. (In press).
- MORANDI N., POPPI L. (1976) - *Studio cristallografico di minerali del serpentino*. Acc. Naz. Lincei, Rend. Cl. Sc. Fis. Mat. Nat., ser. 8, 60, 274-288.
- PELLIZZER R. (1961) - *Le ofioliti nell'Appennino Emiliano*. Atti Acc. Sc. Ist. Bologna, Cl. Sc. Fis., Memorie, ser. 1, n. 8, 5-183.