

RENATO PELLIZZER

TRASFORMAZIONI SPERIMENTALI
ALLE CONDIZIONI PNEUMATOLITICHE E
IDROTERMALI DI ROCCE OFIOLITICHE APPENNINICHE

Riassunto. — Vengono riferiti i risultati di ricerche sperimentali alle condizioni pneumatolitiche e idrotermali sul metamorfismo di rocce ofiolitiche appenniniche.

Precisata la natura delle ricerche, ben diversa per caratteri da quelle di pura sintesi minerale, vengono descritti il metodo di lavoro, l'apparecchiatura usata ed alcune delle singole esperienze, nonchè i dati ad esse relativi.

I risultati fondamentali si riassumono in: variazione nella « compagine » delle rocce con mutamenti parziali o totali dello schema strutturale; variazioni qualitative e quantitative della composizione mineralogica con trasformazioni e neoformazioni di minerali.

Summary. — The results of some experimental researches under pneumatolitic and hydrothermal conditions are reported, which are concerning metamorphism of appenninic ophiolitic rocks.

The type of such researches is very different from pure mineral synthesis; methodology, equipment and some experiment made are reported, together with the correspondent data.

The fundamental results are summarized in this way: variations of the rock « fabrik » with partial or total changes in the structural schema; qualitative or quantitative variations in mineralogical composition along with trasformations and neoformations of minerals.

Zusammenfassung. — Es wird berichtet über die Ergebnisse von unter pneumatolithischen und hydrothermalen Bedingungen durchgeführte, experimentelle Forschungen über die Metamorphose appenninischer ophiolithischer Gesteine.

Nach näherer Bestimmung der Art dieser von einer reiner Mineralien-Synthese ganz verschiedenen Forschungen wird das dabei befolgte Vorgehen, die dabei verwendeten Vorrichtungen und einige einzelne dabei gemachte Erfahrungen sowie die dieselben betreffenden Daten angegeben.

Die grundlegenden Ergebnisse können zusammengefasst werden in: Veränderungen im « Gefüge » der Gesteine unter teilweiser oder vollständiger Aenderung des strukturellen Schemas, und qualitativen sowie quantitativen Veränderungen der mineralogischen Zusammensetzung mit Um- und Neubildungen von Mineralien.

Introduzione

Nel campo di ricerche sulla petrogenesi metamorfica e sulla minerogenesi i problemi connessi alla attività pneumatolitica e idrotermale hanno sempre avuto un ruolo fondamentale ed hanno sempre destato un vivo interesse in molti ricercatori.

Come è noto, mentre l'attività pneumatolitica si svolge in quello stadio dell'evoluzione magmatica caratterizzato da un ambiente in cui le condizioni di temperatura e pressione oltrepassano il punto critico delle soluzioni, l'attività idrotermale inizia al di sotto di tale punto. Questi particolari stadi vengono comunemente chiamati « fase pneumatolitica » e « fase idrotermale » e nella parola fase vengono riuniti due diversi significati: quello della « fase chimico-fisica » e quello della « fase geochimica ».

La fase pneumatolitica viene comunemente delimitata nell'intervallo di temperatura compreso fra i 500° ed i 380°, vale a dire a temperature comunque superiori a quella critica dell'acqua, al di sotto della quale invece si considera presente, per determinati valori della pressione, la fase idrotermale. E' opportuno rilevare che i limiti fissati solo in base ai valori della temperatura sono necessariamente molto approssimati, poichè in tale modo non si tiene conto di una gamma di fattori che li influenzano come ad esempio la concentrazione, le variazioni di pressione, la composizione chimica del mezzo ecc.

Purtroppo l'impossibilità di definire tali fattori e quindi di delimitare i campi di equilibrio o di esistenza dei minerali, rende oltremodo difficile una determinazione delle « fasi geochimiche » e quindi delle successioni paragenetiche corrispondenti all'attività pneumatolitico-idrotermale. Per definirle si è ricorso necessariamente a studiare i depositi di minerali in natura, cercando di stabilire i rapporti di giacitura fra gli uni e gli altri, la loro distribuzione zonale. Inoltre si sono sviluppate molte ricerche su l'ordine di cristallizzazione in base alle relazioni marginali fra i singoli minerali e soprattutto in base alle diverse « strutture » formate dalla loro aggregazione.

Notevoli contributi sono stati apportati dalle ricerche sulle strutture necessariamente conseguenti a processi di trasformazione che hanno portato a sostituzioni successive nelle paragenesi minerali. Tali strutture sono le prove più significative dell'attività dei fluidi in natura, della loro funzione di « vettori » della materia attraverso le vie più varie, dalle fessure agli spazi capillari e subcapillari, sino alle im-

perfezioni dei cristalli stessi, dovute alla loro struttura a mosaico, e si-
-nanche alle lacune reticolari che facilitano i processi diadochici.

Così dallo studio delle associazioni selettive a quello sui fenomeni
-di pseudomorfosi, sui relitti strutturali, sulle distruzioni progressive di
-strutture e di composti e sulle sostituzioni automorfiche, si sono potuti
costruire dei diagrammi che esprimono le diverse « fasi geochimiche »
-dovute all'attività pneumatolitica e idrotermale.

Ma molte sono le lacune e troppe le approssimazioni. Per colmarle
nuove ricerche, con metodi nuovi o notevolmente perfezionati, si sono
-da tempo intraprese. Fra tutte di notevole interesse sono le ricerche
-sperimentali tendenti alla riproduzione sintetica dei minerali, per defi-
-nire le condizioni chimico-fisiche che hanno presieduto alla loro genesi
-in natura.

Uno dei metodi più frequentemente adottati è quello tendente a
realizzare cristallizzazioni in condizioni pneumatolitiche o idrotermali,
-quindi quello di studiare sistemi acquosi a temperature superiori, pros-
-sime o inferiori a quella critica dell'acqua e sotto pressioni sviluppate,
-a quelle temperature, da soluzioni acquose.

Un altro metodo che ha dato interessanti risultati è quello deno-
-minato micropirotecnico con il quale le esperienze di sintesi vengono
-condotte ad altissime pressioni mediante l'uso di piccole quantità di
-esplosivi.

Le difficoltà di tutte le suddette ricerche sperimentali sono notevoli
-poichè si devono escludere le osservazioni dirette, non potendo disporre
-di recipienti trasparenti capaci di resistere all'attacco ed agli sforzi
-nelle condizioni sopracitate. Inoltre il numero delle manipolazioni rea-
-lizzabili in tali condizioni è di gran lunga limitato (in qualche caso
-nullo) rispetto a quelle possibili in condizioni normali. Alle difficoltà
-tecniche si aggiungono anche difficoltà di principio e conseguenti al
-fatto che gli equilibri chimico-fisici, che intervengono nella sintesi
-minerale, sono almeno sistemi ternari, quaternari o di ordine superiore.

Le ricerche sino ad ora condotte hanno avuto come tema fondamen-
-tale la sintesi di minerali a partire o da prodotti chimici sintetici pol-
-verizzati ed opportunamente mescolati, o da soluzioni opportunamente
-preparate. Più raramente si è operato su vetri naturali o su singoli mi-
-nerali: nel primo caso nell'intento di ottenere cristallizzazioni per de-
-vetrificazione, nel secondo per studiare la solubilità delle specie mine-
-ralogiche alle diverse condizioni e le eventuali possibili trasformazioni
-delle stesse.

L'insieme delle ricerche indubbiamente ha portato utili informazioni relative soprattutto alla funzione della temperatura e della pressione, a quella dell'acqua e dei «mineralizzatori» nella genesi dei minerali naturali ad opera dell'attività pneumatolitica e idrotermale.

Nell'intento di apportare nuovi contributi mi sono proposto di realizzare in laboratorio trasformazioni su rocce; l'esito positivo di tali ricerche avrebbe potuto fornire utili informazioni sulla possibilità di indagare con esperienze dirette sul metamorfismo delle rocce, dovuto all'attività pneumatolitica e idrotermale, e quindi sulle condizioni che presiedono alle trasformazioni e neogenesi di minerali, sulle fasi geochimiche, sulle successioni paragenetiche legate a tale metamorfismo. Il campo di indagine è oltremodo vasto: l'ho pertanto necessariamente limitato ed ho eseguito esperienze su particolari rocce di un complesso da me in precedenza studiato petrograficamente.

Ricerche sperimentali sulle trasformazioni pneumatolitico-idrotermali, oltre ad investire problemi di ordine più generale, avrebbero potuto confermare alcune conclusioni cui ero giunto con lo studio petrografico. Questa prospettiva soltanto è stata la determinante nella scelta del materiale. I primi risultati positivi sono già stati preliminarmente comunicati al XII Congresso Nazionale di Mineralogia e pubblicati nei Rendiconti (bibl. 10).

Studi precedenti

Il presente riassunto non intende essere esauriente; per fare questo sarebbe necessaria una vasta trattazione. Poichè mi propongo solo di riferire brevemente sullo sviluppo delle ricerche sperimentali alle condizioni pneumatolitiche e idrotermali, mi limiterò ad uno sguardo panoramico, anche perchè parziali sintesi sull'argomento sono già state pubblicate da più Autori.

A tale proposito va ricordato che già dal 1913 Morey e Niggli (bibl. 4) hanno pubblicato un compendio storico degli studi condotti sino a tale anno sulla sintesi idrotermale di silicati; a conclusione del loro lavoro mettono in evidenza che i dati raccolti non hanno alcun valore quantitativo ed hanno insufficiente valore qualitativo: ciò in quanto nelle riferite esperienze di sintesi molti minerali sono stati ottenuti per una sola volta dal singolo sperimentatore ed in condizioni non ben precisate.

Va segnalato come sin dal 1890 Friedel (bibl. 1) abbia messo in evidenza con ricerche sperimentali la funzione dell'acqua come mineralizzatore allo stato ultracritico in presenza di sali alcalini. Nè va taciuto il significato delle ricerche di Spezia (bibl. 13-14) che realizzò la prima cristallizzazione sintetica del quarzo in condizioni idrotermali; egli adoperò autoclavi cilindriche la cui parte superiore era mantenuta ad una temperatura da 320° a 350°, mentre la parte inferiore era mantenuta ad una temperatura inferiore a 145°-146°; ciò per realizzare un gradiente di temperatura nella soluzione.

Nel 1917 Morey e Fenner (bibl. 5) pubblicarono un interessante lavoro su « Il sistema ternario $H_2O-K_2SiO_3-SiO_2$ », risultato di ricerche condotte in modo sistematico a temperature rigorosamente controllate ed a pressioni costanti.

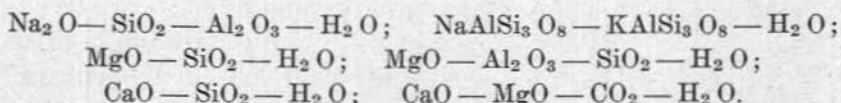
L'introduzione di una apparecchiatura a pressione, con riscaldamento all'interno e raffreddamento esterno per circolazione d'acqua, (Smyth e Adam: 1923; bibl. 12) migliorò notevolmente le possibilità delle ricerche sperimentali. Utilizzando queste apparecchiature Goranson (1931; bibl. 2) condusse le ricerche che portarono alla dimostrazione della bassa solubilità dell'acqua in un fluido avente la composizione di un granito (meno del 10% in peso di H_2O) a pressione riferita a 20 Km. di profondità nella litosfera.

Successivamente, e sino all'ultima guerra mondiale, numerose furono le esperienze condotte in condizioni pneumatolitiche e idrotermali e molte furono le sintesi realizzate di diversi minerali. Ma le difficoltà di precisare con un certo rigore le condizioni per l'intervento di molte variabili (dovute a vari fattori) nel modificare l'ambiente, non portò che a risultati qualitativi.

Mi pare opportuno ricordare, data la natura del presente lavoro, le ricerche di C. J. Nieuvenburg (1935) e di F. H. Norton (1939). Nieuvenburg (bibl. 6) ha dimostrato che il vapor d'acqua in condizioni ultracritiche è capace di sciogliere una notevole proporzione di silice. Norton (bibl. 8) ha realizzato l'alterazione dell'ortoclasio, della nefelina e della leucite con neoformazione di sericite alle condizioni idrotermali, nell'intervallo di temperatura compreso tra 250° e 350°, utilizzando nelle esperienze acqua satura di CO_2 .

Nell'ultimo decennio soprattutto il grande interesse per le indagini sulla attività pneumatolitica e idrotermale portò a sostanziali progressi in tale campo. Studi sistematici furono intrapresi soprattutto negli Stati Uniti e notevoli sono i risultati raggiunti non solo nella rea-

lizzazione della sintesi di molti minerali, ma anche nella conoscenza degli equilibri in sistemi di reale interesse petrografico quali ad esempio:



Notevoli sono i contributi di Barrer, Bowen, Franke, Friedman, Kennedy, A. e M. C. Michel-Levy, Morey, Noll, Roy, Smith, Taylor, Tuttle, Walker, Wyiart, Yoder e molti altri ricercatori.

Un interessante compendio sui principali risultati acquisiti in quest'ultimo decennio è stato recentemente pubblicato da R. Roy e O. F. Tuttle (bibl. 11). In tale lavoro sono riportati molti dati e molti diagrammi relativi a numerosi studi che gli autori suddetti hanno diviso nelle tre seguenti categorie: *a*) sintesi di minerali; *b*) ricerche sull'equilibrio di fasi subsolide; *c*) studi sui liquidi. L'organicità di tale compendio mi esonera anche da una pur breve rassegna.

Apparecchiatura e metodo di lavoro

Le ricerche che mi sono proposto richiedevano l'utilizzazione di un autoclave per poter realizzare le condizioni pneumatolitiche e idrotermali.

L'autoclave adoperato è stato gentilmente prestato, all'Istituto di Mineralogia e Petrografia dell'Università di Bologna, dal Prof. Angelo Bianchi dell'Università di Padova al quale desidero esprimere i più vivi ringraziamenti.

L'autoclave suddetto è un modello costruito dalla Ditta Andreas Hofer di Mülheim (Ruhr) a sezione cilindrica e capacità di un litro. Il corpo è in acciaio inossidabile e sistemato in un forno elettrico (vedi fig. 1).

La temperatura è stabilizzata per mezzo di un pirometro autoregolatore con una precisione di $\pm 10^\circ$. Il coperchio è bloccato mediante 6 bulloni ed è munito di una canna pirometrica per inserirvi la coppia termoelettrica. In esso sono inoltre praticate due condotte che consentono di inserire contemporaneamente un manometro ed una valvola di scarico per eccedenza di pressione o comunque un sistema a rubinetteria per prelievo di fluido. Il forno (220V; 33Amp.) è stato successivamente dotato di termocoppia onde evitare che, in date condizioni di lavoro, a causa dell'inerzia di riscaldamento dell'autoclave, si possano

superare i valori limiti consentiti per le resistenze applicate; queste inoltre sono state annegate in refrattario per evitare che i prodotti di desquamazione del telaio si potessero inserire nelle spire.

Tanto i valori della temperatura quanto quelli della pressione vengono rilevati per lettura diretta sugli strumenti di misura. Un controllo

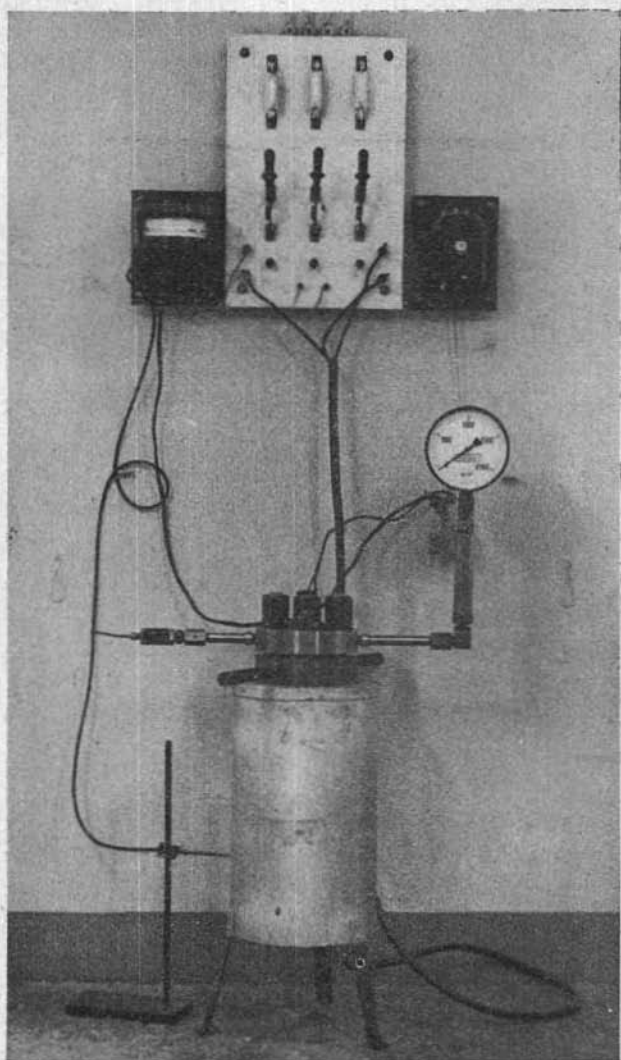


Fig. 1

sui valori si può avere utilizzando i dati numerici pubblicati da Van Niuwenburg (1932; bibl. 7) per l'intervallo di temperatura compresa fra 330° e 480° e per pressioni sino a 600 Kg/cm², dal momento che i valori della pressione, dipendono, per determinati valori delle temperature dalla quantità di liquido introdotta nell'autoclave. Per valori della temperatura superiori a 480°, è utile il diagramma relativo alle relazioni PVT per l'acqua pubblicato da Kennedy (1950; bibl. 3).

Le esperienze sono state condotte in diverse condizioni di temperatura e pressione dopo aver posto al centro dell'autoclave un campione di roccia, sospeso mediante un filo di platino, e dopo aver introdotto nell'autoclave stessa quantità fissate di acqua o di soluzioni acquose, il cui pH era stato preventivamente determinato. La durata delle esperienze è stata di volta in volta fissata in modo del tutto arbitrario con tempi massimi di 60 ore e minimi di 25 ore. Nella durata complessiva dell'esperienza s'intende compreso anche il tempo necessario per il raffreddamento dell'autoclave. Per la fase di raffreddamento non ho adottato alcun programma, lasciando pertanto che il sistema raffreddasse spontaneamente dopo aver interrotto il riscaldamento per semplice interruzione della corrente elettrica.

I campioni di roccia da introdurre nell'autoclave sono stati preparati nel modo seguente: su un campione « di campagna » sono stati praticati alcuni tagli paralleli per ottenere delle fette di roccia dello spessore di cm 0,4-0,5; queste sono state successivamente portate alle dimensioni di cm 2 x 4, lasciando invariato lo spessore. Per ogni esperienza è stato utilizzato uno dei campioni così ottenuti.

Dopo ogni esperienza il campione è stato ridotto in sezione sottile per potere eseguire lo studio al microscopio di polarizzazione e rilevare le eventuali trasformazioni avvenute.

Per rendere il più possibile rigoroso il confronto con la roccia di partenza non portata in autoclave, su una delle fette ottenute dal campione « di campagna » è stata preventivamente praticata una sezione sottile; in tal modo mi è stato possibile eseguire confronti fra porzioni di roccia praticamente limitrofe. Inoltre è stata mia preoccupazione scegliere fra i campioni « di campagna » quelli mostranti una maggior omogeneità statistica.

Ed ancora per rendere il più possibile rigorosi i confronti relativi alla composizione chimica, sono state utilizzate per le analisi porzioni delle stesse fette adoperate per praticare le sezioni sottili. Ciò ben inteso

sia per il campione di roccia di partenza, come per quello portato in autoclave e sottoposto a pneumatolisi.

Dopo ogni esperienza il campione di roccia è sempre apparso notevolmente modificato in superficie; ciò anche in dipendenza del fatto che sul campione medesimo si vengono a depositare pur piccole quantità di ferro, ceduto dall'autoclave che purtroppo non è inattaccabile.

In considerazione di ciò, prima di praticare la sezione sottile ho asportato mediante levigazione la « crosta » superficiale riducendo lo spessore del campione di quantità variabile a seconda dei casi, comunque sempre nell'intorno del millimetro. Del resto la levigazione del campione dopo l'esperienza si rende in ogni modo necessaria per le esigenze imposte dalla tecnica di preparazione delle sezioni sottili.

Risultati ottenuti dalle esperienze su rocce ofiolitiche appenniniche

Il campo di indagine per ricerche sperimentali sul metamorfismo pneumatolitico e idrotermale delle rocce è, come ho accennato, quanto mai vasto; ciò non solo in considerazione dell'elevato numero di tipi di rocce esistenti, il che è ovvio, ma anche e soprattutto in considerazione della gamma delle condizioni di ambiente chimico fisico che si possono realizzare in laboratorio, sempre nell'ambito della pneumatolisi e dell'idrotermalismo, e che possono essersi determinate o determinarsi in natura.

Necessariamente quindi non solo ho limitato le indagini ad un particolare tipo di rocce, ma anche ridotto le esperienze a ben esiguo numero rispetto a quello necessario per realizzare la maggior parte delle fondamentali condizioni di ambiente chimico fisico.

Ciò nonostante l'interesse dei risultati mi ha indotto a scrivere queste note poichè ritengo che essi siano una prova concreta della efficacia del metodo e dell'utilità in petrografia di perfezionare ed estendere le ricerche in questo settore.

Le rocce oggetto delle mie indagini fanno parte di un complesso ofiolitico appenninico, affiorante tra il Passo della Futa e quello della Raticosa. Dallo studio petrografico (bibl. 9) di tale complesso risulta la presenza di diversi tipi di rocce facenti passaggio graduale l'uno all'altro; dallo studio sulle trasformazioni riconosciute traevo le conclusioni che nel complesso roccioso vi era stata una notevole mobilitazione di materia legata ad azioni pneumatolitico-idrotermali ed accompagnata da molteplici intense trasformazioni di minerali. Mobilitazioni e sepa-

razioni risulterebbero avvenute selettivamente ed i minerali di neoforazione si sarebbero generati a spese della materia mobilizzata nello stesso complesso roccioso ove essi hanno sede, senza quindi un sostanziale apporto di materia dall'esterno.

Per le esperienze sopra citate ho scelto due tipi di diabase a carattere spilitico: uno a grana grossa, l'altro a grana media provenienti entrambi dal Sasso di Castro. Per ragioni di chiarezza dopo aver premesso una descrizione del campione di partenza riferirò su alcune delle singole esperienze riportando i risultati ottenuti da ciascuna di esse, riservando alla fine una breve sintesi dei risultati stessi.

A) *Diabase a grana grossa.*

Al microscopio la roccia mostra una struttura intersertale ofitica con sviluppo distintamente idiomorfo dei cristalli di plagioclasì che si presentano con abito allungato o in prismi tozzi intersecantisi in modo vario (v. tavola 1 fig. 1). Le dimensioni dei cristalli secondo l'allungamento non variano in modo molto sensibile: la media delle misure ha dato valori compresi fra 1,5 e 2,5 mm. Da ciò la grana grossa della roccia.

I minerali primari fondamentali sono: plagioclasì e augiti, subordinatamente titanio-magnetiti; gli accessori sono: ematite, apatite; fra i secondari predominano cloriti, anfiboli, ossidi e idrossidi di Fe e Ti; in minor quantità calcite, quarzo, sericite, minerali argillosi.

I plagioclasì sono di gran lunga i più abbondanti fra i minerali presenti in questo tipo di roccia. Sono ricchi di inclusioni costituite nella maggior parte da cristallini di apatite; alcuni di essi hanno l'aspetto di bacchettine allungate che talora si intersecano; la loro rifrazione è decisamente superiore a quella del plagioclasio mentre la birifrazione è bassa e l'estinzione è quella dell'individuo ospitante, qualunque sia l'orientazione delle bacchettine stesse. I plagioclasì sono quasi sempre geminati secondo le leggi dell'albite e karlsbad; rari i geminati doppi albite-karlsbad, più frequenti quelli albite-pericline. Il contenuto in anortite determinato al T.U. con metodi diversi su geminati semplici e doppi, risulta, dalla media dei valori ottenuti, poco variabile intorno a

$$An = 10 \pm 2\%$$

Tutti i plagioclasì presentano accenni di trasformazione messi in evidenza soprattutto da cloriti, talora costituenti piccole plaghe, sparse in ciascun individuo, ed in modo del tutto subordinato da qualche lamella sericitica.

Ciò nonostante lo stato di conservazione si può ritenere buono (v. tavola 1 fig. 1).

Le augiti sono molto meno abbondanti dei plagioclasti: occupano gli interstizi della trama feldispatica. Son ben riconoscibili per la tipica sfaldatura, l'elevata rifrazione, i colori di polarizzazione e l'angolo di estinzione che risulta:

$$c: \gamma = 44^\circ \pm 2$$

Diversi cristalli, di solito nelle parti marginali, presentano segni di trasformazione messi in evidenza dalla comparsa del pleocroismo che si manifesta più o meno intenso a seconda del tipo di trasformazione. Quando la trasformazione è di tipo anfibolico si ha pleocroismo con

α = giallo bruno

β = verde oliva

γ = verde

ed a nicols incrociati si determina un angolo di estinzione

$$c: \gamma = 19^\circ \pm 2$$

Si può quindi affermare che l'anfibolo è del tipo orneblenda comune ed è un prodotto di trasformazione delle augiti. Del resto i passaggi gradualmente sono ben visibili in sezione sottile sino alla quasi completa sostituzione dell'augite con l'anfibolo. Non mancano cristalli interamente anfibolici che si devono comunque ritenere secondari.

Pure per gradi si passa dalla trasformazione anfibolica a quella cloritica e talora plaghe cloritiche sostituiscono quasi per intero l'originario minerale femico. Le cloriti presenti nella roccia sono rappresentate quasi interamente da pennina che, a solo polarizzatore, appare in plaghe verdognole a debole pleocroismo con

α = verde giallo molto pallido

$\beta = \gamma =$ verdolino

A nicols incrociati si risolvono in aggregati lamellari (o fibroso raggiati) con estinzione delle singole lamelle parallela all'allungamento. La birifrazione è bassissima, spesso quasi nulla; molti aggregati si presentano anche con colori di polarizzazione che vanno dal bleu al bleu cupo. Tutti questi caratteri coincidono con quelli descritti nella letteratura.

per le pennine; quelle della roccia in esame si devono ritenere per la maggior parte pennine negative. Raramente ho potuto osservare la presenza di lamelle cloritiche del tipo antigorite.

I minerali opachi sono abbondantemente diffusi e si presentano in plaghe, relativamente estese, con accenni ad una individualità morfologica; in particolare l'ematite, presente in poche zone della sezione, è in lamelle a contorno pseudoesagonale che, a luce trasmessa, appaiono di color rosso sangue, ed a luce riflessa mostrano lucentezza semimetallica.

La magnetite prevale di gran lunga sui minerali opachi in precedenza segnalati. E' sempre associata ad ilmenite il che rende difficile una determinazione selettiva; i cristalli si presentano frequentemente in forme scacchettate od in granuli irregolari. In alcuni cristalli è possibile riconoscere al bordo il così detto « leucoxeno ». Il tutto fa pensare che si tratti di titanomagnetiti. I loro prodotti di trasformazione sono idrossidi di Fe e Ti presenti in quantità variabili da punto a punto. Si notano spesso ai bordi delle titanomagnetiti fini granulazioni di minerali ad alta rifrazione e birifrazione da riferire probabilmente a titanite; rare granulazioni epidiotiche sono presenti.

Nella roccia infine si possono notare in quantità del tutto subordinata plaghe o piccoli granuli di calcite talora associati ai prodotti di trasformazione delle augiti ed anche dei plagioclasti, nonché cristalli a contorno irregolare di quarzo associati alla calcite od all'ematite. Riguardo alle relazioni con gli altri individui cristallini, o meglio relativamente alle osservazioni che concorrono alla definizione di un carattere strutturale, si devono ritenere interstiziali.

L'analisi mineralogica quantitativa al T.I., relativa ai principali componenti presenti nella roccia, ha dato i seguenti risultati:

plagioclasti e loro prodotti di trasformazione (cloriti, sericiti, minerali argillosi)	62%
augiti	8%
anfibioli (orneblenda comune)	5%
cloriti	13%
minerali opachi e semiopachi	12%
	<hr/>
Totale	100%

Dall'analisi chimica quantitativa risulta:

SiO ₂	49,06	« Parametri Niggli »	
TiO ₂	4,37	si	131
Fe ₂ O ₃	12,41	al	20
Al ₂ O ₃	13,00	fm	52
FeO	3,72	c	13
MgO	4,50	alk	14
MnO	0,39	ti	9
CaO	4,47	k	0,060
Na ₂ O	5,20	mg	0,34
K ₂ O	0,51		
H ₂ O ⁺	2,42	Magma: mugearitico	
H ₂ O ⁻	0,54	lamprosieunitico	
		(Natrangabbroide)	
	<hr/>		
	100,59		

« Molecola base »

Kp	Ne	Cal	Cs	Fo	Fa	Hem	Ru	Q
1,89	29,45	6,71	3,64	10,27	4,54	9,10	3,20	31,20
		Q	L	M				
		35,58	43,38	21,04				

« Norma molecolare »

Ort	Ab	An	Di	Orn	Ant	Fe-Ant	Ilm	Mt	Q
3,15	47,08	8,20	8,01	5,80	8,04	2,80	9,60	4,05	3,27
<hr/>					<hr/>		<hr/>		
58,43					10,84		13,65		

ESPERIENZA N. 1

L'esperienza è stata condotta alle sotto indicate condizioni:
 Soluzione: H₂O + (NH₄HCO₃ + NH₄OCONH₂)
 pH della soluzione: 8
 Pressione massima: 250 Kg/cm² .
 Temperatura massima al centro dell'autoclave: 500 ± 10°C
 Relazione PvT: vedi fig. 2.
 Tempo complessivo: 29 ore
 Tempo a T e P costanti: 13 ore.

La roccia risulta profondamente trasformata tanto all'osservazione macroscopica quanto all'osservazione microscopica.

Macroscopicamente risalta immediatamente il cambiamento di colore che da verdastro è divenuto nero opaco ed il cambiamento della « compagine »: la trama feldspatica, ben visibile ad occhio nudo nel campione di partenza, non è più riconoscibile nel campione stesso dopo la pneumatolisi. In quest'ultimo è visibile solo qualche cristallo bianco

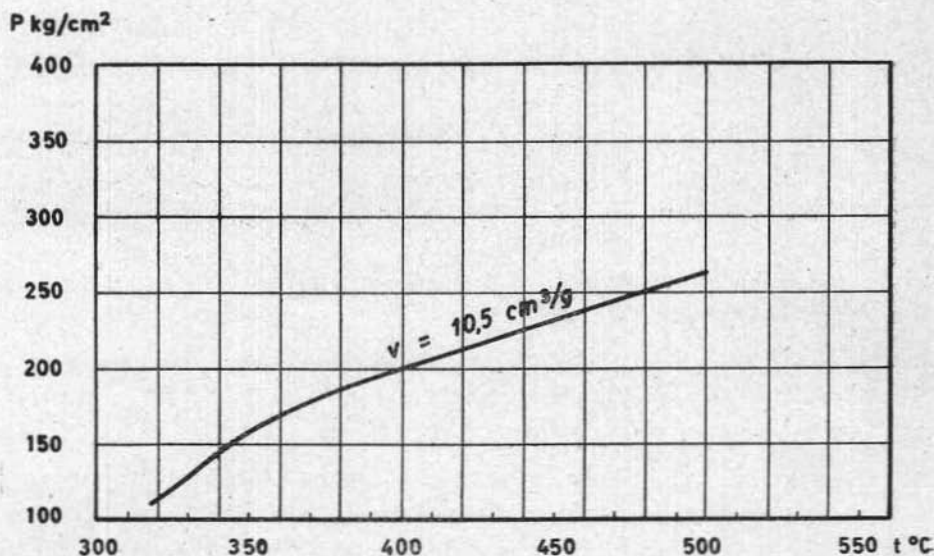


Fig. 2

latteo immerso in una pasta molto scura che presenta qualche piccola bollosità.

Va ancora segnalato che il campione mostra le suddette trasformazioni in tutto il suo spessore (cm 0,4).

All'osservazione microscopica si osserva la scomparsa della struttura intersettale ofitica. Ciò in conseguenza della scomparsa di una alta percentuale di plagioclasio e di augiti. A tale riguardo è significativo il confronto fra i dati dell'analisi mineralogica quantitativa del campione di partenza e quelli sottoriportati relativi al campione trasformato.

Plagioclasì relativamente conservati (a contorni corrosi)	8%
Plagioclasì quasi completamente distrutti (ricchi di venule calcedoniose)	22%
Augiti (relitti)	2%
Plagioclasì di neoformazione con abito allungato sino ad aghiforme (struttura intersertale divergente)	8%
Epidoti di neoformazione	22%
Calcedonio e quarzo; prodotti terroso-argillosi e sericitì	16%
Minerali opachi (in parte di neoformazione)	22%
	<hr/>
	100%

Dal confronto risulta evidente che i plagioclasì si sono ridotti del 50% (considerando solo quelli rimasti in discrete condizioni di conservazione, la riduzione risulterebbe maggiore dell'85%) mentre le augiti si sono ridotte del 75%.

I plagioclasì residuali hanno i contorni corrosi, frastagliati e mostrano segni di profonda trasformazione contrassegnati da venule vermiformi e chiazze in prevalenza calcedoniose, nonchè plaghe ricche di prodotti argillosi associati a lamelle sericitiche in quantità subordinata. Le venule vermiformi e le chiazze sono costituite nella parte centrale da calcedonio e quarzo, ai bordi da albite limpida neocristallizzata che sfuma nel plagioclasio per così dire ospitante. Nelle stesse venule e chiazze sono presenti anche prodotti terroso-argillosi dispersi o in aggregati minutissimi.

Delle augiti non rimangono che relitti. Si può notare la presenza di qualche individuo costituente la parte centrale di un precedente cristallo, circondato da minutissimi relitti isolati dal processo di trasformazione che mostra per lo più andamento centripeto.

Gli anfiboli e le cloriti (presenti nella roccia prima della trasformazione rispettivamente nella misura del 5% e del 13%) sono del tutto assenti, tanto che al microscopio non si notano neppure tracce di tali minerali.

Quanto sinora descritto dà già una chiara idea dell'intensità del metamorfismo. Ciò ancor più è messo in evidenza dalle abbondanti neocristallizzazioni che hanno accompagnato l'intensa mobilitazione di materia avvenuta nella roccia.

Al microscopio infatti si osservano ampie plaghe ricche di epidoti costituiti da zoisiti e termini della serie clinzoisite-pistacite. In seno a

tali plaghe si riconoscono relitti sia di augiti sia di plagioclasti. Spesso si riconoscono chiazze ad epidoti entro i plagioclasti residuali.

Pure frequenti sono le plaghe costituite da soli cristalli di neoforazione. In questo caso associati agli epidoti si riconoscono aghetti di albite intersecantisi secondo il tipico schema delle strutture intersertale divergente ed arborescente (vedi figure tav. 2-3-4). Più spesso individui allungati di albite, anche geminati (aggregati secondo i suddetti schemi strutturali), si riconoscono intorno a relitti di cristalli di plagioclasio (vedi figure tav. 2-3-4) talora sino a sfumare gli uni negli altri. Le determinazioni eseguite al T.U. con metodi diversi hanno dimostrato trattarsi di albite pura.

Nella roccia inoltre vi è abbondanza di ossidi (magnetiti titanifere, ilmenite) ed idrossidi di Fe e Ti, in parte formatisi a spese della materia mobilizzata dai composti ferriferi, presenti nella roccia prima di essere sottoposta alla pneumatolisi, in parte a spese del ferro ceduto dall'autoclave.

Su un frammento di roccia ho potuto eseguire l'analisi chimica quantitativa che ha dato i seguenti risultati:

SiO ₂	46,90	« Parametri Niggli »	
TiO ₂	4,80	si	118
Al ₂ O ₃	14,09	al	21
Fe ₂ O ₃	15,78	fm	52
MnO	0,40	e	12
MgO	4,91	alk	14
CaO	4,58	ti	11
Na ₂ O	5,34	k	0,091
K ₂ O	0,82	mg	0,35
H ₂ O ⁺	1,90		
H ₂ O ⁻	0,25		
	<hr/>		
	99,77		

« Molecola base »

Kp	Ne	Cal	Cs	Fo	Fa + Fs	Ru	Q
2,98	29,53	7,44	3,29	10,92	18,72	4,29	22,83
		Q	L	M			
		23,85	41,75	34,40			

Purtroppo non ho potuto che disporre di una scarsa quantità di materiale, per non compromettere la possibilità di praticare una buona sezione sottile. Non mi è stato pertanto possibile determinare il contenuto in FeO e tanto meno eseguire l'analisi in doppio per un controllo dei dati.

Comunque, dal confronto dei suriportati valori con quelli relativi all'analisi chimica della roccia non sottoposta a pneumatolisi, non risultano sostanziali differenze. Quasi certamente vi è stato un apporto di ferro ceduto dall'autoclave. Non potendo precisare questa quantità, la comparazione dei dati in dettaglio ha un significato relativo. Ciò nonostante, pur ammesso che l'aumento percentuale del ferro sia esclusivamente dovuto al ferro ceduto dall'autoclave, riportando a 100 gli altri valori, dopo aver detratto tale apporto dal valore di Fe_2O_3 , risulta sempre un allontanamento di SiO_2 .

Per quanto concerne i calcoli petrochimici, l'impossibilità di conoscere il valore di FeO, rende incompleto il calcolo normativo. Tuttavia dai valori di base sopra riportati si può calcolare un contenuto in epidoti del 22% ($Zo = 13,23\%$; $Pi = 8,77\%$) corrispondente al dato ottenuto dall'analisi mineralogica al T.I.

Concludendo, dalle indagini chimiche non risulterebbe una sostanziale differenza di chimismo fra roccia di partenza e roccia sottoposta a pneumatolisi; dalle indagini microscopiche, invece, risulta una notevole e sostanziale differenza di composizione mineralogica qualitativa e quantitativa.

ESPERIENZA N. 2

L'esperienza è stata condotta alle sotto indicate condizioni:

Soluzione: $\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4\text{HCO}_3 + \text{NH}_4\text{OCONH}_2)$

pH della soluzione: 9

Pressione massima: 225 Kg/cm²

Temperatura massima al centro dell'autoclave: $375 \pm 10^\circ\text{C}$

Relazioni PvT: vedi fig. 3.

Tempo complessivo: 50 ore

Tempo a T e P costanti: 36 ore

Le trasformazioni della roccia sono meno intense di quelle ottenute con l'esperienza precedente ed hanno carattere sostanzialmente diverso. Non si riconoscono cambiamenti nella struttura.

I plagioclasti mostrano a solo polarizzatore una lieve colorazione rossastra ed hanno aspetto più terroso. Ciò pare dovuto a finissime granulazioni di idrossidi di ferro.

Si nota una maggiore uralitizzazione delle augiti.

Le cloriti non sono scomparse come nel caso precedente, ma solo trasformate: da termini tipo pennina sono passati a termini più ferri-feri ed alluminiferi. Secondo lo schema proposto dal Winchell (bibl. 15)

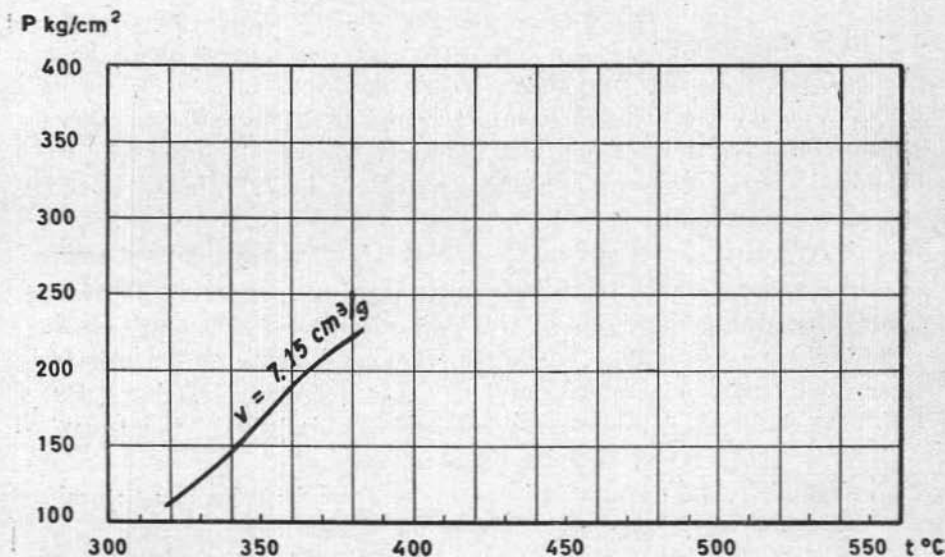


Fig. 3

si può ritenere in base ai mutati caratteri ottici osservati che le trasformazioni siano avvenute per gradi secondo lo schema:

pennina - clinocloro - proclorite

pennina - delessite - afrosiderite

La variazione di composizione delle cloriti è contrassegnata da cambiamento di colore, dal pleocroismo, dal valore della birifrazione. Il cambiamento di colore risalta immediatamente all'osservazione: nella roccia trasformata le plaghe cloritiche mostrano una colorazione decisamente più intensa e colori da verde a verde oliva, a verde giallo.

Nella roccia risulta infine un maggior contenuto in minerali opachi del tipo riconosciuto nella roccia di partenza. La non rilevante differenza percentuale dà a questo dato un significato relativo.

ESPERIENZA N. 3

L'esperienza è stata condotta alle sotto indicate condizioni:

Soluzione tamponata: $H_2O + (CH_3COOH + CH_3COONH_4)$

pH della soluzione: 4

Pressione massima: 275 Kg/cm^2

Temperatura massima al centro dell'autoclave: $480 \pm 10^\circ\text{C}$

Relazioni PvT: vedi fig. 4

Tempo complessivo: 41 ore

Tempo a T e P costanti: 24 ore

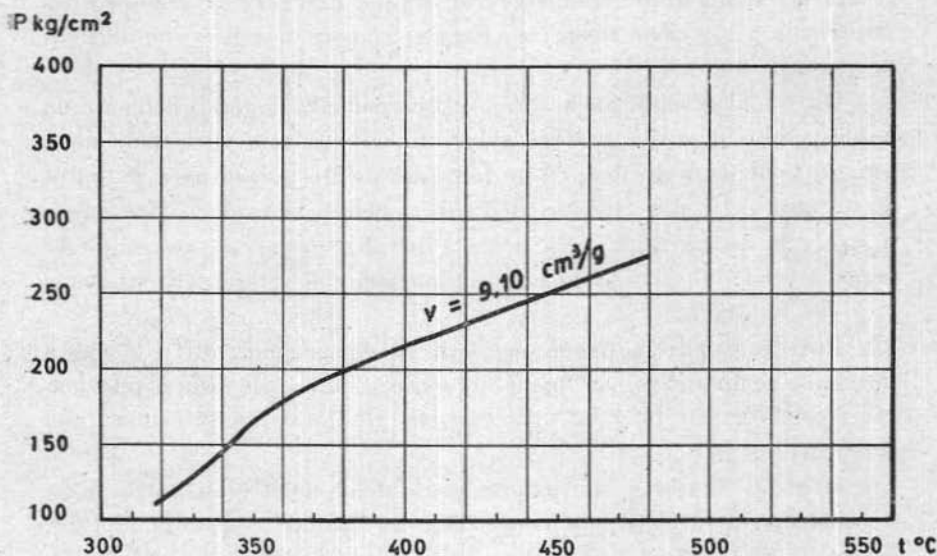


Fig. 4

La roccia mostra segni notevoli di trasformazione; al microscopio si nota anzitutto la scomparsa del carattere intersertale della struttura in alcune zone, mentre in altre tale carattere è ancora bene evidente. Nelle prime evidentemente la trasformazione è più intensa: i plagioclasti hanno contorni corrosi e frastagliati ed in alcuni punti sono associati a plaghe costituite da individui di quarzo e di calcite; si notano cristalli di plagioclasio intimamente compenetrati con quarzo. Appare evidente da tale associazione che i plagioclasti sono relitti di precedenti cristalli i cui bordi sono allo stato attuale costituiti da quarzo. Bene evidenti sono i passaggi graduali (vedi tavola 5 fig. 1). Calcite e quarzo

sono pure fra loro compenetrati; inoltre granulazioni calcitiche si osservano nelle fasce quarzose costituenti i bordi dei plagioclasti trasformati; la composizione di questi ultimi risulta, da varie determinazioni eseguite con metodi diversi al T.U., quella dell'albite.

Questi dati danno già un chiaro quadro della trasformazione avvenuta. Non mancano esempi in cui sono presenti epidoti neoformati a spese del plagioclasio originario. Desidero, a questo punto, ricordare ulteriormente che all'osservazione microscopica non tutta la superficie della sezione mostra quanto sopra descritto, presentando la roccia zone a diversa intensità di metamorfismo. I plagioclasti in generale, da quelli conservati a quelli parzialmente conservati, mostrano a solo polarizzatore una colorazione rossastra (ruggine) dovuta a veli e granulazioni di idrossidi di ferro.

Oltre i plagioclasti anche gli altri componenti originali della roccia hanno subito notevoli trasformazioni. Si osserva una variazione nella composizione degli anfiboli ed un loro incremento percentuale. Si tratta di termini fra i più ferriferi della serie dell'orneblenda. Ciò è messo in evidenza da variazioni nello schema del pleocroismo con passaggio da verde a verde bluastrò, e da una diminuzione del valore dell'estinzione $c: \gamma$ che risulta $12^\circ \pm 2$.

Pure le agiti mostrano segni di trasformazioni: difficile riesce un esame comparativo con quelle della roccia non sottoposta a pneumatolisi poichè anche in quest'ultima, come si è detto, spesso si mostrano trasformate.

Evidente invece è la trasformazione delle cloriti: anzitutto si osservano una notevole diminuzione della percentuale (dal 13% al 1%); inoltre le poche cloriti presenti sono altamente ferrifere: si presentano in aggregati di sferuliti fibroso-raggiate di colore marroncino e con il seguente schema di pleocroismo:

a = verde grigio pallido

γ = marrone

Significativa ancora per la valutazione del metamorfismo subito dalla roccia è la variazione del contenuto in minerali opachi e semi opachi ferriferi. Nella formazione di ossidi e idrossidi indubbiamente ha contribuito l'apporto del ferro ceduto dall'autoclave.

Per un esame comparativo riporto i dati relativi ad un'analisi mineralogica quantitativa eseguita al T. I.

plagioclasì	42%
pirosseni	6%
anfìboli	8%
calcedonio quarzo ed altri prodotti di neoformazione (sostanze terroso-argillose)	20%
cloriti ferrifere con turingite	1%
minerali opachi e semiopachi	23%
	<hr/> 100%

Si tenga presente l'impossibilità di eseguire una buona analisi selettiva per l'intima associazione di certi componenti mineralogici della roccia; le loro dimensioni assai piccole contribuiscono notevolmente ad acuire le difficoltà. Da ciò il raggruppamento di alcuni componenti secondo lo schema sopra riportato.

ESPERIENZA N. 4

L'esperienza è stata condotta alle sottoindicate condizioni:

Soluzione: H₂O

pH della soluzione: 5,6

Pressione massima: 275 Kg/cm₂

Temperatura massima al centro dell'autoclave: 490 ± 10 °C

Relazioni PvT: vedi fig. 5

Tempo complessivo: 42 ore

Tempo a T e P costante: 24 ore

Il risultato di maggior rilievo ottenuto con questa esperienza è la scomparsa delle cloriti. Al posto della plaghe cloritiche si osservano al microscopio aggregati di minutissimi cristallini, quasi guttiformi e talora fibrillari, appena risolvibili ai maggiori ingrandimenti. Anche in tali condizioni di osservazione non è possibile alcuna determinazione ottica, salvo apprezzamenti di ordine generale. Si rileva così che le plaghe costituenti gli aggregati hanno nell'insieme colore marrone chiaro; all'osservazione di dettaglio si notano zone a varie intensità di colore; così ai bordi le plaghe si presentano più scure e nell'interno

chiazate; le parti più scure hanno aspetto terroso ed a nicols incrociati mostrano birifrazione bassissima, le parti più chiare, invece, mostrano birifrazione con colori giallognoli del primo ordine.

Talvolta è possibile appena distinguere nell'aggregato un motivo fibroso raggiato: sono tracce delle preesistenti sferuliti cloritiche (vedi tav. 5 fig. 2).

Il tipo di trasformazione su descritto si riconosce, appena accennato,

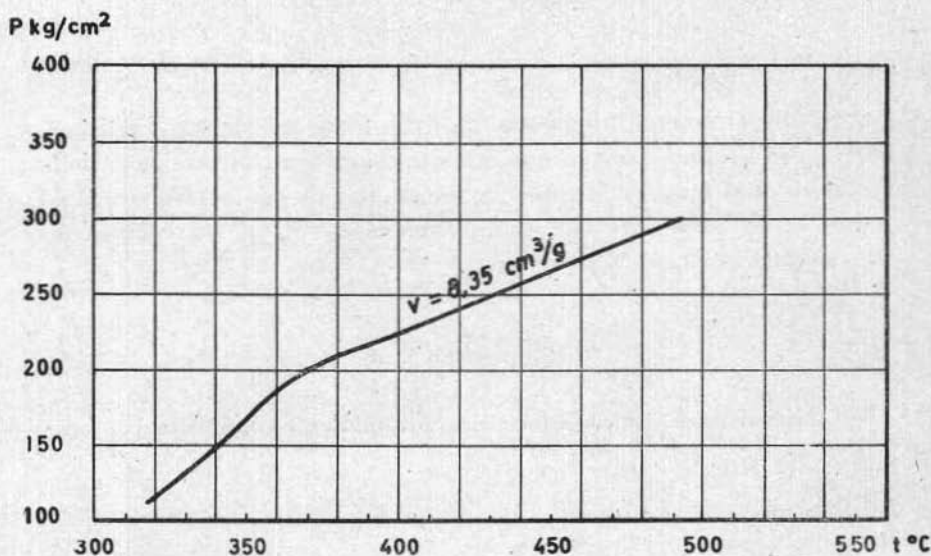


Fig. 5

anche in alcuni punti delle plaghe cloritiche presenti nella roccia non sottoposta a trasformazione. E' pertanto evidente il significato della trasformazione ottenuta sperimentalmente in modo completo su tutte le cloriti.

ESPERIENZA N. 5

L'esperienza è stata condotta alle sottoindicate condizioni:

Soluzione: $H_2O + (HBO_3 + Na_2B_4O_7 + (NH_4HCO_3 + NH_4OCONH_2))$

pH della soluzione: 8,9

Pressione massima: 330 Kg/cm²

Temperatura massima al centro dell'autoclave: 540 ± 10 °C

Relazioni PvT: vedi fig. 6

Tempo complessivo: 48 ore

Tempo a T e P costante: 24 ore

La roccia risulta profondamente trasformata tanto all'osservazione macroscopica quanto all'osservazione microscopica.

Macroscopicamente si osserva il cambiamento di colore che da verdastro è divenuto brunastro ed il cambiamento della compagine: non è più riconoscibile la trama feldispatica; ciò per tutto lo spessore del campione (cm 0,4).

Al microscopio si nota la scomparsa della struttura intersertale ottica: ciò per la totale scomparsa dei plagioclasti. Dei plagioclasti, pre-

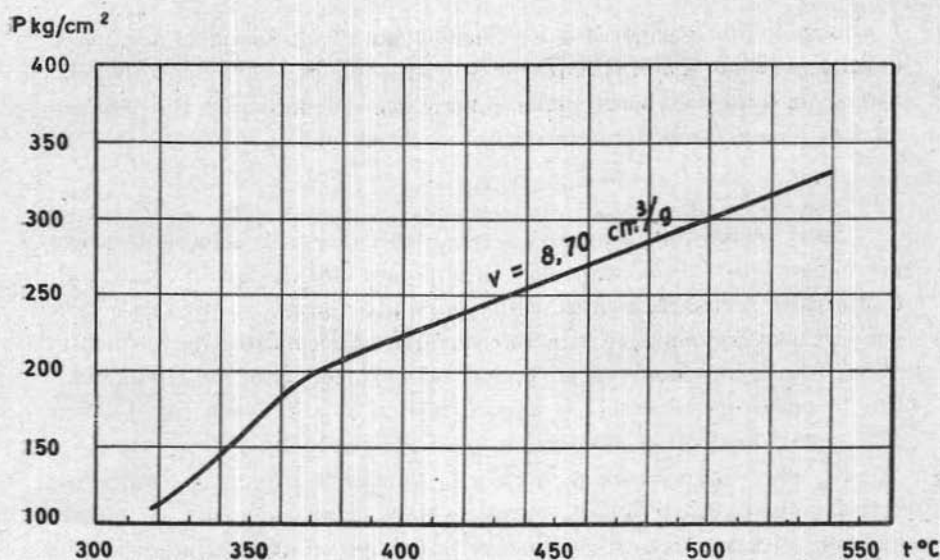


Fig. 6

senti nella roccia prima della pneumatolisi nella misura del 62%, non sono rimasti che i soli relitti visibili in tavola 7 figure 1 e 2.

Si osserva invece una struttura « paragonabile alla porfirica » per la presenza di individui cristallini, a diverse dimensioni, immersi in una pasta di fondo microcristallina (ved. tav. 6 e figg. 1 e 2). Per la maggior parte tali individui sono pirosseni, titanio-magnetiti e anfiboli.

I pirosseni sono rappresentati dalle augiti primariamente esistenti nella roccia; lungo le tracce di sfaldatura ed ai contorni mostrano evidenti segni di trasformazione: i prodotti di neoformazione, costituiti da minuti cristallini, a solo polarizzatore si riconoscono immediatamente

perchè colorati di un rosso brunastro che risalta in seno alle augiti incolore.

Tali prodotti si riconoscono pure in seno alla roccia, isolati in plaghe immerse nella pasta di fondo, sia come aggregati di minuti cristalli fibrosi, sia come individui ben sviluppati e con abito sempre fibroso. Sono pleocroici e con intense variazioni di colore secondo lo schema :

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{rosso} \\ \beta &= \text{giallognolo brunastro} \\ \gamma &= \text{verdolino giallo} \end{aligned}$$

L'allungamento è positivo e l'estinzione parallela. L'angolo degli assi ottici è prossimo a 90° . Rifrazione e birifrazione media. I colori di polarizzazione sono mascherati dalla colorazione del minerale. Da determinazioni eseguite con il compensatore di Berek risulta :

$$\gamma - \alpha = 0,018$$

Tutti questi dati coincidono con quelli descritti nella letteratura per l'iperstene. Poichè sono pure in buon accordo con quelli relativi all'antofillite ferrifera, tenuto conto dell'abito fibroso, è più facile propendere per quest'ultimo minerale. Inoltre va ricordato che frequentemente è in associazione parallela con anfiboli monoclini del tipo actinolite ferrifera, orneblenda ed ossiorneblenda (vedi tav. 8 fig. 1). Fra tutti questi anfiboli si riconoscono passaggi graduali.

Un altro interessante risultato è la comparsa di plaghe, sempre immerse nella pasta di fondo, costituite da sericite mescolata a piccole quantità di minerali argillosi, idrossidi di ferro ed a quantità ancor più piccole di epidoti e carbonati (vedi tav. 8 fig. 2). In qualche caso si può riconoscere che si tratta di paramorfosi su preesistenti cristalli di plagioclasio.

Va inoltre segnalata la presenza, intorno a individui di titanomagnetite, di aureole, a volte allargantisi a vere plaghe, costituite da aggregati squamosi di minuti cristalli lamellari (vedi tav. 9 fig. 1) a rifrazione e birifrazione media. L'estinzione è parallela. Le lamelle sono disposte con l'allungamento normale al bordo delle titanomagnetiti; sono incolore o lievemente colorate in giallo pallido; ai maggiori ingrandimenti si nota che sono associate a minutissime granulazioni o velature di idrossidi di ferro che impartiscono all'aureola una pur debole colorazione. Pur non potendo fare un'affermazione risolutiva, mi pare si tratti in prevalenza di sericite cui, talora, sono associati carbonati

ed epidoti in minute granulazioni. I valori della rifrazione e della birifrazione escludono la possibilità che si tratti di prodotti leucoxenici. Questi invece si riconoscono ai bordi di molti altri individui di titanomagnetite; sono semi opachi ed a luce riflessa hanno il tipico aspetto torbido, terroso e mostrano colore bianco giallastro.

La composizione della pasta di fondo microcristallina è praticamente indeterminata. Si possono riconoscere cristallini con contorni irregolari, frastagliati che hanno debole rilievo e colori d'interferenza grigio chiaro. Si potrebbe ritenere siano minutissimi relitti di plagioclasio. Si riconoscono invece molto bene cristallini di apatite e quelle bacchettine allungate che nella roccia non sottoposta a trasformazione sono incluse nei plagioclasii (vedi descrizione a pag. 304). Dalla loro distribuzione nella pasta di fondo e dalla perfetta identità con quelle presenti originariamente nella roccia, viene spontaneo ritenere che gli accessori inclusi nei plagioclasii si siano conservati.

A conclusione riporto i dati dell'analisi mineralogica quantitativa eseguita al T. I.

pasta di fondo non risolvibile	56%
pirosseni	14%
anfiboli rombici e monoclini	8%
sericite, minerali argillosi, epidoti ecc.	6%
minerali opachi e semiopachi	16%
	<hr/>
	100%

Un esame comparativo di questi dati con quelli relativi all'analisi mineralogica della roccia prima della pneumatolisi, dà una chiara, immediata idea della intensità del metamorfismo.

ESPERIENZA N. 6

L'esperienza è stata condotta alle sottoindicate condizioni:

Soluzione satura: $H_2O + CO_2$

pH della soluzione: 3,8

Pressione massima: 350 Kg/cm²

Temperatura massima al centro dell'autoclave: 450 ± 10 °C

Relazione PvT: vedi fig. 7

Tempo complessivo: 60 ore

Tempo a T e P costante: 44 ore

I risultati di maggior rilievo ottenuti con questa esperienza sono: a) la scomparsa delle cloriti; b) la sericitizzazione di molti plagioclasii; c) la formazione di ossiorneblende; d) l'aumento percentuale di minerali opachi e semiopachi.

Al microscopio si osserva l'assenza delle cloriti che nella roccia prima della pneumatolisi erano presenti nella misura del 13%.

I plagioclasii presentano notevoli segni di trasformazione; in alcune zone si può osservare una completa trasformazione degli individui (vedi

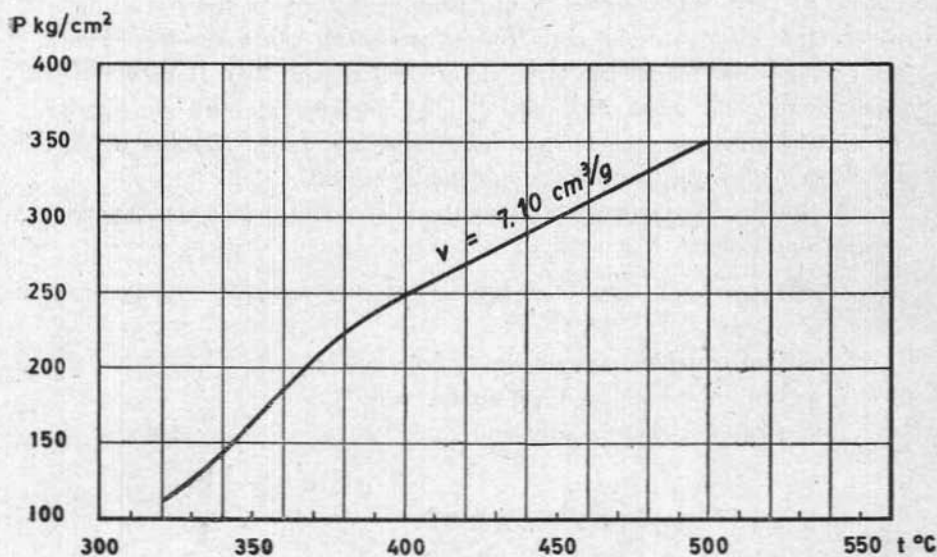


Fig. 7

tav. 9 fig. 2) caratterizzata da prevalente sericite cui si associano epidoti e granulazioni di carbonati. La grana di questi aggregati è per lo più molto minuta, tanto che è necessario ricorrere ai maggiori ingrandimenti per ottenere una risoluzione utile. In alcune di queste plaghe è ancora riconoscibile l'abito del preesistente plagioclasio. Vi sono anche zone in cui risultano ben chiari i graduali passaggi (vedi tav. 10 figg. 1 e 2).

Gli anfiboli presenti ordinariamente nella roccia erano del tipo orneblenda comune. Gli anfiboli presenti dopo la pneumatolisi sono in parte ossiorneblende, ben riconoscibili per il tipico pleocroismo secondo lo schema:

α = giallo bruno

γ = marrone brunastro scuro

e per l'estinzione c : γ intorno ai 5° .

Tra i minerali opachi oltre alle titanomagnetiti si può osservare un aumento in ossidi e idrossidi di Fe e Ti distribuiti nella roccia come granulazioni interstiziali isolate o raggruppate sia in piccole venule lungo le tracce di sfaldatura di molti individui di augite, di anfiboli ed anche di plagioclasio, sia in piccole plaghe in seno agli stessi individui; in alcune zone si hanno vere e proprie velature ad idrossidi.

B) *Diabase a grana media.*

Il diabase a grana media utilizzato per le esperienze di trasformazione non differisce sostanzialmente da quello a grana grossa se non per le dimensioni dei costituenti cristallini (che secondo l'allungamento eccezionalmente raggiungono i 2 mm; i valori per lo più oscillano fra 0,5 e 1,5 mm.) e per un maggior grado di trasformazione, nel senso che sono un pò più estesi gli stessi tipi di trasformazione riconosciute nel diabase a grana grossa. Si tratta in definitiva di una differenza quantitativa e non qualitativa, almeno sostanzialmente. E' evidente che l'analogia sfugge dal rigore quando si entra nel particolare dettaglio.

Ho voluto utilizzare il suddetto campione per sottoporlo alle medesime condizioni sperimentali realizzate per quello a grana grossa, nell'intento di stabilire se le dimensioni dei costituenti cristallini possono avere un certo peso nella trasformazione della roccia in senso quantitativo.

Dall'esame delle sezioni sottili non risulta esservi influenza in tal senso, ben inteso limitatamente alle condizioni realizzate. Sempre limitatamente a tali condizioni non ho riconosciuto sostanziali differenze qualitative. Ciò a conferma dei risultati ottenuti e precedentemente descritti.

Conclusioni

Le ricerche oggetto del presente lavoro, relative al metamorfismo sperimentale pneumatolitico ed idrotermale su rocce ofiolitiche, hanno portato i seguenti risultati:

A) *variazioni nella « compagine » della roccia con mutamenti parziali o totali dello schema strutturale;*

B) *variazioni qualitative e quantitative della composizione mineralogica con trasformazioni e neoformazioni di minerali.*

Le più significative variazioni nello schema strutturale sono:

- a) la scomparsa della struttura intersertale ofitica;
- b) la formazione di uno schema del tutto simile a quello della struttura intersertale divergente sino ad arborescente;
- c) la formazione di uno schema apparentemente paragonabile a quello di una struttura porfirica.

Le più significative trasformazioni nella composizione mineralogica sono:

a) *plagioclasti*: distruzione parziale o completa; sericitizzazione ed epidotizzazione; graduale mobilizzazione di materia con neoformazione di calcedonio e quarzo; neoformazione di albite in cristalli allungati sino ad aghiformi, intersecantisi secondo lo schema della figura intersertale divergente;

b) *cloriti*: distruzione parziale o totale; variazioni nella composizione per apporto di ferro;

c) *augiti*: distruzione parziale, uralitizzazione;

d) *anfiboli*: trasformazione e neoformazione con comparsa di termini rombici;

e) *titano-magnetiti*: trasformazione e neoformazione di idrati di ferro e di prodotti leucoxenici.

Va infine rilevato che fra gli schemi di trasformazione ottenuti e sopra descritti sono presenti quelli che accompagnano e spesso caratterizzano la spilitizzazione.

Tutta la serie di trasformazioni, realizzate in laboratorio alle condizioni precedentemente descritte, oltre ad investire problemi di ordine più generale ai quali si è accennato nell'introduzione, confermano le conclusioni cui ero giunto nell'interpretazione di alcune trasformazioni su rocce ofiolitiche, da me studiate a suo tempo petrograficamente; tali conclusioni sono brevemente riassunte a pag. 10 del presente lavoro.

I problemi di ordine più generale relativi agli equilibri chimico-fisici, alla attività dei fluidi in natura alle condizioni pneumatolitiche e idrotermali ed alla loro funzione come « vettori » della materia e come mineralizzatori, possono trovare nei risultati ottenuti utili riferimenti.

Qualunque tentativo di interpretazione e soprattutto di generalizzazione, relativo ai suddetti equilibri, sarebbe prematuro allo stato attuale. Si dovranno attendere i risultati di ulteriori e numerosi lavori sperimentali.

Mi è gradito concludere esprimendo al Prof. Ciro Andreatta, mio Maestro, i più vivi ringraziamenti per i Suoi generosi consigli e per il Suo prezioso aiuto nella risoluzione di non facili problemi di determinazione mineralogica al microscopio.

Istituto di Mineralogia e Petrografia dell'Università di Bologna - Luglio 1956.

B I B L I O G R A F I A

- (1) FRIEDEL CH. e FRIEDEL G., *Action des alcalis e des silicates alcalins sur la mica.* « Bull. Soc. Fr. Min. » 13, 1890.
- (2) GORANSON R. W., *Solubility of water in granite magmas.* « Amer. J. Sci » 22, 1931.
- (3) KENNEDY G. C., *P.V.T. in water at elevated temperatures and pressures.* « Amer. J. Sci. » 248, 1950.
- (4) MOREY G. W. e NIGGLI P., *The hydrothermal formation of silicates, a review.* J. Amer. Chem. Soc. » 35, 1913.
- (5) MOREY G. W. e FENNER C. N., *The ternary system H₂O — K₂SiO₃ — SiO₂.* « J. Amer. Chem. Soc. » 39, 1917.
- (6) NIEUWENBURG C. J. e VAN ZON P. M., *Semi-quantitative measurements of the solubility of quartz in super-steam critical.* « Rec. Trav. Chim. Pay-Bas » 54, 1935.
- (7) NIEUWENBURG C. J. e BLUMENDHAL H. B., *Isotermes of water from 350° to 480° and for pressure up to 600 Kg/cm².* « Rec. Trav. Chim. Pay-Bas. » 51, 1932.
- (8) NORTON F. H., *Hydrothermal formation of clay minerals in the laboratory.* « Amer. Min. » 24, 1939.
- (9) PELLIZZER R., *Ricerche sulle ofioliti della zona tra la Futa e la Raticosa.* « Boll. Serv. Geol. d'Italia ». 1955.
- (10) PELLIZZER R., *Realizzazione sperimentale di atti metamorfici alle condizioni pneumatolitiche e idrotermali.* « Rend. Soc. Min. It. » XI, 1955.
- (11) ROY R. e TUTTLE O. F., *Investigations under hydrothermal conditions.* « Physics and chemistry of the earth ». Pergamon-London, 1956.
- (12) SMYTH F. H. e ADAMS L. H., *The system calcium oxide-carbone dioxide.* « J. Amer. Chem. Soc. » 45, 1923.
- (13) SPEZIA G., *Contribuzioni di geologia chimica. Esperienze sul quarzo.* « Atti R. Acc. Sc. Torino », 1897-98.
- (14) SPEZIA G., *Sull'accrescimento del quarzo.* « Atti R. Acc. Sc. Torino » 44, 1908.
- (15) WINCHELL A. N., *Elements of Optical Mineralogy.* New York, 1951.

SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA I

Microfotografia composta (4 microfotografie semplici). Nicols. incr.; ingr.
lin. 12.

Diabase a grana grossa con struttura intersertale ofitica; trama plagioclasica.



SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA II

Microfotografia composta (6 microfotografie semplici). Nicols iner.; ingr. lin. 70 (1).

Diabase di tavola I trasformato per pneumatolisi.

In alto a destra: *plagioclasio residuale relativamente conservato, a contorni corrosi e frastagliati, in parte epidotizzato.*

In alto al centro: *plagioclasii residuali ridotti a venule e chiazze calcedoniose e quarzose in parte epidotizzati e sericitizzati; plaga ad epidoti di neoformazione.*

In alto a sinistra: *plaga ad epidoti di neoformazione e cristallini allungati di albite, sempre di neoformazione, includente relitti di plagioclasii e di augite.*

In basso a sinistra ed al centro: *relitti di augiti (a) in plaga ad epidoti di neoformazione ed a minutissimi cristallini aghiformi di albite pure di neoformazione.*

In basso a destra: *cristallini allungati di albite (ab) di neoformazione intersecantisi secondo lo schema della struttura intersertale divergente.*

(1) Nelle microfotografie composte le orientazioni delle singole microfotografie rispetto ai piani di polarizzazione dei nicols sono reciprocamente vincolate. Da ciò la mancanza talora dei tipici caratteri distintivi fra singoli cristalli di specie diversa o di carattere comuni fra singoli cristalli di uguale specie. Le zone oscure sono dovute in parte ad estinzione per quanto sopra, in parte alla presenza di minerali opachi ed in alcuni punti a vuoti nella sezione per la presenza di bollosità formatesi nella roccia (vedi descr. pag. 310).



SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA III

Microfotografia composta (6 microfotografie semplici). Nicols incr.; ingr. lin. 70 ⁽¹⁾.

Diabase di tavola I trasformato per pneumatolisi.

In alto a destra: *relitti di plagioclasti a contorni corrosi e frastagliati; plaghe ad epidoti (ep) di neoformazione con cristallini aghiformi di albite, pure di neoformazione.*

In alto a sinistra ed al centro: *plaghe ad epidoti (ep) di neoformazione includenti relitti di plagioclasti e di augite.*

Al centro: *plagioclasio residuale ridotto a venule e chiazze calcedoniose e quarzose (con albite ai margini), in parte sericitizzato.*

In basso a destra: *cristalli di epidoti (ep) di neoformazione.*

In basso al centro: *relitti di plagioclasti (in parte albite di neoformazione); più sotto: plaga ad epidoti (ep) di neoformazione.*

⁽¹⁾ Vedi nota relativa alla spiegazione della tavola II.



SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA IV

Microfotografia composta (4 microfotografie semplici). Nicols incr.; ingr. lin. 70 ⁽¹⁾.

Diabase di tavola I trasformato per pneumatolisi.

In alto a destra: *relitti di augite (a)*.

In alto al centro ed a sinistra: *epidoti e cristalli di albite (ab) di neoformazione intersecantisi secondo lo schema della struttura intersertale divergente*.

Zona centrale sinistra e destra: *relitti di plagioclasti in plaga a cristallini di albite (ab) di neoformazione (allungati e talora biforcuti alle estremità), cui si associano nella zona sinistra granulazioni epidotiche*.

In basso a sinistra: *relitti di plagioclasti in plaga a cristallini di albite (ab) di neoformazione (talora geminati), cui si associano granulazioni epidotiche*.

⁽¹⁾ Vedi nota relativa alla spiegazione della tavola II.



SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA V

Fig. 1. — Diabase di tav. I trasformato per pneumatolisi (esperienza n° 3). Nicols
incr.; ingr. lin. 100.

Cristalli di plagioclasti a contorni corrosi e individui le cui zone periferiche sono trasformate in quarzo. Si notino i passaggi graduali.

Fig. 2. — Diabase di tav. I trasformato per pneumatolisi (esperienza n° 4). Nicols
incr.; ingr. lin. 300.

Aggregato di preesistenti cloriti trasformate nel quale è ancora possibile distinguere un motivo fibroso raggiato.



Fig. 1

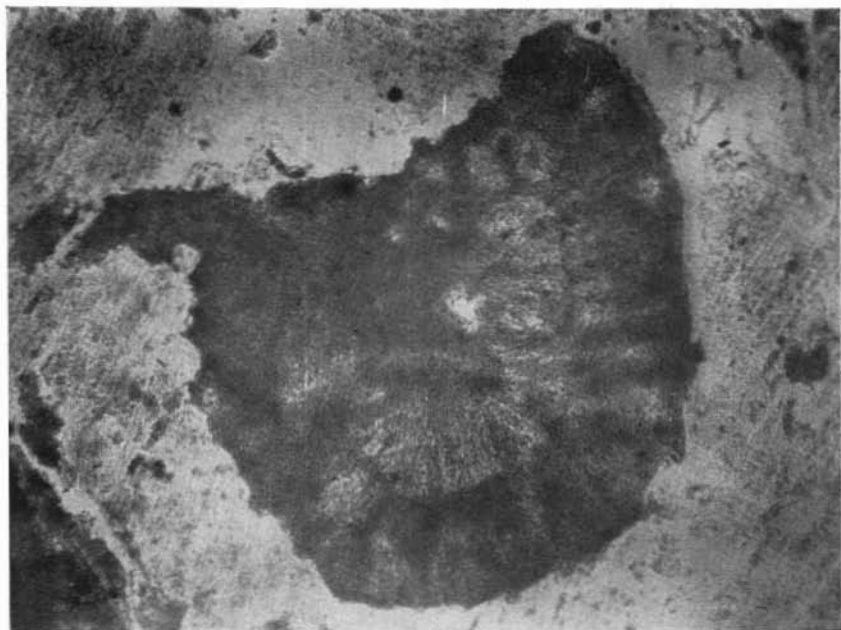


Fig. 2

SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA VI

Fig. 1. — Diabase di tav. I trasformato per pneumatolisi (esperienza n° 5). Nicols iner.; ingr. lin. 32.

Esempio di schema strutturale « paragonabile a quello della struttura porfirica » per la presenza di « fenocristalli », immersi in una pasta di fondo microcristallina.

Fig. 2. — Come sopra.

A destra: « fenocristallo » di angite parzialmente trasformato includente minerali opachi.

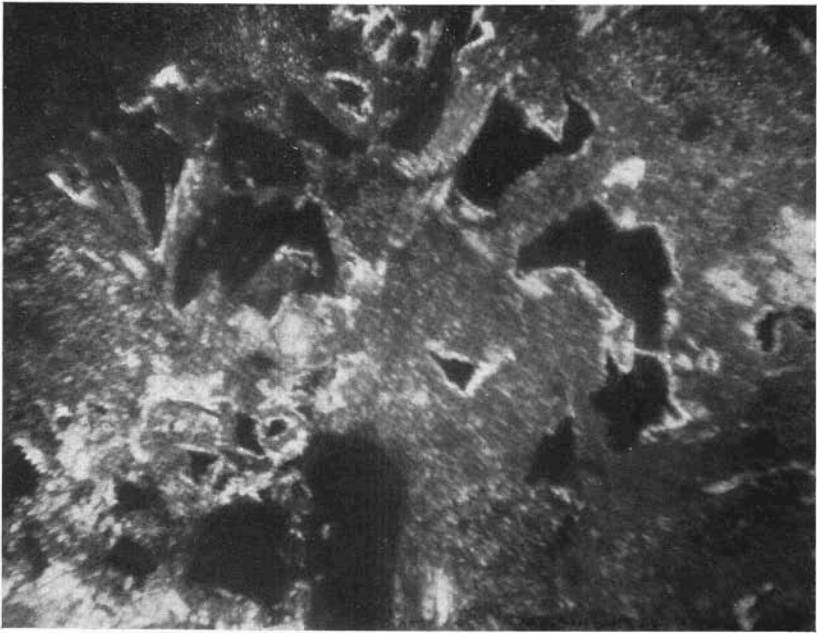


Fig. 1



Fig. 2

SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA VII

Figg. 1 e 2. — Diabase di tav. I trasformato per pneumatolisi (esperienza n° 5).
Nielos incr.; ingr. lin. 100.

Unici esempi riconoscibili di relitti di plagioclasio; gli individui mostrano evidenti contorni corrosi e sinuosi.

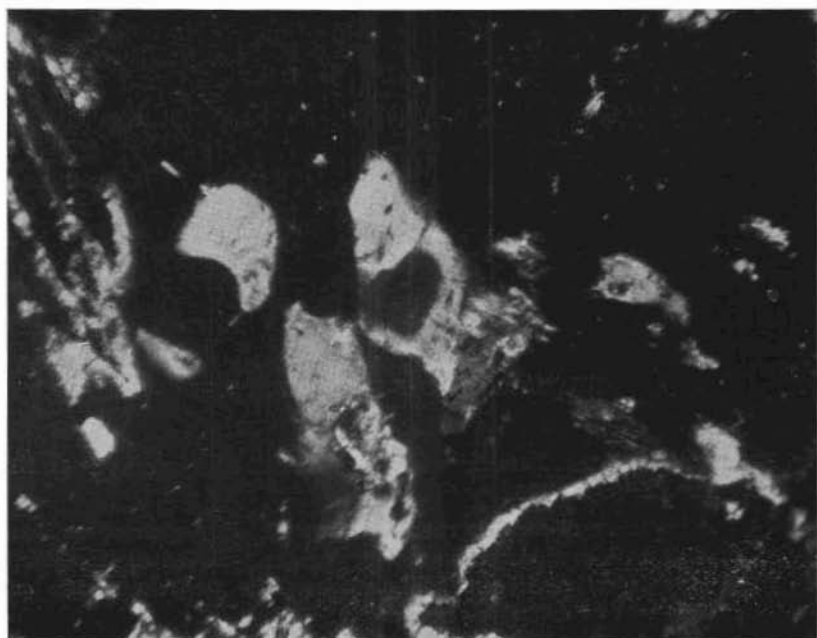


Fig. 1

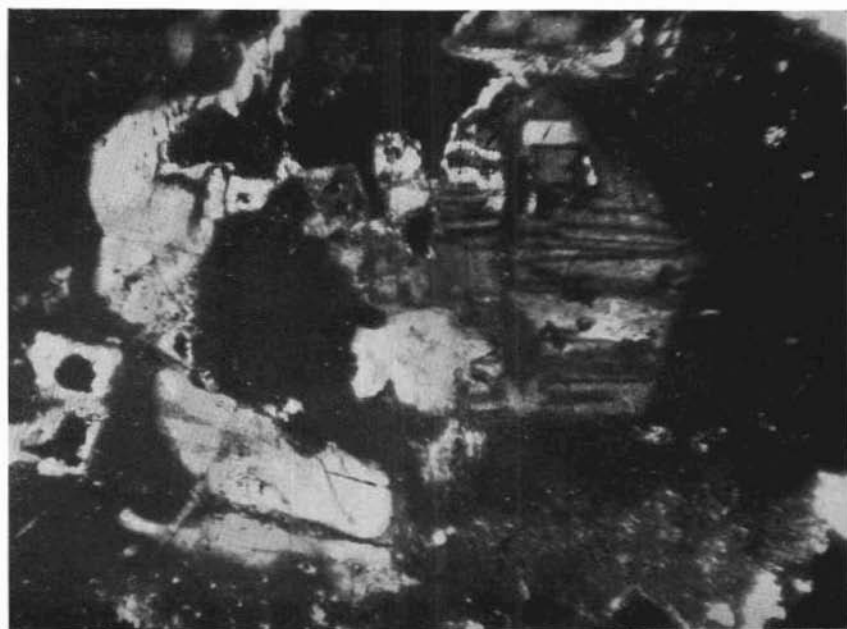


Fig. 2

SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA VIII

Fig. 1. — Diabase di tav. I trasformato per pneumatolisi (esperienza n° 5). Niclos iner.; ingr. lin. 100.

Associazione di anfibolo rombico e monocino di neoformazione, ben visibile nella zona centrale compresa fra due individui di magnetite. La parte in estinzione corrisponde ad antofillite ferrifera, mentre quella illuminata ad actinolite ferrifera.

Fig. 2. — Diabase di tav. I trasformato per pneumatolisi (esperienza n° 5). Niclos iner.; ingr. lin. 100.

Al centro: plaga di neoformazione a prevalente sericite con piccole quantità di minerali argillosi, idrossidi di ferro e con minutissime granulazioni ad epidoti, immersa nella pasta di fondo microcristallina.

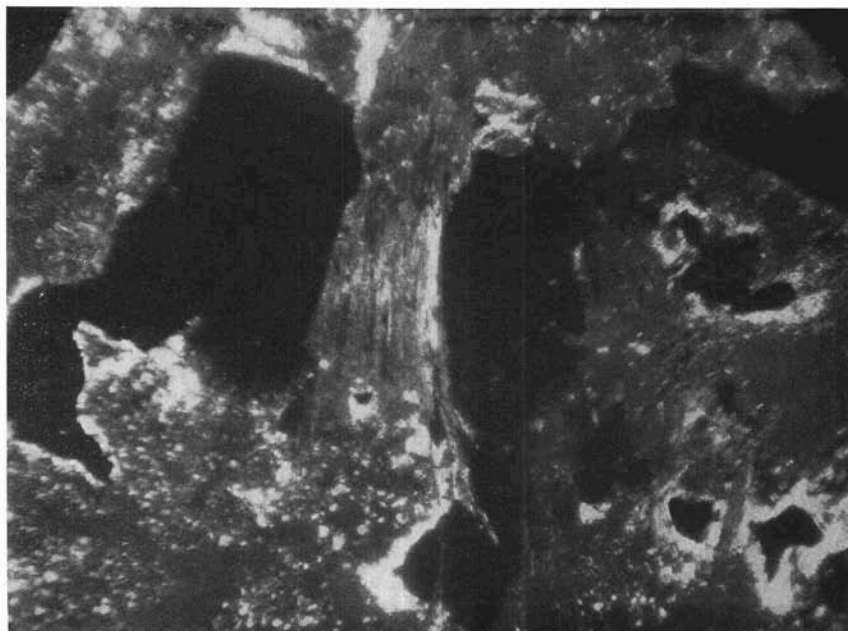


Fig. 1

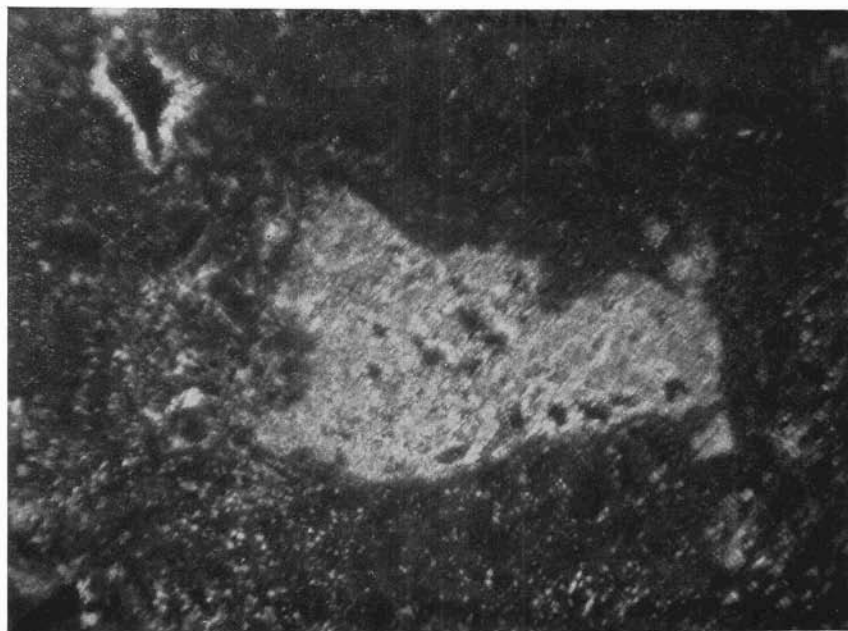


Fig. 2

SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA IX

Fig. 1. — Diabase di tav. I trasformato per pneumatolisi (esperienza n° 5). Nicols iner.; ingr. lin. 300.

Esempio di aggregato lamellare neoformato intorno ad un individuo di titanio-magnetite. (Vedi descrizione pag. 26 del testo).

Fig. 2. — Diabase di tav. I trasformato per pneumatolisi (esperienza n° 6). Nicols iner.; ingr. lin. 300.

Aggregato di neoformazione a prevalente sericite con granulazioni ad epidoti e plaghette a idrossidi di ferro. L'aggregato è pseudomorfo su cristalli di plagioclasio.

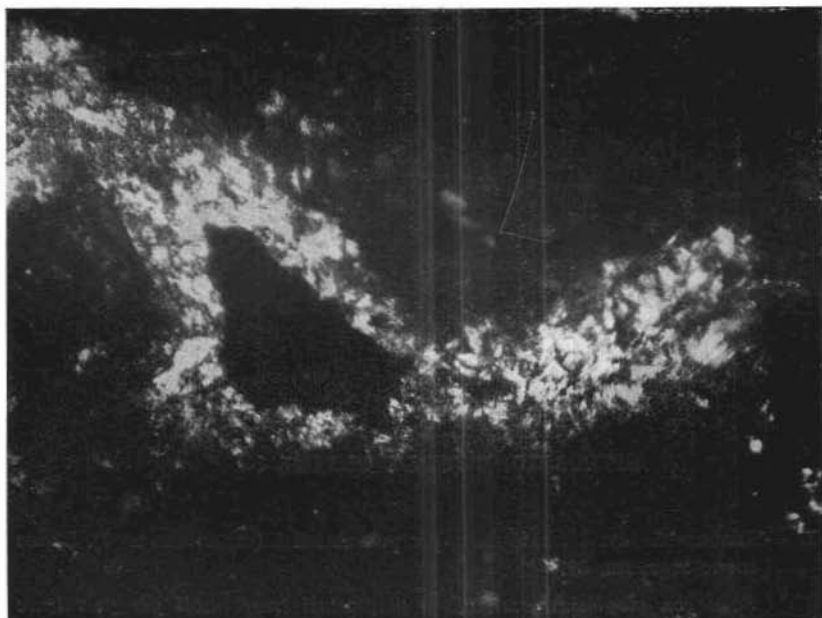


Fig. 1

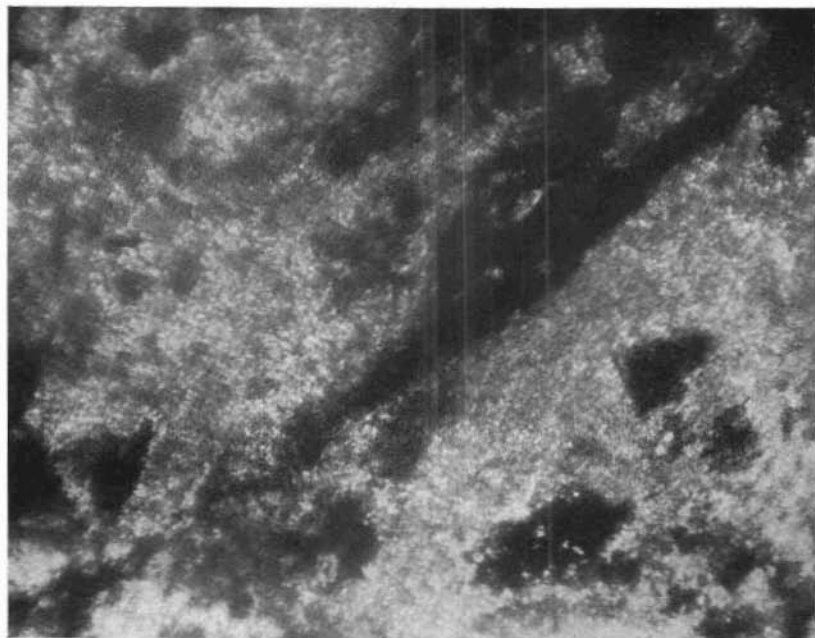


Fig. 2

SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA X

Fig. 1. — Diabase di tav. I trasformato per pneumatolisi (esperienza n° 6). Niclos iner.; ingr. lin. 32.

Zona con plagioclasti residuali e plagioclasti trasformati per prevalente sericitizzazione.

Fig. 2. — Particolare della figura 1. Niclos iner.; ingr. lin. 100.

Passaggi graduali della trasformazione dei plagioclasti.

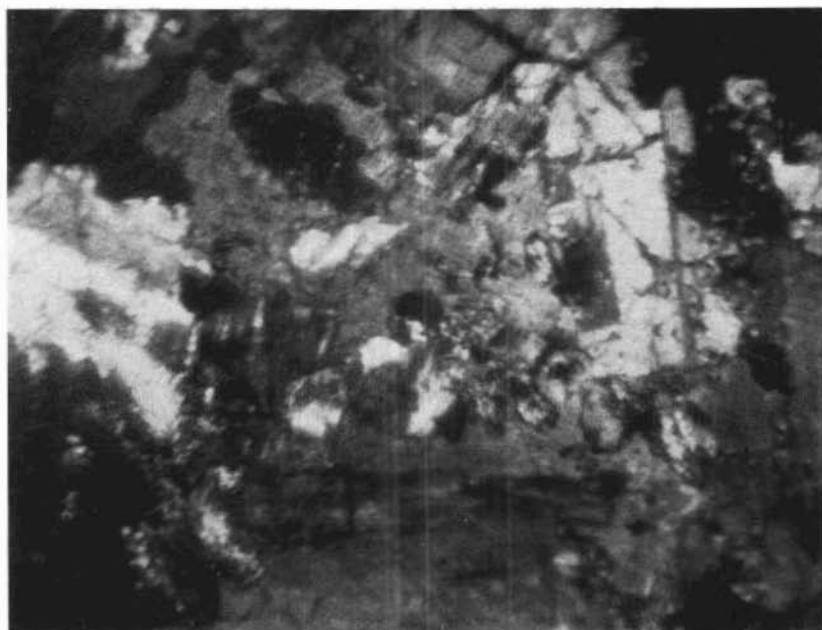


Fig. 1



Fig. 2