

GIULIANO PICCOLI

L'ORIGINE DEL GRANITO

(DUE RECENTI NOTE DI K. R. MEHNERT)

Sono comparsi negli ultimi tempi due lavori di K. R. MEHNERT (1959, 1960) che riguardano il dibattuto problema dell'origine del granito. La prima opera è una messa a punto della questione nei termini in cui viene discussa attualmente. Essa porta un titolo simile al lavoro di O. H. ERDMANNSDÖRFFER del 1950 (e ai lavori di D. L. REYNOLDS 1947, N. L. BOWEN 1948, H. H. READ 1955 nonché a un precedente scritto di D. GUIMARÃES 1938) e come quello è un'opera di critica e aggiornamento sul problema, che si trascina dai tempi di WERNER e HUTTON (vedi anche WIGMANN 1958) (1).

Il lavoro, di quasi cento pagine, è suddiviso in nove capitoli. Nel primo vengono indicati i risultati di ricerche sperimentali sui sistemi silicatici; nei tre successivi si riportano i dati di studi petrografici su temperature, migrazioni di sostanze e bilancio di materiali riguardanti il granito; nel quinto, sesto, settimo e ottavo viene trattata direttamente l'origine del granito per via magmatica, per mobilizzazione selettiva e per metasomatismo; l'ultimo capitolo contiene un breve riepilogo con le conclusioni.

Il lavoro è completato da un breve riassunto in inglese e riporta sette diagrammi e schizzi. Esso è senz'altro l'opera più completa e aggiornata nel suo genere. La bibliografia comprende 300 voci.

Credo valga la pena riassumere nei punti essenziali il contenuto dello studio critico di MEHNERT.

(1) Numerosi altri lavori trattano notoriamente lo stesso argomento generale e portano titoli analoghi. Basti citare per tutti gli articoli di H. H. READ, A. F. BUDINGTON, F. F. GROUPE, G. E. GOODSPEED, oltre quello di N. L. BOWEN sopra ricordato, apparsi in «Geological Society of America, Memoir 28», 1948, intitolata appunto *Origin of granite* (J. GILLULY chairman), oppure la pubblicazione di M. E. TERUGGI: *El origen de los granitos*. «Rev. As. Geol. Argentina», 7, 233-263, 1952.

L' autore citato espone innanzitutto *i risultati di ricerche sperimentali* tendenti a riprodurre in laboratorio la sintesi del granito o di rocce affini in condizioni quanto più vicine possibili a quelle della natura.

E' noto come oggi molti studi sulle condizioni termiche in cui si verifica, ad esempio, il metamorfismo, siano basati sulle sintesi artificiali di specie mineralogiche molto indicative da questo punto di vista. Si può anzi affermare che la minerosintesi sia attualmente in pieno sviluppo e ad essa i petrologi ricorrono sempre più largamente, pur tenendo presenti le grandi limitazioni nella possibilità di riprodurre oggi in via sperimentale le elevate pressioni naturali agenti per tempi lunghissimi, in condizioni statiche o quasi (N. d. R.).

Gli esperimenti eseguiti su fusi secchi e in presenza di acqua indicano che i diagrammi di stato relativi alla formazione dei silicati rimangono simili, ma con sensibile abbassamento delle temperature di solidificazione, se l' acqua non partecipa alla composizione delle fasi solide. Nel caso di formazione di silicati ossidrilati i diagrammi di stato vengono invece mutati radicalmente.

Le ricerche su sistemi « semplificati » rispetto al granito, con 5, 4 o 3 componenti (Ab - An - K - H₂O - SiO₂; Ab - K - SiO₂ - H₂; ecc.) hanno permesso di riconoscere che a 4000 atm di pressione d' acqua il minimo termico ternario del diagramma di stato Ab, Or e Q si trova a 640° - 650° C, e viene ulteriormente abbassato dalla presenza di HF, che certamente esiste in natura come componente volatile dei magmi granitici.

Da queste prove sulla solidificazione di « fusi granitici » viene indicata la composizione più probabile delle rocce derivanti da consolidamento magmatico, cioè una composizione pari o prossima all' eutettico. S' intende che i sistemi naturali sono molto più complessi di quelli riprodotti artificialmente; anche nel semplice esperimento di una diminuzione lineare della temperatura i processi di cristallizzazione si rivelano notevolmente complessi.

Le teorie magmatiste trovano comunque dei validi argomenti a sostegno della probabilità che molte rocce granitiche naturali siano derivate per cristallizzazione da sostanze fuse, al cui eutettico esse corrispondono.

Per i processi anatettici valgono invece le esperienze inverse, di fusione delle rocce granitoidi in presenza di acqua. Di particolare interesse sono inoltre gli esperimenti di fusione di argille (con NaCl) con arricchimento d' acqua. A 675° si ottenne un fuso che aveva un rapporto finale quarzo-ortoclasio-plagioclasio pari a quello di un granito. Esso

rappresentava il 50% in peso del materiale di partenza, con 3% di cloruro di sodio.

E' provato quindi che a partire da rocce sedimentarie di composizione argillosa, con arricchimento in H_2O , si possono formare anatomicamente dei fusi di composizione granitica.

Un altro gruppo di esperimenti è rivolto alle trasformazioni idrotermali di rocce, come modello per il processo di granitizzazione. Per questa via si è riusciti ad ottenere in 96 ore la cristallizzazione di una ossidiana con formazione di ortoclasio, quarzo e mica (tra 600° e 400° C, con K_2CO_3 al 3% e 2000 bar di pressione di H_2O). Altre ricerche sono per ora piuttosto incomplete.

Anche le teorie trasformiste trovano quindi un certo appoggio in ricerche sperimentali, seppure a tutt'oggi ancora parziali. Si tratta in ogni caso di trasformazioni in presenza d'acqua.

Le ricerche dimostrano invece che la diffusione ionica per via intracristallina reticolare (prove su metalli) presenta velocità troppo basse (da un centimetro a un metro in 10^6 anni) per essere invocata come causa di migrazioni geologiche in grande scala, almeno nella parte superiore della crosta terrestre, dove l'effetto della pressione è ancora controllabile sperimentalmente.

La velocità di diffusione in pellicole integranulari è almeno 10^6 volte superiore, il che significa una distanza da 100 metri a 1 chilometro in un milione di anni.

Da questa breve rassegna delle esperienze compiute in laboratorio per suffragare le deduzioni derivanti dalle osservazioni in natura, si può concludere che i processi di solidificazione magmatica, di anatessi e di trasformazione idrotermale delle rocce vengono dimostrati possibili anche sperimentalmente.

L'autore passa quindi ad esaminare una serie di ricerche sulla temperatura di formazione delle rocce granitoidi (graniti, granodioriti, tonaliti, ecc.), basate sui termometri geologici naturali.

Non ci soffermeremo su questo argomento. Si deve ricordare però come certi termometri suggeriti da taluni studiosi non si dimostrino utilizzabili (pertiti); in altri casi la presenza di minerali di bassa temperatura si deve ricondurre agli stadi finali di formazione della roccia esaminata, per la quale qualche autore suppone un precedente stadio di più alta temperatura, negato da altri; in alcuni casi infine la presenza di minerali tipici di alta temperatura, conservati nella roccia, parla chiaramente a favore di una loro probabile origine magmatica.

I minerali cui si allude sono i feldispatici; le ricerche sulle plutoniti vennero suffragate da analoghi studi sulle vulcaniti.

La possibilità di migrazioni di sostanze nella crosta terrestre venne esaminata anche per via petrografica. Senza riferire in dettaglio i vari studi si può ricordare la conclusione cui giungono la teoria magmatista, basata in questo su ricerche sperimentali, e quella della granitizzazione, che si rifà a ricerche di campagna: entrambe riconoscono che *la mobilità dei componenti feldispatici in uno stadio tardivo della formazione del granito è tale da permettere migrazioni che superano il limite del singolo cristallo.*

Nel caso di processi tettonici che offrano una via di migrazione a soluzioni ricche in alcali o se le rocce sono permeabili a tali soluzioni, sono possibili con certezza migrazioni a grande distanza; qui entriamo però in un campo di fenomeni alquanto diverso. La feldispatizzazione attorno a nuclei granitici (feldispato potassico) è per lo meno facilitata da movimenti d'insieme e utilizza spazi intergranulari e capillari; la blastesi plagioclasica si verifica su scala regionale nelle rocce di profondità (nella epimesozona sono più frequenti feldispatici acidi, albite) e si mostra maggiormente indipendente della presenza di graniti che non quella del feldispato potassico.

L'argomento successivo inquadrato da MEHNERT riguarda *il bilancio di materia nella formazione del granito.*

Dopo aver discusso gli errori derivanti dal sistema di raccolta dei campioni e di utilizzazione dei dati di analisi chimiche, l'autore tratta i processi di alcalizzazione e dealcalizzazione nelle rocce e il ruolo dell'acqua.

Nella trattazione dell'*apporto di alcali* si deve ricordare innanzitutto come il materiale originario dei più comuni processi metamorfici è rappresentato da sedimenti di tipo pelitico, che hanno un contenuto in alcali relativamente basso, mentre i graniti, postulati quale prodotto finale dei processi di granitizzazione, contengono un tenore di alcali elevato. I processi si possono quindi riguardare come un arricchimento in alcali, essenzialmente come una feldispatizzazione.

Il sodio e il potassio si comportano in modo diverso sotto questo riguardo. Il K appare legato nella maggior parte dei casi a masse magmatiche vicine; il Na, il cui metasomatismo avviene a temperature minori, segue generalmente il K per rapporti normali di temperatura.

Il problema della *provenienza degli alcali* trova una soluzione molto semplice se si accetta per essi una « sorgente » magmatica vicina. Diversamente si possono affacciare tre ipotesi:

1) gli alcali provengono da masse magmatiche acide profonde, non affioranti; questo è in accordo con le teorie magmatiste. Gli antichi scudi affioranti sono però già ricchi in alcali e la provenienza di essi da sorgenti acide ancor più profonde non sembra probabile nella considerazione di un bilancio complessivo di materiali nella crosta terrestre;

2) alcuni considerano quale sorgente di alcali il sima sottostante al sial. L'arricchimento di alcali dal sima al sial può essere avvenuto per differenziazione magmatica o per diffusione ionica (teorie trasformiste);

3) l'arricchimento in alcali avviene soltanto entro il sial, per migrazione interna, senza variazione del tenore totale degli alcali.

Nessuna di queste tre ipotesi appare risolutiva.

Discutendo i processi di *dealcalizzazione* (degranitizzazione) l'autore ricorda come negli ultimi tempi si sia attribuita grande importanza alle charnockiti, che sarebbero le rocce più profonde affioranti su tutta la Terra e rappresenterebbero i prodotti di dealcalizzazione in profondità, al piede « basico » dei blocchi sialici. La parte più profonda della catazona potrebbe essere pertanto la sorgente degli alcali. Le osservazioni principali furono fatte in Goenlandia.

Proietti vulcanici nell'ercinico renano tedesco indicano l'esistenza di granuliti charnockitiche e rocce anortositiche alla base del complesso roccioso; si può presumere quindi l'esistenza anche in questa regione di condizioni simili a quelle constatate negli affioramenti groenlandesi (charnockiti sottostanti agli gneiss e migmatiti).

Circa *l'acqua* vale notare com'essa sia estremamente scarsa alle grandi profondità e più abbondante in zone intermedie, dove si constata i più intensi fenomeni di mobilizzazione (zona delle facies anfibolitiche di ESKOLA).

Dopo questa serie di fondamentali premesse, viene esaminato direttamente il *modo di formazione del granito*.

Innanzitutto oggi molti ammettono che il granito possa formarsi per vie diverse, per determinate condizioni P - T . Vi sarebbero pertanto varie possibilità:

1) per diminuzione di temperatura e differenziazione di un magma basico di alta temperatura (origine magmatica);

2) per aumento di temperatura e mobilitazione di un sedimento di composizione adatta (origine anatettica);

3) per infiltrazione di ichor magmatici o emanazioni diverse in rocce di adeguata composizione (teorie metasomatiste e trasformiste);

4) mescolanza di magmi o di magmi e rocce incassanti (ibridizzazione).

Fondamentale per questi studi è l'esame petrografico dei relitti delle fasi attraversate precedentemente dal granito; purtroppo questo criterio è di difficile applicazione.

L'origine magmatica del granito è convalidata dall'esistenza di lave fluide della stessa composizione, per cui almeno nel dominio vulcanico-subvulcanico devono esistere magmi di tale natura. Anche la composizione prossima allo « eutettico » o all'« ideale » di molti graniti sta a favore di questa origine. Se si tiene conto poi dell'importanza oggi attribuita ai processi di ricristallizzazione e trasformazione finale a bassa temperatura nella formazione della struttura granitica, si constata un avvicinamento dei punti di vista delle classiche teorie magmatiste e dell'idea dell'origine del granito per granitizzazione. La complessità dei fenomeni è dimostrata d'altra parte anche dagli studi sui filoni, che si formano mediante un processo a piccole tappe e con molte interazioni colle rocce incassanti (principio di HULIN).

Il grave problema dello spazio delle « camere » granitiche non ha trovato ancora una soluzione soddisfacente, nè con le teorie magmatiste nè con quelle della granitizzazione (la massa asportata, sia per diffusione ionica che per infiltrazione di soluzioni è tale da far sussistere ugualmente il problema) (cfr. WALTON 1955).

Forse solo la considerazione di un bilancio complessivo tra masse salienti e sprofondantisi nella crosta terrestre, può fornire un'ipotesi di lavoro ragionevole.

Un problema dibattuto da tempo riguarda il significato geologico del contatto tra granito e rocce vicine. Si constata come le masse granitiche presentino spesso contatti netti con le rocce contermini; d'altra parte si riconosce molte volte una continuazione entro il granito di strutture della roccia incassante. Si può osservare come nelle parti più elevate della crosta terrestre si verifichi in prevalenza il primo caso, che ci suggerisce una penetrazione del granito mediante il tipo « diapirico ».

L'autore conclude la trattazione dell'origine magmatica del granito dichiarando come essa debba ritenersi fondata nel caso di una composizione mineralogica eutettica.

La formazione del granito per mobilizzazione selettiva forma l'argomento di un altro capitolo.

L'idea della possibilità di una fluidizzazione delle rocce per imbibizione sorse già all'epoca di SEDERHOLM, e la discussione se le vene delle migmatiti debbano essere interpretate come intrusioni arteritiche o essudati venitici si risolse con il riconoscimento che esistono entrambe le possibilità (efr. anche G. PICCOLI 1958).

Si discute a volte la possibilità che si formino fusi anatettici a profondità modeste; in seguito ai risultati delle ricerche, già ricordate, sui diagrammi di fusione e i loro eutettici, si deve escludere questo fenomeno nell'epizona e nell'alta mesozona. I graniti ivi esistenti devono avere un'altra origine.

Dopo una breve discussione sugli « ichor » quali prodotti di anatessi, MEHNERT passa a considerare i relitti sfuggiti alla fusione. In ogni caso, per la grande importanza dei processi autometasomatici finali, di bassa temperatura, accade che rocce magmatiche e anatettiche possano assomigliarsi. Fra gli esempi di rocce sfuggite all'anatessi totale si citano le kinzigiti della Foresta Nera.

Altro caso considerato dagli studiosi è quello della *formazione del granito per metasomatismo*.

Sotto questo nome si indicano quei processi di trasformazione per cui al posto dei minerali della composizione originaria si formano nuovi minerali di composizione diversa senza variazione di volume. Gli scambi avvengono spazio per spazio, cioè in forma di « fronte »; si esclude quindi da questi processi il caso di una fluidificazione in massa. I processi metasomatici, già noti per il normale metamorfismo, possono condurre anche alla formazione delle rocce granitoidi? Si è parlato addirittura di elementi « granitofili » (Si, Al, Alc) che tenderebbero a concentrarsi ad una determinata profondità nella crosta terrestre (per una combinazione di equilibrio dipendente dalla temperatura, pressione, gravità, ecc.) ed elementi « granitofobi » (Ca, Mg, Fe) che verrebbero respinti verso il basso (o verso l'alto secondo la teoria dei fronti basici della REYNOLDS).

Il processo più noto di granitizzazione è la feldispatizzazione. Nelle fasi magmatiche tardive possono formarsi grandi cristalli di feldispatopotassico nelle rocce incassanti, che vengono così ad avere una composizione granitoide. Esse sono naturalmente inomogenee e lontane dalla composizione granitica « ideale », corrispondente all'eutettico del sistema quarzo-albite-ortoclasio. Le temperature di feldispatizzazione sta-

rebbero secondo BARTH tra 450° e 650° C (in base al rapporto K/Na nei feldispati), quindi inferiori a quelle del minimo « granitico » (ESKOLA aveva indicato la feldispatizzazione potassica come dovuta al magma granitico, ma riconobbe che in questo caso le temperature non erano tali da permettere quella possibilità). A temperature ancora più basse si formano le rocce con feldispatizzazione plagioclasica, in particolare albitica; tale feldispatizzazione è dovuta a soluzioni alcaline (cfr. ESKOLA 1956, 1961).

Il concetto di *granitizzazione* deve essere usato in definitiva nel senso più lato, comprendendovi la partecipazione di una fase fluida, magmatica o idrotermale.

In natura sono presenti tutti gli stadi di transizione fra fasi solide e fluide (processi di reomorfismo di BACKLUND). In base al riconoscimento che, per i processi di granitizzazione, devono essere disponibili sostanze granitizzanti in sovrappiù, si può affermare che le idee dei magmatisti e dei trasformisti non sono molto distanti su quello che deve essere il bilancio di materie per la granitizzazione.

A conclusione del suo lavoro lo studioso germanico dichiara come sia oggi riconosciuto che esistono varie possibilità di formazione del granito nel senso più lato.

Cercando di collegare i singoli processi in un quadro unitario si riconosce, dal punto di vista spaziale, l'opportunità di suddividere la crosta terrestre in « gradini » di profondità o meglio di intensità. Si può così stabilire che una tettonica complicata delle rocce granitoidi e migmatitiche predomina nelle zone di mobilizzazione più intensa, a medie profondità, mentre nelle granuliti delle zone sottostanti prevale una tettonica più tranquilla, evidentemente meno influenzata dalla mobilizzazione granitoide. Nelle zone più elevate prevale l'intrusione diapirica in fase fluida. L'*Unterbau* delle zone granitiche è rappresentato infine da una zona di degranitizzazione, che è la più profonda zona terrestre affiorante (le rocce corrispondenti sono granuliti basiche, charnockiti, povere d'acqua). Da queste profondità provengono anche mobilizzati pegmatitoidi e granitoidi.

Il problema della formazione del granito va considerato anche in rapporto temporale rispetto ai cicli orogenici. Si possono riconoscere in generale fenomeni di mobilizzazione sinorogeni (con formazione di magmi palingenici) e fasi tardorogene fino a postorogene di intrusioni diapire.

In definitiva si deve riconoscere che la formazione delle rocce granitoidi è un processo molto complicato; il « granito » corrisponde ad

uno stato di equilibrio per date condizioni ptX . In molti casi l'equilibrio non è raggiunto completamente: questo fatto offre la possibilità di future suddivisioni sia petrografiche che genetiche del granito.

Ho creduto opportuno riassumere così ampiamente l'opera di MEHNERT per l'alto interesse del suo contenuto. Come si può facilmente constatare, la posizione di questo studioso sul problema del granito è quella di un magmatista aperto a tutte le idee suggerite dalle esperienze e dalle ricerche di compagna e di laboratorio. Egli respinge in definitiva solo quelle concezioni che non sembrano sostenute da un corredo di prove sufficiente a dimostrarne la possibile validità.

Non è inutile un breve confronto con le conclusioni esposte nell'altro lavoro ricordato (1960), successivo a quello testè recensito, in cui sono presi in considerazione i giacimenti di minerali utili di origine endogena.

In esso si riconosce che può aver luogo la formazione di fasi mobili anche a temperatura relativamente modesta (quarzo, albite, adularia, carbonati); in presenza di eccesso d'acqua si originano le fasi mobilizzate idrotermali. In queste condizioni si formano moltissimi giacimenti minerari. A temperature più alte avviene la mobilizzazione pegmatitoidi (quarzo-plagioclasio-ortoclasio [microclino]). I minerali metalliferi rimangono allora nelle fasi relitte non mobilizzate (restiti). Condizioni di temperatura (relativamente) elevate portano infine alla mobilizzazione granitica, in cui l'intero complesso mineralogico è reso mobile, senza « restiti ». Gli eventuali minerali metalliferi si disperdono in una massa tendente all'omogeneizzazione. Nuovi giacimenti minerari possono concentrarsi a temperature decrescenti, in presenza di eccesso d'acqua. La mobilizzazione è quindi presente in tutti gli stadi metamorfici e sta a pari con il puro metamorfismo e i fenomeni magmatici, senza identificarsi con nessuno di essi.

Senza estendere le considerazioni ad un campo più strettamente geochimico voglio soltanto ricordare, infine, che lo stesso autore ha condotto una serie di studi sul comportamento degli alcali nelle parti profonde della crosta terrestre, analizzando fenomeni che presentano tanta importanza per il problema dell'origine del granito.

LAVORI RECENSITI:

- MEHNERT K. R. (1959) - *Der gegenwärtige Stand des Granitproblems*. « Fortschr. Miner. », 37, 117-206, 7 fig.
- (1960) - *Ueber endogene Erzbildung und ihre Beziehungen zur Granitentstehung durch selektive Mobilisation*. « N. Jb. Min., Abh. », 94 (Festband Ramdohr), 49-76, 1 fig.

ALTRI LAVORI RICORDATI NEL TESTO:

- BOWEN N. L. (1948) - *The granite problem and the method of multiple prejudices*. « Geol. Soc. Amer., Memoir », 28, 79-90.
- ERDMANNSDÖRFFER O. H. (1950) - *Die Entwicklung und jetzige Stellung des Granitproblems*. « Heidelb. Beitr. Miner. Petr. », 2, 334-377, 3 fig.
- ESKOLA P. (1956) - *Postmagmatic potash metasomatism of granite*. « C. R. Soc. Géol. Finlande », 29, 85-100, 2 fig.
- ESKOLA P. (1961) - *Granitentstehung bei Orogenese und Epirogenese*. « Geol. Rund. », 50, 105-123, 3 fig.
- GUIMARAES D. (1938) - *Das Problem der Granitbildung*. « Chemie der Erde », 12, 82-94, 4 fig.
- MEHNERT K. R. (1960) - *Zur Geochemie der Alkalien im tiefen Grundgebirge*. « Beitr. Miner. Petr. », Miner. Inst. Fr. Univ. Berlin, 7, 318-339, 10 fig.
- MEHNERT K. R. e WILLGALLIS A. (1957) - *Zum Alkalihaushalt der Granitisation im Schwarzwald an Hand flammenphotometrischer Reihenanalysen*. « N. Jb. Min., Abh. », 91, 104-130, 4 fig.
- MEHNERT K. R., WILLGALLIS A., KALLIES B., MEIER B. e SCHÜLER B. (1959) - *Die Genauigkeit der Kornzählanalyse zur Bestimmung des quantitativen Mineralbestandes von kompakten Gesteinen granitähnlicher Zusammensetzung*. « Beitr. Min. Petr. », Miner. Inst. Fr. Univ. Berlin, 6, 203-218.
- PICCOLI G. (1958) - *Il problema delle migmatiti attraverso mezzo secolo di ricerche*. « Period. Miner. », 1-87, 5 tav.
- READ H. H. (1955) - *The granite controversy*. 430 p., 23 fig., Murby, London.
- REYNOLDS D. L. (1947) - *The granite controversy*. « Geol. Mag. », 84, 209-223, 1 figg.
- WALTON M. (1955) - *The emplacement of granite*. « Am. Journ. Sci. », 253, 1-18, 1 fig.
- WEGMANN C. E. (1958) - *Das Erbe WERNER's und HUTTON's*. « Geologie », 7, 531-559.