ROCCE METAMORFICHE

5.1 Introduzione

Va sotto il nome di *metamorfismo* l'insieme dei processi in grado di far variare lo stato energetico di un sistema roccioso solido conducendolo ad una nuova situazione di equilibrio. Il processo metamorfico si attiva ogni qualvolta si verifica una profonda variazione delle condizioni ambientali (pressione e temperatura). È importante sottolineare che il metamorfismo avviene allo stato solido e non coinvolge pertanto fusi magmatici.

Mentre il limite tra processo magmatico e processo metamorfico è netto (nel processo magmatico le rocce si formano da un magma, dunque da un sistema allo stato fuso), non è facile stabilire un limite tra processo sedimentario e processo metamorfico; è diventata tuttavia prassi collocare questo limite là dove finisce la diagenesi (quindi il processo metamorfico agirebbe su rocce già litificate). I principali parametri discriminanti sono rappresentati da: i) i minerali, poiché certe fasi sono tipiche dell'uno o dell'altro processo; ii) le dimensioni dei cristalli, poiché minerali comuni ad entrambi i processi formano, nel metamorfico, cristalli di maggiori dimensioni; iii) la presenza in certe rocce metamorfiche di strutture e tessiture esclusive del processo metamorfico.

Le rocce metamorfiche derivano pertanto da cambiamenti nella struttura ed eventualmente nella composizione chimica di rocce preesistenti (sia magmatiche, sia sedimentarie, sia metamorfiche) quando queste vengono sottoposte a marcate e progressive modificazioni per effetto di variazioni delle condizioni di temperatura e/o pressione. Infatti una roccia dovrebbe essere sempre costituita, in teoria, da un'associazione di minerali stabili alle condizioni di temperatura e di pressione alle quali si trova. Se essa viene sottoposta a condizioni termo-bariche differenti da quelle di formazione, i suoi minerali tendono a modificarsi verso una nuova associazione mineralogica (insieme di minerali) in equilibrio con le nuove condizioni ambientali.

Il metamorfismo comporta una riorganizzazione degli atomi all'interno dei diversi minerali con formazione di nuove specie chimiche e con la produzione, qualora sia inizialmente assente, di una struttura cristallina. Tutte queste modificazioni avvengono senza che la roccia passi allo stato fuso, nel qual caso si produrrebbe una nuova roccia magmatica.

Abbiamo detto che il metamorfismo determina una variazione della struttura ed eventualmente della composizione chimica della roccia preesistente. In realtà, mentre in seguito al processo metamorfico la struttura sicuramente cambia, non è assolutamente detto debba variare il chimismo totale della roccia. Se infatti il sistema rimane chiuso (non si ha ingresso di nuovi elementi chimici, ad esempio attraverso soluzioni percolanti) la composizione chimica totale della roccia non

cambierà, fatta eccezione per la formazione di fasi anidre partendo da fasi idrate (ad esempio di pirosseni da anfiboli).

Poichè il processo metamorfico viene attivato da una variazione della pressione e/o della temperatura, è possibile definire diversi ambienti metamorfici e diverse tipologie di metamorfismo. In particolare distingueremo:

- *metamorfismo termico o di contatto*: metamorfismo di alta temperatura e bassa pressione, dovuto al contatto dei magmi con le rocce incassanti, sviluppa la caratteristica aureola metamorfica;
- *metamorfismo dinamico*: metamorfismo di bassa temperatura e bassa pressione, si verifica in corrispondenza di grandi faglie, le rocce vengono frantumate per il movimento relativo e successivamente ricementate;
- *metamorfismo regionale*: metamorfismo di alta e/o bassa temperatura ed alta e/o bassa pressione, è il più diffuso, si sviluppa a grande scala ed è connesso a grandi movimenti geodinamici (tettonica zolle ed orogenesi);
- *metamorfismo di seppellimento*: metamorfismo di bassa temperatura ed alta pressione, è determinato dalla elevata pressione indotta dall'accumulo di potenti strati di sedimenti;
- *metamorfismo oceanico*: metamorfismo di bassa pressione ed alta o bassa temperatura, tipico dei processi distensivi nelle dorsali oceaniche;
- *metamorfismo da impatto meteorico o meteoritico*: metamorfismo di alta temperatura ed alta pressione, geologicamente istantaneo, determinato dall'impatto con grossi blocchi di origine extraterrestre.

Quando l'aumento di temperatura e/o pressione è tale da determinare la fusione parziale della roccia, a fondere sarà la frazione mineralogica più acida (quarzo, feldspati, muscovite). Se il fuso acido che si forma raffredda in loco, si produce una roccia formata da porzioni di roccia metamorfica rimasta solida (detta *paleosoma*) e porzioni di roccia ignea appena formatasi (detta *neosoma*); tali rocce sono dette *migmatiti*.

La produzione di un magma in seguito ad elevato grado di metamorfismo (alta pressione ed alta temperatura) è detta *anatessi*. Risulta intuitivo identificare l'anatessi come il limite tra processo metamorfico e processo magmatico. In realtà questo è completamente vero solo quando il magma che si forma viene allontanato dal luogo di origine formando un sistema a sé stante; infatti le migmatiti sono considerate a cavallo tra le rocce metamorfiche e le rocce magmatiche.

Come abbiamo detto le rocce metamorfiche possono essere prodotte da rocce magmatiche, sedimentarie e metamorfiche. Nel caso in cui il sistema di partenza (detto *protolito*) sia costituito da

rocce magmatiche, le conseguenti rocce metamorfiche possono essere denominate anteponendo il suffisso *orto-*, mentre, se derivate da rocce sedimentarie, il suffisso *para-* (ad esempio si potrà parlare di ortogneiss e di paragneiss, anche se la distinzione tra i due tipi non sempre è agevole). Quando il metamorfismo interessa masse rocciose superficiali, formatesi in condizioni di temperatura e pressione ordinarie, che, sepolte sotto migliaia di metri di sedimenti, vengono sottoposte ad un aumento di temperatura e di pressione, il metamorfismo viene detto *progrado*. Nei rari casi in cui una roccia sia sottoposta a temperature inferiori a quelle che hanno caratterizzato il suo processo di formazione, il metamorfismo viene detto *retrogrado*.

5.2 Trasformazioni metamorfiche e rinnovamento strutturale

Come le rocce magmatiche, anche le rocce metamorfiche presentano caratteristiche strutturali specifiche (oltre a minerali con tipica genesi metamorfica). Le trasformazioni strutturali e tessiturali avvengono prevalentemente ad opera della pressione, che può essere di due tipi: i) Pressione di carico esercitata dal peso delle rocce sovrastanti, il cui valore dipende dalla densità delle rocce. In genere si assume per il gradiente barico un valore intorno a 25-30 Kg/cm^2 ogni 100 m di profondità. La pressione di carico è di tipo idrostatico. Ciò significa che essa agisce sulle rocce in tutte le direzioni (principio di Pascal); ii) Pressione orientata dovuta ai movimenti crostali orizzontali responsabili dei fenomeni orogenetici. Tale pressione, agendo in una direzione determinata, è in grado di condizionare la tessitura della roccia metamorfica che si sta formando dando luogo ad una "ricristallizzazione dinamica" dei minerali, che si dispongono lungo andamenti planari o lineari. Una disposizione planare dei minerali è chiamata *foliazione*, mentre una disposizione lineare dei minerali è chiamata *lineazione*. Minerali che tendono a definire piani di foliazione sono in genere i fillosilicati come le miche. I minerali che tendono a definire una lineazione sono minerali allungati, come gli anfiboli, e qualche volta il quarzo ed i feldspati. Come la *foliazione*, anche la *scistosità* è generata, di preferenza, dall'iso-orientamento di fillosilicati secondo piani tra loro sub-paralleli. Sia la foliazione, sia la scistosità sono caratteristiche planari penetrative delle rocce metamorfiche, poiché determinano la formazione di strutture planari presenti non solo in superficie ma anche all'interno di essa. Normalmente, tanto più è marcato il grado di metamorfismo tanto più le superfici di scistosità sono coerenti, nel senso che diventa sempre più difficile rompere la roccia lungo tali superfici. Quando questa operazione risulta invece agevole, al termine di superficie di scistosità si preferisce quello di *superficie di foliazione*.

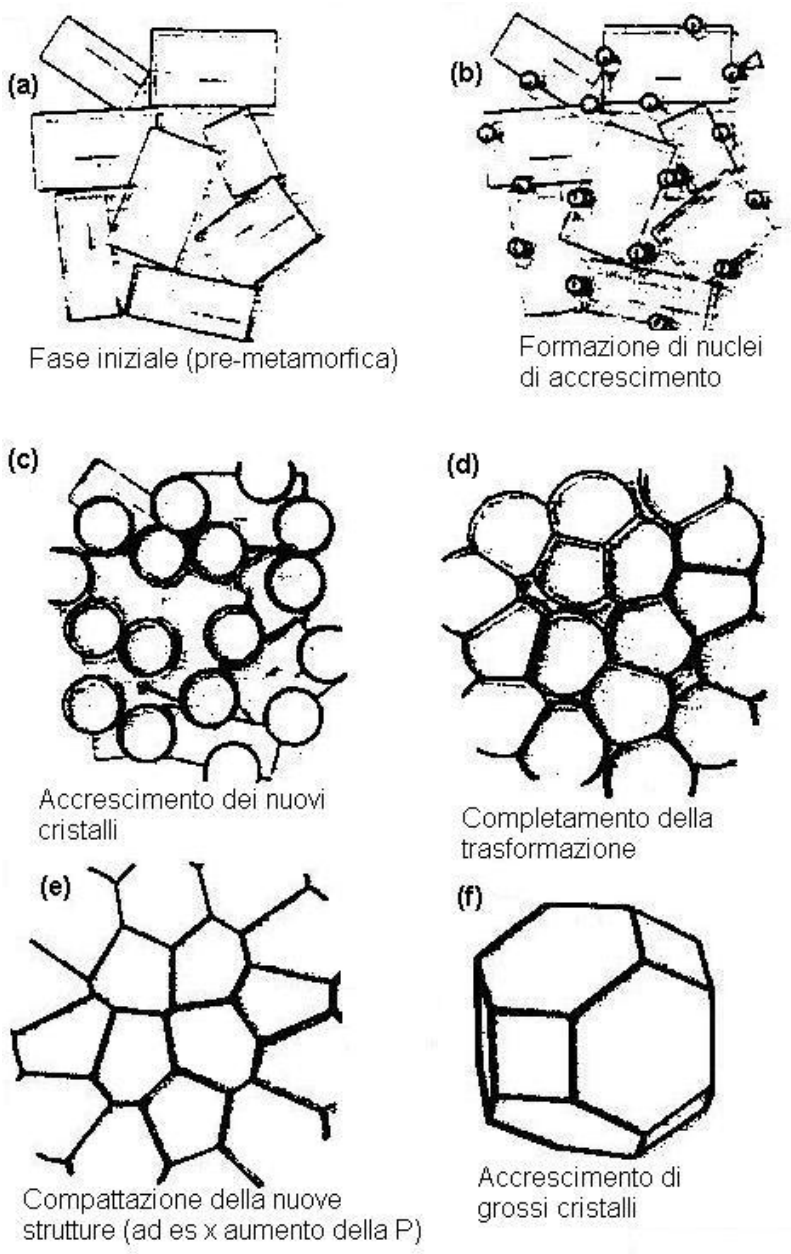

Figura 5.1. Nucleazione ed accrescimento di cristalli per effetto del metamorfismo

I cristalli che si formano in seguito al processo metamorfico vanno incontro ad un iter di accrescimento che ha inizio con la *nucleazione*. Questo processo (Figura 5.1) consiste nella comparsa di nuclei di cristalli, cioè di minutissimi corpi costituiti dall'assemblaggio di un numero piccolo di atomi disposti secondo una configurazione corrispondente, dai punti di vista chimico e strutturale, ad una specie mineralogica stabile nelle nuove condizioni ambientali. I nuclei si formano lungo i limiti granulari di altre specie mineralogiche, o lungo le discontinuità interne a cristalli pre-esistenti (ad esempio dislocazioni del reticolo cristallino, bande di deformazione, etc.). Per effetto di reazioni allo stato solido le molecole derivanti da disgregazione di fasi mineralogiche

si mescolano tra di loro negli spazi intergranulari, formando una popolazione mista che è sede di fluttuazioni sia di composizione che di localizzazione delle singole particelle componenti. Nell'ambito di questa popolazione, per effetto delle citate fluttuazioni si realizzano locali radunamenti di atomi. Si tratta di situazioni locali e transitorie, dette *pre-nuclei* o *embrioni* o *germi* di cristalli che hanno dimensioni piccolissime. La stabilizzazione dei nuclei avviene mediante aumento di dimensioni, cioè per estensione del particolare ordinamento spaziale ad un numero maggiore di particelle circostanti. Si ha così la formazione di cristalli in senso stretto la cui dimensione sarà tanto maggiore quanto più ampio ed esteso è l'effetto metamorfico. Pertanto è possibile determinare il grado metamorfico di ciascuna roccia in funzione delle dimensioni dei cristalli (ad esempio si parla di marmi a grana fine, media o grossa a seconda che abbiano rispettivamente subito basso, medio o alto grado di metamorfismo).

5.3 Tipi di metamorfismo

Le rocce metamorfiche possono derivare oltre che da altre rocce metamorfiche, anche da rocce sedimentarie (para-metamorfiti) e da rocce ignee (orto-metamorfiti). Tra quelli precedentemente citati, discuteremo brevemente i seguenti tipi di processo metamorfico.

5.3.1 Metamorfismo di carico o seppellimento

Si produce quando masse rocciose sprofondano entro la crosta terrestre subendo un aumento di pressione per il peso dei sedimenti sovrastanti e di temperatura che cresce con la profondità, secondo il gradiente geotermico. Se le rocce che sprofondano sono sedimentarie, si passa gradualmente dalla diagenesi al metamorfismo di basso grado e non sempre è possibile fare una distinzione netta tra i due fenomeni.

5.3.2 Metamorfismo regionale

È legato ai grandi movimenti crostali ed è tipico delle zone dove due porzioni (*placche*) di crosta terrestre si scontrano e si corrugano a formare montagne. All'interno ed in profondità nelle catene montuose vi sono grandi estensioni di rocce metamorfiche che possono essere portate poi a giorno dagli stessi movimenti tettonici e dalla erosione. È indubbiamente il processo metamorfico più diffuso ed in grado di produrre le più significative ed estese formazioni di rocce metamorfiche.

5.3.3 Metamorfismo termico o di contatto

Si produce quando le rocce si trovano in contatto con intrusioni magmatiche. Le rocce circostanti (rocce incassanti) subiscono un aumento di temperatura a causa del calore emanato dal magma che si raffredda. In tal modo le intrusioni ignee sono sempre circondate da aureole di rocce metamorfiche il cui grado metamorfico diminuisce man mano che ci allontaniamo dal corpo magmatico. L'intensità di tale processo è direttamente proporzionale alla temperatura dell'intrusione magmatica, alla presenza di fluidi circolanti ed al grado di fratturazione e conducibilità termica delle rocce incassanti.

5.3.4 Metamorfismo dinamico o cataclastico

Si produce in corrispondenza di grandi fratture della crosta terrestre (*faglie*), dove due frammenti crostali si spostano parallelamente con verso opposto. Lungo la superficie di contatto (*superficie di faglia*) tra le due masse rocciose in scorrimento reciproco, l'attrito libera enormi quantità di calore. Le rocce vengono frantumate e profondamente alterate. Si formano rocce metamorfiche tipiche chiamate *miloniti*.

5.4 Classificazione delle rocce metamorfiche

Il limite superiore del metamorfismo corrisponde alla temperatura al di sopra della quale si entra nel campo del liquido, uscendo per definizione da quello del metamorfismo. La temperatura di inizio fusione (o di anatessi) varia molto a seconda della composizione delle rocce, della presenza o assenza di acqua e del grado di saturazione in acqua della roccia. Prima di entrare nel vivo della classificazione delle rocce riassumiamo alcuni concetti fondamentali:

- La gradualità ed intensità delle trasformazioni mineralogiche che si verificano nell'intervallo termico del metamorfismo implicano il concetto di grado metamorfico; il grado è basso per temperature relativamente basse ed aumenta all'aumentare della temperatura.
- La quantità di componenti volatili trattenuti nei reticoli cristallini diminuisce man mano che aumenta il grado metamorfico.
- All'aumentare della temperatura e, più in generale del grado metamorfico, le dimensioni dei cristalli aumentano.
- Il grado di ristrutturazione e la quantità di volatili rimasti nei reticoli cristallini non forniscono una misura diretta e disambigua del grado metamorfico; questa informazione può essere invece fornita dalla comparsa di associazioni mineralogiche nuove.

La classificazione delle rocce metamorfiche è piuttosto complessa e non ha trovato ancora l'accordo di tutti gli specialisti. In generale essa tiene conto sia del tipo di rocce di partenza sia delle condizioni termobariche raggiunte. La classificazione è complicata anche dal fatto che rocce differenti (o meglio protoliti differenti) possono trasformarsi nella stessa roccia metamorfica.

Una classificazione ancora molto utilizzata è quella proposta dal petrologo finlandese Penti Eskola (1915) che raggruppa insieme in una stessa *facies metamorfica* (*facies* è un termine latino che significa aspetto) rocce diverse per composizione chimica e mineralogica, ma formatesi all'interno di un medesimo intervallo di pressione e temperatura e definite da particolari e caratteristiche associazioni di minerali (*paragenesi*). In altri termini, partendo da un complesso di rocce composizionalmente varie ma sottoposte alle stesse variazioni di pressione e temperatura, si formano molteplici associazioni mineralogiche, tutte appartenenti allo stesso tipo di facies metamorfica. Ciascuna facies prende il nome da una roccia particolarmente rappresentativa, ma comprende rocce molto diverse per composizione chimica e mineralogica (a seconda del protolito di partenza). All'interno di ciascuna facies si esegue poi una classificazione in base alle caratteristiche mineralogiche della roccia.

Descriviamo di seguito alcune sequenze di trasformazioni metamorfiche, facendo riferimento a rocce di partenza particolarmente diffuse.

5.4.1 Argilliti ⇒ Argilloscisti ⇒ Filladi ⇒ Micascisti ⇒ Gneiss

Le argilliti (formatesi in genere da miscele sedimentarie di argilla e sabbia in diverse proporzioni) al crescere del grado metamorfico si trasformano in *argilloscisti*, rocce compatte dalla tipica tessitura scistosa legata alla formazione di piani di minerali micacei che ne causano la sfaldabilità lungo piani paralleli. Un gruppo particolare di argilloscisti sono le *ardesie*, impiegate ad esempio un tempo in montagna come tegole per coperture di edifici.

Al crescere del grado metamorfico le argilloscisti si trasformano in *filladi*, con struttura microcristallina (i cristalli non sono ancora visibili ad occhio nudo). Molte filladi hanno un aspetto sericeo poichè la superficie di sfaldatura è ricoperta di miche i cui cristalli non sono tuttavia identificabili a occhio nudo. Se le argille di partenza contenevano una qualche percentuale di materia organica, questa, dopo aver subito un processo di carbonizzazione, cristallizza in *grafite* dando alle filladi un intenso colore nero. Argilloscisti e filladi sono caratterizzate da un metamorfismo di basso grado (facies degli scisti verdi).

I *micascisti* sono rocce metamorfiche scistose di medio grado in cui le miche ed il quarzo cominciano a formare cristalli visibili ad occhio nudo (facies anfibolitica).

I micascisti si possono infine trasformare in rocce metamorfiche di alto grado con struttura cristallina perfettamente evidente, paragonabile a quella di un granito, e simili a questo come composizione mineralogica, dette *gneiss* (paragneiss). Negli gneiss troviamo gli stessi minerali tipici del granito (quarzo, feldspato e miche) stirati però a formare striature parallele chiare e scure (facies anfibolitica).

5.4.2 Granito ⇒ Gneiss

Il granito, e le rocce ignee acide in generale, possono trasformarsi per metamorfismo di alto grado in gneiss. Questi gneiss sono spesso indistinguibili da quelli che si formano a partire da rocce pelitiche.

5.4.3 Calcari ⇒ Marmi

Il termine “marmo” è utilizzato commercialmente per indicare la maggior parte delle rocce lucidabili. Tuttavia, in senso stretto, il *marmo* è una roccia derivata da calcari metamorfosati; quando è microcristallino, si dice anche saccaroide (simile allo zucchero).

Se il calcare iniziale contiene dei minerali argillosi (*marne*), questi si trasformano in miche producendo rocce con una tipica struttura scistosa, dette *calcescisti* (metamorfismo regionale) o dando luogo a rocce compatte dette *calcefiri* per metamorfismo di contatto. Particolarmente pregiati sono i marmi bianchi, ossia privi di impurità; si ricordi ad esempio il marmo di Carrara.

5.4.4 Arenarie ⇒ Quarziti

Le quarziti sono rocce microcristalline, non scistose, costituite quasi interamente da minuscoli cristalli di quarzo.

5.4.5 Basalti ⇒ scisti verdi (serpentiniti) e scisti blu ⇒ anfiboliti

Le rocce magmatiche basiche si trasformano per metamorfismo di basso grado in *scisti verdi*, cosiddetti per la presenza di serpentino, un fillosilicato che dà alla roccia la tipica colorazione verde e la caratteristica tessitura scistosa, e a seguire in *scisti blu*, cosiddetti per la presenza di glaucofane, un anfibolo di colore blu. Per metamorfismo di grado medio-alto si passa poi alle *anfiboliti*, caratterizzate dalla presenza di un anfibolo di colore verde scuro, l'*orneblenda*.

5.4.6 Peridotite ⇒ talcoscisti e serpentiniti

Le rocce ultrafemiche si trasformano per metamorfismo di basso grado in *talcoscisti* e *serpentiniti*, caratterizzati rispettivamente dalla presenza del talco e del serpentino, due fillosilicati tipicamente metamorfici.