

1. I principali minerali che formano le rocce della crosta terrestre

I minerali presenti in natura sono diverse migliaia. Considerando gli elementi della tavola periodica, tutti i possibili reticoli e le possibili sostituzioni fra atomi nello stesso punto del reticolo (vicarianze), possiamo affermare che sarà sempre possibile scoprire minerali nuovi sulla Terra e su altri pianeti. Questa geodiversità mineralogica ha una grande importanza economica, scientifica e naturale.

Ogni minerale infatti possiede precise proprietà che lo caratterizzano, magari legate a piccole impurezze o difetti nel reticolo, e le possibili applicazioni industriali sono sempre in aumento. Negli USA, caratterizzati dai maggiori consumi procapite di risorse del pianeta, si arriva alle nove tonnellate di minerali utilizzate per persona in media all'anno. Alcuni minerali non sono più sfruttati perché pressoché esauriti come quelli di stagno (ormai ricavato in buona parte dal riciclaggio), o dannosi come l'amianto considerato cancerogeno, o non più utili all'industria e sono soppiantati da altri nuovi e ricercatissimi come il *coltan*.

La distribuzione dei minerali non è omogenea sulla Terra, ma rispecchia la distribuzione degli ambienti litogenetici attuali e di quelli del passato. I tempi di formazione di minerali e rocce in questi ambienti sono molto lunghi, pertanto, alla scala dei tempi umani, gli elementi estratti dai minerali sono risorse limitate che è necessario riciclare, data anche la grande quantità di energia necessaria per estrarli e il grande impatto ambientale a cui dà luogo la loro estrazione. L'industria mineraria è una delle più inquinanti al mondo, sia durante l'attività estrattiva, sia quando essa è finita per ripristinare in parte il paesaggio e le condizioni ambientali precedenti. I costi per limitare tali impatti sono molto elevati e spesso le società minerarie non li fronteggiano scaricandoli sulle comunità locali. Importante quindi che la legge regoli tali attività richiedendo anche garanzie economiche sull'opera di disinquinamento finale.

L'importanza scientifica dei minerali è dovuta invece ai dati che si possono ricavare da essi per ricostruire la storia delle rocce (e quindi del pianeta) e per svolgere tutte le possibili attività, speculative ed applicative, legate alle Scienze della Terra.

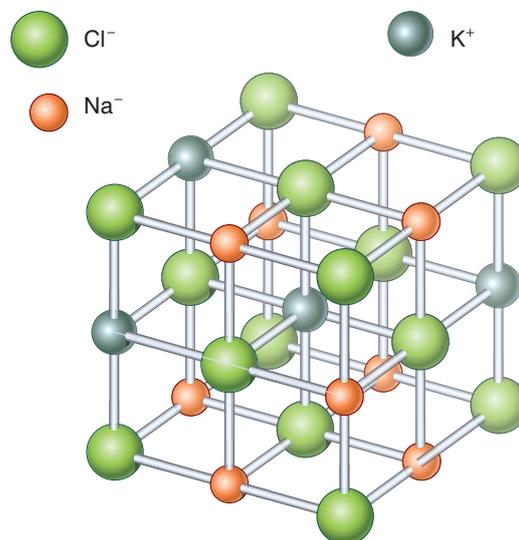
Infine molti minerali costituiscono i serbatoi di elementi necessari per la vita e fanno parte dei diversi cicli biogeochimici che connettono i vari sistemi dinamici del pianeta.

I minerali che possiamo trovare facilmente in natura sono molto pochi. Essi sono in ordine d'abbondanza nella crosta terrestre: feldspati (58%), quarzo (12%), miche e altri fillosilicati, anfiboli e pirosseni, olivine (che tutti insieme fanno il 22%) e, per il rimanente 8%, ossidi e idrossidi di ferro e alluminio, carbonati di calcio e magnesio e solfati di calcio.

2. La vicarianza e gli ambienti di formazione di un minerale

Durante la crescita di un minerale, se lo spazio è disponibile per lo sviluppo di un reticolo cristallino, ma mancano certe particelle, altre possono prendere il loro posto. Ad esempio gli ioni del calcio possono sostituire quelli del magnesio in alcuni minerali. Immaginate il reticolo cristallino come un insieme di punti dove possiamo sostituire in ogni punto una particella di un tipo con quella di un altro. I minerali che hanno lo stesso reticolo cristallino, ma composizione diversa sono detti **isomorfi**.

Si definisce *vicarianza* la possibilità di sostituire nello stesso punto del reticolo cristallino una particella di un elemento con un'altra a certe condizioni: le due particelle devono avere prima di tutto raggio ionico simile, poi la stessa carica, essere della stessa famiglia chimica, (come ad esempio gli ioni dei metalli alcalini Na^+ e K^+), o avere una affinità geochemica fra loro come il magnesio e il ferro (► **figura 3.1**).



Coltan

Il coltan è una miscela di due minerali, la columbite e la tantalite. Esse sono ossidi rispettivamente di niobio e tantalio di cui sono i serbatoi fondamentali in natura. I due metalli, vicarianti l'uno dell'altro, sono indispensabili nell'industria elettronica. Il tantalio può trattenere un'alta carica elettrica, vitale nella costruzione dei condensatori che controllano il flusso di corrente nei microcircuiti. I condensatori al tantalio sono usati in tutti i telefoni cellulari, computer portatili e segreterie telefoniche.

◀ Figura 3.1

Lo ione K^+ può sostituire quello Na^+ nel reticolo del salgemma. La sostituzione è data dal fatto che i due ioni fanno parte della stessa famiglia chimica, hanno carica uguale e raggio ionico non troppo diverso.

Che cosa succede se le cariche sono diverse? Occorrono due sostituzioni contemporanee. Per esempio, sostituendo nel reticolo due ioni Si^{4+} con due ioni Al^{3+} , mancheranno due cariche positive, aggiungendo allora uno ione Ca^{2+} in più si ripristina la carica totale. Ma se la particella è più grande dello spazio disponibile? In questo caso il reticolo si deforma localmente generando un *difetto reticolare*.

Nelle formule dei minerali la vicarianza è rappresentata mettendo tutti insieme fra parentesi e separati da virgole i vari ioni metallici che si possono sostituire l'uno con l'altro nelle stesse posizioni del reticolo. Per esempio la formula delle olivine è $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ (► figura 3.2). Questa scrittura indica che in natura sono stati rinvenuti tanti tipi di olivine, con percentuali di ferro e magnesio diverse in funzione dell'ambiente di formazione della roccia. Questo fatto può essere descritto dicendo che le olivine formano tra loro delle **soluzioni solide**. Questo concetto è valido per tutti quei minerali che posseggono lo stesso reticolo cristallino e hanno elementi vicarianti. Tutti i minerali che danno luogo a miscele isomorfe a causa della vicarianza formano delle famiglie denominate con termini al plurale, come le miche o i feldspati.



In natura è molto raro trovare un minerale puro e privo di difetti reticolari: la maggior parte dei minerali è difettosa e ha composizioni chimiche intermedie. Svolgendo un'analisi chimica più approfondita all'interno di un singolo cristallo si possono trovare tracce infinitesime di tantissimi elementi diversi.

Possiamo quindi immaginare il reticolo come una spugna in accrescimento che, deformandosi, si imbeve dei diversi tipi di particelle presenti nell'ambiente di formazione delle rocce circostanti, il cosiddetto ambiente litogenetico. Pertanto un minerale, insieme ai suoi compagni dell'associazione mineralogica, riflette molto bene la composizione chimica dell'ambiente che lo ha creato e anche la sua storia.

3. Il reticolo cristallino e gli ambienti di formazione di un minerale

In laboratorio, provando a diverse temperature e pressioni, si è potuto associare un certo tipo di reticolo di un minerale a uno specifico intervallo di temperatura e pressione; variando tali parametri, il reticolo non è più stabile e si trasforma in un altro, stabile nelle nuove condizioni. In conclusione, quando osserviamo una roccia, cioè un insieme di minerali, dobbiamo immaginarla come il frutto di un certo ambiente naturale, l'*ambiente litogenetico*, caratterizzato da determinati valori di pressione e temperatura, dalla quantità di spazio disponibile e da una certa composizione chimica.

Incrociando i dati di laboratorio e quelli ottenuti sul terreno, possiamo associare a ogni roccia i valori di temperatura, pressione e composizione chimica in cui si è formata e ipotizzare, con buona approssimazione, le condizioni del corrispondente ambiente litogenetico. È possibile in tal modo poter ricostruire non solo le caratteristiche di ambienti relativamente facili da osservare, come quelli di una scogliera corallina, ma anche di quelli inaccessibili come una camera magmatica o un ambiente metamorfico di una catena montuosa. Addirittura è possibile ipotizzare anche le caratteristiche di ambienti litogenetici che non esistono

più e che testimoniano l'evoluzione della Terra come nel caso dei giacimenti di *ferro a bande* (BIF, *Banded Iron Formation*) (► figura 3.3).

Non dobbiamo infatti dimenticare infine la dimensione temporale: la formazione dei cristalli è un processo molto lungo, durante il quale le condizioni ambientali potevano cambiare e con esse anche la mineralogia. Alcuni minerali sono come dei fossili imprigionati nell'ambra che testimoniano ambienti litogenetici diversi rispetto ai compagni che li circondano.



◀ **Figura 3.3**

Dettaglio di rocce con ferro a bande. Hamersley Gorge nel Karijini National Park, Pillbara, Australia. [BlueGum Pictures/Alamy]

4. Un ambiente litogenetico che non esiste più: il caso dei giacimenti di ferro a bande

La maggior parte dei giacimenti di ferro esistenti sulla Terra appartiene alla formazione del *ferro a bande* (BIF, *Banded Iron Formation*) databile tra i tre e i due miliardi di anni fa in diverse parti della superficie terrestre. Questi giacimenti di origine sedimentaria si sono formati in ambiente di mare poco profondo dove il ferro, trasportato dai fiumi come ione ferroso (Fe^{2+}) prelevato dalle rocce continentali, precipitava sul fondo sotto forma di ossido insolubile. Le bande, da cui il nome della formazione, sono dovute all'alternanza di straterelli grigi di ossido di ferro con livelli di selce e carbonato di calcio rossastri.

La presenza di questi giacimenti rende possibile ipotizzare le caratteristiche di ambienti litogenetici che non esistono più e che testimoniano l'evoluzione della Terra. Perché? Il ferro che si scioglie in acqua è solo quello in forma ferrosa (Fe^{2+}), ma questo ferro sulla superficie terrestre poteva essere stabile solo in presenza di un'atmosfera riducente cioè priva di ossigeno. Infatti nell'attuale atmosfera ossidante, perché ricca di ossigeno, il ferro si trasforma in ferro ferrico (Fe^{3+}) che non è solubile in acqua (ecco perché nelle etichette dell'acqua minerale non lo trovate) e quindi non può dar luogo a giacimenti di ferro per precipitazione in acque marine.

Tutta questa storia è tipicamente gaiana perché l'ossigeno necessario per ossidare il ferro ferroso (Fe^{2+}) e farlo precipitare era fornito dai cianobatteri, organismi procarioti fotosintetici, tra i primi viventi sulla Terra, organizzati nelle acque marine in strutture dette stromatoliti. Il ferro ferroso era ossidato dall'ossigeno di origine organica durante la primavera e l'estate mentre in autunno e inverno, quando i cianobatteri avevano un'attività ridotta, sul fondo del mare si depositava solo il fango testimoniato dalla selce e dal carbonato di calcio. Quindi ogni coppia di strati di ferro a bande testimonia un ciclo annuale.

La produzione di ossigeno da parte dei cianobatteri per molto tempo è stata consumata dalla precipitazione del ferro ferroso, ma a partire da 2 miliardi di anni fa i giacimenti di ferro a bande diminuirono per scomparire 1,5 miliardi di anni fa. Ormai l'ossigeno prodotto dai viventi era via via così aumentato da essere in eccesso rispetto al ferro ferroso, si era diffuso nelle acque marine e poi nell'atmosfera ossidando direttamente in superficie il ferro delle rocce continentali. Il ferro ferrico (Fe^{3+}) ossidato, tipicamente di color ruggine, non si poteva sciogliere nelle acque dei fiumi ed essere portato al mare, nel contempo le rocce e le terre dei continenti, ancora prive di vita, diventavano rossastre.

5. La descrizione di una roccia e di un minerale

Mentre si descrive una roccia si può cadere in un classico equivoco: per alcuni di noi da un lato ci sono minerali e cristalli, oggetti tridimensionali isolati, dall'altro vi sono i minerali che formano le rocce visti come *macchie sulla superficie della roccia*, poiché è difficile immaginare che la roccia è costituita da un insieme di cristalli tridimensionali. Occorre rompere la roccia e manipolare il campione per superare questo ostacolo cognitivo.

Che cosa vediamo se prendiamo una pietra in mano? Che è solida, più o meno pesante, più o meno spigolosa o arrotondata, lucente oppure opaca. Se l'abbiamo raccolta è perché qualcosa ci colpiva: la forma, il colore, la lucentezza, la bollosità.

In molte rocce non andiamo oltre queste osservazioni, ma in alcune di esse percepiamo che vi sono componenti più piccole; per apprezzarle è importante girare la roccia fra le mani, farla colpire in modi diversi dal sole, bagnarla con l'acqua, avvicinarla agli occhi.

Una roccia appare spesso come l'insieme di granuli di forma, colore e lucentezza diversi. Se la rompiamo vediamo che questi granuli si trovano anche all'interno, ma i colori sono più vivi e la pietra appare più fresca. A questo punto possiamo osservare che anche la sabbia appare formata da questi granuli, in genere non più di tre o quattro tipi diversi; per esempio granuli bianchi o rosa opachi, granuli d'aspetto vitreo, scaglette lucenti e appiccicose nere o grigio metallico. I granuli che osserviamo sono i *minerali*. Osservando una roccia a occhio nudo, molto spesso vediamo che è costituita dall'insieme di più granuli di minerali, dello stesso tipo o di tipo diverso: la cosiddetta *associazione mineralogica*. Chiamiamo *cristallo* ciascuno di questi granuli che appartengono a minerali diversi.

La parola *cristallo* ha in italiano un duplice significato. Dal punto di vista merceologico un *cristallo* è un vetro arricchito nella sua composizione con un metallo, per esempio il piombo. Il vetro in questo modo diventa particolarmente lucente e pesante. La distinzione tra un vetro e un *cristallo* mostra un ulteriore significato a livello microscopico: nel cristallo le particelle sono disposte in modo ordinato mentre nel vetro in modo casuale come in un liquido. Dal punto di vista geomineralogico un *cristallo* è invece un frammento di un minerale con tipiche caratteristiche chimico fisiche (quindi un cristallo di un minerale può anche essere per esempio leggero e opaco).

6. Un confronto fra silicio e carbonio: strutture microscopiche dei silicati e disposizione degli atomi di carbonio nelle molecole, rapporti con le proprietà macroscopiche

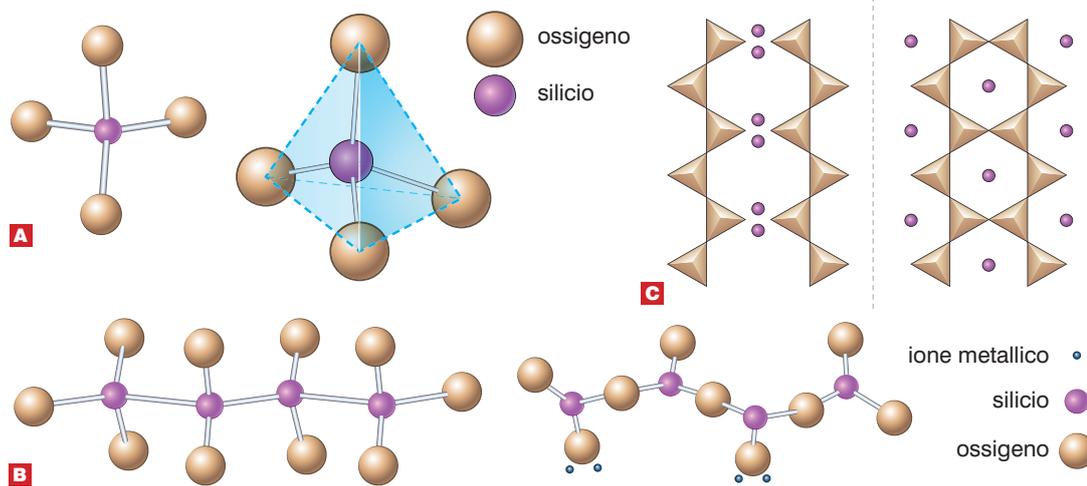
Quarzo, feldspati, miche, anfiboli, pirosseni e olivine fanno parte del grande gruppo dei silicati che costituiscono il 92% dei minerali della crosta, sono classificati in poche famiglie sulla base dei loro reticoli cristallini e possono essere suddivisi in due grandi gruppi su base geochimica: felsici (o sialici) con alluminio, sodio, potassio e mafici (o femici) con magnesio, calcio e ferro. I silicati sono minerali costituiti da ossigeno, silicio e ioni metallici, tra cui soprattutto alluminio, ferro, calcio, sodio, potassio e magnesio.

I composti del carbonio, con una serie di strutture molecolari molto variabili e complesse, sono invece le macromolecole che costituiscono i viventi.

Vi sono molte affinità fra le strutture legate al silicio e quelle formate dal carbonio. Entrambi gli elementi fanno parte dello stesso gruppo nella tavola periodica e sono uno sotto l'altro. A entrambi mancano quattro elettroni per completare la popolazione elettronica dell'ultimo livello. Per questo motivo tendono a fare quattro legami covalenti secondo due principali disposizioni nello spazio comuni ai due elementi.

Esse sono quella **tetraedrica**, dove l'atomo al centro si lega ad altri quattro posti ai vertici di un tetraedro, e quella **planare**, dove l'atomo centrale si lega ad altri tre su un piano e ad un quarto sull'asse perpendicolare al piano stesso (per chi avesse già affrontato l'argomento degli orbitali ibridi in chimica si tratta di *sp³* e *sp²*).

Per questo motivo il tetraedro SiO₄ e quello CH₄ sono i mattoni fondamentali per la costruzione rispettivamente dei silicati e delle molecole organiche.



◀ **Figura 3.4**

A I due tetraedri SiO_4 , a destra, e CH_4 , a sinistra.

B Catena idrocarburica ottenuta dall'unione di quattro tetraedri CH_4 eliminando gli idrogeni intermedi con il legame diretto C—C confrontata con la catena dei pirosseni dove i tetraedri SiO_4 hanno in comune un atomo di ossigeno.

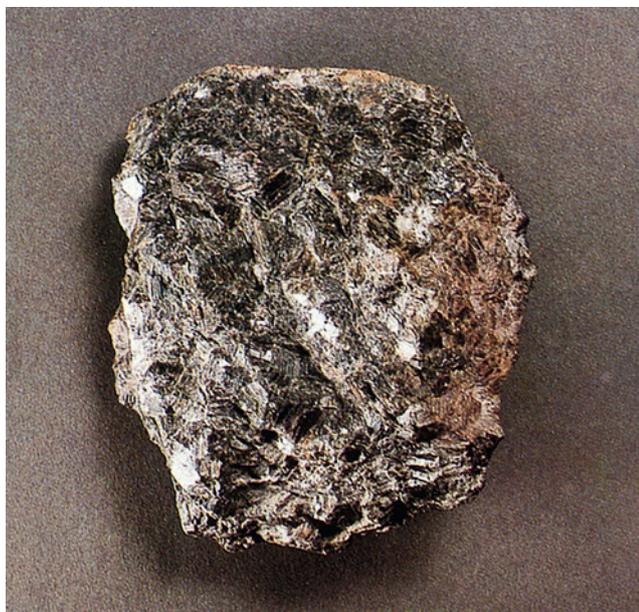
C Nei disegni delle strutture silicatiche si preferisce evidenziare la disposizione dei tetraedri tralasciando i singoli atomi come nel disegno della struttura dei pirosseni, caratterizzati da catene parallele di tetraedri tenute insieme da ioni positivi metallici.

Il silicio è dello stesso gruppo del carbonio e, come per quest'ultimo, i suoi tetraedri si possono unire fra loro formando catene, anelli e foglietti a nido d'ape. Nel caso del carbonio i singoli atomi si possono unire direttamente fra loro, mentre nei silicati i vari atomi di silicio sono uniti sempre da un atomo di ossigeno comune a due tetraedri (► **figura 3.4**).

Nei silicati a questa unione diretta fra i vari tetraedri mediata dall'atomo di ossigeno si affianca un'altra possibilità: il tetraedro SiO_4^{4-} si configura come uno ione negativo e l'unione di due tetraedri è garantita da uno ione metallico positivo in corrispondenza degli ossigeni, come potete vedere nella ► **figura 3.4C**. Un'ulteriore possibilità di variazione è quella di sostituire il silicio con l'alluminio al centro del tetraedro come nel caso dei feldspati.

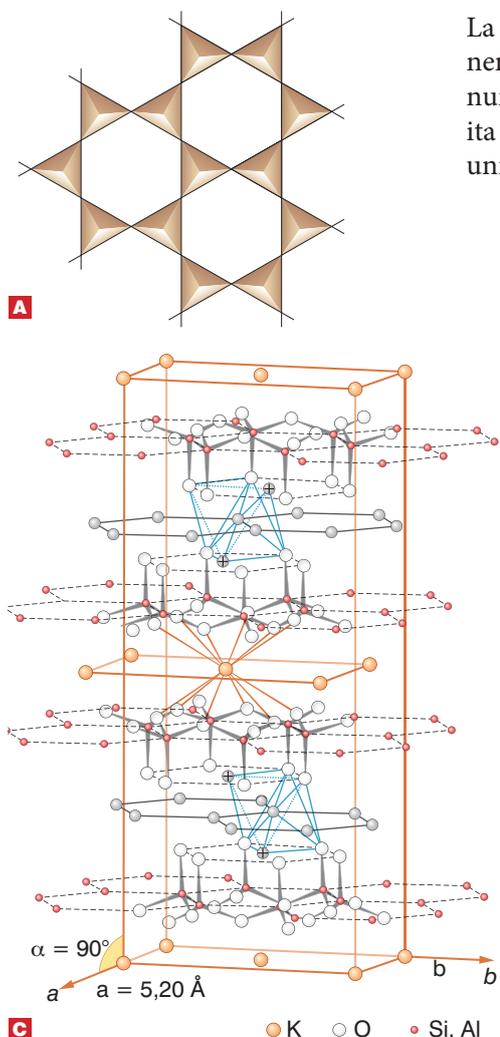
Con questa scatola di costruzioni si possono formare molti diversi minerali classificabili sulla base della disposizione dei tetraedri come avete visto nel testo a pagina 61 (figura 3.11). Le strutture possibili sono diverse, ma qui vorremmo farvene vedere solo alcune per mettere in evidenza il legame che esiste fra la struttura e le proprietà macroscopiche dei diversi minerali e confrontarle con le corrispondenti strutture del carbonio.

La prima struttura che analizziamo è quella basata su una catena di tetraedri che, nel caso del carbonio, dà luogo agli idrocarburi che però non danno solidi a temperatura ambiente se non con catene lunghissime e pesanti che costituiscono l'asfalto. Nei silicati invece i minerali costituiti da lunghe catene di tetraedri SiO_4 sono anfiboli e pirosseni, gli **inosilicati** (► **figura 3.5**). La radice classica del nome è illuminante: sono silicati a catena ($\iota\nu\eta$, pronuncia *ine*, vuol dire fibra, nervo, in greco). Queste strutture evidenziano il legame tra proprietà microscopiche del reticolo e macroscopiche del cristallo. I cristalli dei pirosseni e degli anfiboli sono tipicamente prismatici più o meno allungati, diventando a volte aciculari (a forma di ago come quelli usati come amianto), e le superfici di sfaldatura sono parallele ai filari di tetraedri e ortogonali a essi.

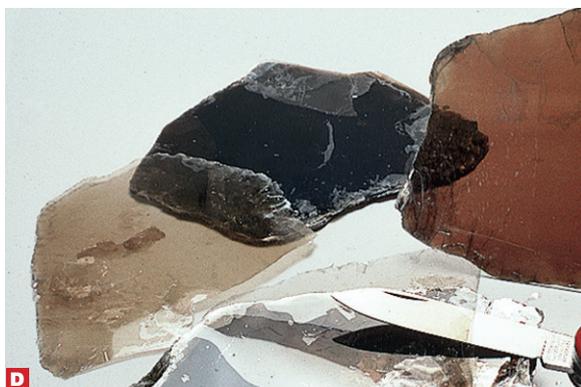
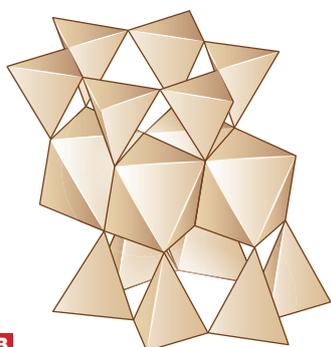


◀ **Figura 3.5**

Cristalli di pirosseni e anfiboli.



La struttura invece delle miche (► figura 3.6) e dei minerali affini è chiamata **fillosilicatica** (da φύλλα, pronuncia *filla*, vuol dire foglia in greco) perché costituita da fogli di tetraedri disposti a nido d'ape a foglio uniti da cationi metallici tra un foglietto e l'altro.

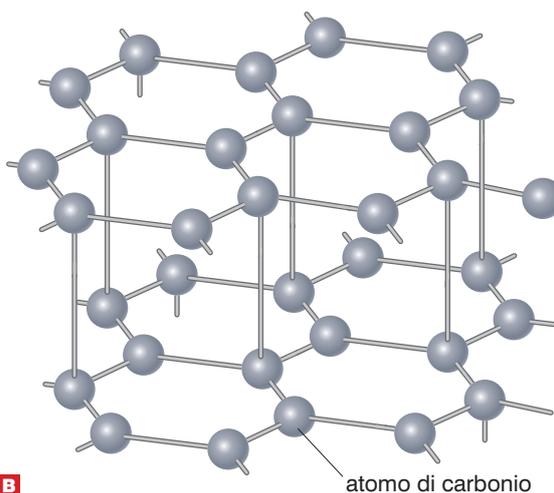


◀ **Figura 3.6**

Il foglietto dei fillosilicati visto dall'alto (A) e di profilo (B). Gli ottaedri coricati (situati tra un foglio e l'altro di tetraedri SiO_4) sono costituiti da ioni Mg^{2+} o Al^{3+} che formano un composto di coordinazione di forma ottaedrica con gli atomi di ossigeno dei tetraedri SiO_4 e ioni OH^- presenti al centro degli anelli. I pacchetti di foglietti sono uniti da cationi metallici interstrato (come K^+) come da figura (C). L'aspetto macroscopico del cristallo di biotite è coerente con la struttura microscopica. D

Caratteristica sfaldatura dei cristalli di biotite. I cristalli, con un abito cristallino prismatico piatto a base esagonale, si sfaldano facilmente con un coltello parallelamente alla faccia esagonale, dalla caratteristica lucentezza metallica. Sui lati del prisma, poco sviluppati e d'aspetto opaco, è possibile inserire un coltello per separare le facce esagonali, suscettibili di essere ancora ulteriormente separate. Se si punta il coltello contro la faccia esagonale questa si rompe in modo irregolare. La struttura cristallina della biotite è simile a quella di un wafer, le «cialde» sono costituite da un reticolo di particelle disposte a nido d'ape con legami covalenti uguali in tutte le direzioni. La «crema» che unisce le cialde è costituita da ioni metallici. Tale disposizione giustifica molto bene le proprietà macroscopiche evidenziate dalla fotografia.

La struttura fillosilicatica condiziona le proprietà a livello macroscopico delle miche. I cristalli sono molto piatti, estesi, si sfaldano facilmente tra un piano e l'altro, in corrispondenza dello strato di ioni metallici, creando lamine finissime, e la sensazione al tatto è tipicamente untuosa. Il talco, un fillosilicato, ne è un classico esempio. Sono lucenti in corrispondenza dei piani fillosilicatici e opache di profilo. La sfaldatura corrisponde, a livello microscopico, alla rottura del legame ionico fra i metalli e il piano dei tetraedri di silicio. Anche il carbonio presenta una struttura analoga a quella dei fillosilicati: la grafite, infatti, presenta caratteristiche macroscopiche analoghe di tenerezza sfaldandosi facilmente nelle varie lamelle, untuosità al tatto e lucentezza grassa. A livello atomico c'è però una differenza rispetto ai silicati perché si tratta di un esempio di struttura dove l'atomo centrale di carbonio si lega ad altri tre su un piano e a un quarto sull'asse perpendicolare al piano stesso (ibridazione sp^2) che consente il legame con il foglietto parallelo.



◀ **Figura 3.7**

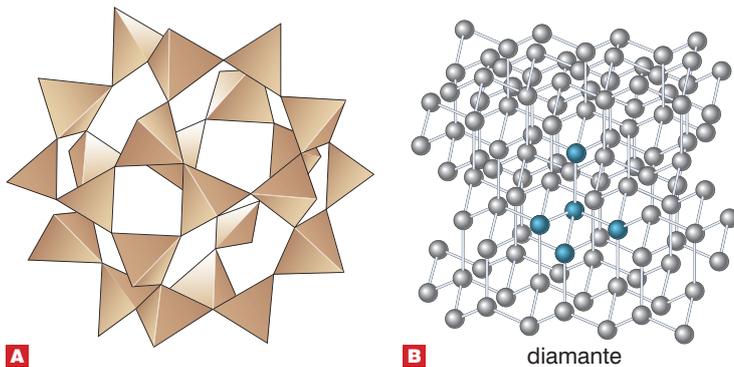
La grafite nera, tenera, leggera e untosa al tatto e il suo reticolo cristallino affine a quello dei fillosilicati.

A Grafite.

B Reticolo della grafite.

Fillosilicati e grafite possono formare insieme delle rocce, per esempio le ardesie o le famigliari lavagne dove tutti i giorni insegnanti e allievi scrivono e disegnano con il gesso, caratterizzate dal colore nero e dalla possibilità di rompersi lungo dei piani detti di scistosità che non sono altro che l'insieme dei piani di sfaldatura degli innumerevoli cristalli che le costituiscono.

La struttura **tettosilicatica** caratterizza il quarzo dove i tetraedri SiO_4 sono uniti direttamente fra loro, mentre nei feldspati alcuni sono uniti da ioni metallici. La disposizione è complessa da rendere in un disegno ed è analoga a quella del diamante (carbonio purissimo), dove i singoli atomi di carbonio sono uniti gli uni agli altri con legami covalenti secondo una geometria tetraedrica evidenziata in blu nella ► **figura 3.8**. Il quarzo e il diamante sono minerali molto duri.

◀ **Figura 3.8**

Struttura tettosilicatica (A) e reticolo del diamante (B).

7. Minerali e salute umana: un caso studio

Amianto, o asbesto, è un termine che copre un insieme di minerali diversi accomunati dal fatto di essere molto fibrosi, caratteristica che nell'industria, insieme al fatto di non essere infiammabili, di essere dei buoni isolanti termici e acustici, resistenti agli acidi e di avere un basso costo di estrazione, ha permesso e permette la produzione di manufatti molto vari (più di tremila) dai pannelli isolanti, alle tute ignifughe, alle pastiglie dei freni delle automobili. È quindi stato usato moltissimo come isolante termico e acustico ignifugo nell'edilizia, mescolato col cemento, il cosiddetto cemento-amianto o *eternit* dal nome della principale ditta europea di produzione, nella cantieristica navale e ferroviaria e in svariati cicli industriali. Il suo uso industriale iniziato già a fine Ottocento, quando fu anche molto reclamizzato come un rimedio contro gli incendi, ha avuto il suo massimo utilizzo a partire dagli anni '50 del secolo scorso, in coincidenza con il boom economico, fino a tutti gli anni '70 quando poi la legislazione in diversi Paesi, tra cui l'Italia, ne ha proibito del tutto l'uso. Tuttora l'amianto è normalmente prodotto e usato in Russia, Cina, Usa, Brasile e Canada, mentre è vietato in tutti i Paesi europei, in molti Paesi arabi, africani e in Giappone.

I minerali che possono essere usati come amianto sono un fillosilicato, il serpentino, nella varietà crisotilo, e alcuni anfiboli sodici come la crocidolite (*amianto blu*), di magnesio, ferro e calcio come la grunerite e la cummingtonite (detti anche *amosite* o *amianto bruno*), l'antofillite, l'actinolite e la tremolite, queste ultime due prive di importanza industriale.

Il reticolo cristallino degli inosilicati, costituito da lunghe catene lineari di tetraedri SiO_4 , a cui gli anfiboli appartengono, spiega la fine fibrosità di questi minerali che presenta spessori dell'ordine di trenta nanometri (10^{-9} m), corrispondenti grossolanamente a sei volte la struttura a catena doppia degli anfiboli. Un capello umano è milletrecento volte più spesso di una fibra di amianto.

Il caso del crisotilo è interessante perché si tratta di un fillosilicato che dovrebbe dare dei cristalli a foglietto, non allungati. In natura il foglietto del serpentino però si arrotola su se stesso molto strettamente, come un foglio da disegno, dando luogo a lunghi pseudocristalli fibrosi lunghi anche decine di centimetri.

◀ **Figura 3.9**

Il reticolo cristallino del serpentino presenta delle tensioni interne fra lo strato di tetraedri SiO_4 e quello composto dagli ioni Mg^{2+} o Al^{3+} , che formano un composto di coordinazione di forma ottaedrica con gli atomi di ossigeno dei tetraedri stessi e gli ioni OH^- presenti al centro degli anelli (vedi figura 3.6 A, B, C), poiché le dimensioni dei due strati non combaciano. In natura questo fa sì che il reticolo si rompa in piccoli frammenti dando luogo a cristalli piccolissimi (serpentino varietà lizardite), oppure inverta periodicamente i due strati con formazione di cristalli ondulati (serpentino varietà antigorite) o infine tende ad arcuare i piani in continuazione fino a farne un rotolo come nel caso del crisotilo.

Fino dall'inizio del Novecento i medici si erano accorti dell'effetto sulla salute umana dell'amianto: le finissime fibre, frammentandosi, sono facilmente ispirate fino ad arrivare agli alveoli polmonari perché superano tutti i filtri a livello bronchiale, il minerale lentamente si accumula con l'esposizione e come dice il suo nome (*amianto* in greco significa immacolato, incorruttibile e *asbesto* perpetuo, inestinguibile) non può essere metabolizzato dall'organismo.

Le patologie riferite all'esposizione alle fibre di amianto sono tre.

- 1) L'asbestosi, una fibrosi del tessuto polmonare che diventa via via più spesso e coriaceo limitando la capacità respiratoria, che è tipicamente professionale, cioè legata ai lavoratori esposti alle lavorazioni con l'amianto.
- 2) Il carcinoma polmonare che è il tumore maligno più frequente, anche a basse dosi di esposizioni alle fibre; se il soggetto esposto è un fumatore la probabilità di contrarre il cancro aumenta di novanta volte.
- 3) Il mesotelioma pleurico che è il cancro che interessa le pleure, le membrane che avvolgono i polmoni; l'effetto neoplastico si verifica anche per esposizioni limitate e non sembra avere un valore di soglia minimo, cioè un valore di concentrazione di fibre di amianto nell'aria al di sotto della quale non si hanno effetti sulla salute umana.

Queste malattie si manifestano dopo molti anni rispetto all'esposizione, da dieci a quindici per l'asbestosi, da venti fino a quaranta per il cancro.

Per questi motivi la legislazione dell'unione europea e quella italiana a partire dai primi anni '80 del secolo scorso hanno via via limitato l'uso dell'amianto fino a proibirlo del tutto con la legge del 27 marzo del 1992 in Italia e nel 2005 in tutta la Ue.

Ogni anno si ammalano decine di migliaia di persone negli Usa, in Giappone e nella Ue, gli stati del boom economico, dove vengono registrati i decessi per tali patologie, previsto in Italia dal 2007.

In Italia secondo lo studio *Sentieri* (Studio Epidemiologico Nazionale dei Territori e Insediamenti Esposti al Rischio Inquinamento) svolto nell'ambito del Programma Strategico Ambiente e Salute promosso dal Ministero della Salute e coordinato dall'Istituto Superiore di Sanità (ISS), in Italia vi sono 57 aree da bonificare per l'amianto situate principalmente in corrispondenza dei cantieri navali, nei siti industriali di produzione, tra cui ricordiamo l'Eternit di Casale in Piemonte, e le cave di prelievo del minerale, tra cui quella di Balangero in Piemonte, la più grande d'Europa, il cui costo di bonifica è carico del pubblico, essendo fallita l'ultima società proprietaria. I cittadini italiani esposti sono circa sei milioni.

In una collina tozza brulla, tutta scheggioni e sterpi, si affondava una ciclopica voragine conica, un cratere artificiale, del diametro di quattrocento metri: era in tutto simile alle rappresentazioni schematiche dell'Inferno, nelle tavole sinottiche della Divina Commedia. Lungo i gironi, giorno per giorno, si facevano esplodere le volate delle mine... Al fondo, al posto di Lucifero, stava una poderosa chiusura a saracinesca; sotto a questa era un breve pozzo verticale... C'era amianto dappertutto, come una neve cinerina: se si lasciava per qualche ora un libro su un tavolo, e poi lo si toglieva, se ne trovava in il profilo in negativo.

Primo Levi, *Nichel* in *Il sistema periodico*, Einaudi 1975.

Come racconta Primo Levi, che come primo impiego lavorò proprio a Balangero, l'amianto si libera nell'aria e si diffonde anche lontano dal sito di produzione interessando anche chi non lo lavora direttamente. Il processo ai proprietari della Eternit, conclusosi con la loro condanna in primo grado il 13 febbraio 2012, dà un'idea del numero di persone coinvolte solo per alcuni siti nell'inquinamento da amianto in Italia. Le parti civili al processo erano 6392, quasi tremila i morti e i malati per la fibra killer, almeno 2300 le vittime negli stabilimenti italiani, a partire dal 1952, di Casale Monferrato (Alessandria), Cavagnolo (Torino), Rubiera (Reggio Emilia) e Bagnoli (Napoli). Millecinquecento sono i morti a Casale, lo stabilimento più grande in Italia, chiuso nel 1986.