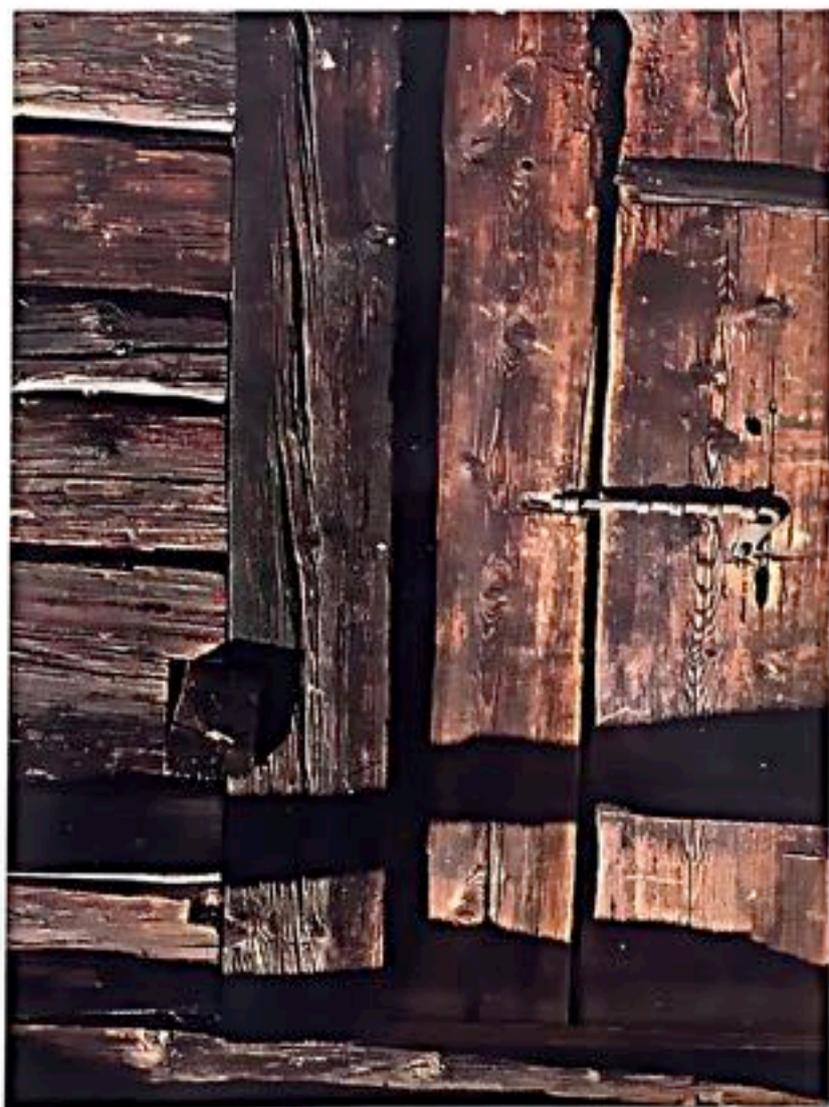


Piergiorgio Rossi - Benedetta Spadolini

L'immaginazione del concreto

Gli strumenti operativi del progetto



Ricerche di tecnologia dell'architettura
FRANCO ANGELI

Piergiorgio Rossi (Pergola, 1942) Professore incaricato supplente di Morfologia dei componenti presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Chieti.

Benedetta Spadolini (Firenze, 1952) Professore associato di Morfologia dei componenti presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Chieti.

Michele M. Lepore (Roma, 1955) Ricercatore presso l'Istituto di Tecnologia della Facoltà di Architettura dell'Università di Chieti.

Alessandro Pagliero (Roma, 1938) Ricercatore presso l'Istituto di Tecnologia della Facoltà di Architettura dell'Università di Chieti.

Alla redazione del presente volume hanno collaborato:

Carla Cadario (Benevento, 1958) che ha curato le elaborazioni grafiche della terza parte (Progettare per l'industria contemporanea);

Giovanni Meloni (Rieti, 1967) che ha curato l'editing generale e le elaborazioni grafiche della seconda parte (La capacità di trasformare i materiali).

Copyright © 1989 by Franco Angeli Libri s.r.l., Milano, Italy

I lettori che desiderano essere regolarmente informati sulle novità pubblicate dalla nostra Casa Editrice possono scrivere, mandando il loro indirizzo, alla "Franco Angeli, Viale Monza 106, 20127 Milano", ordinando poi i volumi direttamente alla loro Libreria.

Michele M. Lepore

appendice prima
I MATERIALI

10. LE CARATTERISTICHE INTRINSECHE E POTENZIALI

Le proprietà e il comportamento dei materiali dipendono dalla loro struttura interna.

Il contributo principale della scienza dei materiali è stata la individuazione di questo principio. Si è scoperto infatti, che tutti i materiali possiedono una architettura interna, e si è visto che tale architettura è abbastanza complessa da poter spiegare il comportamento di tutti i materiali. Ciò significa anche che il comportamento di un materiale può venire previsto se se ne conosce dettagliatamente la relativa struttura.

In questa parte tratteremo dei materiali non in modo enciclopedico, cioè con l'intendimento di fornire tutte le nozioni relative alle proprietà di tutti i materiali specifici possibili, bensì con lo scopo di dare un contributo allo sviluppo di quelle capacità intuitive dello studente che sono alla base dell'*invenzione* della soluzione costruttiva di cui i materiali sono un elemento determinante. Qui non ci soffermeremo sull'aspetto fisico-matematico quantitativo bensì sottolineeremo l'aspetto qualitativo per migliorare la comprensione delle relazioni che legano le strutture interne dei materiali al comportamento dei materiali stessi. Ciò permetterà sia di intuire, o di prefigurare il comportamento di un nuovo materiale ora sconosciuto basandoci sul rapporto tra la struttura interna di quest'ultimo e le strutture di materiali sperimentati, sia di intuire di quale struttura dovremo dotare un materiale se vogliamo che

esso corrisponda a determinate caratteristiche.

Per far ciò tratteremo in una prima parte i criteri di ordine generale, in seguito specificheremo i materiali principali utilizzati nelle costruzioni e nel design, come esemplificazioni dei tipi di rapporto struttura-comportamento analizzati per gruppi di materiali affini.

Generalmente i materiali di impiego tecnologico sono classificati in tre gruppi principali: metalli, polimeri, materiali ceramici; le loro proprietà, sostanzialmente differenti, sono ricollegabili alle particolari condizioni in cui, per ognuno dei tre gruppi, si trovano gli elettroni esterni degli atomi¹.

I *metalli* allo stato solido sono cristallini, vale a dire che i loro atomi si dispongono nello spazio secondo configurazioni che si ripetono; inoltre presentano prevalentemente atomi con un solo elemento.

I *polimeri* contengono in genere elementi leggeri, cui devono il loro basso peso specifico; d'altra parte la loro struttura elettronica li rende isolanti, mentre la struttura molecolare li fa flessibili e lavorabili.

I *materiali ceramici* derivano le loro proprietà (durezza, resistenza agli ambienti aggressivi e alle alte temperature) dalla contemporanea presenza di elementi metallici e non metallici.

Un quarto gruppo di classificazione dei materiali è rappresentato dai *semiconduttori* che devono essere esaminati a parte in quanto sono sovrapposti ai tre gruppi indicati in precedenza. Essi contengono un numero limitato di portatori di carica (elettroni); questo numero può essere variato intervenendo sulla composizione chimica, sul campo elettrico, sulla luce e su altri parametri.

Infine esistono i *materiali compositi*, materiali complessi la cui composizione, la microstruttura o il regime degli sforzi sono predispo-

¹ Tale classificazione è la più diffusa nei trattati di tecnologia dei materiali, e ci fornisce una prima relazione tra criteri di analisi, risorse e modi di utilizzazione. I testi di riferimento consultati per la redazione del capitolo e per il reperimento delle illustrazioni sono rappresentati da:

Open University, *Introduzione ai materiali*, Ed. Mondadori, Milano, 1976;
J.E. Gordon, *La scienza dei materiali resistenti*, Ed. Mondadori, Milano, 1976;
L.H. Van Vlack, *Tecnologia dei materiali*, Ed. Mondadori, Milano, 1976;
J.E. Gordon, *Strutture*, Ed. Mondadori, Milano, 1979;
G.L. Liedl, *La scienza dei materiali*, in *Le Scienze* n. 220, 1986.

sti per costituire un materiale ottimale. Tra i materiali compositi sono compresi i materiali di origine biologica tra i quali ricordiamo il legno che è costituito da polimeri naturali e, in particolare, dalla cellulosa.

Lo scopo che intendiamo raggiungere è quello di dare una risposta a semplici domande sul comportamento e sulla natura dei materiali più comuni che compongono gli oggetti che ci circondano, siano essi la trave di un edificio, un albero o semplicemente il rivestimento del piano della scrivania alla quale probabilmente siete seduti mentre leggete questo libro. Per quale motivo certi solidi sono più resistenti di altri? Perché l'acciaio può piegarsi senza spezzarsi mentre il vetro esplode in mille pezzi prima ancora di raggiungere una deformazione visibile? Ed infine come possiamo produrre materiali migliori? Per far questo dobbiamo descrivere a grandi linee, le strutture che caratterizzano i tipi di materiali su indicati e quale relazione tra quelle ed il comportamento di quest'ultimi; e ciò in quanto la vera difficoltà per giungere alla soluzione di un problema consiste spesso nel riuscire ad individuarne l'esistenza.

Attraverso la conoscenza dei meccanismi che regolano la natura delle cose che ci circondano, attraverso l'osservazione della natura stessa possiamo tentare di dare una risposta al problema di individuare nuovi materiali o semplicemente nuovi modi di utilizzo di materiali già esistenti. Infatti troppo spesso la scelta di un materiale per realizzare un oggetto è fatta in base a criteri tradizionali e conservatori tanto da scartare a priori un materiale solamente perché insolito per quel dato uso. A questo proposito riportiamo una frase di Gordon che dovrebbe farci riflettere: "Gli ingegneri [...] oggi si scandalizzerebbero moltissimo all'idea di una grossa nave di legno. I nostri antenati si scandalizzarono molto di più all'idea di farne una di ferro"².

² J.E. Gordon, *Strutture, op. cit.*, pag. 273.

10.1. Proprietà e comportamento

Le proprietà di un materiale sono rappresentate dalla sua risposta a stimolazioni provenienti dall'esterno del materiale stesso; queste proprietà sono distinte in:

*proprietà meccaniche*³, che governano la risposta dei materiali alle varie sollecitazioni meccaniche e che sono relative alle caratteristiche di deformabilità, durezza e tenacità⁴;

proprietà termiche, legate alla vibrazione degli atomi, che diviene sempre più intensa all'aumentare dell'energia termica assorbita dal materiale. Le proprietà termiche dipendono dalla dilatazione termica e dalla conducibilità termica o dal suo inverso, la resistività termica;

proprietà elettriche, che governano le risposte allo stimolo di un campo elettrico applicato dall'esterno del materiale (anche se possono venire correlate alla mobilità intrinseca degli elettroni dovuta all'agitazione termica in assenza di campi esterni), sono esemplificate dalla conducibilità elettrica, o dal suo inverso la resistività, e dalla costante dielettrica.

Si possono elencare altre proprietà che caratterizzano un materiale, quali quelle *ottiche* e *chimiche* ma esulano dai confini della nostra indagine.

Dall'insieme di queste proprietà deriva il comportamento e quindi la rispondenza alla funzione che il manufatto è chiamato a svolgere. Per esempio: se un materiale ha un alto valore della resistività elettrica sarà indicato per isolare dall'esterno altri materiali con un basso valore di resistività elettrica (es: rame) che proprio per questa caratteristica sono utilizzati come conduttori negli impianti elettrici. Di

³ In particolare, le proprietà meccaniche correlano la deformazione al carico applicato dall'esterno. Attraverso lo studio del comportamento meccanico del materiale possiamo prevedere se una barra di acciaio sottoposta ad un carico crescente si flette o si rompe, in che momento ciò avviene e, quando si flette solamente, se potrà riprendere la sua forma originale all'allontanamento del carico.

⁴ La tenacità è funzione della quantità di energia che un materiale può assorbire prima della rottura.

queste caratteristiche ne approfittiamo ogni giorno, ogni volta che accendiamo un apparecchio elettrico e non rimaniamo fulminati. Il normalissimo filo elettrico che collega il televisore alla rete ne è un esempio evidente. Esso è costituito da una parte interna in rame ed un rivestimento esterno isolante che generalmente è di materiale termoplastico. Ma, come vedremo meglio in seguito, i termoplastici generalmente utilizzati a questo scopo, associano alla proprietà di essere fortemente isolanti elettricamente (alta resistività), quella meno desiderabile di offrire una insufficiente sicurezza antincendio. La causa dell'80% degli incendi è provocata dal mal funzionamento dell'impianto elettrico, il classico corto circuito. Va però rilevato che più frequentemente la causa degli incendi non è il corto circuito netto (di resistenza praticamente nulla) tra due conduttori in tensione, bensì un corto circuito spurio od imperfetto, cioè un contatto di elevata resistenza, che trasformando energia elettrica in calore per un tempo sufficientemente lungo, determina un surriscaldamento del conduttore che finisce per incendiarsi. Quindi se si trovasse un materiale con alti valori di resistenza elettrica ma con bassi valori di resistenza termica (permettendo una migliore dissipazione del calore) si disporrebbe di cavi elettrici molto più sicuri. Tali materiali oggi esistono ed uno di essi a base di ossido di magnesio è utilizzato nella fabbricazione di particolari cavi detti *antifiamma* prescritti dalla normativa antincendio attualmente vigente.

Dovendo noi scegliere il materiale più adatto per rispondere ad una esigenza o per svolgere una funzione, dovremo verificare la combinazione delle proprietà rispetto ad uno o all'insieme dei materiali utilizzati in modo da controllare il comportamento del manufatto finale. È proprio da questo concetto che deriva la classificazione della tecnologia dei materiali già indicata.

La conoscenza che serve al progettista è in particolare quella che permette di ricondurre l'informazione scientifica all'interno delle procedure di scelta. La proprietà in quanto tale ci spiega solo la ragione del comportamento del materiale rispetto a condizioni esterne od interne. Correlando proprietà, comportamento e funzione arriviamo a circoscrivere il campo delle soluzioni più soddisfacenti.

10.2. Le condizioni di impiego

Per analizzare il comportamento di un materiale dobbiamo fare riferimento da un lato a ciò che accade all'interno del materiale stesso (struttura, composizione chimica, ecc.) dall'altro alle condizioni esterne (carichi, temperatura, ecc.) Se studiamo i materiali rispetto agli impieghi più caratteristici dell'architettura, abbiamo che la resistenza di qualunque struttura dipende, per gran parte, dalle relazioni chimiche e fisiche che avvengono a livello molecolare. La comprensione del comportamento di tale struttura, necessita di una investigazione che spazi in tutta la gamma delle dimensioni fisiche, dal molto grande al molto piccolo con competenze che variano dal campo dell'ingegneria a quello della chimica.

I materiali, che ci interessano in questo studio, sono solidi; i solidi sono tenuti insieme dai legami⁵ chimici e fisici di atomi e molecole. I legami molecolari possono essere distrutti attaccandoli in molti modi diversi, per esempio mediante frattura meccanica, fusione o attacco chimico; le lavorazioni viste al cap. 4 e 5 non sono altro che azioni consapevoli e finalizzate di modifica della struttura atomica e molecolare. Gli studiosi di scienza dei materiali hanno studiato prevalentemente le relazioni fra struttura e le proprietà dei materiali. I tecnologi invece si sono concentrati sulle relazioni tra struttura e proprietà dei materiali da un lato e le prestazioni dei materiali stessi dall'altro, sino a giungere allo studio delle possibilità di migliorare le

⁵ Si hanno differenti tipi di legami chimici che possiamo distinguere sintenticamente rispetto a:

i legami che tengono assieme gli atomi all'interno della molecola, a loro volta composti da: il *legame ionico*, che si forma tra ioni, cioè tra atomi o gruppi di atomi dotati di carica negativa o positiva, in cui si ha uno scambio di elettroni da un atomo all'altro; il *legame covalente* in cui gli elettroni dell'orbita più esterna sono in compartecipazione di atomi differenti; di solito è il legame più difficile da formare, ma è molto forte e rigido; il *legame metallico* dove tutti gli elettroni dell'orbita esterna vengono condivisi, non ruotano permanentemente attorno ad atomi particolari ma muovendosi liberamente nel materiale consentono il passaggio di corrente elettrica;

i legami che uniscono le molecole l'una all'altra a loro volta composti da: il *legame di Van der Waals*, costituito da una debole attrazione fra atomi o molecole neutri adiacenti; il *legame a idrogeno*, legame debole mediato da un atomo di idrogeno condiviso da due molecole.

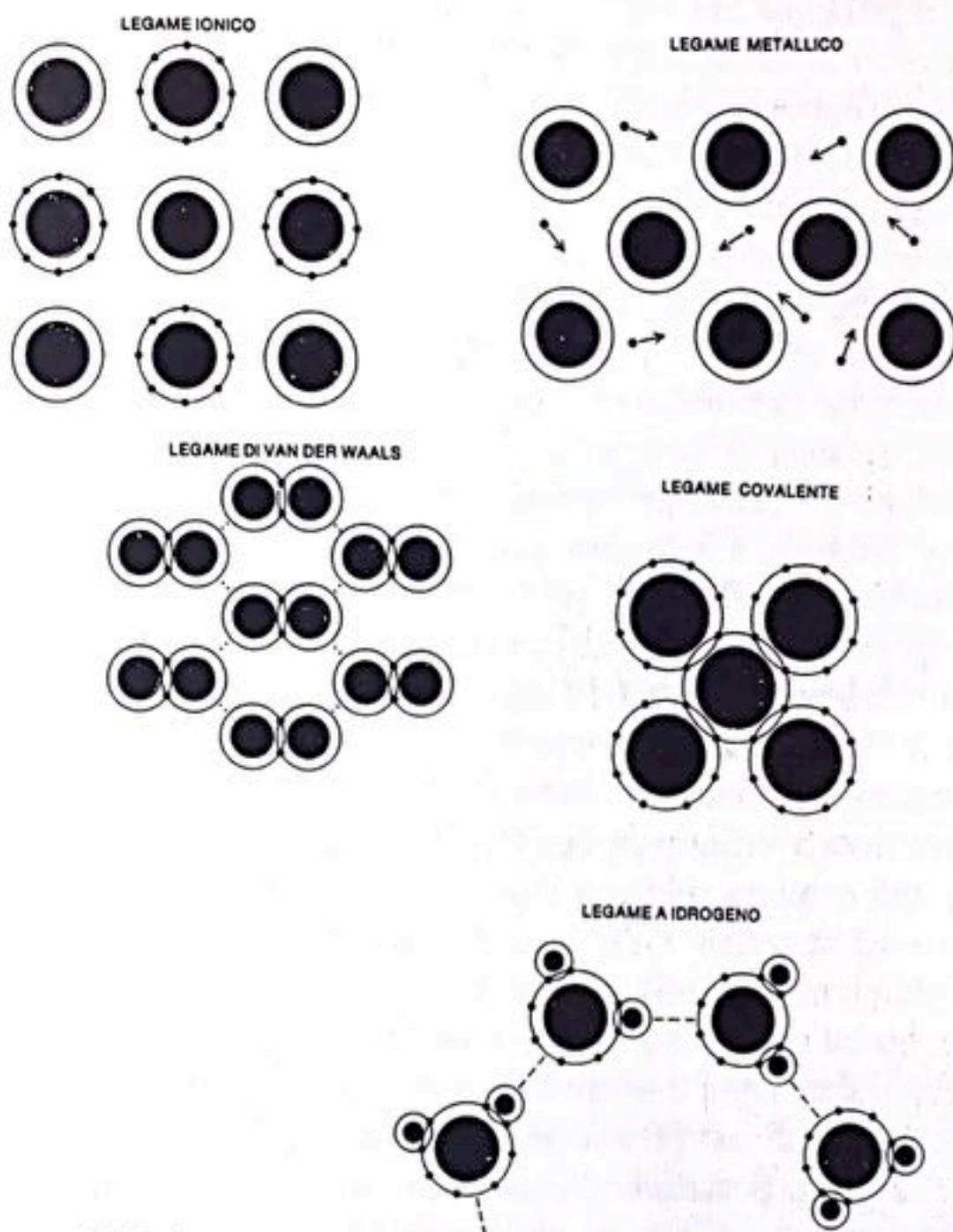


Figura 10.2.1.

I legami chimici, che dipendono dalla struttura elettronica dei materiali, sono determinanti per le proprietà di questi ultimi. Nel disegno sono rappresentati cinque tipi possibili di legame. Il legame ionico si forma tra atomi o gruppi di atomi dotati di carica positiva o negativa. I gruppi che hanno carica opposta si attraggono. Nel legame covalente coppie di atomi condividono alcuni elettroni, occupando la loro orbita esterna. Nei metalli tutti gli elettroni dell'orbita esterna sono condivisi, muovendosi nel reticolo e consentendo il passaggio di una corrente elettrica. Il legame di Van der Waals è costituito da una debole attrazione fra atomi con molecole neutri adiacenti. Infine il debole legame a idrogeno è mediato da un atomo di idrogeno condiviso da due molecole.

prestazioni attraverso una modifica dei processi di trasformazione.

Il principio che regola il funzionamento del manufatto finale è legato alla conservabilità delle strutture; compito di una struttura è di mantenere il proprio equilibrio statico, e per svolgerlo devono generare delle forze tali da resistere alle sollecitazioni alle quali sono sottoposte. Per poter constatare empiricamente questo principio dobbiamo avere il caso di un materiale da costruzione che resiste a forze esterne solo quando viene deformato; cioè deve cedere alla sollecitazione per poter opporre una qualsiasi resistenza. Questo cedimento consiste in una deformazione (accorciamento od allungamento) della sua forma geometrica a causa di contrazioni o allungamenti interni, a volte impercettibili. Un materiale veramente rigido non esiste. Qualsiasi materiale si deforma; è solo una questione di misura ed è sul controllo dell'ordine di grandezza di questa deformazione che si gioca la partita dell'ingegneria. A meno che tale deformazione non sia incompatibile con la funzione per la quale è stata progettata una certa struttura, essa non è un difetto ma una caratteristica inevitabile; venire a patti con le deformazioni dei materiali è uno dei compiti del progettista⁶. Sono tali deformazioni a sviluppare quelle forze di resistenza che rendono un solido più o meno rigido o duro. Tutto ciò dipende dalla struttura atomica del materiale e dal fatto che gli atomi sono tenuti insieme da forze chimiche (legami). Se non si esercita alcuna sollecitazione sul solido, questi legami si possono considerare come in uno stato neutro o di equilibrio. Ogni tentativo di avvicinare maggiormente gli atomi (sollecitazione di compressione) o di allontanarli (sollecitazione di trazione) da questa posizione di equilibrio, causa un accorciamento od un allungamento di tali legami che come delle molle immaginarie collegano gli atomi tra di loro, con un conseguente accorciamento od un allungamento di tutto il solido. Se si considerano gli atomi come elementi rigidi e non spostabili, a meno di sollecitazioni particolarmente forti, l'unico elemento sottoponibile a modificazioni è il legame tra questi.

Nelle strutture le sollecitazioni di compressione e di trazione

⁶ Si ricorda che nell'ambito della Tecnologia si passa continuamente dall'interno all'esterno del manufatto e viceversa, e tra trasformazione del materiale e utilizzazione del materiale trasformato.

sono legate a peso e configurazione dell'edificio. Le deformazioni delle parti resistenti ci indicheranno l'effettiva capacità del materiale di svolgere le funzioni a cui è destinato. Le lavorazioni invece mirano a scindere i legami per determinare la configurazione progettata dell'elemento o del sistema, attraverso una rottura dei legami molecolari (fusione, taglio) oppure attraverso una loro sostituzione (soluzione, modellazione). Arriviamo così a comprendere come le caratteristiche del materiale svolgano funzioni e siano utilizzate in termini diversi durante il processo di trasformazione e durante la utilizzazione del manufatto finale. Ad esempio la durezza e la resistenza di un metallo da un lato può consentire la realizzazione di coperture particolarmente leggere, dall'altro possono richiedere utensili o lavorazioni talmente complessi o costosi da renderne l'uso praticamente impossibile.

Tomando alla struttura, all'interazione dei legami si sovrappone quindi, un sistema di forze che equilibra quello delle sollecitazioni esterne. Per comprendere meglio ruolo e significato dei legami atomici della struttura molecolare riportiamo brevemente i principi fondamentali del comportamento dei materiali.

10.2.1. Sforzo e deformazione

La relazione esistente tra sollecitazioni e deformazioni fu osservata da Hooke (1679) il quale sperimentalmente notò che l'allungamento subito da una molla a causa dell'applicazione di un carico è proporzionale all'intensità del carico: in altre parole, lo sforzo è proporzionale all'allungamento e viceversa. Non è chiaro fino a che punto Hooke sia stato capace di distinguere tra l'elasticità in quanto proprietà del materiale ed elasticità in quanto funzione della forma della struttura⁷.

⁷ Le osservazioni fatte da Hooke su una struttura se pur di minime dimensioni come una molla, fu poi generalizzata per i materiali da Young (1807) che stabilì le caratteristiche di deformazione elastica di questi. In realtà la legge di Hooke è un'approssimazione. Per deformazioni molto grandi - dal 5% al 10% circa - lo sforzo non è proporzionale all'allungamento. Nei comuni materiali da costruzione, però, le deformazioni hanno quasi sempre valori compresi tra $\pm 1\%$ ed in questo caso la relazione tra sforzo e deformazione è quasi perfettamente lineare.

Per piccole deformazioni il processo di estensione-accorciamento e di ritorno alla posizione iniziale, al cessare della sollecitazione che lo ha causato, è perfettamente lineare; tale comportamento dei solidi viene chiamato *elastico*. Quando le sollecitazioni aumentano in maniera eccessiva, il corpo si deforma e resta deformato anche al cessare delle sollecitazioni; questo comportamento viene chiamato *plastico*. Un ulteriore aumento del carico provoca infine la rottura del corpo solido.

Young (1807) si rese conto che se si considerano gli sforzi e le deformazioni del materiale invece che quelle complessive della struttura si può considerare:

$$\text{sforzo/deformazione} = \text{costante}$$

Si rese conto anche che c'era una costante, caratteristica peculiare di ogni sostanza chimica, che ne rappresentava l'elasticità. Tale costante viene comunemente chiamata *modulo di Young*, oppure *E*. Esso descrive quanto siano flessibili elasticamente i materiali in quanto tali. La rigidità di una data struttura od oggetto dipende, quindi, sia dal modulo di Young del materiale di cui sono fatti, sia dalla loro forma geometrica⁸.

Quando un materiale viene sollecitato da un carico, come abbiamo visto, si provoca in ogni caso una deformazione. Se il carico è di piccola entità, tale deformazione tende ad annullarsi al venir meno della sollecitazione. La deformazione relativa è detta *deformazione elastica*, cioè è una deformazione reversibile. Nella fase elastica i legami interatomici rimangono integri, ed ogni atomo rimane legato

⁸ Valori approssimativi del Modulo di Young per alcuni materiali (Kg/cm²)

gomma	71,4
plastica non rinforzata	14 280,0
legno (circa)	142 800,0
cemento	173 400,0
ossa	214 200,0
magnesio metallico	428 400,0
vetro comune	714 000,0
alluminio	744 600,0
acciaio	2 142 000,0
ossido di alluminio (zaffiro)	4 284 000,0
diamante	12 240 000,0

con gli stessi atomi. Nella fase plastica, invece, alcuni legami si rompono, gli atomi si muovono e si legano ad atomi diversi dai precedenti. Al di sopra di un certo valore del carico applicato, la deformazione indotta non sarà più reversibile ma diventerà una deformazione permanente detta *deformazione plastica*. Il valore del carico che determina l'inizio della deformazione plastica si chiama carico specifico di *snervamento*.

Ne consegue che la deformazione plastica consente di comprendere il comportamento statico dei materiali duttili i quali possono acquistare una resistenza meccanica maggiore a seguito del processo di incrudimento⁹, consentendo di aumentare il carico di rottura. Viceversa se il carico è dato, possiamo determinare la sezione resistente più opportuna rispetto alle caratteristiche del materiale e confrontare tra loro materiali diversi per individuare il più adatto allo scopo.

10.2.2. I meccanismi di frattura

Come non esiste un corpo veramente rigido, così non esiste un corpo realmente infrangibile. La infrangibilità, o meglio la non infrangibilità di un corpo, dipende dalla resistenza meccanica dello stesso, caratteristica che, è meglio ricordarlo, è cosa differente dalla rigidità: la rigidità o modulo di Young (E), riguarda quanto sia rigido, flessibile o elastico un materiale; la resistenza meccanica è relazionata alla forza necessaria per rompere un oggetto. Un grissino è rigido ma è poco resistente, l'acciaio è rigido ed è anche resistente, una fune di nylon è flessibile ma è molto resistente, un budino è flessibile e poco resistente.

Poiché abbiamo detto che non esiste un corpo infrangibile, cioè che non può essere rotto, ne deduciamo che qualsiasi oggetto costituito

⁹ Come vedremo in seguito, l'incrudimento provoca un mutamento delle caratteristiche meccaniche di un materiale metallico attraverso lavorazioni meccaniche (generalmente a freddo) o sollecitazioni che inducono uno scorrimento del materiale. L'incrudimento dipende dal meccanismo delle *dislocazioni* e produce un aumento della durezza.

da un qualsiasi materiale può essere sottoposto, ad esempio, ad una forza di trazione e potrà resistere solo sino a quando la sollecitazione esterna applicata non raggiungerà il livello necessario per spezzare in due l'oggetto rompendo tutti i legami tra gli atomi lungo una linea di frattura. In questa zona di frattura si generano due nuove superfici che non esistevano prima che l'oggetto si rompesse. Griffith (1893-1963) ebbe la geniale intuizione di collegare l'energia superficiale delle superfici di frattura all'energia potenziale elastica contenuta nel materiale prima della rottura¹⁰.

Va però rilevato che la grande maggioranza dei solidi comuni ha soltanto un centesimo o un millesimo della resistenza teorica; fa eccezione l'acciaio che talvolta raggiunge valori di un decimo di quella calcolata¹¹. Questo rende necessario trovare qual'è il meccanismo di indebolimento che determina la resistenza meccanica reale dei materiali comuni.

Una qualsiasi apertura od angolo bruscamente rientrante in un punto di un materiale comporta un aumento dello sforzo localizzato in quel punto. Questo aumento localizzato, che possiamo definire una concentrazione di sforzo, dipende esclusivamente dalla forma dell'apertura e non dalla sua dimensione.

I fori e le tacche anche se di piccole dimensioni sono importantissimi nel determinare cedimenti o la formazione di fratture nel

¹⁰ Se vogliamo calcolare quanto sono resistenti i materiali dobbiamo quantificare lo sforzo appena sufficiente a separare due strati adiacenti di atomi all'interno del materiale. A questo scopo non ci interessa sapere se il materiale è vetroso o cristallino, ma ci basta conoscere il modulo di Young e l'energia superficiale del solido in questione. Possiamo così ottenere il valore teorico della resistenza. Praticamente però è stato verificato che le resistenze calcolate dei materiali sono molto superiori a quelle comunemente ottenute nella pratica quotidiana.

¹¹ Fu sempre Griffith che cercò di formulare una qualche teoria fisica che colmasse questa discrepanza abissale tra teoria e pratica. Lavorando su delle bacchette di vetro egli riuscì ad ottenere delle fibre sottilissime avvicinandosi sperimentalmente alla resistenza teorica. Concluse che se si fossero potute ottenere delle fibre più sottili la loro resistenza sarebbe stata molto vicina al valore teorico. Nel caso di una fibra tanto sottile da essere costituita da una sola catena di atomi i valori teorici e sperimentali dovevano, quindi, coincidere.

A questo punto, diventò evidente che non era questione di spiegare perché le fibre di vetro sottili fossero così resistenti, ma perché le fibre più spesse lo fossero meno.

materiale. Basta pensare alla forellatura dei fogli di carta predisposti per essere strappati lungo una determinata linea, o al vetraio che per tagliare una lastra di vetro ne incide la superficie con un semplice graffio. Non importa quanto sia spessa la lastra (se è omogenea), né quanto sia profondo il graffio prodotto. È la forma più o meno aguzza del solco che determina l'effetto di indebolimento del materiale. Ciò è utilissimo nei processi di trasformazione, ma può essere molto negativo durante la vita del manufatto.

Incidendo la superficie non facciamo altro che determinare una fessura, cioè rompiamo un certo numero di legami adiacenti. Il carico, che era applicato alle catene ora spezzate, dovrà obbligatoriamente seguire il contorno della superficie determinata dalla fessura andandosi a concentrare sul singolo legame giacente sul fondo della rientranza. Ovviamente questo legame così sollecitato rispetto agli altri sarà il primo a cedere. Il legame successivo non si troverà certamente in condizioni migliori poiché dovrà sostenere non solo il carico applicato a tutte le catene spezzate all'inizio, ma anche quello della catena che si è appena rotta. Vale a dire che una fessura costituisce un meccanismo di indebolimento del materiale, che permette ad una forza debole esterna di rompere uno alla volta legami anche molto resistenti¹².

Anche in assenza del meccanismo di indebolimento della propagazione di una fessura i materiali cedono alle sollecitazioni esterne, rompendosi se queste raggiungono il valore critico. In questo caso il

¹² Prima abbiamo detto che le fibre di vetro sottili sono di fatto più resistenti (in modo relativo) a fibre di vetro di dimensioni maggiori. Ciò non è dovuto ad una qualche speciale proprietà dovuta alla loro sottigliezza, ma al fatto che proporzionalmente alla sottigliezza diminuisce la possibilità che in esse vi siano delle microfessure superficiali. Infatti se si levigasse perfettamente la superficie di un vetro spesso, esso avrebbe la stessa resistenza di una fibra sottile. Il fatto è che, non solo ciò è difficile da realizzare, ma è ancora più difficile riuscire a mantenere tale superficie intatta nel tempo ed indenne da microfessurazioni. Nei materiali fragili, il problema della resistenza è quasi sempre un problema di levigatezza superficiale. Nel caso del vetro i difetti sono costituiti dalle fessure superficiali, nel caso di solidi cristallini fragili, invece, il problema sono i gradini superficiali che si formano durante il processo di crescita del cristallo stesso.

Un gradino infatti, costituisce una concentrazione di sforzo come una *mezza* fessura. E come per le fessure, a determinare l'entità del meccanismo di indebolimento, determinando una concentrazione di sforzo, non sono le dimensioni assolute della rientranza, ma il rapporto tra profondità e raggio di curvatura dell'apice.

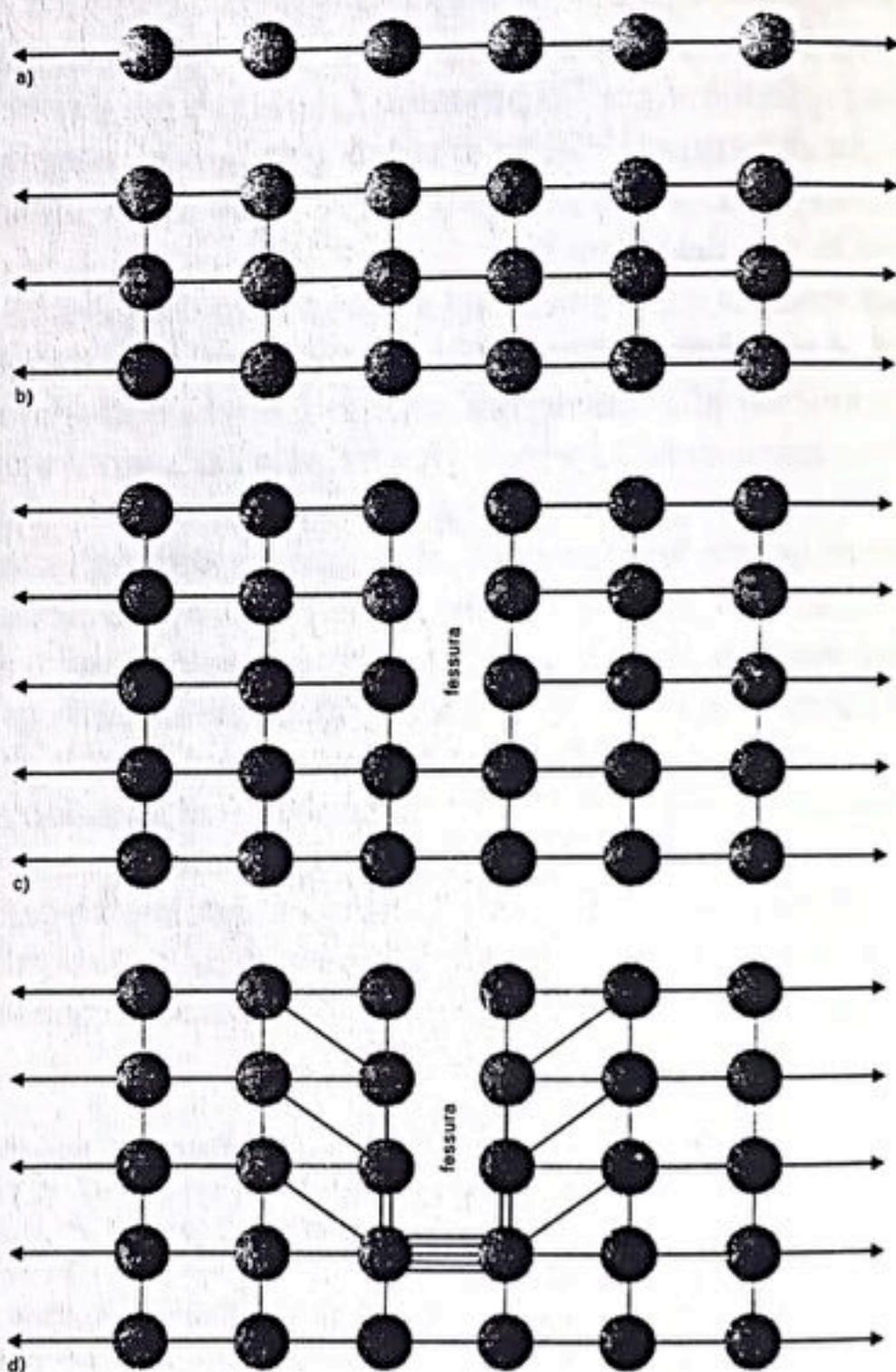


Figura 10.2.2.

Se si taglia un certo numero di legami adiacenti in modo da formare una fessura, il carico applicato si trasmette al singolo legame che giace sul fondo della fessura seguendo il contorno della stessa. Questo legame, sovraccarico, cede a sua volta favorendo il propagarsi della fessura attraverso tutto il materiale sino alla frattura completa.

cedimento è dovuto ad uno scorrimento interno del materiale dovuto a sforzi di taglio. Lo scorrimento interno riguarda prevalentemente i metalli malleabili come ad esempio il piombo o l'oro. Il vetro che è fragile prima si incide poi si spezza, il ferro anche se lo si incide si piega ma non si spezza. È intuibile come fragilità e malleabilità condizionano la scelta delle lavorazioni prima e delle configurazioni poi.

In generale si può affermare che a determinare la rottura di un materiale concorrono sempre due meccanismi: lo *scorrimento plastico* e la *frattura fragile*. Il materiale cederà a quello dei due che richiede lo sforzo minore. I materiali *duttili* cedono per snervamento prima di spezzarsi. Quelli *fragili* si spezzano prima di snervarsi.

In un solido fragile, la frattura ha luogo mediante la separazione totale di due strati adiacenti di atomi, mentre il resto del materiale rimane indisturbato. Un materiale duttile come il metallo invece, si comporta come un pezzo di plastilina, cioè nella massa del materiale si verifica uno scorrimento di grosse proporzioni prima che questo si divida in due pezzi distinti. Il fatto che in un materiale duttile si verifichi questo scorrimento sotto una sollecitazione di taglio, non significa che un certo strato di atomi si è separato da quello adiacente, bensì che i due strati sono come slittati uno sull'altro. Quindi il materiale in realtà non si è particolarmente indebolito, perché i legami rotti sono stati sostituiti con altri. Questa proprietà è sfruttata nella modellazione e dipende come già ricordato da temperatura (caldo e freddo) e caratteristiche chimiche del processo di trasformazione (a secco e a umido).

Un materiale duttile e cristallino (i metalli), è composto da cristalli che, come tutte le cose di questo mondo, non sempre sono perfetti. Un cristallo può essere immaginato come una serie di piani paralleli contenenti strati di atomi. Se uno strato di atomi risulta incompleto, ci devono essere due punti, all'una ed all'altra estremità dello strato "in più", dove gli atomi sono distorti generando un punto di debolezza del cristallo. Tale punto, costituito da un fronte di atomi fuori posto, rispetto alla struttura regolare del solido cristallino si chiama *dislocazione*¹³.

¹³ La dislocazione è quindi un difetto lineare, che però, ha la proprietà, se sottoposto a sollecitazione, di spostarsi con una certa libertà all'interno del cristallo. L'incontro di più dislocazioni, può generare altre dislocazioni, che se la sollecitazione permane, generano a loro volta altre dislocazioni (anche dell'ordine di 10^{12} per centimetro quadrato), alcune delle quali spostandosi con sempre maggiore mobilità, possono essere

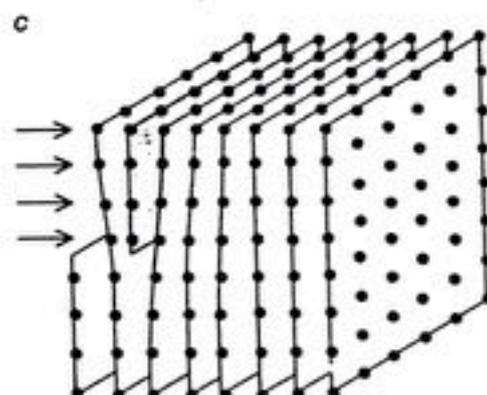
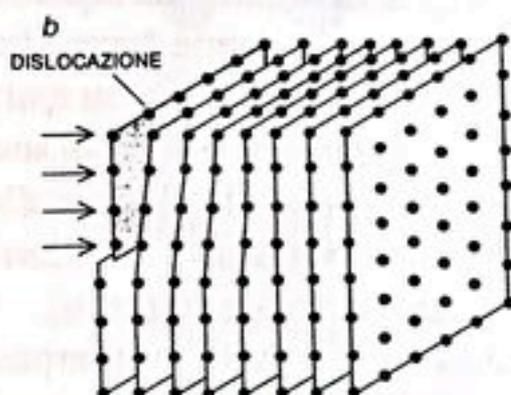
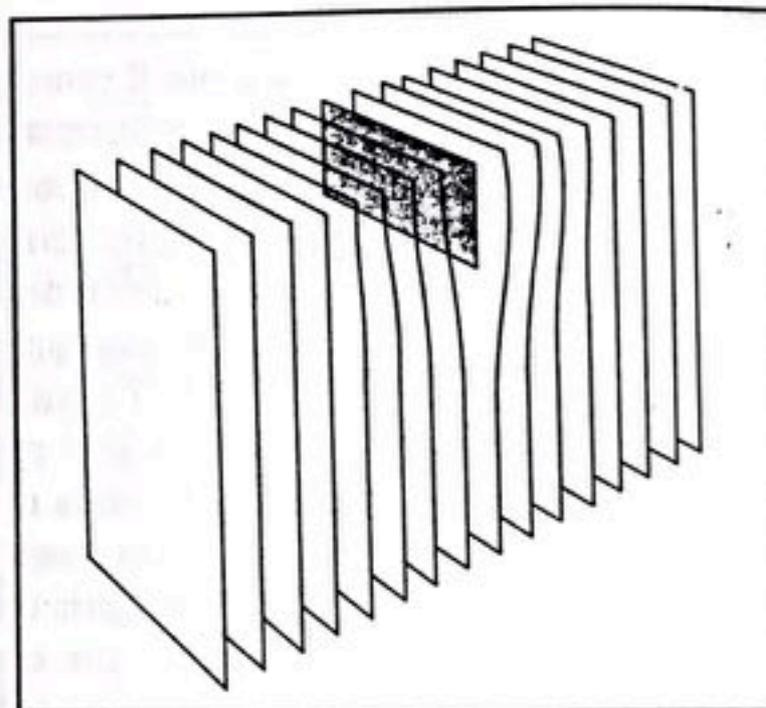


Figura 10.2.3.

La deformazione di un cristallo di metallo crea nella microstruttura di questo un difetto chiamato dislocazione. La dislocazione è quindi un difetto lineare, che però, ha la proprietà, se sottoposto a sollecitazione, di spostarsi con una certa libertà all'interno del cristallo. Se si applica una forza di taglio al cristallo metà del piano atomico più interno viene spinto verso l'interno fino a scontrarsi col semipiano successivo, mentre il semipiano più esterno lo sostituisce. Se la sollecitazione di taglio persiste, la dislocazione continua a propagarsi con lo stesso processo di disgregazione e di sostituzione dei semiplani atomici.

Le dislocazioni possono esistere in un qualsiasi materiale cristallino, ma è la possibilità di essere mobili che differenzia i materiali cristallini metallici da quelli non metallici.

10.3. Metalli e leghe metalliche

Sinteticamente le caratteristiche dei metalli sono rappresentate da: elevata conducibilità termica, buona conducibilità elettrica, opacità, elevato peso specifico, elevata duttilità e tenacità.

In natura il metallo è presente in forma di composti minerali all'interno degli strati rocciosi della crosta terrestre. I minerali metalliferi devono essere prima trasformati in metallo per poter essere introdotti nel ciclo delle lavorazioni necessarie alla produzione del manufatto: il materiale, allo stato naturale, non presenta le caratteristiche di malleabilità, duttilità, coerenza, durezza e compattezza che contraddistinguono il metallo e i suoi derivati.

Il minerale è quasi sempre estratto in miniere che si sviluppano in profondità seguendo le giaciture degli strati rocciosi ricchi di minerale. Attraverso la trasformazione dei minerali metalliferi modifichiamo la struttura molecolare sino ad ottenere un materiale con le proprietà ed il comportamento richiesto.

I metalli allo stato solido sono cristallini, cioè i loro atomi si dispongono nello spazio secondo geometrie reticolari che si ripetono. Essi sono costituiti da atomi di un solo elemento e cristallizzano secondo uno di questi tre tipi di reticolo: cubico a facce centrate, cubico a corpo centrato, esagonale. I metalli del primo e del terzo tipo vengono considerati compatti, in quanto ogni atomo è contornato dal maggior numero possibile di altri atomi.

espulse dalla superficie del cristallo. Ma se il processo continua, le dislocazioni diventano tanto numerose e fitte da ostacolarsi a vicenda e dopo un periodo di libero movimento, il materiale comincia ad indurirsi (*incrudimento*) e, se si continua a sollecitarlo diventa fragile.

Se il materiale contiene atomi di elementi estranei e questi sono di piccole dimensioni, possono collocarsi tra gli interstizi degli atomi dell'elemento principale. Se gli atomi estranei sono di dimensioni paragonabili a quelle degli atomi dell'elemento principale, i primi possono invece occupare, in maniera distribuita, alcuni posti dei secondi nella struttura reticolare del materiale. Questo è il caso di molte leghe.

Generalmente tutti i metalli di uso tecnologico sono policristallini, cioè sono formati da molti grani¹⁴, ognuno dei quali è un cristallo a sé. Due grani adiacenti hanno lo stesso reticolo cristallino ma con un'orientazione diversa¹⁵. In questo caso le zone di contatto tra i grani assumono importanza significativa sul comportamento del metallo.

In un materiale puro, sebbene la forma dei singoli cristalli sia irregolare, il contatto a livello molecolare è generalmente buono e poiché di solito l'energia superficiale dei bordi dei grani è più elevata di quella dei piani di frattura interni ai cristalli, ciò non provoca una diminuzione della resistenza. Nel caso di un materiale impuro, invece, poiché nella fase di cristallizzazione le impurità tendono ad essere espulse all'esterno del cristallo stesso, esse si collocano sui bordi dei grani e nei vuoti. In questo caso la zona di contatto tra i grani diventa una zona di scarsa resistenza.

Passando dalla struttura al comportamento del materiale, ricordiamo: tenacità, duttilità, resistenza e dilatazione. Il comportamento dei metalli alla sollecitazione di compressione è sostanzialmente identico a quello di trazione. Ciò è dovuto agli atomi che reagiscono con forze attrattive se si tenta di allontanarli (trazione) e con forze repulsive se si tenta di avvicinarli (compressione). Poiché queste forze si equivalgono si spiega l'identità di comportamento nei due casi.

I metalli sono generalmente tenaci. La tenacità può definirsi genericamente come la capacità di opporsi alla propagazione delle fessure, cioè di ridurre la concentrazione di sforzo che si genera

¹⁴ Un grano è costituito da atomi in un reticolo cristallino con una precisa orientazione nello spazio.

¹⁵ Nel momento della solidificazione si generano dei nuclei di crescita dotati di una propria orientazione reticolare (il grano), che giungono in contatto tra loro formando la zona del bordo del grano, formando una transazione di orientazione nella struttura atomica del materiale.

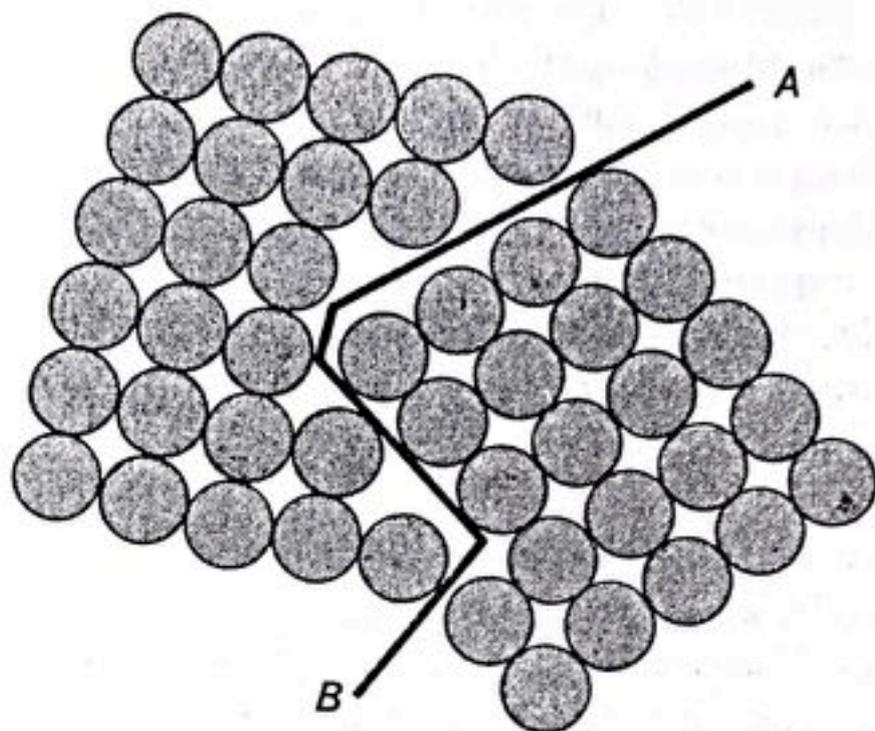


Figura 10.3.1.

Tutti i metalli di uso tecnologico sono policrostallini, cioè formati da molti grani ognuno dei quali è un cristallo a sé. Due grani adiacenti hanno lo stesso reticolo cristallino ma con un'orientazione diversa. Nel momento della solidificazione si generano dei nuclei di crescita dotati di una propria orientazione reticolare, che giungono in contatto tra loro formando la zona del bordo del grano, costituendo una transazione di orientazione nella struttura atomica del materiale. In un materiale puro il contatto a livello molecolare è generalmente buono, in un materiale impuro, invece, poiché nella fase di cristallizzazione le impurità tendono ad essere espulse all'esterno del cristallo stesso, esse si collocano sui bordi dei grani e nei vuoti. In questo caso la zona di contatto tra i grani diventa una zona di scarsa resistenza.

all'apice della fessura sino ad impedirne l'avanzamento. Le dislocazioni si oppongono alla propagazione delle fessure, rendendo più o meno duttile il metallo. Infatti un metallo con una duttilità adeguata, richiederà un *lavoro di rottura*¹⁶ elevato.

Sotto carico, in corrispondenza dell'apice della fessura, il metallo riesce a scorrere alleggerendo la concentrazione di sforzo. La fessura, in questo caso, non può procedere con la sola sollecitazione meccanica, ma possono intervenire altri agenti a rendere il materiale non sicuro¹⁷. Un legame può essere spezzato anche con mezzi chimici oltre che fisici e meccanici o con una combinazione di questi. Ad esempio col riscaldamento ad una temperatura legata al calore specifico allentiamo i legami in tutta la massa metallica; mentre la soluzione o la reattività chimica nei metalli sono limitate ad azioni superficiali. In termini fisici la rottura o propagazione della fessura può essere aiutata durante la lavorazione attraverso utensili opportunamente progettati.

In campo metallurgico, la duttilità porta a rendere il metallo tenace, così che le fessure non si propagano facilmente, e malleabile, cioè forgiabile. La duttilità è una proprietà esclusiva dei cristalli perché le dislocazioni così come le abbiamo descritte prima, possono esistere solo come difetti dello stato cristallino di un materiale.

La dilatazione, che si verifica nei materiali durante il riscaldamento, è determinata dalla maggiore ampiezza della vibrazione termica degli atomi. Nel caso di variazione termica contenuta si può considerare il *coefficiente di dilatazione lineare*, costante. Se invece la temperatura è alta, l'ampiezza di vibrazione degli atomi aumenta a tal punto da sconvolgere la struttura reticolare del materiale sino a provocare la fusione. L'effetto della temperatura sui metalli è strettamente relazionabile alla forza dei legami interatomici. Metalli con elevato modulo di elasticità hanno alti punti di fusione e basso coefficiente di dilatazione termica.

¹⁶ Il lavoro di rottura è l'energia che si deve consumare per far propagare una frattura attraverso un materiale.

¹⁷ Anche se nella zona di apice della fessura la concentrazione di sforzo è stata ridotta dalla formazione delle dislocazioni, non è stata, però, eliminata del tutto. In questa zona rimangono deformazioni di ogni sorta che rendono i legami più sensibili agli attacchi di solventi o composti chimici aggressivi.

Esistono due problemi principali che riguardano tutti i metalli: la metallurgia di estrazione, cioè la separazione del metallo dai suoi minerali; la metallurgia fisica, cioè il modo in cui rendere il metallo della durezza, resistenza e tenacità volute. Essendo il metallo puro di solito molto tenero, con la metallurgia fisica si cerca di intralciare il movimento delle dislocazioni nel metallo, fino al punto di renderlo più resistente senza che diventi fragile.

Il punto rimane quindi, sempre lo stesso, almeno per i metalli adoperati in ingegneria: cioè il controllo del movimento delle dislocazioni attraverso la modificazione delle dimensioni e della struttura dei cristalli metallici, aggiungendo altre sostanze o impurezze.

Applicando questo principio si è arrivati alla fabbricazione di leghe metalliche, a volte anche complesse, con prestazioni sempre più rispondenti ad impieghi sempre più diversificati.

10.3.1. L'acciaio

Quando si parla di metalli in genere, probabilmente il primo metallo che viene in mente è il ferro (Fe). Quando si pensa ai metalli adoperati nel campo dell'architettura e dell'industrial design, la mente corre dal ferro all'acciaio e, molte volte, con un uso improprio dei due termini. L'elemento chimico principale di entrambi i metalli è sempre il ferro; legando il ferro con determinate quantità di carbonio si ottengono gli acciai e la ghisa. Con *ferro* si indica di solito il metallo allo stato puro; la *ghisa* invece è una lega di ferro ad alto tenore di carbonio (tra il 2 e 4%), mentre per *acciaio* si intende una lega a basso contenuto di carbonio¹⁸.

I componenti dell'acciaio, cioè gli elementi che entrano in lega con il ferro in percentuali variabili tra lo 0 ed il 5%, sono: *carbonio* (C) e *silicio* (S) *manganese* (Mn), (dà modo all'acciaio di conservare la

¹⁸ L'acciaio è una lega di ferro e carbonio, con un tenore di carbonio compresi tra lo 0,09 e 1,7%.

saldabilità che altrimenti verrebbe compromessa con tenori di carbonio superiori allo 0,15%) che sono sempre presenti; *zolfo* e *fosforo* e l'*ossigeno* (libero o combinato) che sono impurità dannose¹⁹; *cromo*, *nicel*, *vanadio*, *tungsteno*, *molibdeno* che entrano negli acciai speciali²⁰. Gli acciai si suddividono in: acciai al carbonio, se sono costituiti principalmente da due soli elementi base (ferro e carbonio), e acciai speciali o legati se intervengono elementi additivi²¹.

Le caratteristiche meccaniche degli acciai comuni sono legate, come sappiamo, alla composizione chimica ed alla struttura micrografica: un acciaio con lo 0,1% di carbonio (sola ferrite) ha una modesta resistenza a trazione (30 Kg/mm²) ma una notevole malleabilità (allungamento a rottura 35%); un acciaio con lo 0,8% di carbonio (sola perlite) ha una notevole durezza ed una buona resistenza a trazione (80 Kg/mm²), ma una notevole fragilità e ridotta malleabilità (allungamento a rottura 8%).

Le proprietà dei diversi tipi di acciaio dipendono, oltre che dalla composizione chimica, anche dai metodi di preparazione. Infatti è possibile con opportuni trattamenti dotare l'acciaio di particolari caratteristiche richieste da usi particolari. Queste lavorazioni più specifiche

¹⁹ Il fosforo rende fragile l'acciaio, lo zolfo ne riduce la malleabilità.

²⁰ Compongono l'acciaio ricotto anche la *ferrite* (soluzione solida di carbonio nel ferro) componente dolce e malleabile, che forma cristalli ben definiti negli acciai a basso tenore di carbonio (0,1%). Aumentando il carbonio, dapprima sul bordo dei grani di ferrite, poi col crescere del tenore di carbonio fino all'0,85%, in tutta la struttura, compare la *perlite*, aggregato di ferrite e cementite (carburo di ferro), la quale accresce la durezza dell'acciaio.

²¹ I primi vengono classificati come acciai extra-dolci (tenore di carbonio inferiore allo 0,15%), dolci (dallo 0,15 allo 0,25%), semi-dolci (dallo 0,25 allo 0,50%), duri (dallo 0,50 allo 0,70%), extra-duri (oltre lo 0,70%). Dalla malleabilità e duttilità che caratterizzano i primi, usati per lamiere e chiodi, si passa man mano ad acciai di durezza intermedia, utilizzati per le rotaie, travi, elementi strutturali, agli acciai extra-duri utilizzati nella fabbricazione di parti di motori, utensili per officina, strumenti chirurgici.

sempre basate sul riscaldamento sono: *ricottura*²², *normalizzazione*²³, *rinvenimento*²⁴, *cementazione*²⁵ e *nitrurazione*²⁶. Infine ricordiamo la *tempra* (o *tempera*), alla quale possono essere sottoposti solo gli acciai medi e quelli ad alto contenuto di carbonio, che consiste nel raffreddare bruscamente l'acciaio portato precedentemente ad una temperatura superiore ad un dato punto critico, immergendolo in acqua, od olio, od altre sostanze atte a sottrargli rapidamente calore. L'acciaio così trattato acquista elevata resistenza meccanica e durezza superficiale.

Gli acciai in lega (o speciali) hanno proprietà dovute alla presenza di uno o più elementi in lega con il ferro oltre al carbonio. Le classi più importanti degli acciai speciali sono: gli acciai speciali per costruzioni; gli acciai in bassa lega ad alta robustezza; gli acciai inossidabili; gli acciai termoresistenti; gli acciai per strumenti; gli acciai per usi elettrici.

Gli acciai speciali²⁷ usati per la loro combinazione di durezza e duttilità, in parti strutturali a sezione larga di trattori, automobili, aerei, navi o ponti, sono più costosi degli acciai al carbonio e sono caratterizzati dalla presenza di elementi scelti per uno scopo specifico, in una

²² La *ricottura* è un trattamento dell'acciaio operato attraverso un riscaldamento a temperatura superiore all'intervallo critico, prolungata permanenza a tale temperatura, lento e controllato raffreddamento. Serve per addolcire e rendere più lavorabile il materiale, omogenizzare, eliminare le tensioni interne.

²³ La *normalizzazione* invece è un ciclo termico simile alla ricottura, ma con raffreddamento meno lento. Serve per affinare ed omogenizzare la struttura.

²⁴ Si ottiene una situazione intermedia rispetto alle due precedenti lavorazioni, riducendo la fragilità ma mantenendo una elevata durezza all'abrasione, mediante il *rinvenimento*, trattamento a temperatura compresa tra 160 e 300°C. Tale trattamento dà all'acciaio una colorazione caratteristica per ossidazione superficiale. Il colore paglia (230°C) indica una temperatura adatta per rasoi, il giallo (250°C) per lame di coltelli, il bruno (260°C) per forbici, il porpora (270°C) per accette, l'azzurro (290°C) per molle di orologi.

²⁵ Con il processo di *cementazione*, si può rendere molto dura la sola superficie di acciai extra-dolci o dolci. Esso consiste nel riscaldare il metallo a temperatura superiore a quella di *tempra* in presenza di carbonio, che viene assorbito da uno strato superficiale; questo può essere indurito con un successivo trattamento termico.

²⁶ Allo scopo di indurire lo strato superficiale si può adottare anche il processo di *nitrurazione* che consiste nel far assorbire dall'acciaio piccole quantità di azoto. In questo modo si ottiene una superficie durissima senza ricorrere alla *tempra*.

²⁷ O.A. Barra, *La conversione fototermica dell'energia solare*, Etas, Milano, 1981.

percentuale compresa tra 1 e 4%.

La funzione più importante degli elementi in lega è di controllare la profondità di penetrazione del processo di indurimento tramite il loro effetto sulle microstrutture dell'acciaio durante il trattamento termico. Tale profondità è funzione della qualità e del tipo di elementi presenti mentre la durezza superficiale è funzione della sola quantità di carbonio.

Gli acciai speciali per costruzioni nella classificazione AISI (American Iron and Steel Institute) sono identificati da un numero a 4 cifre, di cui la prima indica l'elemento predominante della lega (ad esempio 2 indica nichel, 3 acciaio al nichel-cromo, 6 acciaio al cromo-vanadio ecc.), la seconda la percentuale dell'elemento predominante e le ultime due, al solito, la percentuale di carbonio espressa in centesimi di unità percentuale. Ad esempio AISI 2340 è un acciaio con circa il 3% di nichel e lo 0,40% di carbonio. La classificazione degli acciai secondo l'UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione) che concorda con la classificazione della Commissione di Coordinamento della CECA prevede la suddivisione in due gruppi:

gruppo I: acciai caratterizzati in base alle caratteristiche meccaniche²⁸ ;

gruppo II: acciai caratterizzati in base alla composizione chimica²⁹ .

²⁸ Gruppo I

Sottogruppo I 1: simbolo iniziale Fe, seguito dal numero che esprime il carico di rottura a trazione (in Kg/mm²), oppure dalla lettera E e dal numero che esprime il carico unitario di snervamento (in Kg/mm²).

Sottogruppo I 2: simbolo iniziale Fe, seguito da una lettera indicante convenzionalmente l'impiego dell'acciaio (G, acciaio per getti; D, acciaio deformabile a freddo; ecc.), o da due o più cifre che specificano il grado di attitudine ad un certo impiego o il carico di rottura.

²⁹ Gruppo II

Sottogruppo II 11: simbolo iniziale C, seguito dal numero che esprime il contenuto di carbonio moltiplicato per 100.

Sottogruppo II 12: simbolo iniziale C, seguito da una lettera indicante l'impiego dell'acciaio (D, acciaio per verghella; G, acciaio per getti; ecc.) e dal numero che esprime il contenuto di carbonio moltiplicato per 100.

Sottogruppo II 21: numero che esprime il contenuto di carbonio moltiplicato per 100, seguito dai simboli degli elementi di lega che caratterizzano l'acciaio e da uno o più numeri di ciascuno ottenuto moltiplicando per un fattore il contenuto percentuale

Gli acciai a bassa lega ad alta robustezza sono identificati dal nome di un marchio (ad es. "Dynalloy"), non richiedono un trattamento termico né sono adatti ad esso, comprendono un gruppo di composti a relativamente basso costo, hanno una robustezza maggiore degli acciai al carbonio (ottenuta con i consueti mescolamenti di differenti elementi in lega), sono vantaggiosi in quanto evitano l'uso di sezioni alte di acciaio al carbonio. Gli acciai inossidabili, o di alta lega, presentano una superiore resistenza alla corrosione attribuita alla presenza del cromo come elemento aggiunto dominante della lega; il cromo aumenta inoltre la resistenza all'ossidazione e alla temperatura³⁰.

Gli acciai termoresistenti sono detti "superacciai" per la loro ancora maggiore qualità della lega e sono nati da uno sforzo per la ricerca di materiali non deformabili ad alte temperature sollecitato dalle applicazioni in campo aeronautico e spaziale. Gli acciai speciali per gli strumenti sono leghe di alta qualità che migliorano la profondità di indurimento e la resistenza meccanica degli acciai al carbonio con l'aggiunta di elementi quali il vanadio, il tungsteno e il molibdeno. In particolare Cr, Mo, W sono i principali additivi per acciai per strumenti quali stampi o cesoie che lavorino a contatto con metalli caldi. Leghe al 18% di W, 4% di Cr, 1% di Va, sono indicate per acciai per strumenti che lavorino in movimento ad alte velocità dove gli acciai a carbonio rapidamente si ammorbidirebbero per il calore sviluppato degli attriti. Gli acciai per usi elettrici infine sono acciai con una percentuale di si-

dell'elemento (fattore 4 per Co, Mn, Cr, Ni, Si; fattore 10 per Al, Cu, MO, Nb, V, Ti; fattore 100 per N, P, S; ecc.).

Sottogruppo II 22: simbolo iniziale X (che indica la presenza di un elemento di lega in una misura superiore al 5%), seguito dal numero che esprime il contenuto in carbonio moltiplicato per 100, dai simboli degli elementi di lega che caratterizzano l'acciaio, da uno o più numeri che esprimono la concentrazione di tali elementi.

In tutti i casi alle sigle possono essere premessi o posposti numeri o lettere che danno indicazioni particolari.

³⁰ Gli acciai inossidabili al cromo-nichel sono designati dalla serie 300 dell'AISI ed hanno un contenuto minimo del 16% di Cr e dell'8% di Ni. Il più diffuso è il 302 con lo 0,15% di C, 18% di Cr e 8% di Ni. La serie AISI 200 indica, rispetto alla precedente, gli acciai con apprezzabile presenza di Mn ed un basso contenuto di Ni. Il 202 contiene, ad esempio, lo 0,15% di C, il 7,5+10% di Mn, il 4+6% di Ni e il 17+19% di Cr. La serie AISI 400 indica acciai con sola aggiunta di Cr; ad esempio l'AISI 410 contiene lo 0,12% di C e il 14+18% di Cr che gli fornisce qualità superiori di resistenza alla corrosione.

licio dello 0,5+5%, che presentano alta permeabilità, alta resistenza elettrica e bassa isteresi: per tali proprietà generalmente sostituiscono il ferro in macchine elettriche.

10.3.2. *L'alluminio*

L'alluminio è un metallo di colore bianco argenteo, leggero, duttile e malleabile; fonde a circa 660°C e bolle a 2060°C circa. È sotto forma di silicati di alluminio come costituente di quasi tutte le rocce comuni particolarmente abbondanti in natura, (generalmente combinati a ossidi alcalini o all'ossido di calcio sotto forma di alluminosilicati, quali i feldspati, le miche, le argille, le zeoliti) rappresenta l'8,5% del peso della crosta terrestre.

Il minerale commerciale più importante per l'estrazione dell'alluminio è la bauxite: una roccia che può essere marrone, rosa, gialla o rossa, che può variare dalla consistenza di fango a quella di una roccia relativamente morbida, e che consiste in una combinazione chimica di ossido di Al (l'allumina Al_2O_3), acqua (ossido monoidrato $Al_2O_3 \cdot H_2O$ e triidrato $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ di Al) e (ossidi di ferro, silicio e titanio), di altre impurità.

L'alluminio ha una struttura cristallina cubica a facce centrate. La sua affinità con l'ossigeno, che non consente di trovarlo libero in natura e ne rende difficile e costoso l'ottenimento del metallo puro, è anche responsabile della sua grande stabilità e resistenza alla corrosione. Se esposto all'aria si ricopre rapidamente di una pellicola di ossido che ne protegge la superficie; essa è talmente sottile che risulta invisibile. L'ossido di alluminio è protettivo perchè la formazione di un primo strato di ossido impedisce una ulteriore ossidazione del materiale³¹.

È un buon conduttore di calore e di elettricità. La sua conducibilità elettrica è circa il 61% di quella del rame a fronte di una densità

³¹ In ambienti particolari come l'acqua di mare lo strato ossidato perde le sue caratteristiche isolanti.

di circa 1/3: per conduttori di pari peso e lunghezza, l'Al presenta una conducibilità pari al 200% circa di quella del rame, oltre che una maggiore robustezza meccanica³². L'alluminio non è particolarmente resistente agli alcali (fatta eccezione per l'ammoniaca), per la solubilità in essi del film di ossido protettivo; è viceversa del tutto stabile in ambienti neutri o in presenza di acidi quali l'acido acetico e il nitrico, che vengono usualmente conservati proprio in recipienti di questo materiale; è attaccato invece dall'acido cloridrico.

Le leghe a base di Al possono essere divise in due gruppi: leghe lavorate e leghe stampate. Il primo gruppo di leghe (disponibili in fogli, tubi e fili) può essere suddiviso in due sottogruppi, il primo composto da leghe non trattabili termicamente, consistenti in soluzioni solide omogenee caratterizzate da scarsa robustezza ed alta duttilità e tipicamente comprendente le leghe di Al-Mn. Il secondo composto da leghe che richiedono un trattamento termico per il raggiungimento delle proprietà ottimali e comprendente le leghe di Al-Mg-Si e Al-Cu-Mg (duralluminio).

Allo stato puro è molle (con un carico di rottura di 8 Kg/mm²) e molto malleabile; quando è alligato con altri elementi, presenti in percentuali variabili, assume le proprietà meccaniche che ne rendono conveniente l'impiego: queste leghe sono chiamate leghe leggere e, se il magnesio entra in misura consistente, ultraleggere. Le leghe di alluminio sono caratterizzate oltre che dalla notevole leggerezza, da un basso punto di fusione, da una facile lavorabilità e da una elevata resistenza alla corrosione e alla sollecitazione meccanica³³. I processi di trasformazione, come indicato al capitolo 5, sono basati sullo stampaggio per iniezione o getto, su lavorazioni plastiche come l'estrusione; il materiale può essere utilizzato allo stato grezzo o dopo trattamento termico.

I fogli commerciali di alluminio hanno una purezza del 99+99,3%.

³² Il rapporto tra le proprietà meccaniche di alcuni materiali si inverte con la temperatura in quanto la robustezza dell'alluminio temprato sono inferiori a quelle del rame temprato.

³³ Ricordiamo le leghe di alluminio e *silicio, magnesio, silicio-magnesio, manganese, magnesio-manganese, rame, rame-magnesio, zinco-rame-magnesio*.

Una maggior purezza (99,45% e 99,6%) ha un impiego per la realizzazione di conduttori elettrici; con un livello di purezza pari al 99,99% diventa possibile la realizzazione di condensatori elettrolitici ed in gioielleria.

L'alluminio può essere indurito per lavorazione a freddo (incrudimento) e viene rifinito in un'ampia varietà di modi, dalla verniciatura all'elettrodeposizione, dalla lucidatura chimica e elettrochimica alla sabbiatura. Generalmente i semilavorati di alluminio, utilizzati nell'industria delle costruzioni, vengono anodizzati in bagni galvanici (processi elettrolitici a caldo) per assumere lucentezza, levigatezza e colore rispondenti alle esigenze tecniche, estetiche e commerciali; l'elettrolita più usato è l'acido solforico diluito. Attualmente si sta diffondendo l'uso di metalli protetti con vernici epossidiche o poliuretatiche.

10.4. I polimeri

Benché le plastiche rispetto ai materiali metallici presentino in generale minori resistenze meccaniche ed il loro uso nella maggioranza dei casi debba essere limitato a moderate condizioni di temperatura e pressione, esse sono leggere, buoni isolanti termici ed elettrici, facili da fabbricare ed installare, prive di alti coefficienti di attrito e disponibili con un'ampia gamma di proprietà diverse di grande interesse in molteplici usi.

Le principali caratteristiche delle materie plastiche sono rappresentate da: basso peso specifico, cattiva conducibilità elettrica, cattiva conducibilità termica, scarsa capacità di riflettere la luce, flessibili, deformabili.

Le materie plastiche sono sostanze organiche sintetiche ad elevato peso molecolare. Contengono carbonio, come elemento fondamentale, oltre che idrogeno, ossigeno, azoto ed in alcuni casi anche elementi minerali quali cloro e fluoro.

Gli atomi di tali elementi danno luogo a molecole elementari (monomeri) che in particolari condizioni di temperatura, pressione o

agenti attivanti, si concatenano tra loro formando delle molecole giganti. Le molecole sono costituite da gruppi di pochi atomi tenuti uniti da forti legami, mentre sono deboli i legami tra molecola e molecola. Le molecole giganti delle materie plastiche, invece, sono composte da migliaia ed anche milioni di atomi. Tali macromolecole sono chiamate anche polimeri. Questi hanno una struttura che si presenta sotto forma di fili o catene centrali di atomi di carbonio che si giustappongono piuttosto liberamente. Possono essere lineari, come il polietilene, o a rete. Se i monomeri, che costituiscono il polimero, hanno la possibilità di collegarsi tra di loro su due posizioni per ogni monomero, possono ottenersi anche polimeri con struttura a reticolo tridimensionale.

I polimeri lineari, cioè costituiti da catene semplici, ripiegate su se stesse, possono essere "stirati" senza che le distanze interatomiche tra gli elementi vengano modificate sensibilmente. Un esempio di questo tipo è costituito dalle gomme che sottoposte anche a forze modeste danno forti allungamenti.

Vi sono casi in cui, invece, la macromolecola si presenta ramificata. In questo caso ne verrà influenzato il comportamento plastico. Per comprendere meglio questo effetto, basta pensare alla difficoltà che potremmo incontrare se tentassimo di sfilare dei rami d'albero da una catasta, rispetto allo stesso tentativo compiuto su una catasta di pali lisci.

Alcune molecole lineari hanno la possibilità di stabilire legami a ponte tra di loro. Questo naturalmente, fa diminuire la deformabilità plastica del polimero. Il processo di *vulcanizzazione* della gomma, non fa altro che favorire la formazione di tali legami trasversali tra le molecole di zolfo: dipenderà poi dal numero di questi legami, dipende dalla durezza della gomma ottenuta. Controllando questo numero si può ottimizzare la stabilità meccanica rispetto alla flessibilità o viceversa a seconda delle caratteristiche volute.

Nel caso di monomeri capaci di collegarsi con più di un monomero, si ottengono strutture più complesse che presentano ad alta temperatura, una rigidità maggiore di una semplicemente lineare conseguenza della formazione di reticoli tridimensionali. A causa anche delle dimensioni molto grandi delle molecole, che si muovono quindi con difficoltà, i polimeri hanno spesso una cristallinità non completa e comunque variabile. Esistono polimeri che al di sotto di una certa

temperatura, sono totalmente amorfi, con conseguente elevata rigidità simile a quella dei vetri, mentre al di sopra di una certa altra temperatura si comportano come liquidi molto viscosi.

Tra i materiali di base usati nella produzione delle plastiche vi sono il fenolo, l'urea, la formaldeide, il glicerolo, l'acetilene ed il petrolio.

Le materie plastiche possono dividersi in due grandi categorie: Le resine termoplastiche³⁴ e termoindurenti³⁵.

◦ I materiali termoindurenti sono caratterizzati da un procedimento di sintesi irreversibile che passa attraverso due stadi. In origine le molecole si organizzano secondo un reticolo tridimensionale incompleto, contenente anche molecole che non hanno reagito. In seguito, sotto l'azione del calore, le molecole non attivate reagiscono completando il reticolo spaziale, subendo una modificazione chimica irreversibile (reticolazione).

La produzione di oggetti con tali materiali termoindurenti è lenta a causa del tempo necessario per la polimerizzazione. Non è possibile riutilizzare il materiale di scarto proprio per la irreversibilità del processo di formazione del reticolo tridimensionale. Raffreddandosi, il materiale diventa infusibile ed insolubile; se nuovamente scaldato non rammollisce più e se la temperatura è elevata carbonizza. In caso di applicazioni che prevedono alte temperature, quindi, le resine termoindurenti sono decisamente più indicate.

◦ I materiali termoplastici presentano un processo irreversibile: rammolliscono quando vengono riscaldati e tornano nuovamente rigidi quando vengono raffreddati. In tali materiali l'unione delle molecole avviene con andamento lineare e non vi sono molecole che non hanno reagito. Il processo è caratterizzato da una fase che lo rende reversibile ed all'aumentare della temperatura le molecole possono reagire ad una pressione slittando le une sulle altre.

³⁴ Le termoplastiche commercialmente importanti sono: politene, ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene), PVC (polivinilcloruro), CAB (butirato-acetato di cellulosa), Saran (cloruro di vinilidene), Teflon o TFE (tetrafluoro-etilene), CFE (cloro-trifluoro-etilene), policarbonati, polipropilene, nylon.

³⁵ Le principali termoindurenti sono le resine fenoliche, ureiche e poliuretaniche.

Il raffreddamento della resina può avvenire rapidamente facilitando le lavorazioni. La formatura degli oggetti realizzati con questi materiali avviene attraverso processi di iniezione a caldo in stampi o di estrusione, senza far subire alla resina cambiamenti né chimici né strutturali, rendendo così possibile il riciclaggio degli scarti.

Quasi tutte le materie plastiche utilizzate nel campo dell'edilizia e dell'industrial design, appartengono alle termoindurenti od alle termoplastiche; fanno eccezione i poliesteri. Questi possono essere propriamente considerati termoplastici in quanto induriscono definitivamente e neanche termoindurenti perché l'indurimento è dovuto all'azione di speciali reagenti e non alla variazione di temperatura. I poliesteri comprendono vari tipi di resine dipendenti da acidi e alcoli impiegati e da eventuali agenti modificanti; si distinguono in: poliesteri saturi termoplastici; poliesteri saturi termoindurenti; poliesteri non saturi termoindurenti; poliesteri non saturi termoindurenti per copolimerizzazione.

Sono questi ultimi che vengono chiamati comunemente resine poliesteri, e che presentano una larga diffusione legata alla possibilità di permettere lo stampaggio senza pressione.

In generale, le plastiche vengono miscelate con cariche inerti, materie coloranti, di rinforzo, plastificanti, e solventi, allo scopo di migliorare le proprietà di resistenza termica, elettrica e strutturale, diminuendo al tempo stesso il consumo di resina. Come già indicato, le tecniche di lavorazione, maggiormente adottate sono le seguenti:

iniezione, utilizzabile esclusivamente per le termoplastiche, che allo stato fuso vengono introdotte in stampi che riproducono in negativo la forma da realizzare;

estrazione, utilizzata per termoplastiche, generalmente per la produzione di tubi, fili, profilati. Le resine fuse e disciolte con solventi, vengono spinte attraverso filiere opportunamente sagomate;

stampaggio, utilizzato per le plastiche termoindurenti. In questo procedimento il materiale plastico, ridotto in polvere o granulato, viene messo nella matrice di uno stampo; applicando una precompressione a caldo si fa aderire bene la plastica rammollita allo stampo. Riscaldando ulteriormente e aumentando la pressione fino a raggiungere i valori richiesti, si consente la completa polimerizzazione della resina.

Le principali caratteristiche che consentono di riconoscere i materiali ceramici rispetto agli altri, sono rappresentate da notevole durezza, resistenza in ambienti corrosivi (inerzia chimica), buon comportamento alle alte temperature (refrattarietà), fragilità.

I materiali ceramici possono essere ottenuti da una grande varietà di materie prime diverse (alcune delle quali non si trovano in natura) che comprendono argilla, vetri, vetri cristallizzati, cristalli monolitici, cristalli per laser, combustibili nucleari e protesi ossee. Fanno parte di questa gruppo tutti i materiali solidi che non sono né metalli, né polimeri anche se possono contenere come componenti o additivi, sostanze metalliche e polimeriche.

I materiali ceramici si rivelano particolarmente utili per la capacità di resistere al calore³⁶ e all'attacco degli agenti chimici. In genere non fondono a temperature inferiori a 1000°C in qualche caso la temperatura di fusione raggiunge 2000°C.

Questi materiali derivano le loro proprietà dall'intensità dei legami che mantengono nelle loro posizioni gli atomi costituenti e che rendono necessaria una notevole quantità di energia termica per essere allentati. Nel contempo questa proprietà ha anche un risvolto negativo, in quanto determina la fragilità caratteristica dei ceramici.

La forza dei legami impedisce che i piani degli atomi scorrano facilmente l'uno sull'altro (come in un metallo duttile); il materiale non riesce a deformarsi per alleggerire la sollecitazione e si mantiene mirabilmente integro sino al superamento di una certa soglia (carico di rottura) superata la quale i legami cedono improvvisamente. Il risultato, spesso catastrofico, è facilmente immaginabile³⁷. Come vedremo meglio in seguito, questa caratteristica rende un materiale ceramico molto sensibile alle minuscole imperfezioni della sua microstruttura che diventano punti di partenza di fessure. Sempre per questo motivo la

³⁶ Poiché molti materiali ceramici sono composti di ossidi metallici, una ulteriore ossidazione (sia per combustione sia per reazione chimica), è spesso impossibile se non ad alte temperature.

³⁷ Mentre i metalli hanno generalmente valori di tenacità a frattura superiori ai 40 megapascal (MPa) per radice quadrata di metro ed i metalli relativamente fragili come la ghisa hanno una tenacità a frattura di 20 Mpa per radice quadrata di metro, i materiali

resistenza a compressione è buona mentre non lo è quella a trazione o taglio. Infatti in presenza di sollecitazioni di compressione le due superfici di una potenziale fessura tendono a richiudersi, mentre in presenza di sollecitazioni di trazione o taglio le superfici tendono ad allontanarsi peggiorando la situazione.

Nessun materiale ceramico è lavorabile come i metalli o i polimeri per deformazione plastica a caldo, come è stato descritto in precedenza a proposito di stampaggio estrusione o laminazione. Nei processi di trasformazione, ad eccezione del vetro, si ricorre raramente alla fusione e, per la fabbricazione degli oggetti si usano polveri o granulati fini da compattare in stampi utilizzando tre tipi di formatura: formatura sotto pressione; formatura idroplastica; formatura per colaggio. La *sinterizzazione*, che risulta essere il metodo primario di fabbricazione è un processo che utilizza il calore per legare le particelle, ad una temperatura inferiore di quella di fusione del materiale. Durante questo processo di agglomerazione è necessario fare attenzione al fenomeno del *ritiro* nella fase dell'essiccazione e della cottura.

Illustriamo qui di seguito le caratteristiche di due tipi di materiali ceramici particolarmente rilevanti nell'industria delle costruzioni: le argille e i vetri. Il cemento, pur essendo un materiale ceramico è trattato nel gruppo dei materiali compositi, in quanto si è preferito sottolinearne i modi di impiego rispetto alle caratteristiche della materia prima.

10.5.1. Le argille

Come illustrato nel cap. 5 le argille sono tra le più antiche materie grezze ad essere usate nella formazione di materiali ceramici. Essendo idroplastiche possono essere facilmente plasmate nella forma desiderata. Quando sono essiccate, invece, hanno una resistenza sufficiente a renderne il loro impiego possibile anche nella fabbricazione di elementi strutturali. Tale resistenza aumenta notevolmente se dopo l'essiccazio-

ceramici tradizionali come anche il vetro, invece, hanno fattori di tenacità a frattura di 1 MPa per radice quadrata di metro.

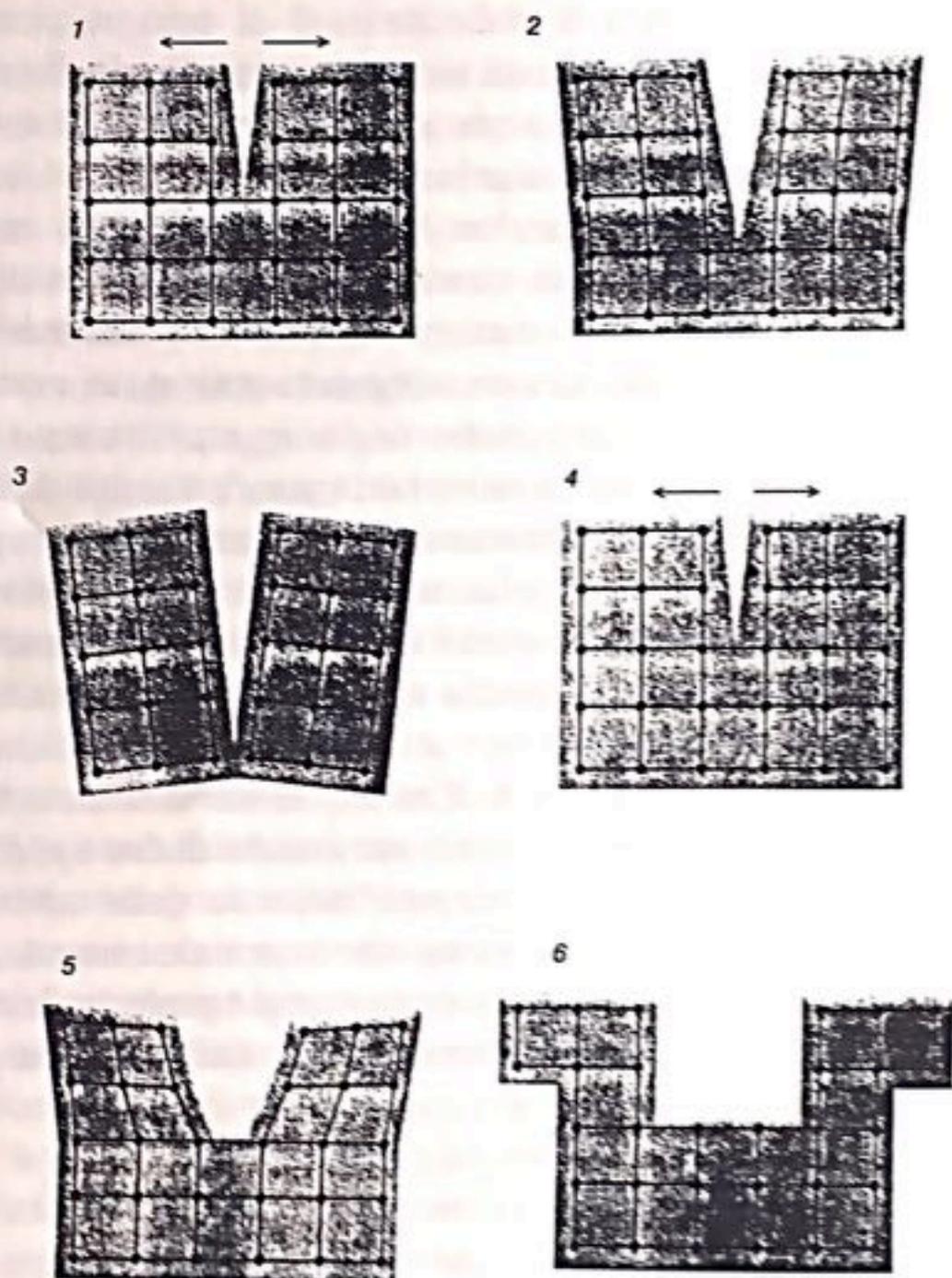


Figura 10.5.1.

Materiali fragili, come quelli ceramici, hanno una struttura cristallina che non si deforma facilmente. Quindi una piccola inclinatura (cricca), al cui apice si abbia una concentrazione di sforzo che superi la soglia alla quale i legami del materiale si spezzano, può rapidamente propagarsi nel materiale ceramico (disegno 1-3) determinandone la frattura. Una cricca analoga in un materiale duttile verrebbe allargata e smussata via via che i legami si deformano, si rompono e si ricostituiscono, permettendo ai piani atomici di scorrere l'uno sull'altro (disegno 4-6).

ne, l'oggetto di argilla viene cotto ad alta temperatura.

L'argilla è una roccia sedimentaria, poco coerente e di aspetto terroso, prodotto quasi sempre dall'alterazione di silicati alluminosi misti con detriti finissimi; tali rocce rappresentano i sedimenti più abbondanti sulla superficie terrestre (oltre il 70% del totale delle rocce sedimentarie).

Le argille possono essere considerate come particelle di terra di piccolissime dimensioni (minori di un micron). Tali particelle possono essere simili a lamelle bidimensionali, ognuna delle quali è praticamente come una grande molecola bidimensionale. La sovrapposizione di tali lamelle costituisce un corpo tridimensionale, all'interno del quale, tra gli interstizi delle lamelle possono infiltrarsi altre molecole di minori dimensioni, come le particelle d'acqua. Ed è proprio l'inclusione dell'acqua che conferisce all'argilla la plasticità. Essiccando l'argilla, cioè rimuovendo le molecole d'acqua, si creano dei legami di certa forza limitata tra le lamelle.

Il colore e la caratteristica delle argille variano a seconda delle impurezze e dei minerali in essa contenuti; ricordiamo: in primo luogo che la plasticità è direttamente proporzionale al rapporto tra la parte veramente argillosa e la parte sabbiosa (quarzo, carbonati, ossidi di ferro), in secondo luogo che la resistenza al calore (refrattarietà) è inversamente proporzionale alla presenza di ossidi di ferro.

Sono dette *grasse* quelle argille povere di scheletro sabbioso, untuose al tatto, molto plastiche e ad elevato coefficiente di ritiro alla cottura, *magre* quelle che presentano caratteristiche opposte. Vengono impiegate per la fabbricazione di laterizi se il contenuto di carbonato di calcio non supera il 25% e se lo scheletro sabbioso è in quantità inferiore al 5%. Quelle particolarmente pure, per la loro altissima temperatura di fusione (*argille refrattarie*), sono utilizzate per la costruzione di laterizi refrattari.

Trattando le argille a temperature di 500-550°C, queste si decompongono liberando molecole d'acqua che si forma durante il processo di decomposizione. Durante tale processo viene anche alterata la struttura stessa del materiale. Si generano delle strutture transitorie che modificandosi ulteriormente al termine lasciano una massa amorfa, quindi non cristallina.

10.5.2. Il vetro

Con un termine molto generale si definiscono "vetri", tutte le sostanze allo stato vetroso, cioè i prodotti inorganici amorfi ottenuti per fusione e raffreddamento che si solidificano senza cristallizzare.

Il vetro viene fuso e formato grazie alla deformazione viscosa che è fortemente dipendente dalla temperatura. In un liquido molto viscoso, nel processo di solidificazione, in particolare se è raffreddato velocemente, le molecole non potranno impacchettarsi nelle posizioni ottimali. Il materiale si solidificherà sotto forma di una massa dura ed irregolare di molecole. I metalli, come abbiamo visto, sono cristallini come la maggior parte delle rocce che hanno avuto il tempo necessario per raffreddarsi.

Esistono vetri di composizione diversissima. I più noti dal punto di vista industriale sono i vetri silicatici; cioè i vetri il cui costituente principale è la silice. La silice ha la proprietà di poter esistere allo stato amorfo, vetroso e di conservare questo stato anche dopo il processo di fusione.

La maggioranza dei vetri di uso commerciale è costituita da silicati alcalini contenente anche ossidi di metalli. Gli elementi primari sono: silice, costituita da sabbia molto pura a basso contenuto di ferro (meno dello 0,05%); carbonato di sodio anidro; calcare. La composizione base del vetro (silice, calce e soda) può essere variata notevolmente allo scopo di ottenere requisiti particolari. Il vetro *pirex* è senza soda e contiene borosilicati per aumentare la resistenza alle soluzioni alcaline ed agli sbalzi di temperatura³⁸. Nelle composizioni di tutti i principali vetri figurano ossidi di metalli alcalini in funzione di fondenti. I silicati alcalini sono pertanto dotati di scarsa resistenza chimica e meccanica, perciò nella composizione figurano sempre ossidi di metalli alcalino terrosi in funzione di stabilizzanti. I vetri più comuni sono di tipo sodico-calcico.

Come tutte le altre sostanze, durante il raffreddamento successivo alla formatura, i vetri si raffreddano dall'esterno verso l'interno, ne

³⁸ Il boro abbassa infatti notevolmente il coefficiente di dilatazione termica, mentre il piombo aumenta la rifrangenza, la brillantezza e la fusibilità.

consegue che la superficie esterna si solidifica prima ed impedisce alla massa interna di contrarsi durante il raffreddamento, dando così origine ad uno stato di tensione interna. Per gli oggetti comuni si ovvia a questo inconveniente con la ricottura, che consiste nel riscaldare il vetro fino ad una temperatura di poco al di sotto del punto di rammollimento, e raffreddandolo molto lentamente. Nei vetri temprati invece si trae vantaggio da questo fenomeno raffreddando rapidamente i pezzi, colpendo il vetro ancora caldo con getti d'aria in modo da portare al massimo lo stato di tensione interna³⁹.

Durante il raffreddamento inizialmente la sua faccia esterna si contrae perchè indurisce mentre la faccia interna, ancora molle cede. Successivamente, sia l'esterno che l'interno si comportano in maniera elastica e le loro contrazioni vanno fuori fase. Quando il vetro ha completato il raffreddamento, l'esterno risulterà in compressione e l'interno in trazione. La superficie esterna resta sottoposta a notevoli sollecitazioni di compressione con conseguente aumento della resistenza agli urti. Un urto particolarmente violento però, anche in un solo

³⁹ Quando si considerano le condizioni per cui un liquido può formare un vetro, bisogna considerare che la facilità con cui gli atomi formano il cristallo è in grande misura conseguenza della "forma" regolare dell'atomo. Cioè ci sono alcune molecole che non formano cristalli a causa della loro geometria irregolare. Ciò non significa, però, che se gli atomi e le molecole sono geometricamente regolari, automaticamente sia possibile la cristallizzazione. Infatti, affinché un cristallo possa crescere, occorre un nucleo cristallino. Le impurità, che sono quasi sempre presenti, agiscono come nuclei e favoriscono la cristallizzazione. Ma perché il cristallo possa crescere, è necessario che la temperatura del liquido sia appena al di sotto della temperatura di fusione cristallina. Un'elevata velocità di raffreddamento tende invece a minimizzare la crescita del cristallo.

Nella fabbricazione del vetro commerciale, la materia prima costituita dall'ossido di silicio, fonde producendo un liquido molto viscoso che sta a significare che le molecole si muovono molto lentamente. Ciò comporta che se nel composto fuso sono presenti nuclei di cristallizzazione, la velocità di crescita è comunque molto bassa.

In ogni caso però, non si può escludere che si formi una piccola quantità di cristallo, anche in vetri molto puri, in quanto dei nuclei possono formarsi accidentalmente per configurazioni molecolari favorevoli. In questo caso, cioè quando il vetro comincia a cristallizzarsi, tale processo si chiama devettrificazione. All'estendersi della devettrificazione, il vetro acquista un aspetto traslucido causato dalla diffusione della luce sulle facce dei piccoli cristalli.

punto, determina una rottura dell'equilibrio instabile che causa la frantumazione dell'oggetto in piccolissimi frammenti⁴⁰.

I vetri di sicurezza - detti anche stratificati - risalgono ad un brevetto del 1905 dell'inglese J. Wood⁴¹. I vetri stratificati sono molto resistenti all'urto e, in caso di rottura, vengono comunque mantenuti uniti dalla plastica e mantengono la loro trasparenza. Aumentando il numero degli strati alternati di vetro e plastica fino ad ottenere spessori anche di 6 cm, si ottengono vetri corazzati capaci di resistere anche a colpi di armi da fuoco.

Al fine dell'incremento della tenacità, l'equivalente del meccanismo delle dislocazioni nei materiali metallici è, per quanto riguarda i materiali non metallici, il meccanismo di arresto delle fessure. Naturalmente è di grande importanza anche ogni accorgimento che tenda a ridurre la concentrazione di sforzo in determinati punti come appunto, all'apice di una fessura. Per far ciò si può ad esempio aumentare il raggio di curvatura dell'apice della fessura. Infatti spesso si possono vedere in oggetti di vetro dei fori fatti all'estremità delle fessure nella speranza di impedire alla fessura⁴² stessa di propagarsi.

Tra i vetri speciali sono particolarmente importanti i vetri ottici. Questi si differenziano dagli altri per la lentezza e l'accuratezza della lavorazione e per la precisione nel dosaggio delle materie prime (per esempio deve essere assolutamente evitata la presenza di tracce di ferro). Tutti i vetri ottici vengono raffreddati con estrema lentezza e lavorati esclusivamente a freddo con operazioni di taglio, molatura e lucidatura con smerigli finissimi.

⁴⁰ Le deformazioni del vetro - come per la maggior parte degli altri solidi trasparenti - diventano visibili in luce polarizzata. Infatti per studiare le sollecitazioni interne di strutture compresse massicce, ad esempio, se ne realizza un modello in plexiglass e lo si fotografa illuminandolo con luce polarizzata. Poiché la luce del sole diffusa dalla volta celeste è parzialmente polarizzata quando viene riflessa da superfici non metalliche, spesso sui parabrezza delle automobili, che sono trattati con questo sistema, diventano visibili le tracce dei getti d'aria adoperati per il raffreddamento del vetro. Naturalmente adoperando lenti polarizzate tale effetto si accentua notevolmente.

⁴¹ Originariamente erano costituiti da due lastre di vetro unite da un foglio di celluloido, in seguito (1943) il foglio di celluloido fu sostituito con uno di polivinil-acetale ed infine di polivinil-butirale (1950). Tali resine sono plastiche autosaldanti e resistenti alla luce.

⁴² Come abbiamo visto la concentrazione di sforzo è tanto maggiore quanto l'apice della fessura è acuto.

10.6. I materiali compositi

I materiali compositi presentano la microstruttura o un regime interno degli sforzi predisposti in modo ottimale rispetto all'utilizzazione prevista. Oltre ai materiali compositi naturali come il legno (materiale biologico), esistono materiali "progettati" componendo appunto materiali diversi in un unico nuovo materiale: ricordiamo il calcestruzzo, (materiale agglomerato) il cemento armato (materiale rinforzato) e i materiali modificati superficialmente al fine di modificare le prestazioni del materiale nel suo complesso.

Le combinazioni di materiali permettono di ottenere un materiale con caratteristiche non raggiungibili dai materiali singoli. Ad esempio, materiali poco resistenti e fragili diventano più resistenti e più tenaci con l'aggiunta di piccole quantità di fibre. Il motivo è che le fessure vengono arrestate o deviate dalla presenza di elementi rinforzanti che in funzione della geometria possono essere: particelle, fibre lunghe, fibre corte. Le fibre da sole hanno uno scarso valore strutturale, la cosa cambia però se le immergiamo in una matrice costituita da un altro materiale. La matrice agendo come un adesivo, lega le fibre e conferisce maggiore resistenza al materiale stesso.

Quando un fascio di fibre senza matrice è sottoposto ad una sollecitazione a tal punto che una delle fibre si rompe, quest'ultima diventa incapace di sopportare qualsiasi carico e trasferisce lo sforzo sopportato alle rimanenti fibre intatte, portandole più vicino alla rottura. Quando invece le fibre sono immerse in una matrice, l'eventuale rottura di una fibra non ne blocca la sua funzione meccanica. Questo perché in genere i materiali costituenti le matrici essendo duttili conferiscono tenacità al composito; la sollecitazione sulle altre fibre intatte subisce un aumento inferiore a quello che si avrebbe in assenza della matrice permettendo al materiale di migliorare la resistenza meccanica.

Tra i materiali compositi ne troviamo alcuni che possiamo definire biologici (legno, cuoio) altri materiali agglomerati (calcestruzzo, pietra), altri ancora materiali rinforzati (cemento armato, vetroresina), altri infine materiali modificati superficialmente (rivestimenti, verniciatura, smaltatura, zincatura, elettrodeposizione, deposizione in fase vapore, vetrificazione, anodizzazione, abrasione).

10.6.1. Il legno

Il legno è un materiale composito costituito da polimeri naturali; tra questi il più importante è la cellulosa. La cellulosa è la componente strutturale di tutte le sostanze vegetali e rappresenta in media circa un terzo del peso di tutta la vegetazione. Benché le piante siano molto differenti tra di loro, per quanto concerne la forma e l'aspetto generale, la molecola di cellulosa chimicamente è la stessa per tutte.

Tutte le piante evolute possiedono delle cellule cave, allungate, a forma di fuso, le cui pareti sono costituite per la maggior parte da cellulosa. Questi fusi cavi sono in pratica le fibre che conferiscono la resistenza ai carichi. La struttura visibile del legno non è altro che la stratificazione di queste cellule, che ogni anno costituiscono il nuovo strato di materiale che si deposita in anelli concentrici su tutta la circonferenza, sotto la corteccia e vicino alla superficie. Tale deposito costituisce la crescita annuale della pianta, primaverile ed estiva. Le cellule biologiche primaverili sono più grandi ma hanno pareti più sottili di quelle estive.

Le molecole di cellulosa formano dei filamenti molto lunghi più o meno cristallini. La maggior parte del volume interno del legno è formato da spazio vuoto, poiché le pareti delle cellule sono abbastanza sottili e di forma spesso approssimativamente rettangolare. Ciò contribuisce alla caratteristica del legno di essere un materiale igroscopico, cioè in grado di impregnarsi di acqua in funzione dell'umidità dell'atmosfera circostante.

Gli alberi crescono di svariate forme e dimensioni, ma il diverso comportamento di legni differenti è dovuto soprattutto alla differenza di densità, che può variare dagli $0,15 \text{ g/cm}^3$ del legno di balsa agli $1,3 \text{ g/cm}^3$ del legno di guaiaco. A parte certe piccole differenze nella disposizione geometrica delle fibre, da un punto di vista strutturale, tutti i legni possono essere considerati come dei fasci di tubi paralleli. Le grosse differenze di densità che abbiamo indicato prima si giustificano con lo spessore variabile delle pareti cellulari.

Il comportamento del materiale dipendente dal tipo di essenza arborea da cui è ricavato, condiziona modi di utilizzazione e processo produttivo. Tipo e disposizione delle nervature, unitamente al colore, sono gli elementi principali nella determinazione della qualità estetica

o decorativa del materiale e quindi di conseguenza, del prezzo mediamente corrisposto.

Il legno derivato da piante appartenenti alle Gimnosperme, classe delle conifere (abete, pino, cedro, larice) hanno una struttura omogenea e compatta in quanto i tessuti non sono differenziati tra conduttori e meccanici e le cellule parenchimatiche (riserve di amidi e grassi utilizzate dalla pianta d'inverno e rifornite d'estate) sono poche. Inoltre le conifere sono piante resinose e il materiale da esse ottenuto risulta notevolmente stabile e resistente agli agenti atmosferici. La resina funziona come idrorepellente (fattore di impermeabilizzazione), producendo una riduzione sia dell'assorbimento di acqua e vapore nei periodi umidi, sia dell'evaporazione nei periodi secchi. Le variazioni di umidità nel legno avvengono in misura diversa tra esterno ed interno e tra le diverse facce, questo provoca, anche dopo molti anni, una dilatazione variabile delle fibre (direttamente proporzionale all'escursione del livello di umidità) all'interno di uno stesso pezzo.

Il legno derivato dalle dicotiledoni (faggio, frassino, rovere, noce, ciliegio, olmo, olivo, castagno) ha nervature più sottili, ravvicinate e variegata che gli conferiscono una maggiore durezza e compattezza. I legni più duri e compatti crescono nelle regioni tropicali e superano ampiamente in stabilità e resistenza le conifere (mogano, ebano, palissandro).

Una delle differenze tra i due gruppi di piante (gimnosperme e dicotiledoni) riguarda la velocità di crescita e riproduzione degli alberi da cui dipendono la disponibilità di materiale e il prezzo. In generale le conifere hanno un ritmo di accrescimento abbastanza rapido, mentre i legni più duri presentano il ciclo di maturazione più lungo. Tra gli altri, faggio e castagno hanno tempi di crescita relativamente brevi, olmo, rovere, noce e ciliegio relativamente lunghi, molto lunghi l'olivo. Quando viene forzato il ritmo di crescita delle piante attraverso i nuovi sistemi di coltivazione, il legno prodotto, indipendentemente dall'essenza prescelta, risulta meno compatto e stabile.

È evidente che più il legno è pregiato e più tende ad essere utilizzato per rivestimento (decorazione) in spessori il più possibile contenuti. Viceversa dove la funzione è strutturale e servono spessori rilevanti, oppure il materiale può essere rivestito, sono utilizzati con maggior frequenza legni economici e di più facile lavorabilità. In

questo caso si dà la preferenza a morbidezza e stabilità del legname proveniente dalle conifere.

Data l'anisotropia strutturale del legno, ne consegue una anisotropia anche delle proprietà. In particolare le variazioni dimensionali che si verificano in seguito a fluttuazioni di temperatura ed umidità o del modo di applicazione del carico, sono decisamente anisotrope. La dilatazione termica è maggiore di circa il 40% in direzione tangenziale, in riferimento a quella radiale, che a sua volta è da 6 a 4 volte maggiore di quella in direzione longitudinale. Anche il ritiro è anisotropo; infatti le maggiori variazioni si hanno in direzione tangenziale, mentre quelle in direzione longitudinale sono trascurabili e quelle in direzione radiale hanno valori intermedi tra i valori delle altre due. Per quanto concerne il carico di rottura si verificano ulteriori anisotropie; infatti il valore del carico di rottura longitudinale è di 20 volte superiore di quello radiale. Ciò è dovuto alla posizione delle cellule allungate rispetto al senso di propagazione della frattura.

Le proprietà meccaniche del legno sono assimilabili a quelle di un fascio di tubi o fibre. È proprio la struttura fibrosa che creando delle superfici di separazione, costituisce un efficace sistema di arresto all'avanzamento di una fessura. Ciò conferisce ad una trave in legno la caratteristica resistenza a sforzi di flessione se caricata trasversalmente alle fibre⁴³. Al contrario se si applica un carico che determina, trasversalmente alle fibre, una sollecitazione di trazione o di compressione il legno cede facilmente. Infatti contro vena, è facile separare o schiacciare il fascio di fibre. Nel senso delle fibre o della venatura, il legno è resistente alla trazione ma anche in questo caso è poco resistente alla compressione. La resistenza alla flessione citata prima, infatti non è dovuta ad una equivalente resistenza alle due componenti della flessione: la trazione e la compressione. Lo schiacciamento graduale delle fibre del lato della trave sollecitato a compressione provoca un trasferimento del carico sul lato in trazione.

La natura avrebbe certamente potuto unire le molecole di cellulosa delle fibre del legno anche lateralmente con legami chimici primari ottenendo un materiale isotropo; cioè con le stesse caratteristiche di resistenza in tutte le direzioni. Ciò, però, come sappiamo avrebbe

⁴³ Uno sforzo di flessione applicato trasversalmente ad una trave, genera delle sollecitazioni di trazione e di compressione in direzione longitudinale della trave stessa.

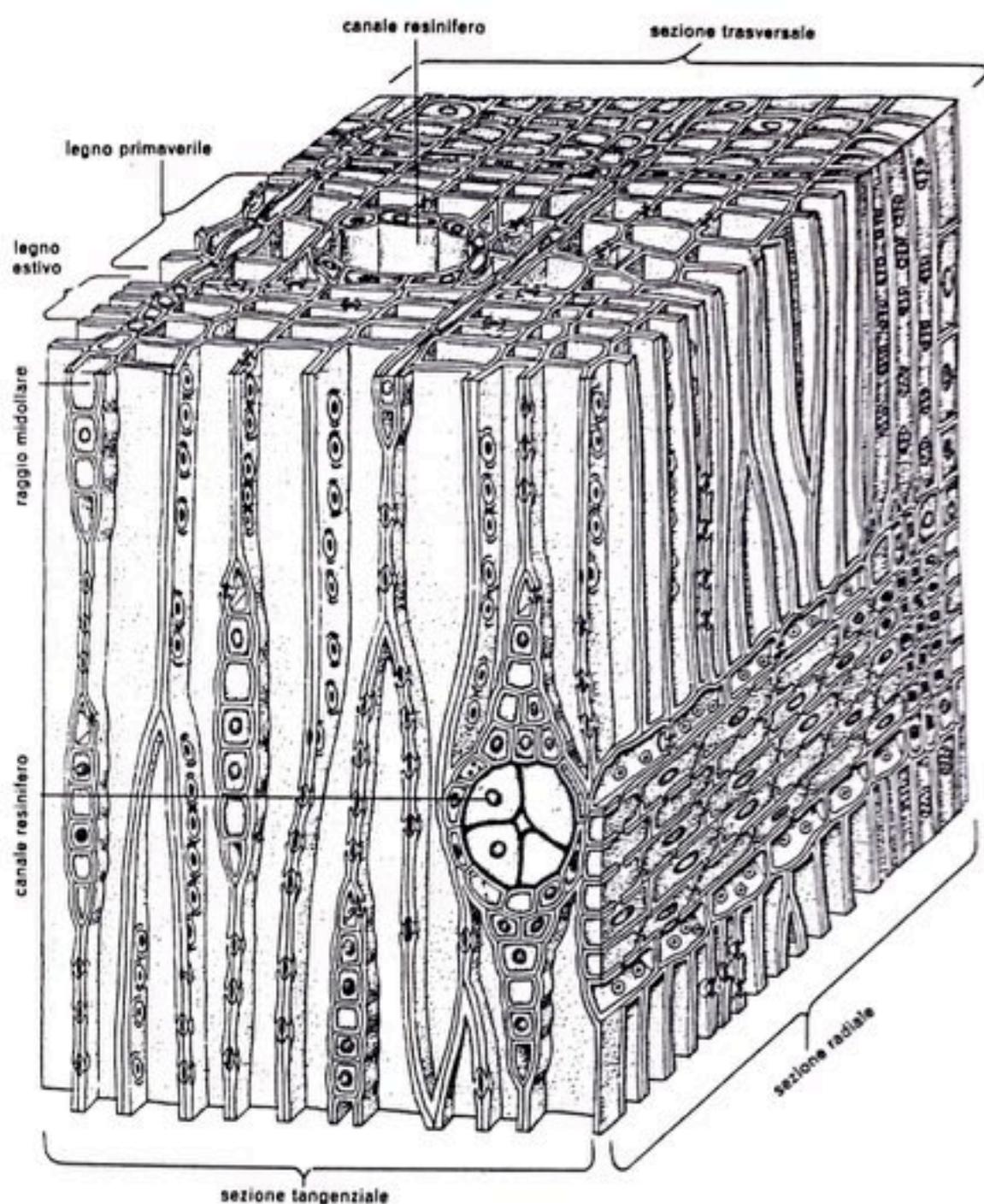


Figura 10.6.1.

Rappresentazione dell'aspetto microscopico del legno. Nella sezione tangenziale è possibile valutare lo spessore e l'altezza dei raggi midollari; nella sezione trasversale è evidente la successione del legno primaverile e estivo; nella sezione radiale si nota un raggio midollare parallelo al piano di sezione.

paradossalmente reso il materiale meno resistente e tenace. Infatti è proprio l'esistenza di superfici di separazione o piani a bassa resistenza, paralleli alla direzione di massima resistenza che rendono un materiale efficiente da questo punto di vista.

Il legno quindi è un materiale con buone proprietà meccaniche, ma con uno svantaggio non trascurabile: la vulnerabilità all'umidità. Riguardo a ciò, il problema maggiore, non è tanto l'aumento di peso del materiale se immerso in ambiente carico di umidità; bensì il fenomeno del rigonfiamento e del ritiro. La anisotropia del legno rende i movimenti, che si verificano in caso di ritiro o di rigonfiamento, trascurabili nella direzione della venatura, e elevati in direzione trasversale.

Se consideriamo i valori estremi dell'umidità relativa dell'aria ambiente⁴⁴, le dimensioni laterali di una tavola di legno possono variare dal 5 al 10%. Impedire fisicamente al legno di restringersi, servirebbe solamente a farlo spaccare poiché esso non ha nessuna resistenza alla trazione esercitata ortogonalmente alla venatura. Il principale metodo per ridurre il pericolo di deformazioni indesiderate consiste nel portare il legno ad un tasso di umidità il più possibile in equilibrio con quello dell'ambiente nel quale il legno verrà collocato⁴⁵. Tale metodo chiamato stagionatura del legno, non è altro che un'operazione di essiccazione⁴⁶.

⁴⁴ I valori dell'umidità relativa dell'aria possono andare da un minimo del 30% (5% in casi estremi) dei climi caldi asciutti ad un massimo del 100%, oltre il quale l'umidità si manifesta condensandosi in acqua.

⁴⁵ Per uso esterno, il tasso di umidità dovrebbe essere del 20%, per un ambiente interno non riscaldato il 15% e per un ambiente riscaldato 8 o 10%.

⁴⁶ Dato che le cellule sono tubi chiusi a forma di fuso, non è molto facile far uscire l'acqua contenuta in esse, se non per diffusione attraverso le pareti delle cellule, a partire da quelle più interne attraverso le pareti di quelle esterne. Per ottenere questo è necessario mantenere un gradiente di umidità. Più tale gradiente è alto più rapidamente verrà eliminata l'umidità. Ma se il gradiente è troppo elevato, l'esterno del legno sarà notevolmente più asciutto dell'interno con conseguente danneggiamento del materiale. Il tasso di umidità trattenuto dalle pareti cellulari può arrivare sino ad un massimo del 25% della quantità d'acqua totale. Oltre tale percentuale, le pareti cellulari non possono assorbire altra acqua e l'umidità addizionale si trova come acqua libera all'interno delle cavità. È da notare che fino al *punto di saturazione di fibra* le cavità non contengono acqua.

10.6.2. La pietra

La pietra da costruzione viene estratta dalle rocce che sono parte integrante della crosta terrestre e sono formate da un aggregato di minerali diversi all'interno di una massa indipendente e non omogenea. Le principali caratteristiche delle pietre derivano oltre che dagli elementi presenti nell'aggregato, dai modi di formazione del deposito roccioso (rocce sedimentarie, eruttive effusive e intrusive, metamorfiche).

Rocce sedimentarie (calcari, silici, quarziti, tufi) traggono origine dall'accumulo di materiale proveniente dal disfacimento di altre rocce e da depositi di natura organica. Per fornire sistematicamente il quadro della varietà delle prestazioni fornite da questo tipo di pietre ricordiamo: i *calcari*, costituiti da carbonato di calcio, feldspati e sostanze bituminose. Possono avere origine diversa sia chimica per precipitazione diretta, sia organica per deposizione, sia infine per metamorfismo delle forme precedenti. Da quest'ultimo processo derivano i marmi che presentano una tessitura compatta e, talvolta, una struttura cristallina. Sono facili da lavorare, lucidabili e segabili in lastre e blocchi.

Un particolare tipo di pietra calcarea è rappresentata dal *travertino*, roccia calcarea a struttura spugnosa. È un composto calcareo di origine chimica; si forma in presenza di acque agitate e di vegetazione (ambienti tali da favorire la precipitazione del carbonato di calcio insolubile) e si presentano come un materiale compatto molto poroso per la presenza di cavità dovute alla putrefazione dei resti vegetali inclusi nella roccia⁴⁷.

Tutte le variazioni dimensionali e meccaniche del legno dovute all'umidità avvengono al di sotto del punto di saturazione di fibra, cioè per tassi di umidità compresi tra lo 0 ed il 25%. Oltre questo punto, non si ha nessun rigonfiamento ulteriore e l'acqua assorbita non fa altro che incrementare il peso.

⁴⁷ Ricordiamo inoltre
le *silici*: costituite da quarzo amorfo. Se a struttura cavernosa sono leggere e resistenti, altrimenti sono fragili e poco resistenti. Vengono usate in lastre per rivestimento e come pietrisco per calcestruzzi;
le *quarziti*: costituite da granuli di silice, sono molto compatte, vengono usate in lastre per rivestimento e da pavimento;
le *arenarie*: sono costituite da grani silicei e frammenti minuti a spigoli vivi uniti da

Da un secondo processo di morfogenesi derivano le rocce eruttive, che sono originate dal raffreddamento di magmi fluidi già ad altissima temperatura. Sono di difficile lavorazione, ma sono dotate di buona levigabilità e lucidabilità e caratterizzate da una struttura granulare più o meno fine.

Un primo tipo di roccia eruttiva è rappresentato dai *graniti*: sono compatti, massicci ed adatti a sostenere elevati carichi di compressione. Vengono generalmente usati sia per pavimentazioni sia per rivestimenti. Anche i *porfidi* e i *basalti* sono molto compatti e duri. Difficili da lavorare, vengono usati in blocchetti o lastre per le pavimentazioni, in particolare per quelle stradali.

Il *tufò* è un altro tipo di roccia eruttiva; si forma in prevalenza per deposizione di ceneri vulcaniche trasportate per mezzo fluido (aria o acqua) e si presenta come materiale abbastanza resistente, relativamente duro, facilmente lavorabile.

Infine le rocce metamorfiche sono rocce originate sia da rocce eruttive che sedimentarie, le quali a causa di forti pressioni ed alte temperature hanno assunto una nuova struttura cristallina. Tale struttura che si chiama scistosa è caratterizzata dalla divisibilità in lastre sottili⁴⁸.

L'insieme dei materiali lapidei fornisce una gamma piuttosto ampia di scelta delle prestazioni (strutturali, funzionali, estetiche) e rispetto ai processi di trasformazione sono al contrario piuttosto rigidi e basati su una sola lavorazione: maggiore durezza dell'utensile rispetto al materiale.

Nella prima fase di estrazione del materiale per il distacco dalle pareti rocciose si utilizza la capacità di abrasione della sabbia che

cemento di vario tipo. Sono facilmente lavorabili come pietra da taglio, grezza e conca; le *rocce solfatate*: sono tenere non adatte per impieghi all'esterno (gesso); i *tufi calcarei*: hanno struttura spugnosa e cavernosa come il travertino. Sono leggeri e si tagliano con facilità.

⁴⁸ Fanno parte di questo tipo di pietre: *gneiss*: sono come i graniti ma con una struttura scistosa e cristallizzata. Sono ottime pietre da taglio; *filladi*: derivano dalla trasformazione metamorfica delle argille (lavagna, ardesia). Si possono tagliare in strati molto sottili, resistono bene agli agenti atmosferici; *scisti cristallini*: hanno piani di sfaldamento preferenziali; utilizzati come rivestimento, coperture, inerti per calcestruzzi, per la fabbricazione di mattoni refrattari.

trasportata da un filo metallico rotante, incide progressivamente la giacitura naturale della pietra. La parete incisa viene ribaltata verso il basso per distacco dei blocchi che vengono sommariamente sbazzati in cava e successivamente trasportati nei laboratori per le trasformazioni finali.

Rispetto alla segabilità le pietre si dividono in: *tenere* (tufi calcarei ed alcuni travertini) se segabili con seghe a denti; *semidure* (calcari e arenarie), se segabili con lame lisce ed ausilio di sabbie; *dure* (calcari saccaroidi, serpentini, arenarie forti), se segabili con lame lisce e l'aggiunta di sabbia quarzosa; *durissime* (porfidi quarziferi, graniti, diaspri) se segabili solo con l'ausilio di lame speciali o polveri di diamantifere industriali. La durezza è tanto maggiore quanto più elevato è il suo peso specifico, cioè è proporzionale al grado di compattezza.

10.6.3. Il calcestruzzo

Il calcestruzzo è un impasto formato di un agglomerante (calce o cemento) misto a materiali inerti (sabbia e ghiaia) che indurisce con la presa. I calcestruzzi di calce e pozzolana, usati nell'architettura antica, sono in disuso; oggi il calcestruzzo più utilizzato è quello cementizio⁴⁹. La ghiaia e la sabbia devono corrispondere a determinati requisiti di grossezza e di grana, ed essere perfettamente pulite.

Le caratteristiche fisiche e meccaniche del calcestruzzo dipendono in primo luogo dal tipo, dalla qualità e dalla percentuale dei diversi componenti oltre che da fattori esterni quali la temperatura ambiente, l'umidità e la costipazione del materiale (generalmente ottenuta per vibratura).

⁴⁹ Le dosature medie per calcestruzzi sono le seguenti: a) calcestruzzi per getti di fondazioni o muri: sabbia: 0,4 m³, ghiaia: 0,8 m³, cemento 2-3 q.; b) calcestruzzi per strutture di cemento armato: sabbia: 0,4 m³, ghiaia: 0,8 m³, cemento 3-4 q. La dosatura è correntemente definita in peso di legante e in volume di sabbia e ghiaia, il tutto riferito ad un metro cubo di calcestruzzo.

Prevalentemente però incide la qualità della pasta di cemento, essendo questa il componente più debole (la ghiaia è certamente più resistente del cemento). La pasta di cemento e acqua si colloca entro gli interstizi e i pori della sabbia e della ghiaia, il cemento si idrata e funge da legante. Con un rapporto basso tra acqua e cemento si ottiene una buona massa di cemento idrato e una quantità non troppo alta di acqua negli interstizi della ghiaia, vale a dire che un calcestruzzo con un basso rapporto acqua/cemento è più resistente di uno con un alto valore di tale rapporto.

Il legante usualmente è una mistura di cemento-Portland, in polvere, ed acqua: il primo sviluppa la sua robustezza a mezzo dell'idratazione e da polvere sciolta diventa materiale duro e fragile. Quando il cemento-Portland reagisce con l'acqua parte dell'acqua si combina chimicamente, ma la parte rimanente evapora causando nell'essiccamento il ritiro del cemento solidificato. Per ovviare a questo svantaggio del ritiro per ridurre i costi, e per migliorare le caratteristiche meccaniche, aggregati inerti vengono usati a scopi riempitivi, fino a formare circa il 75% del volume totale.

Il cemento-Portland è essenzialmente costituito da due dei più abbondanti elementi sulla crosta terrestre, il silicio e il calcio. Per prepararlo, un materiale contenente Ca (pietra calcarea, conchiglie o gesso) ed un materiale di tipo argilloso (pietre argillose o ardesia) vengono finemente macinati, accuratamente proporzionati e portati in un forno rotante alla temperatura di 1680°C dove i componenti argillosi fondono e il calcare CaCO_3 si decompone in anidride carbonica CO_2 e ossido di calcio CaO . Quest'ultimo unendosi con i precedenti materiali argillosi fusi, forma i silicati di calcio che costituiscono raffreddati e macinati il 75% del cemento-Portland; il rimanente 25% è costituito da composti di Al e Fe. Nella reazione del cemento-Portland con l'acqua per la formazione del cemento, i silicati tricalcici producono alta robustezza e alto calore di idratazione, mentre i silicati bicalcici sono più lenti a solidificare e producono un minore calore di idratazione.

Gli aggregati inerti che vengono legati in una massa conglomerata dall'impasto di cemento-Portland e acqua sono divisi in funzione delle loro dimensioni in fini (tipicamente la sabbia) e grossi (tipicamente la ghiaia) utilizzando un setaccio di tipo 4 (ossia con maglia di 4,76

mm) come strumento per la separazione fra i due tipi.

Oltre il cemento Portland esistono altri tipi di cemento: il cemento pozzolanico, il cemento d'altoforno ed il cemento alluminoso. Per cemento pozzolanico si intende la miscela omogenea, ottenuta con la macinazione di clinker portland e di pozzolana o di altro materiale a comportamento pozzolanico, con la quantità di gesso o di anidrite necessaria a regolarizzare il processo di idratazione.

Nella produzione del cemento d'altoforno, al clinker portland macinato si aggiunge loppa basica granulata di alto forno, con il gesso o l'anidrite necessaria. Il cemento alluminoso si ottiene con la macinazione di clinker costituito essenzialmente da alluminati idraulici di calcio.

10.6.4. La vetroresina

Mentre nei metalli, come abbiamo visto precedentemente, la tenacità è una proprietà che può essere incrementata da particolari meccanismi, come quello delle dislocazioni, nei materiali non metallici uno dei meccanismi più utilizzati è quello che ostacola la propagazione delle fessure. Possiamo realizzare un materiale rinforzato con un grandissimo numero di sottili fibre di vetro tenute insieme dalla resina. Tali fibre hanno le stesse caratteristiche chimiche e fisiche del vetro comune - essendo appunto costituite da tale materiale - quindi sono fragili. La resina adoperata per unire le fibre è fragile anch'essa. Mettendo insieme, però, resina e fibre si ottiene un materiale (la vetroresina) che è noto e largamente utilizzato per la sua caratteristica di tenacità.

I materiali non metallici tenaci contengono spesso al loro interno delle superfici di separazione o piani a bassa resistenza. Questi piani possono essere anche costituiti da due materiali diversi adiacenti, come nel caso della vetroresina. Analogamente al legno, le plastiche rinforzate come la vetroresina hanno internamente ben definite queste superfici di separazione. La cosa importante è che tali superfici sono di solito molto meno resistenti del materiale circostante. Questo che a prima vista potrebbe sembrare un difetto, in realtà è un grande vantaggio che la natura ha utilizzato nel legno e l'uomo ha riutilizzato. Infatti

è proprio la scarsa resistenza di queste superfici di separazione a rendere il materiale tenace.

Quando una fessura si avvicina perpendicolarmente ad una di queste superfici, gli sforzi assiali della zona anteriore dell'apice della fessura, raggiungendo la superficie di separazione tenderanno ad aprirla separandone i due lati. Se la resistenza della superficie di separazione è superiore ad un quinto circa della forza di coesione generale del materiale, la fessura continuerà il suo cammino attraversando la superficie come se il materiale fosse un solido fragile, cioè non si verificherà alcun fenomeno di arresto della fessura. Se invece, al contrario, la forza di adesione della superficie di separazione è inferiore ad un quinto circa della forza di coesione generale del materiale la superficie cederà aprendosi ortogonalmente alla fessura, creando così una sorta di trappola per la fessura che verrà in questo modo a trovarsi con un raggio di curvatura dell'apice estremamente grande e quindi privo di alte concentrazioni di sforzo. Naturalmente se invece l'adesione delle superfici fosse eccessivamente debole si avrebbe un indebolimento generale del materiale.

10.7. Conclusioni

Riassumendo: nei materiali solidi (di prevalente interesse in questa sede), le caratteristiche sono dipendenti dalla struttura molecolare; la resistenza dei materiali ordinari è di molto inferiore a quella prevista in teoria sui solidi cristallini idealizzati; alcune caratteristiche e la resistenza meccanica in particolare, dipendono fortemente dalle deviazioni della struttura cristallina ideale; (per quanto riguarda i materiali cristallini, la ripetizione ordinata del reticolo teorico non è sempre perfetta), la presenza di alcuni difetti⁵⁰ contribuisce ulterior-

⁵⁰ I difetti che si possono riscontrare in una struttura cristallina possono sintetizzarsi in: *vacanze*, ossia il vuoto creato da un atomo mancante; *impurezza sostituzionale*, quando il vuoto (vacanza) è occupato da un atomo di un altro tipo; *impurezza interstiziale*.

mente a differenziare il comportamento di un solido rispetto ad un altro.

Con l'approfondimento di queste conoscenze sono state sviluppate delle teorie per cercare di spiegare l'origine dei difetti ed il ruolo che essi hanno nell'alterare le proprietà dei materiali. Da qui a tentare di produrre difetti intenzionali, per ottenere materiali con specifiche caratteristiche, il passo è stato breve.

Per mezzo della cristallografia si è studiata la struttura cristallina di molti materiali; con la termodinamica si è compreso il meccanismo che regola lo stato di equilibrio di tali strutture. Con tali conoscenze sulla struttura, le proprietà e le leggi che ne regolano l'equilibrio molecolare al variare delle sollecitazioni esterne, quali temperatura e pressione, si è potuto mettere a punto tutto l'insieme di metodi per il controllo e la modificazione dei vari livelli di organizzazione interna di un materiale, al fine di ottenere le proprietà e le prestazioni desiderate. Tali metodi non sono altro che le lavorazioni.

Quando un materiale, sia esso argilla, vetro o acciaio, viene riscaldato, lavorato e raffreddato, può attraversare diverse fasi nelle quali si trova in uno stato di non-equilibrio. Questo è ciò che accade a quasi tutti i materiali tecnologicamente importanti. Essi subiscono lunghe manipolazioni in condizioni di non-equilibrio e vengono poi utilizzati in uno stato di stabilità, o per essere più precisi, di *metastabilità*⁵¹.

Lo stato di equilibrio di un dato materiale, corrisponde allo stato di minima energia in relazione a determinati valori di temperatura, pressione e composizione chimica⁵². Le conoscenze degli stati ideali di equilibrio ha permesso lo sviluppo di tecniche tendenti ad alterare le configurazioni strutturali dei materiali attraverso le differenti lavora-

quando negli spazi interatomici di un materiale si vanno a collocare atomi di dimensioni inferiori di altra natura; *dislocazione*, quando si realizza un gradino nelle file di atomi, che permette lo scorrimento di un piano atomico sull'altro.

⁵¹ Sono fasi cristalline o quasi cristalline abbastanza stabili, ma non quanto le fasi stabili raggiunte con velocità di raffreddamento normalmente lente.

⁵² Ma molte lavorazioni che si fanno sui materiali spesso impediscono proprio il raggiungimento di questo equilibrio. Ad esempio la tempra dell'acciaio, non è altro che un "congelamento" dello stato del materiale prima che le reazioni tra ferro e carbonio raggiungano l'equilibrio.

zioni. Oggi infatti è realmente possibile produrre nuove strutture, modificando le configurazioni spaziali degli atomi, per ottenere materiali con determinate proprietà predeterminate⁵³. Operando sulla composizione chimica e sulla struttura è possibile migliorare la durezza, la resistenza, la compattezza, la resistenza all'abrasione ed alla corrosione di un materiale.

Per quanto riguarda i materiali ceramici, che come abbiamo visto sono caratterizzati da una ottima resistenza al calore ed agli agenti chimici, i tentativi sono concentrati soprattutto ad eliminare l'unico reale difetto che essi presentano: la fragilità. I materiali ceramici potrebbero essere più resistenti alle cricche⁵⁴ se potessero essere eliminati i difetti costituiti da porosità, agglomerazioni e impurezze chimiche che si collocano tra i grani. Infatti in alcuni casi pur rimanendo il materiale al di sotto della soglia di frattura grazie ai forti legami tra gli atomi, questa può essere superata nei punti dove si trovano i difetti poiché in questi punti vengono a verificarsi delle concentrazioni di sforzo. In questi punti può quindi svilupparsi una cricca che costituendo essa stessa una concentrazione di sforzo può propagarsi in tutto il materiale sino a causarne la rottura (vedi punto 10.5.2). Quindi è nell'eliminazione di questi difetti che è diretta la ricerca. Un metodo per far ciò, è quello di utilizzare una polvere finissima di elevata purezza chimica che possa essere compattata prima della sinterizzazione. Grazie all'assenza di

⁵³ Uno dei metodi più antichi per ottenere una struttura lontana dall'equilibrio, e quindi con nuove caratteristiche, è quello di raffreddare il materiale il più velocemente possibile. Il raffreddamento rapido infatti influisce in modo significativo sulla microstruttura del materiale.

Nelle leghe metalliche raffreddate normalmente si ottengono grossi cristalli ramificati dovuti al fatto che durante la solidificazione di un materiale costituito da più componenti, uno dei componenti solidifica prima degli altri. Al crescere della fase solida gli spazi intermedi vengono occupati dai componenti che solidificano più lentamente. La spaziatura tra le ramificazioni dei cristalli decresce all'aumentare della velocità di raffreddamento modificando conseguentemente le caratteristiche del materiale. Oggi si possono raggiungere velocità di raffreddamento di un miliardo di gradi centigradi per secondo, ottenendo strutture molto fini formate da piccolissimi cristalli omogenei od addirittura strutture amorfe.

⁵⁴ Microscopiche fessurazioni.

porosità in questo caso si ottiene una elevata tenacità. Un altro metodo consiste nell'introdurre nella miscela delle sottili fibre ceramiche come nel caso dei materiali compositi⁵⁵. Un ulteriore metodo per arrestare la propagazione delle fessure è quello di distribuire su di un'area maggiore le sollecitazioni concentrate nel suo apice. Ciò è quello che avviene se durante la fabbricazione del materiale ceramico vengono intenzionalmente prodotte al suo interno minuscole microincrinature. Infatti, come abbiamo dimostrato, se una cricca nel propagarsi si imbatte in una microfessura con un diverso orientamento, il suo apice ne risulta smussato e pertanto diminuisce la concentrazione di sforzo su di esso sino a scendere sotto la soglia di frattura.

Nei polimeri, invece, il legame trasversale (*crosslinking*) è un esempio di come si possa migliorare la rigidità alterando i legami tra le molecole, poiché la reticolazione blocca le catene polimeriche in un reticolo tridimensionale. Variando le caratteristiche delle catene polimeriche si possono realizzare delle strutture amorfe oppure semicristalline, uniformi o costituite da zone di composizione o di orientazione diversa. Infatti se si vuole ottenere un materiale che possieda il massimo della resistenza longitudinale delle molecole del polimero, tali molecole devono avere un'orientazione comune. Certe lavorazioni permettono di aumentare l'estensione e l'orientazione delle macromolecole: l'estrusione; la trafilatura lenta ad una temperatura prossima al punto di fusione del polimero; il trattamento del polimero con un solvente in modo da formare un gel da cui vengono filate con maggior facilità le fibre orientate.

Altre tecniche di lavorazione invece di mescolare diversi polimeri, comportano l'estrusione simultanea di questi fino a formare una struttura costituita da strati alterni di polimeri differenti, ciascuno dello spessore di 10 micrometri. Il materiale che ne viene fuori può essere composto da centinaia o migliaia di strati; ad esempio se uno dei componenti è rigido ma fragile e l'altro è gommoso, ne viene fuori un materiale che combina la rigidità alla tenacità.

Tecniche più avanzate nel cercare modi migliori di disporre le macromolecole si rifanno alla biologia. Imitando i principi di organiz-

⁵⁵ Abbiamo già visto come le fibre possano costituire un meccanismo di arresto di una fessura impedendole di allargarsi e di propagarsi.

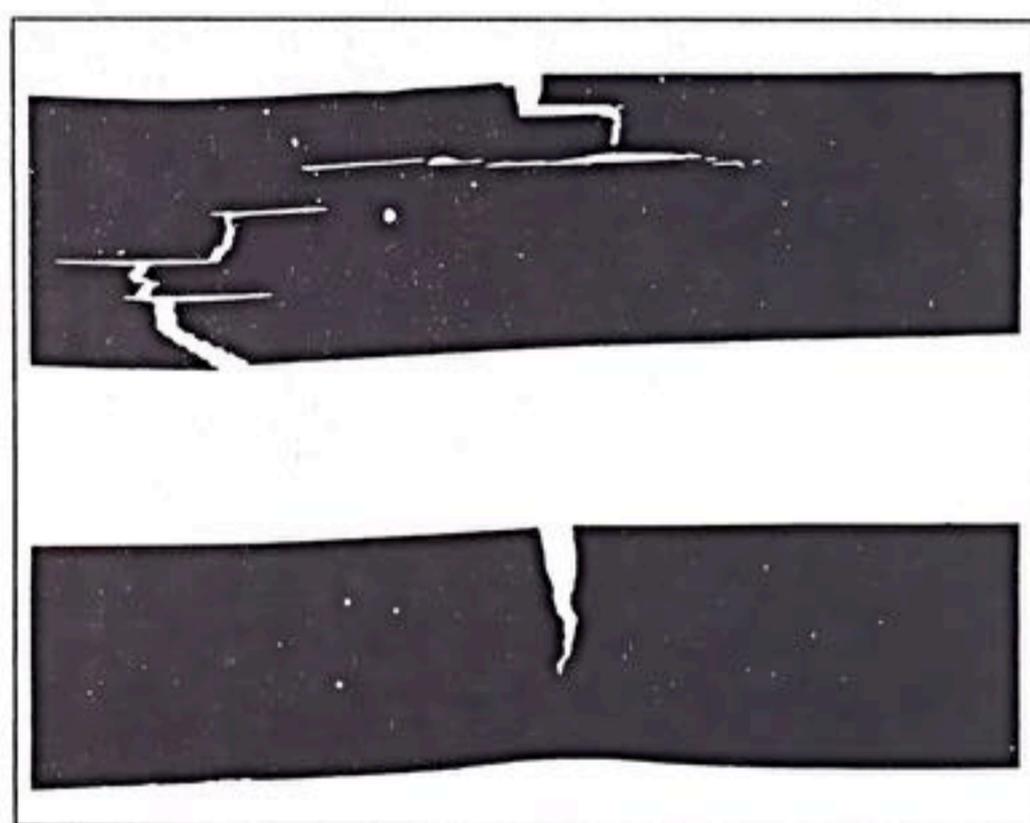
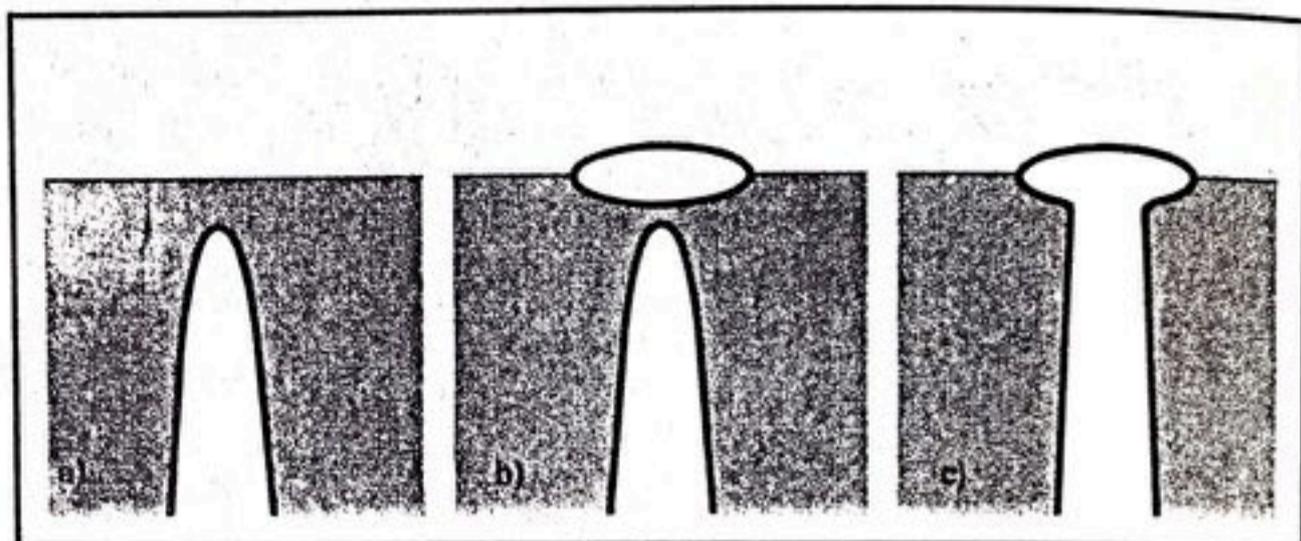


Figura 10.7.1. Meccanismo di arresto delle fessure

Effetto di una superficie di separazione di bassa resistenza nella propagazione delle fessure: la fessura si avvicina a una superficie di separazione a bassa resistenza; la superficie di separazione si apre di fronte alla fessura arrestandone la propagazione. Questo meccanismo è importante tanto nei materiali compositi artificiali (vetroresina) quanto nel legno.

zazione gerarchica dei tessuti biologici, le macromolecole vengono disposte secondo schemi che anticipano le sollecitazioni alle quali si troverà esposto il materiale, come ad esempio avviene nei tendini⁵⁶. Tali tecniche anche se utilizzano materiali a matrice polimerica producono materiali con caratteristiche molto vicine a quelle dei materiali compositi.

Come abbiamo visto in precedenza, un ruolo determinante nell'incremento della resistenza meccanica dei materiali compositi è dovuto all'inclusione di elementi rinforzanti nella massa del materiale. Le proprietà di tali materiali non vengono determinate esclusivamente dal tipo di matrice e dal materiale di rinforzo, sia esso sotto forma di particelle o di fibre, ma anche dalle caratteristiche geometriche del rinforzo. Nei materiali compositi avanzati sono utilizzate molto le fibre lunghe e continue che rinforzano il materiale con maggiore efficienza delle fibre corte o particelle. Questo anche perché la loro orientazione può essere meglio controllata e il materiale può essere progettato per adeguarlo alle future sollecitazioni di esercizio. Alcuni compositi avanzati sono ottenuti sovrapponendo strati sottili rinforzati di fibre continue orientate (struttura simile al legno compensato); nel contempo la mancanza di fibre che collegano i vari strati determina una scarsa resistenza agli urti e, sotto sollecitazioni molto forti, il materiale può delaminarsi. Per rinforzare i compositi in molte direzioni aumentando la resistenza agli urti, nuovi procedimenti hanno utilizzato fibre intessute in una grande varietà di forme, in modo da controllare la geometria interna oltre alla composizione.

Senza dubbio l'uomo ha da sempre dato grande importanza al ruolo che i materiali hanno svolto nel corso della storia: molte delle invenzioni fondamentali sarebbero state impossibili senza la capacità tecnologica di *materializzarle*. L'evoluzione delle tecniche di trasformazione della pietra, metallo, legno, segue di pari passo quella degli oggetti che con tali materiali sono realizzati determinandone in larga

⁵⁶ Il tendine presenta una struttura gerarchica a sei livelli di organizzazione composte da fibre sempre più. Quando il tendine viene sottoposto ad un grande sforzo, piccoli elementi della struttura cedono riducendosi al livello inferiore; le fibrille si risolvono in sottofibrille e in microfibrille. In questo modo il cedimento localizzato assorbe energia impedendo il cedimento dell'intero sistema.

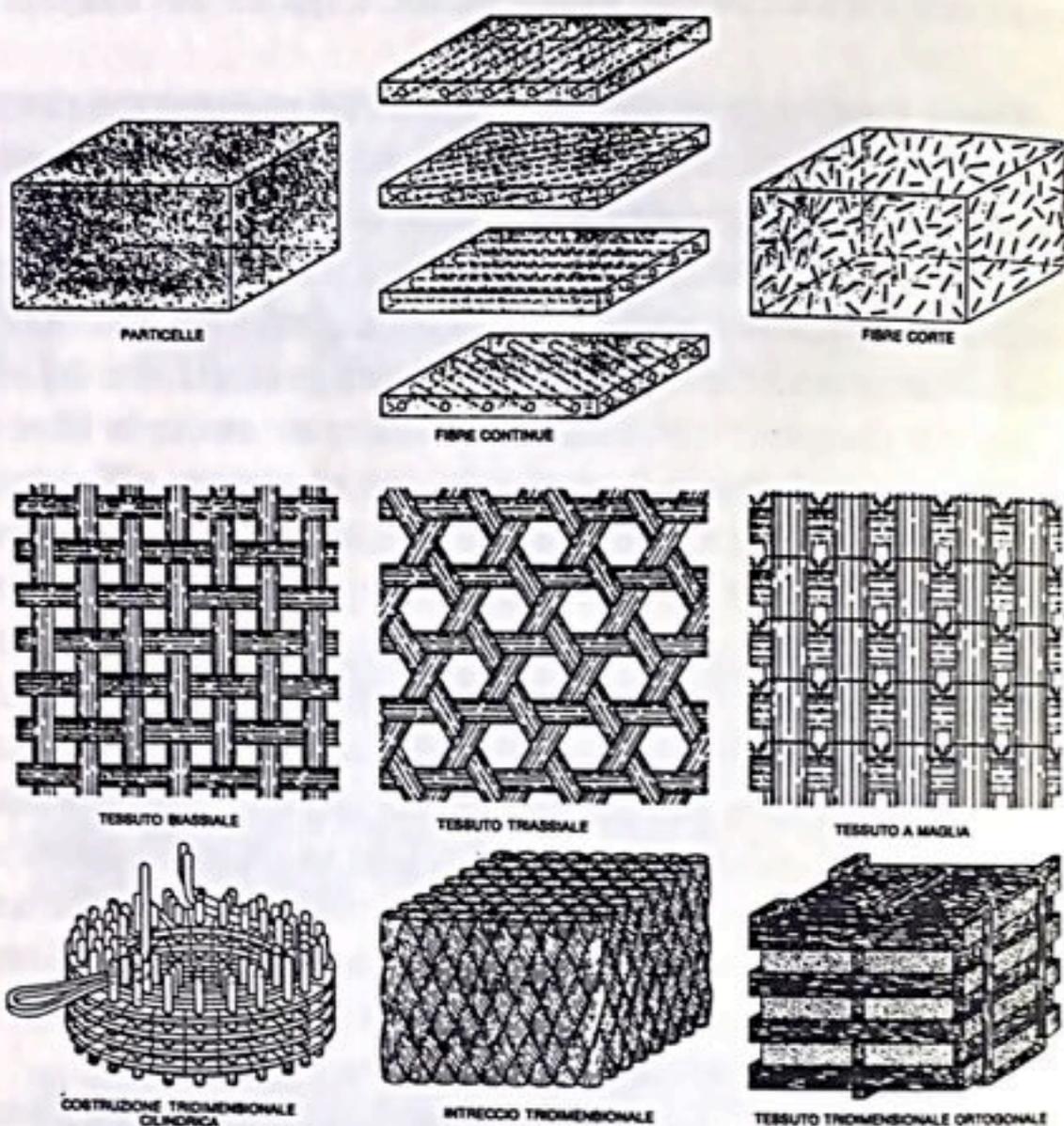


Figura 10.7.2.

Un ruolo determinante nell'incremento della resistenza meccanica dei materiali compositi è dovuto all'inclusione di elementi rinforzanti nella massa del materiale, sia esso sotto forma di particelle o di fibre, oltre che dalle caratteristiche geometriche del rinforzo. Nei materiali compositi avanzati sono utilizzate molto le fibre lunghe e continue che rinforzano il materiale con maggiore efficienza delle fibre corte o particelle. Alcuni compositi avanzati sono ottenuti sovrapponendo strati sottili rinforzati di fibre continue orientate.

parte la reale capacità di assolvere alle funzioni per i quali sono stati pensati. La stessa forma che a volte rappresenta il congelamento razionalizzato di un programma di interattività tra l'oggetto e l'utilizzatore, è spesso intimamente legata alle caratteristiche di resistenza, o di peso o di semplice apparenza del materiale.

Poiché l'influenza esercitata dai materiali sugli aspetti della vita dell'uomo è così grande, il capire il funzionamento e essersi fatti qualche idea su cosa si debba fare per inventarne di nuovi, è decisamente importante. Un materiale può essere progettato e possono essere previste le sue caratteristiche. L'oggetto del progetto, oltre al manufatto appartenente alla scala edilizia o dell'industrial design, può essere, quindi, anche il materiale stesso.

La rapidità, che oggi caratterizza la trasformazione del contesto ambientale e produttivo, rende necessario e urgente adeguare l'insegnamento della tecnologia, soprattutto quando questo sia finalizzato alla formazione di futuri progettisti. Gli strumenti tecnici e operativi dell'architettura e dell'industrial design cambiano continuamente e le soluzioni innovative, adatte ai bisogni emergenti nella società, nascono dalla revisione critica degli approcci tradizionali. Per questo, la prima rappresentazione dei processi costruttivi, rifiutando codificazioni ormai invecchiate, va fondata sulla combinabilità o trasferibilità dell'informazione tecnologica all'interno di ipotesi progettuali o di strutture produttive in continua evoluzione.

La realizzazione dell'idea è sempre il punto di mediazione tra una molteplicità di fattori contingenti e specifici (vincoli economici, geografici, culturali o storici) ma, nel contempo, trae origine dalla riutilizzazione delle esperienze precedenti. I modi

del costruire e del produrre utilizzati, sperimentati o semplicemente proposti fino ad oggi, sono il materiale di base che consentirà di individuare nuove aggregazioni o assetti tecnologici delle realizzazioni di domani.

Per dare un quadro sufficientemente esaustivo del campo disciplinare, ne *L'immaginazione del concreto* si fa riferimento a cinque tematiche correlate tra loro: i riferimenti teorici; le caratteristiche dei materiali; i processi di trasformazione; la produzione di oggetti; le implicazioni del progetto. Queste tematiche sono analizzate e illustrate facendo riferimento da un lato ai principali sistemi costruttivi dell'architettura, dall'altro agli episodi salienti dell'industrial design.

In tal modo si soddisfa l'esigenza di chiarezza e correttezza metodologica nell'identificare gli strumenti operativi che il progettista utilizza di volta in volta per obiettivi e in contesti sempre nuovi e sconosciuti.



L. 38.000, iva inclusa

ISBN 88-204-3532-2



9 788820 435325