

I lapidei

22.1 Generalità

Le pietre sono state impiegate come materiali da costruzione fin dai tempi antichi per le loro eccezionali qualità. Infatti, per resistenza, durabilità e varietà di aspetto e colorazione, esse potevano essere utilizzate sia per la costruzione di edifici sia per la preparazione di ornamenti. Oggi l'impiego della pietra per strutture primarie è stato quasi del tutto abbandonato perché antieconomico; sono utilizzate prevalentemente nelle opere di restauro. Inoltre, la pietra, grazie a moderne tecniche di taglio, che permettono di ottenere lastre sempre più sottili, è usata nell'edilizia per rivestimenti, con scopi protettivi e ornamentali.

22.2 Le rocce

Le pietre provengono dalle rocce. Per *roccia* s'intende qualsiasi materiale che costituisce la crosta terrestre. Da un punto di vista chimico le rocce sono miscele di più minerali e hanno composizione variabile e proprietà differenti.

Le rocce sono, in genere, costituite da un numero limitato di specie minerali. In alcune ne è presente uno minerale.

Classificazione delle rocce

Le rocce possono essere classificate secondo vari criteri:

- in base alle *proprietà fisico-meccaniche*: rocce coerenti, compatte, incoerenti, sciolte;
- in base alla *composizione*: rocce monomineraliche, polimineraliche;
- in base all'*origine*: rocce endogene ossia formatesi all'interno della Ter-

- ra, rocce esogene cioè formatesi sulla superficie terrestre;
- in base alla *genesì*:
 - rocce magmatiche o ignee: di origine lavica;
 - rocce sedimentarie: formatesi in seguito al deposito di materiali provenienti dalla degradazione di altre rocce e compattati da forti pressioni;
 - rocce metamorfiche: dovute alla trasformazione di rocce magmatiche e sedimentarie in conseguenza di temperature e pressioni elevate.
- In Tabella 22.1 è riportata la classificazione, in base alla genesì, delle rocce più utilizzate in edilizia.

Tabella 22.1 Classificazione delle rocce in base alla genesì

1. Rocce ignee	a struttura granitoide	graniti sieniti dioriti gabbri
	a struttura porfirica	porfidi trachiti porfiriti basalti
	a struttura vetrosa	ossidiane
2. Rocce sedimentarie	di origine fisico-meccanica	ghiaie, arenarie
	di origine vulcanica	tufi
	di origine organica	calcari
	di origine chimica	travertini, alabastri, tufi
3. Rocce metamorfiche		quarziti ardesie marmi

La classificazione commerciale, di seguito riportata, considera invece criteri diversi quali, per esempio, la lucidabilità, la lavorabilità ecc.

Graniti - rocce di natura silicatica, di elevata resistenza meccanica. **Lucidabili** (granito, diorite, gabbro, sienite; porfido).

Pietre - rocce compatte o porose. **Non lucidabili** (trachite, conglomerato, arenaria, argilla, tufo, calcare tenero, dolomia, quarzite).

Marmi - rocce compatte di natura carbonatica. **Lucidabili** (marmo, calcare compatto).

Travertini - rocce ricche di cavità, compatte. **Lucidabili** (travertino).

Caratteristiche delle rocce utilizzate in edilizia

La maggioranza delle rocce che affiorano sulla superficie terrestre può fornire pietra da costruzione. Affinché una roccia possa fornire materiale di pregio, deve presentare alcune caratteristiche basilari.

Il valore estetico di una roccia ornamentale è riconducibile al colore, alla tessitura (disegno) e alla grana del materiale.

Il colore di una roccia deriva innanzi tutto dalla composizione mineralogica e dalla presenza di sostanze pigmentanti in forma diffusa o di pellicola che avvolge i singoli individui cristallini (rocce allocromatiche). Il colore può essere uniforme (rocce sedimentarie), punteggiato (rocce magmatiche), variegato (marmi) o plurimo (brecce). Il colore originale di un materiale lapideo utilizzato in esterno solo in rari casi è stabile nel tempo. Le fasi pigmentanti risentono, infatti, delle azioni che le solubilizzano, ossidano, idratano.

Forma, dimensione, modi di aggregazione dei costituenti minerali determinano la tessitura e la struttura dei lapidei. La tessitura riguarda la disposizione dei componenti e la loro trama. La struttura è data dalla forma, dalle dimensioni e dai rapporti dei componenti.

Le rocce devono essere compatte e in esse non devono essere presenti componenti argillosi. Inoltre, non devono essere ricche di componenti scistososi.

Altri fattori da considerare sono la lavorabilità, la lucidabilità e la durabilità.

Le pietre tenere (rocce sedimentarie porose, rocce prive di quarzo e silicati) sono spaccate, segate o perforate più rapidamente e con minori costi rispetto alle pietre dure (rocce magmatiche, rocce metamorfiche, rocce con quarzo e silicati).

A causa delle diverse durezza dei minerali presenti la lucidabilità non è realizzabile come ad esempio per le arenarie. Al contrario, è ottenibile in rocce compatte e tessitura omogenea (rocce magmatiche, calcari compatti, marmi).

La durabilità è in funzione dell'impiego cui una pietra è destinata. Una roccia resistente all'usura (roccia metamorfica scistosa) è adatta alle pavimentazioni. Una roccia resistente alla compressione (roccia magmatica) è adatta alla fabbricazione di colonne e pilastri. Una roccia resistente al deterioramento da parte degli agenti atmosferici e con caratteri cromatici stabili (rocce magmatiche, rocce sedimentarie compatte) è idonea all'impiego per rivestimenti in esterno.

22.3 Requisiti

Le caratteristiche più importanti da prendere in considerazione per utilizzare una pietra come materiale da costruzione sono elencate di seguito.

Massa volumica apparente (o peso per unità di volume)

Quando la pietra è utilizzata in funzione ornamentale, la conoscenza dei valori delle masse aggiunte è necessaria per un corretto calcolo della struttura. Una classificazione commerciale secondo questo parametro divide i materiali in 5 categorie (Tabella 22.2).

Tabella 22.2 Classificazione in funzione della massa volumica

Tipo	Massa volumica (kg/m ³)	Materiale
Molto leggeri	< 1000	Pomici
Leggeri	1000-1500	Tufi vulcanici, calcareniti
Mediamente pesanti	1500-2500	Calcari teneri, arenarie porose, peperini, travertini
Pesanti	2500-3000	Calcari compatti, dolomie, graniti, porfidi
Molto pesanti	> 3000	Basalti, graniti, anfiboli

Porosità

La porosità influenza le proprietà meccaniche e la capacità di assorbire liquidi e gas da parte del materiale, con conseguenze negative sulla durabilità. La determinazione della porosità è fondamentale per giudicare la resistenza meccanica effettiva dei manufatti, poiché le cavità possono diventare siti di innesco della frattura.

Coefficiente d'imbibizione

È il rapporto percentuale tra massa secca e massa dopo l'immersione in acqua. Indica quanto un materiale all'apparenza compatto, immerso in acqua, ne assorbe fino a saturazione. Fornisce indicazioni sulla compattezza e durezza in caso di contatto prolungato con acque meteoriche e

terreni umidi. I valori del coefficiente d'imbibizione, per alcuni lapidei, sono riportati in Tabella 22.3.

L'acqua e le sostanze in essa disciolte sono tra i principali fattori di degrado a causa d'interazioni chimiche (alterazione, corrosione ecc.) ed effetti meccanici, conseguenti, per esempio alla dilatazione dell'acqua che ghiaccia.

Tabella 22.3 Coefficiente d'imbibizione per alcuni materiali

Materiali	Coefficiente di imbibizione (%)
Graniti, dolomie, marmi saccaroidi, calcari compatti	< 1
Trachiti, arenarie, travertini	< 5
Tufi vulcanici, calcareniti, calcari teneri	25 ÷ 45

Assorbimento capillare

Rappresenta la capacità del materiale di assorbire acqua per capillarità.

Permeabilità all'acqua

È l'attitudine di una roccia a lasciarsi attraversare dall'acqua sotto un gradiente di pressione. Questa caratteristica non è solo funzione della porosità, ma richiede anche continuità fra i pori. Materiali come le pomici, con vuoti isolati, sono poco permeabili. Sono da considerare non permeabili le rocce come i graniti, le dioriti, le sieniti e le rocce sedimentarie e metamorfiche compatte.

Permeabilità all'aria e ai gas

Questa proprietà è in relazione alla porosità e ha importanza non trascurabile nell'utilizzo dei lapidei come rivestimento in edilizia. Infatti, da essa può dipendere il benessere e l'igienicità degli ambienti interni essendo il ricambio dell'aria umida interna con quella esterna il fattore condizionante. Tutte le rocce compatte sono impermeabili all'aria e ai gas. Per questo motivo quando sono impiegate per rivestimenti esterni si deve utilizzare la tecnologia delle pareti ventilate in cui lo strato di rivestimento è distanziato di alcuni centimetri dalla parete da ricoprire.

Gelività

La gelività è dipendente dalla dimensione e dalla distribuzione dei pori, dalla resistenza meccanica del materiale e dal suo modulo elastico.

Resistenza a compressione

La resistenza, anche se in misura differente, è correlata alla grana, alla tessitura, alla natura petrografica e anche alla direzione di applicazione dello sforzo perché, in molti casi, esistono nel materiale piani preferenziali di sfaldatura.

Resistenza all'urto

Un'elevata resistenza a una sollecitazione dinamica (urto) costituisce un fattore importante in impieghi, quali pavimenti e gradinate, in cui gli urti accidentali sono frequenti. Il migliore comportamento è assicurato dalla grana fine e omogenea. Cavità e discontinuità sono fattori peggiorativi.

La resistenza all'urto è misurata in modo indiretto determinandone la tenacità. La prova si esegue per caduta di una sfera di acciaio del peso di 1 kg su una lastra di $20 \times 20 \times 3$ cm poggiata su un letto di sabbia dello spessore di 10 cm. Il valore è espresso dall'altezza (in cm) di caduta della sfera che provoca la rottura della lastra.

Una classificazione in ordine decrescente di tenacità, dei lapidei d'impiego più diffuso, è la seguente: basalti > porfidi > dioriti > graniti > arenarie a cemento siliceo > calcari compatti e marmi saccaroidi > arenarie a cemento non siliceo.

Usura per attrito radente

Nei materiali impiegati in rivestimenti di esterni, ma anche in pavimentazioni d'interni, la resistenza al logoramento delle superfici, da parte di agenti abrasivi è un fattore fondamentale. Per valutare tale resistenza s'impiega il tribometro di Amsler. Esso è costituito da un disco di ghisa ricoperto da particelle fini di materiale abrasivo (carborundum) ruotante con velocità periferica di 1 m/s. Il disco è tenuto in contatto con il campione in prova per mezzo di una pressione standard. Il numero dei giri deve essere tale da corrispondere a un percorso di 1 km dell'abrasivo sul campione. Il risultato della prova è rappresentato dallo spessore di campione abraso, espresso in millimetri.

L'usura delle rocce aumenta passando da quelle eruttive (con elevato contenuto di silice), alle scistose e alle sedimentarie.

I valori tipici sono abrasioni minori di 1 mm per i migliori materiali mentre per quelli intermedi i valori si collocano nel *range* 1-5 mm. Consumi oltre i 5 mm indicano scarsa idoneità del materiale ad applicazioni con prevedibile usura meccanica.

Coefficiente di dilatazione termica

Nelle rocce costituite da diverse fasi mineralogiche, i costituenti con differente coefficiente di dilatazione possono generare lesioni dapprima microscopiche e limitate alla superficie, poi più estese e interessanti l'intera massa. Un fenomeno simile avviene nei marmi, pur essendo questi costituiti da grani di sola calcite, poiché questo materiale presenta valori del coefficiente di dilatazione termica differenti nelle diverse direzioni cristallografiche.

Nell'accoppiamento con altri materiali strutturali, come i laterizi o il calcestruzzo, è opportuno prevedere adeguati giunti di dilatazione per evitare distacchi o rotture dei rivestimenti.

La determinazione del coefficiente si esegue mediante prove condotte in camera climatica nel campo di temperature comprese fra -5 e $+40$ °C.

In Tabella 22.4 sono riportati i coefficienti di dilatazione termica α per alcuni lapidei.

Tabella 22.4 Coefficienti di dilatazione lineari

Materiale	$\alpha \times 10^6$ (mm/m °C)
Calcari compatti, marmi saccaroidi	4-8
Porfidi quarziferi, porfidi, basalti	5-6
Graniti, sieniti, dioriti	7-9
Arenarie	11-12

Attitudine alla lavorazione (lavorabilità)

La lavorabilità di un materiale lapideo può essere descritta in termini di:

- spaccabilità;
- perforabilità;
- segabilità.

Spaccabilità

È la proprietà delle rocce a rompersi secondo superfici piane sotto l'azione di utensili a percussione (mazze, cunei, martelli pneumatici ecc.). La spacc-

cabilità è facile in materiali sfaldabili (rocce scistose) e meno regolare in materiali non sfaldabili.

Per indicare i diversi piani di più facile spaccabilità si utilizzano in "gergo" vari termini. I più usati sono il *verso* (superficie di più facile suddivisibilità), il *contro* (superficie ortogonale al verso ma con la sua stessa direzione) e il *secondo* (superficie ortogonale alle altre due). Per il *contro* e il *secondo* la spaccabilità è di più difficile attuazione rispetto al verso.

Perforabilità

I costi di abbattimento in cava sono influenzati dai tempi richiesti per la perforazione della roccia e dal consumo degli utensili impiegati (fioretti). La perforabilità di un materiale può essere espressa in termini di velocità di avanzamento dei fioretti. In funzione della durezza della roccia, essa può variare da alcuni cm/minuto a oltre un metro/minuto.

Segabilità

La segabilità è l'attitudine a lasciarsi segare. È funzione della mineralogia, della struttura e tessitura della roccia. Questa proprietà riveste importanza ai fini dei costi per la produzione dei manufatti.

Agli effetti della segabilità si distinguono:

- rocce durissime (gabbri, basalti, graniti);
- rocce dure (serpentine, calcari compatti, marmi);
- rocce semidure (calcari teneri, marne);
- rocce tenere (tufi, gessi, calcari poco litificati).

22.4 Lavorazione della pietra da costruzione

Due sono i metodi principali di coltivazione di una cava: a cielo aperto o in galleria. Nel primo caso la cava si estende e si approfondisce, asportando tutto il materiale e sconvolgendo la morfologia del territorio interessato. Nel secondo, la cava nel suo sviluppo segue un determinato livello o strato e lascia quasi integra la morfologia del territorio.

Il materiale lapideo è cavato in blocchi con sistemi diversi secondo la natura e la giacitura della roccia. Il ciclo produttivo è articolato in due fasi distinte:

- estrazione dal giacimento di blocchi di grossa dimensione, dove le principali tecnologie impiegate sono:
 - taglio con esplosivo;
 - azione di cunei meccanici o idraulici;
 - perforazione continua;
 - impiego di agenti chimici espansivi;

- taglio con acqua ad alta pressione;
 - taglio con filo diamantato o con tagliatrici a nastro;
 - taglio con fiamma.
- suddivisione per taglio dei grossi blocchi in elementi di piccola dimensione (blocchi) o in lastre e successiva rifinitura. Per la trasformazione dei blocchi si procede con seghe a disco diamantato o con telai multilama ottenendo pezzi o lastre grezze di diverso spessore. I pezzi ottenuti mediante divisione sono in seguito sbazzati e rifiniti sia per la forma sia per l'aspetto superficiale.

La lavorazione delle facce dei conci per muratura deve essere perfetta sulle superfici di appoggio; le superfici laterali sono invece rifinite solo per un ristretto bordo, il resto è lasciato grezzo.

I graniti, i marmi o alcuni calcari, come ultima operazione, possono essere lucidati (pulimento) con un nastro continuo attraverso l'azione abrasiva di appropriate sostanze. Secondo il grado di pulimento si distinguono: l'arrotatura (con pezzi di arenaria), la levigatura (con la pomice), la lucidatura (con limatura di piombo). La superficie lavorata si definisce pelle (pelle grossolana, mezzana, liscia, levigata, lucidata).

22.5 Prodotti

In relazione alla natura geologica e petrografica dei materiali lapidei si possono ottenere diversi tipi di manufatti: blocchi, lastre ecc.

Blocchi di grandi dimensioni si ricavano da graniti o rocce magmatiche, da rocce sedimentarie in stratificazione massiccia (alcuni calcari), da rocce metamorfiche prive di scistosità e venature (quasi tutti i marmi). Sono adatti per fusti di colonne, architravi, statuarie.

Blocchi di piccole dimensioni si ricavano da rocce sedimentarie (calcari, dolomie, arenarie, tufi). Sono adatti alla preparazione di conci per muratura.

Blocchi di piccole dimensioni adatti alla preparazione di elementi decorativi, si ottengono da rocce sedimentarie tenere (calcari teneri, pietra di Lecce).

Lastre di vario spessore si ricavano da rocce sedimentarie a stratificazione sottile (calcari, calcari marnosi). Sono adatte alle murature e alle coperture dei tetti.

Lastre di grande estensione, molto resistenti all'usura e alla flessione, si ricavano da rocce metamorfiche di natura silicea con elevata scistosità (gneiss, serpentiniti). Sono adatte alle pavimentazioni esterne e alle coperture. Lastre ricavate per segagione, da rocce compatte di diversa natura (graniti, calcari, marmi), sono adatte al rivestimento di pareti e pavimentazioni interne.

Secondo le caratteristiche fisico-meccaniche, il colore e la tessitura della roccia, si preparano i prodotti destinati ai diversi utilizzi.

Arenarie

Rocce clastiche costituite da sabbia riunita da cemento calcareo, siliceo o gessoso. Le arenarie formano un discreto materiale da costruzione e sono usate per lastricati.

Basalti

Rocce vulcaniche, nere, pesanti. Sono utilizzati come materiale da selciato: i "sampietrini" caratteristici della pavimentazione di Roma, sono appunto basalti dei colli laziali.

Calcari

Rocce abbondanti sulla crosta terrestre. Sono costituite da calcite (carbonato di calcio), facilmente attaccabile dagli acidi e di scarsa durezza: 3 della scala di Mohs¹. Si presenta in struttura microcristallina, microcristallina compatta, granulare, saccaroide, concrezionata, stalattitica. All'accumulo di spoglie di organismi a scheletro calcareo, organismi per lo più marini, sono dovuti i calcari fossiliferi o calcari zoogenici.

I caratteri fisici dei calcari variano con la struttura. I cristallini sono più coerenti e duri, i calcari zoogeni sono i più teneri.

I travertini sono depositi lasciati dall'evaporazione di acqua ricca di carbonati.

Particolari calcari sono i marmi. Tecnicamente si chiama marmo qualunque calcare granulare o compatto avente una struttura tale da renderlo suscettibile di bella pulitura e di essere pertanto usato in architettura. I marmi si presentano in colorazioni diverse: dal bianco al rosa con venature grigie.

Dioriti

Rocce intrusive con struttura granitoide. Il colore varia dal verde al grigio. Sono utilizzati sotto forma di lastre a scopo ornamentale.

¹ Nella scala di Mohs un materiale lapideo ha durezza uguale a quella di un minerale della scala se lo scalfisce e ne è scalfito. I valori variano da 1, attribuito al talco, assunto come materiale più tenero, a 10, fissato per il diamante, il più duro.

Gabbri

Rocce intrusive variamente colorate. Alcune varietà sono utilizzate quale materiale ornamentale.

Gneiss

Gli gneiss si distinguono dai graniti per la struttura scistosa dovuta a pagliette di mica e alla forma sub-lenticolare di granuli di quarzo. In alcuni gneiss, che presentano un graduale passaggio al granito, la struttura scistosa è poco evidente. Queste rocce sono utilizzate in blocchi o in lastre.

Graniti

Rocce granulari di notevole durezza. La struttura della roccia è a granuli intimamente mescolati. Si hanno varietà di granito bianco e granito roseo. I graniti per la durezza, la resistenza, la caratteristica di prendere un bel pulimento, e il bell'aspetto, sono impiegati come materiali ornamentali e per pavimenti.

Porfidi

Rocce ignee a struttura porfiroide, ossia con una massa a struttura finemente granulare, compatta e omogenea, in cui si trovano sparsi grossi cristalli.

Il porfido va annoverato tra le rocce più dure: durezza 6 Mohs. Secondo il componente feldspatico che prevale, i porfidi si dividono in:

- porfido granitico, di colore variabile;
- porfido sienitico, costituito da una massa rosso-bruna o verde-giallastra;
- porfido dioritico, con massa di colore verde-bruno;
- porfido ortosico o non quarzifero, con massa variabile dal grigio al rosso.

Quarziti

Costituiti in prevalenza di quarzo granulare, di rilevante durezza e compattezza. Sono di colore vario, ma predomina il bianco. È utilizzato per lastricati.

Scisti cristallini

Rocce metamorfiche, stratificate, caratterizzate dalla loro divisibilità in falde sottili.

Sieniti

Rocce intrusive. La struttura è granulare. Hanno caratteristiche simili ai graniti. Il colore varia da bruno-violaceo a grigio.

Trachiti

Rocce effusive. Il colore è bianco, grigiastro, rossiccio. Il nome indica la loro caratteristica più evidente: la ruvidezza.

Tufi vulcanici

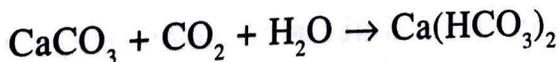
Rocce piroclastiche risultanti da cementazione di frammenti provenienti da eruzioni vulcaniche.

22.6 Alterazioni dei lapidei e interventi conservativi

I meccanismi di alterazione dei materiali lapidei sono diversi e spesso concomitanti, anche se spetta all'acqua il ruolo più importante nei processi di degrado. Il potere solvente e la capacità di esercitare rilevanti azioni fisiche in corrispondenza di cambiamenti di stato sono le principali cause di quest'azione.

Il fattore determinante dell'azione di alterazione dell'acqua è la sua acidità. Questa, normalmente, presenta valori di pH fra 5,6 e 5,8 per la presenza in essa di CO_2 (con formazione di acido carbonico). Nelle piogge, per la presenza di inquinanti azotati e solforici e CO_2 , dovuti all'inquinamento atmosferico, il pH può scendere fino a $4,0 \div 4,5$ (piogge acide) con conseguenze devastanti sui lapidei.

I materiali lapidei a matrice calcarea si sciolgono in acqua ricca di CO_2 secondo la reazione di equilibrio:



Questo equilibrio è tanto più spostato verso destra (con formazione del bicarbonato solubile) quanto maggiore è il contenuto dell'anidride carbonica in soluzione. Un ruolo ancora più devastante è svolto dai composti azotati e solforati contenuti nell'atmosfera in forma di nebbia e pioggia (piogge acide).

I composti ossigenati dell'azoto presenti nell'atmosfera sono il protossido (N_2O), il monossido (NO) e il biossido (NO_2). Questi ultimi due sono in genere valutati come somma e definiti NO_x . In presenza di umidità il prodotto finale è sempre HNO_3 .

L'acido nitrico aggredisce i materiali carbonatici trasformandoli in nitrati solubili. I sali solubilizzati possono migrare in materiali porosi e ricristallizzare con nuova azione disgregante sui manufatti.

I componenti dello zolfo (SO_2 e SO_3) sono insieme all'acido nitrico, derivato dagli ossidi di azoto, i principali responsabili delle piogge acide. In presenza di umidità si forma H_2SO_4 che è il composto responsabile della solfatazione delle superfici con formazione di "croste nere" la cui fase mineralogica principale è il $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Questi solfati negli ambienti urbani inquinati inglobano spesso particelle carboniose e idrocarburi incombusti assumendo colorazioni più o meno scure da cui prendono il nome.

L'azione biologica prodotta da alcuni batteri nitrificanti che producono nel loro metabolismo sali ammoniacali è anch'essa causa di fenomeni di deterioramento.

In presenza di materiali calcarei porosi, l'azione degli acidi e di tutti gli agenti aggressivi veicolati dall'acqua si può esplicare anche in profondità. Il risultato è di solito la demolizione della fase legante carbonatica con formazione di sali che, trasportati dall'acqua nella matrice porosa, possono, in relazione al mutare delle condizioni termoigrometriche nel materiale, cristallizzare. Si generano sollecitazioni meccaniche che causano microlesioni. Si producono anche nuovi sistemi di pori. Conseguentemente, il materiale diventa ancora più suscettibile a tutte le azioni aggressive. I risultati di tali aggressioni spaziano così da modeste alterazioni superficiali a esfoliazioni e distacchi di conci, fino a profonde cavernizzazioni e perdite di coesione dell'intera compagine litica.

Il meccanismo di deterioramento dei graniti, la cui costituzione mineralogica comprende diverse fasi cristalline, è più complesso. I minerali costituenti mostrano, infatti, rispetto agli agenti aggressivi ambientali, comportamenti alquanto diversi. Se il quarzo si può considerare inalterabile, non altrettanto si può affermare per gli altri componenti tipici come i feldspati.

I feldspati (ortosilicati alcalini e alcalino-terrosi) sono decomposti dall'azione dell'acqua che li trasforma in caolinite, idrossido di potassio e silice. La soluzione acquosa, basica per la presenza dell'idrossido di potassio, rallenterebbe il processo di decomposizione che invece è accelerato dalla presenza degli inquinanti acidi.

Il luogo comune che attribuisce alle rocce granitiche una durabilità assoluta è quindi solo in parte accettabile anche se l'impiego di materiali in forma di lastre levigate, che costituisce il prevalente utilizzo nell'architettura moderna, rende minimi i tempi di contatto con gli agenti chimici aggressivi. La levigazione produce l'occlusione di microlesioni e di eventuale microporosità del materiale.

Cristallizzazione salina

La presenza di acqua all'interno di un materiale poroso, oltre ai fenomeni di degrado prodotti dalla sua solidificazione, può dare origine a tutta una serie d'inconvenienti associati alla presenza di componenti salini veicolati dall'acqua stessa. I sali, infatti, tenderanno a cristallizzare quando l'umi-

Tabella 22.5 Schema delle alterazioni macroscopiche

<p>Senza peggioramento delle condizioni</p>	<p><i>Alterazione cromatica.</i> Variazione del colore naturale estesa a tutto il litotipo. <i>Macchia.</i> Pigmentazione localizzata della superficie sia per la presenza di componenti naturali (inclusioni) sia per la presenza di materiale estraneo (ruggine, acqua ecc.). <i>Patina.</i> Strato sottile, omogeneo, costituito da sostanze estranee.</p>
<p>Perdita di materiale dalla superficie</p>	<p><i>Erosione anche differenziale.</i> Asportazione di materiale dalla superficie con messa in risalto dell'eterogeneità di motivi tessiturali. <i>Pitting.</i> Formazione di numerosi fori ciechi ravvicinati. <i>Alveolizzazione.</i> Formazione di cavità di forma e dimensioni variabili, dette alveoli, spesso interconnesse.</p>
<p>Perdita della morfologia del manufatto</p>	<p><i>Disgregazione e Polverizzazione.</i> Decoesione con caduta del materiale sotto forma di polvere o frammenti. <i>Esfoliazione.</i> Formazione di una o più porzioni laminari, di spessore ridotto e subparalleli tra loro. <i>Scagliatura.</i> Distacco di parti di forma irregolare.</p>
<p>Deposizione e/o formazione di prodotti secondari</p>	<p><i>Concrezione o Incrostazione.</i> Accrescimento compatto di estensione limitata. <i>Deposito superficiale.</i> Accumulo di materiali estranei di varia natura (terriccio, guano). <i>Crosta.</i> Grave modificazione dello strato superficiale del materiale lapideo distinguibile per il colore. Può distaccarsi anche spontaneamente dal substrato. <i>Efflorescenza.</i> Formazione di sali, in genere bianchi, sulla superficie. <i>Pellicola.</i> Strato superficiale di sostanze coerenti estranee al materiale lapideo. <i>Patina biologica.</i> Presenza di organismi vegetali sul substrato (alghe, funghi, licheni, muschi, piante superiori).</p>
<p>Riduzione della resistenza meccanica</p>	<p><i>Deformazione.</i> Variazione della sagoma o della forma. <i>Rigonfiamento.</i> Sollevamento superficiale localizzato. <i>Fratturazione.</i> Fessurazione del materiale.</p>

dità relativa dell'aria, a contatto con il materiale, scenderà sotto la tensione di vapore delle soluzioni contenenti i sali. Questi, quindi, potranno cristallizzare sulla superficie, ovvero a differenti profondità, in relazione alla successione dei processi di evaporazione e di rifornimento della soluzione attraverso i pori capillari.

In condizioni di bassa ventilazione il rifornimento di acqua alla superficie genera cristallizzazione superficiale in forma di efflorescenze. L'effetto sul materiale è di natura estetica. Quando invece si ha una notevole velocità di evaporazione, il fronte umido è localizzato sotto la superficie e i sali cristallizzano nei pori situati in piani più o meno distanti dalla superficie. Gli aumenti di volume, talvolta molto rilevanti, associati alla formazione dei cristalli, producono sollecitazioni meccaniche in grado di deteriorare materiali lapidei anche molto resistenti.

In definitiva, su tutti i materiali lapidei, una volta esposti agli agenti atmosferici, si manifestano fenomeni di alterazione. Tali fenomeni sono stati classificati dalla Commissione NORMAL (*NOR*mative *MA*teriali *Lap*idei).

I fenomeni sono raggruppati, secondo l'azione che essi esercitano sul materiale lapideo, in Tabella 22.5.

Consolidanti e protettivi

Un materiale lapideo esposto all'atmosfera si degrada attraverso un processo che procede dall'esterno verso l'interno in modo progressivo. Nella maggior parte dei casi il deterioramento si accompagna alla formazione di croste nere superficiali dure e poco porose, sotto le quali il materiale è de-coeso e molto poroso. Le zone interne sono, in genere, meglio conservate e hanno una porosità contenuta rispetto agli strati degradati sovrastanti.

Per contenere e arrestare il processo di disgregazione del lapideo, si può ricorrere all'impiego di prodotti consolidanti. Il consolidamento deve migliorare la resistenza meccanica del materiale lapideo e modificare la sua struttura interna. In tal modo si rende più difficile l'accesso di acqua e di soluzioni acide e saline.

Nel caso in cui il prodotto consolidante ha anche caratteristiche di idro-repellenza, il trattamento ha pure funzione protettiva. In questo caso, infatti, il prodotto riduce la penetrazione nel materiale dell'acqua con diminuzione della probabilità di innesco di processi di degrado connessi alla sua presenza.

Prima della scelta del prodotto consolidante da utilizzare, occorre effettuare una serie di operazioni conoscitive di fondamentale importanza:

- indagine chimico-fisica e mineralogico-petrografica al fine di individuare la natura della pietra su cui occorre intervenire e le cause del suo deterioramento;

- corretta scelta della tecnica di pulitura da adottare;
- eventuali incollaggi e stuccature preventive;
- eventuale protezione.

Nel restauro conservativo dei materiali lapidei il miglior consolidante è quel prodotto che, oltre a migliorare le caratteristiche meccaniche del materiale, riesce a penetrare in profondità consentendo la coesione tra le parti alterate del manufatto e l'adesione di quelle parti degradate al substrato sano.

La profondità di penetrazione del prodotto dipende:

- dalla porosità del materiale;
- dal tipo di prodotto consolidante;
- dal solvente impiegato;
- dalla modalità di applicazione.

Caratteristiche del consolidante

Un prodotto consolidante, impiegabile in interventi di tipo conservativo, deve rispondere a una serie di requisiti fondamentali.

- *Compatibilità*. Il prodotto deve essere compatibile dal punto di vista fisico e chimico con la pietra su cui è applicato. Il suo coefficiente di dilatazione termica e la sua conducibilità termica devono essere simili a quelli della pietra sana. A livello chimico il prodotto non deve innescare alcun tipo di reazione con il supporto trattato.
- *Penetrazione*. Il consolidante deve penetrare il più possibile in profondità ed essere assorbito uniformemente dalla pietra.
- *Permeabilità*. Il prodotto non deve occludere completamente i pori della pietra ma riportare la porosità del materiale ai livelli caratteristici del supporto non degradato.
- *Durabilità*. Il consolidante non deve reagire con i sali di neoformazione accumulatisi, con il tempo, sia all'interno sia all'esterno della pietra stessa. Deve, inoltre, resistere agli attacchi atmosferici (pioggia, raggi ultravioletti, vento ecc.), agli agenti inquinanti e mantenersi inalterato nel tempo.
- *Reversibilità*. Una sostanza consolidante può essere considerata reversibile se è solubile in un solvente che, pur portandola in soluzione, non intacchi il materiale lapideo originale.

Il mercato offre un'ampia gamma di prodotti. Essi sono suddivisibili in due grandi famiglie.

Consolidanti inorganici

Caratteristica comune a tutti i consolidanti inorganici è la formazione di precipitati insolubili all'interno del materiale lapideo trattato. I prodotti inorganici hanno una notevole affinità con i materiali lapidei per quanto attiene le caratteristiche fisiche. Inoltre, si caratterizzano per una durata nel tempo, in generale, superiore alle sostanze organiche. L'applicazione prevede la precipitazione, all'interno dei capillari del materiale lapideo, di un nuovo composto, poco solubile, per la reazione del consolidante con un componente del lapideo stesso o con l'anidride carbonica o con l'acqua. Tale composto penetra nelle cavità e nei pori riducendo i vuoti.

Appartengono alla categoria dei consolidanti inorganici:

- l'idrossido di bario o barite;
- i silicati alcalini;
- la calce e bicarbonato di calcio;
- l'alluminato di potassio.

Tra i principali inconvenienti connessi all'impiego di questi composti occorre ricordare:

- la scarsa resistenza agli stress meccanici;
- la scarsa efficacia in presenza di elevate e diffuse decoesioni;
- la scarsa penetrazione in profondità.

Consolidanti organici

Questi prodotti esplicano la loro azione attraverso un elevato potere adesivo in grado di "saldare" tra loro i granuli del materiale lapideo.

Nella maggior parte dei casi i consolidanti organici sono anche dotati di proprietà idrorepellenti e, quindi, protettive nei confronti della superficie trattata. I prodotti di questo genere sono polimeri sia termoplastici sia termoindurenti.

- Le resine termoplastiche presentano una struttura lineare che garantisce loro flessibilità e solubilità in appropriati solventi. Il che garantisce una parziale reversibilità dell'intervento di consolidamento a fronte, però, di un ridotto potere adesivo;
- Le resine termoindurenti sono polimeri a struttura reticolare con un buon potere adesivo, ma scarsa flessibilità e ridotte proprietà meccaniche.

Tutti i consolidanti organici presentano una limitata resistenza chimica che provoca, nel tempo, un deterioramento del polimero. Il fenomeno si concentra, in particolare, nelle zone superficiali dove alcuni polimeri tendono a ingiallire conferendo, al materiale lapideo, una colorazione diversa da quella originaria. Queste resine si caratterizzano, di frequente, per una notevole dilatazione termica rispetto a quella del materiale lapideo, differenza che può causare la formazione di fratture nel substrato.