©Ministero per beni e le attività culturali-Bollettino d'Arte

GIORGIO TORRACA

INTERAZIONE TRA DEGRADO DEGLI STRATI DI SUPERFICIE E DEGRADO DELLA STRUTTURA INTERNA DEI MATERIALI LAPIDEI. PROBLEMI DI CONSOLIDAMENTO

1. – Importanza delle condizioni superficiali per la resistenza dei materiali lapidei al deterioramento

A causa della natura dei materiali cristallini che le compongono (formati da legami chimici ionici e covalenti) le pietre sono materiali incapaci di deformazione plastica; il loro comportamento sotto sforzo può essere definito rigido e fragile.

Questo tipo di materiali è capace di sostenere notevoli carichi a compressione (se le superfici compresse sono molto bene lavorate) ma sono sempre deboli e poco affidabili sotto tensionamenti a trazione.

La debolezza a trazione è dovuta al fatto che qualunque piccolissima frattura esistente sulla superficie costituisce un luogo di concentrazione delle tensioni; lo sforzo esercitato sull'apice della frattura può essere molte volte superiore allo sforzo medio applicato sull'intera pietra. [1]

Accade quindi facilmente che all'apice di una frattura si raggiunga il carico di rottura per valori del carico medio ancora assai bassi; la frattura allora si allunga e il fattore di concentrazione (che è legato al rapporto tra lunghezza della frattura e raggio al suo apice) aumenta ulteriormente (*fig.* 1). In queste condizioni la marcia della frattura attraverso il materiale diventa sempre più veloce, senza possibilità di arresto, e la pietra si rompe.

La resistenza a trazione di un materiale rigido e fragile dipende quindi dalle condizioni della sua superficie. È noto infatti che il vetro in lastra può essere facilmente rotto praticando una piccola incisione sulla sua superficie mentre invece le fibre di vetro che hanno una superficie quasi esente da difetti mostrano un'elevata resistenza a trazione e flessione.

La condizione della superficie influenza anche la resistenza a compressione di una pietra, ma in questo caso sono le piccole escrescenze che possono provocare una concentrazione delle tensioni (*fig.* 2).

È noto infatti che per la costruzione di strutture soggette a carichi importanti (ad esempio i pilastri delle cattedrali gotiche) si usavano in passato pietre con la superficie esattamente lavorata oppure si inserivano tra blocco e blocco malte di allettamento o altri dispositivi per distribuire il carico.

L'ineguale distribuzione dei carichi all'interno delle pietre e la varia natura dei componenti cristallini delle pietre stesse possono determinare l'insorgenza di una concentrazione delle tensioni in vari punti all'interno del materiale, e quindi di una microfratturazione; ciò può avvenire in pietre soggette a carichi medi assai inferiori (50 % o meno) alla loro resistenza ultima alla compressione. [2]

La comparsa di microfratture, oltre alla riduzione della resistenza a trazione del materiale, provoca anche effetti chimico-fisici a causa della idrofilicità dei materiali lapidei. [3]

Le pareti delle fratture nelle pietre sono infatti capaci di formare legami Idrogeno con l'acqua liberando una notevole quantità di energia. Come conseguenza l'acqua è attirata all'interno delle fratture e può spostarsi a distanze notevoli anche contro l'azione della forza di gravità (risalita capillare). Dato che il fenomeno di attrazione per l'acqua è dovuto alle pareti, esso avrà effetti tanto più importanti quanto più le pareti sono vicine ossia quanto più le fratture sono sottili (capillarità).

Le fratture permettono quindi l'accesso di acqua atmosferica all'interno del materiale e l'inizio di processi chimici di degrado (attacco di acidi) o tensionamenti meccanici causati da cambiamenti di fase (gelo o cristallizzazione di sali).

La forza e la resistenza all'ambiente dei materiali lapidei dipende quindi dalle condizioni della loro superficie. Essa dipende anche dalla natura dei materiali che si trovano all'interno dei pori e delle microfratture. È noto per esempio che la resistenza a trazione delle pietre diminuisce quando sono umide mentre la presenza di un materiale non polare migliora le caratteristiche meccaniche; ad esempio in un esperimento eseguito in Inghilterra l'impregnazione con paraffina ha provocato un aumento del 400 % della resistenza a trazione in un calcare. [4]

I tensionamenti meccanici causati da cicli termici producono quindi molto più danni se avvengono in presenza di umidità.

Per spiegare questo fatto si può avanzare l'ipotesi che l'energia liberata dai legami formati con l'acqua serva a compensare, in parte, l'energia richiesta per rompere i legami del materiale; l'acqua agirebbe quindi come un agente che facilita la rottura dei legami tra gli atomi del solido idrofilo.

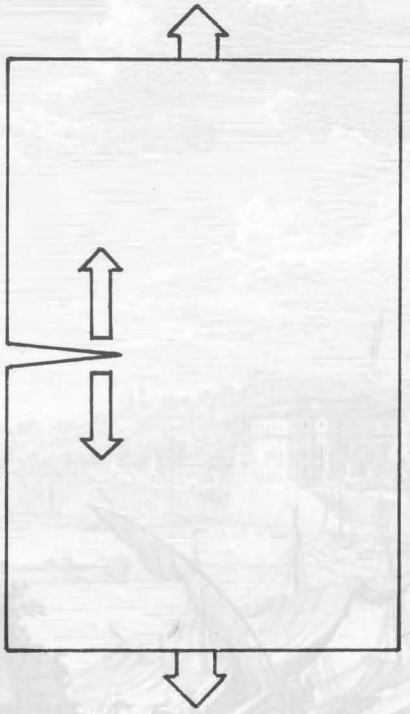
La rottura di un materiale deve quindi essere sempre considerata come un processo nel quale all'energia meccanica si somma quella termica (le vibrazioni degli atomi) e quella chimica (l'energia liberata per ricombinazione delle superfici formate per rottura con i materiali immediatamente disponibili).

Le pietre oltre alla porosità causata da microfratture ne possiedono però anche una naturale originatasi durante il processo geologico di formazione.

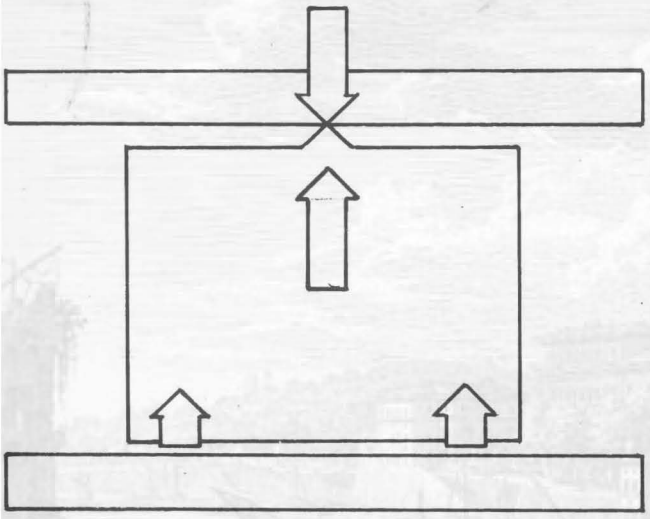
La porosità naturale, che è bassa e scarsamente influente nei marmi e nelle pietre dure in genere, assume invece una notevole importanza nelle pietre sedimentarie più morbide (calcari, arenarie e tufi).

Nelle pietre tenere molto porose l'importanza relativa degli sforzi meccanici imposti alla pietra diminuisce rispetto agli effetti prodotti dalla migrazione dell'acqua nei pori. In queste pietre lo spazio interno è facilmente accessibile attraverso varie vie (aspirazione capillare dal suolo, penetrazione di pioggia) e le condizioni della superficie divengono relativamente meno importanti nel determinare l'evoluzione dei processi di degrado.

©Ministero per beni e le attività culturali-Bollettino d'Arte



1 – CONCENTRAZIONE DELLE TENSIONI SU UNA FRATTURA SUPERFICIALE SOTTO UN CARICO A TRAZIONE. FORMULA APPROSSIMATA DI INGLIS PER IL FATTORE DI CONCENTRAZIONE



2 – CONCENTRAZIONE DELLE TENSIONI SU UNA IRREGOLARITÀ SUPERFICIALE SOTTO UN CARICO A COMPRESSIONE

Nei materiali molto porosi è difficile infatti mantenere in buone condizioni una superficie per un tempo abbastanza lungo perché essa viene spesso aggirata dall'acqua e si trova così presa in mezzo tra l'azione dell'ambiente esterno e i fenomeni chimico–fisici che si svolgono nei pori quando essi contengono acqua (gelo e cristallizzazione di sali).

2. – Conseguenze della teoria del deterioramento dei materiali lapidei sulla conservazione delle pietre di interesse artistico e monumentale

L'influenza della microfratturazione e della penetrazione d'acqua sui processi di alterazione permette di spiegare molte caratteristiche dei processi di degrado delle pietre.

La tecnica di lavorazione usata dallo scalpellino (o dallo scultore) influenza spesso il comportamento della pietra rispetto all'ambiente; il lavoro di scalpello delicato, condotto con orientamento tangenziale dell'utensile, e seguito da una rimozione accurata del materiale danneggiato mediante polveri abrasive morbide, produce superfici lisce e compatte che mostrano buona resistenza al degrado. Lo stesso succede per superfici frequentemente soggette al tocco di visitatori o passanti; qui la conservazione è favorita oltre che dalla lucidatura meccanica anche dai grassi depositati per contatto con la pelle umana. È noto viceversa che le superfici ruvide e molto irregolari, su cui lo scalpello si è accanito, sono molto più soggette ad alterazione. [5]

Anche molto alterabili sono le pietre che subiscono tensionamenti perché non libere di espandersi quando si riscaldano sotto il sole, ad esempio lapidi incastrate in muri (che si incurvano progressivamente, con la convessità all'esterno) o lastre di paramenti sprovviste di giunti di dilatazione. Si noti bene che in questi casi l'alterazione non è soltanto meccanica ma anche chimica (in ambienti inquinati queste pietre sono fortemente solfatate) perché le microfratture prodotte dal tensionamento permettono l'attacco in profondità degli acidi trasportati dalla pioggia o dalla condensazione di umidità.

La teoria dell'alterazione è però particolarmente importante per i riflessi che ha sulla prassi di pulitura, consolidamento e protezione. [6]

Una prima conseguenza della teoria è che bisogna assolutamente evitare di danneggiare le superfici delle pietre durante i processi di restauro; ogni nuova microfrattura rappresenterà infatti un indebolimento meccanico della pietra (nella sua intera massa) e un'accelerazione dei processi chimico–fisici di alterazione. Ciò è particolarmente vero per le pietre dure, poco porose.

Questa considerazione esclude molti dei processi di pulitura attualmente impiegati (raschiatura, uso di spazzole rotanti, sabbiature, uso di *shock* termici) in tutti i casi in cui la durabilità del materiale è importante. Un metodo di pulitura ideale dovrebbe non creare danni e non formare sottoprodotti pericolosi per la futura conservazione (quest'ultima considerazione esclude anche acidi e basi che lasciano dietro di sé sali potenzialmente pericolosi).

I metodi oggi consigliati per le superfici di interesse storico e artistico (acqua nebulizzata, impacchi di carta e argilla, paste chimiche quasi neutre, microsabbiatura) non sono essi stessi perfetti ed è probabilmente impossibile eseguire una pulitura senza apportare alcun danno alla superficie originale. La pulitura deve però essere eseguita lo stesso, pur cercando di minimizzare i danni, perché essa permette di procedere ai trattamenti successivi di consolidamento e protezione ai quali si affida il compito di tenere sotto controllo l'alterazione, almeno per qualche tempo.

Una seconda considerazione che deriva direttamente dalla teoria è che, nel restauro delle pietre, occorre ricostituire una superficie compatta, il più possibile esente

©Ministero per beni e le attività culturali-Bollettino d'Arte

da difetti, che metta il materiale in grado di resistere agli sforzi meccanici e impedisca la penetrazione dell'acqua.

Conseguenza di questo principio è la necessità di stuccare accuratamente qualsiasi frattura macroscopica superficiale; la stuccatura deve essere eseguita su ogni frattura individualmente, con un materiale adatto, senza affidarsi alla generica azione di un consolidamento con cui il materiale intero venga trattato. I consolidamenti infatti per lo più non riescono a colmare e stabilizzare fratture visibili; la loro azione è invece efficace sulle microfratture che possono essere "ricucite" dai composti, organici o inorganici, depositati.

Il consolidamento delle pietre comprende quindi una azione macroscopica (su giunti e fratture visibili) e una microscopica (su microfratture); due operazioni che devono essere ben differenziate e per le quali, in genere, occorrono materiali diversi.

Nel caso delle pietre porose, come si è già accennato, il problema si pone in modo diverso e non è di facile soluzione. Non si tratta infatti soltanto di creare una superficie resistente ma sarebbe invece necessario spingere in profondità l'azione di "ricucitura" del materiale per creare uno strato resistente abbastanza spesso e bene ancorato al nucleo interno della pietra che non ha ancora subìto l'aggressione dell'ambiente.

La creazione di una barriera idrorepellente diventa particolarmente difficile nel caso di pietre che contengano argille, come le arenarie dell'Italia Centrale e le molasse della Svizzera Romanza. L'argilla è infatti un materiale che sembra assorbire acqua (con aumento di volume) anche quando si cerca di impedirlo interponendo strati idrorepellenti; l'espressione "bagnatura preferenziale" (*preferential wetting*) è stata usata per spiegare questo comportamento che rende inefficienti, o perfino dannosi, gli strati idrorepellenti superficiali applicati su materiali di questo tipo.

Pietre molto porose dovrebbero quindi subire in primo luogo un trattamento di "ricucitura" profonda con stucchi e consolidanti e poi andrebbero difese da ogni lato contro la penetrazione dell'acqua; ciò è ovviamente assai difficile nel caso di murature di notevoli dimensioni.

3. – Provvisorietà dei metodi di consolidamento e protezione delle pietre

L'azione continua dell'ambiente sulle superfici trattate a scopo conservativo ne compromette progressivamente la continuità meccanica e la capacità di respingere, o almeno ridurre, l'accesso dell'acqua all'interno.

I fattori più importanti che determinano la progressiva inattivazione dei sistemi protettivi introdotti mediante i procedimenti conservativi sono:

a) gli sbalzi termici, e le tensioni meccaniche che ne risultano, che provocano la formazione di nuove microfratture o la perdita di adesione delle stuccature;

b) l'ossidazione dei materiali organici idrorepellenti causata dall'azione dell'ossigeno e della luce; essa provoca la perdita dell'idrorepellenza entro un numero di anni che dipende dalla qualità e dallo spessore dello strato idrorepellente;

c) l'attacco degli acidi atmosferici (soprattutto anidride carbonica e derivati dello Zolfo) che si intensifica man mano che gli strati protettivi perdono il potere idrorepellente. I dati finora rilevati fanno pensare che gli acidi si fissano sulle pietre come gas o come aerosol ma che l'attacco prosegue solo se l'acqua interviene a ridistribuire il materiale solubile formando cristalli macroscopici dei prodotti di reazione.

La conservazione di una pietra esposta all'azione aggressiva dell'ambiente deve quindi essere affidata ad un processo continuo di manutenzione.

La vita utile dei trattamenti protettivi dipende però fortemente dalle condizioni del "micro–ambiente" che si trova a stretto contatto con la superficie della pietra. È quindi possibile rallentare i cicli di manutenzione migliorando le condizioni ambientali sul contorno dell'oggetto da proteggere. In particolare i seguenti punti sono di importanza notevole:

a) ridurre gli sbalzi termici sulla superficie delle pietre;

b) evitare la condensazione di umidità e la deposizione di aerosol;

c) evitare l'impatto diretto di pioggia o lo scorrimento di rivoli di pioggia;

d) per i materiali porosi, evitare la penetrazione di umidità nel materiale (risalita capillare, pioggia dispersa, perdite da tubi, ecc.).

4. – Conclusioni

Le condizioni superficiali della pietra determinano le sue prestazioni meccaniche e la resistenza all'ambiente tanto più decisamente quanto meno poroso è il materiale.

I sistemi protettivi che tendono a ricostituire e mantenere una superficie compatta per far fronte all'aggressione dell'ambiente sono essi stessi attaccati con una velocità variabile a seconda delle condizioni ambientali.

Una politica di conservazione consiste quindi nella riduzione dell'intensità dei fattori di alterazione e nella esecuzione di cicli di manutenzione la cui frequenza è commisurata alla velocità prevedibile con cui i sistemi protettivi approntati saranno messi fuori servizio.

Dicembre 1984

1) R.L. Colombo, *Le caratteristiche meccaniche dei materiali*, Firenze 1975, pp. 8–19.

2) J.B. Walsh, *Deformation and Fracture of Rock*, in *Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments*, Washington, D.C., 1982, pp. 87–187; R. Perami, *La minéralogie dans les travaux publics*, in *Annales ITBTP*, n. 384, Juin 1980, série: *Sols et Fondations*, pp. 22–25.

3) G. Torraca, *Porous Building Materials. Materials Science for Architectural Conservation*, 2 ed., ICCROM, Roma 1982, pp. 3–43.

4) L. Arnold, D.B. Honeybornf, C.A. Price, *Conservation of Natural Stone*, in *Chemistry and Industry*, 17 April 1976, pp. 345–347.

5) G. Alessandrini *et Alii*, *Investigation on the Degradation of Stone: X. Effects of Finishing Techniques on Sandstone and Marble*, in *Atti del Symposium "The Conservation of Stone II"*, Bologna 1981, pp. 139–164.

6) G. Torraca, *Treatment of Stone in Monuments: a Review of Principles and Processes*, in R. Rossi Manaresi (*Ed.*), *Proceedings of International Symposium "The Conservation of Stone I"*, Bologna 1976, pp. 297–315.