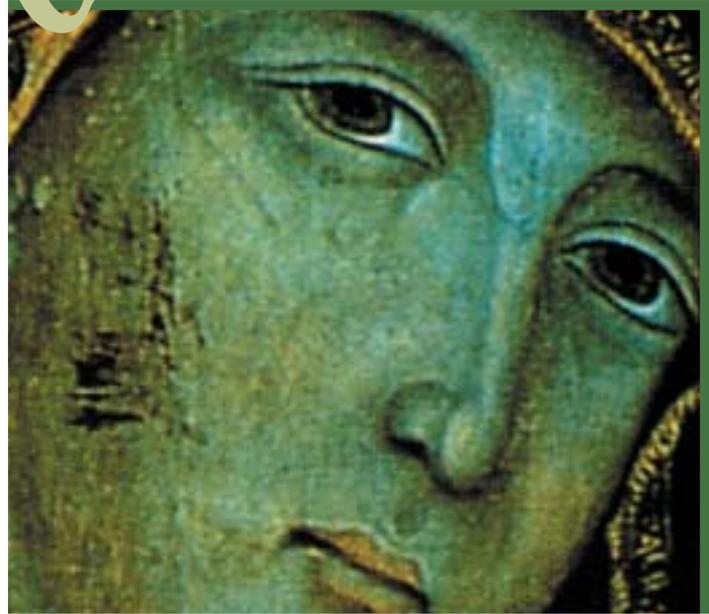




’  
ambie





# ente museale

## Principali fattori di degrado

Il rapporto tra l'ambiente ed i beni culturali viene quasi sempre considerato limitandone l'analisi all'ambiente esterno. In effetti però il ruolo che l'ambiente interno nei musei può svolgere ai fini della salvaguardia del patrimonio culturale è assai significativo e non di rado determinante. Il trasporto degli inquinanti dall'esterno,

l'inquinamento dovuto alla presenza dei visitatori spesso contemporaneamente presenti in numeri incompatibili con la protezione di un'opera d'arte, la minore attenzione prestata all'ambiente interno nel monitoraggio e controllo sono elementi che concorrono alla crescita dell'attenzione di esperti e gestori verso l'ambiente museale indoor.



Il degrado di un'opera d'arte, fortemente accentuato in questi ultimi anni, si manifesta subito dopo la realizzazione del manufatto e continua progressivamente a contatto con l'ambiente. Tale fenomeno, anche in assenza di fattori di degrado antropogenico, è un processo naturale, progressivo e irreversibile, in quanto soggiace al Secondo Principio della Termodinamica, cioè rientra nell'ordine naturale delle cose. Si può affermare che queste trasformazioni sono la diretta conseguenza di un disequilibrio che si manifesta tra le due entità fondamentali cui fa riferimento il ragionamento termodinamico, cioè tra il "sistema" e il "mezzo", intendendo per "sistema" il corpo o la porzione di materia che si intende studiare, e per "mezzo" l'ambiente circostante che può interagire con il sistema. Una condizione di disequilibrio si produce ogni volta che una o più grandezze fisiche scelte per rappresentare lo sta-

to del sistema o del mezzo assumono nelle due entità valori diversi.

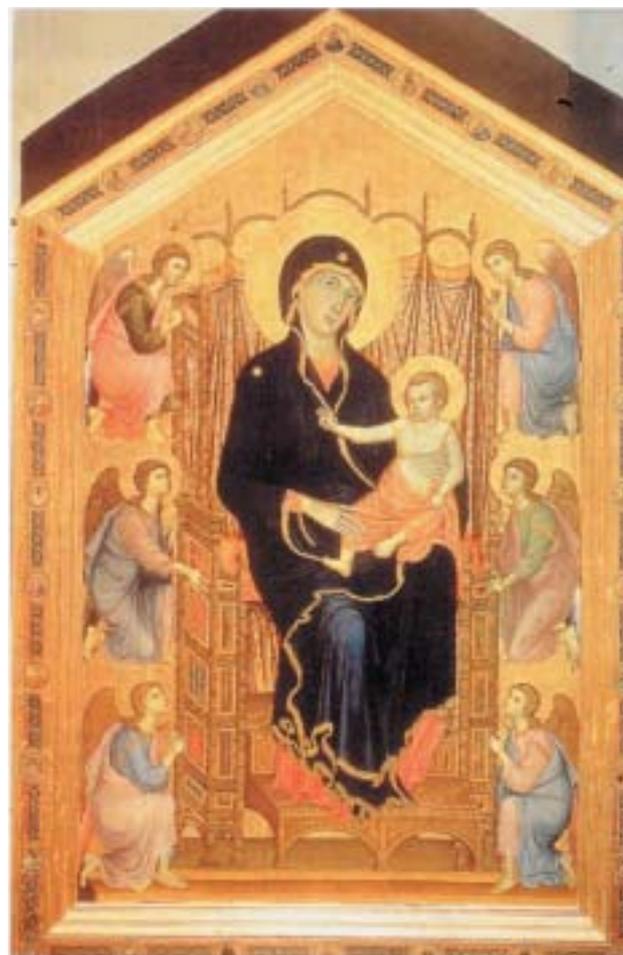
### Luigi Campanella

to del sistema o del mezzo assumono nelle due entità valori diversi.

Questo ragionamento può essere esteso per analogia anche ai fenomeni di deterioramento dei materiali storico-artistici. Infatti se si attribuisce all'oggetto-bene culturale il carattere di "sistema" e quello di "mezzo" all'ambiente in cui l'oggetto è conservato, si può sostenere che ogni processo di deterioramento, prodotto da cause diverse, di natura fisica, chimica o biologica, è riconducibile a trasformazioni termodinamiche.

Le trasformazioni più frequenti sono rappresentate da trasferimenti di calore dal sistema al mezzo (o viceversa), spesso accompagnati da trasferimenti di acqua in fase liquida o di vapore.

Il modello termodinamico consente di dedurre che la maggior parte dei processi di degrado potrebbe essere evitata se si potesse realizzare una condizione di perfetto equilibrio tra oggetto da conservare e ambiente di conservazione.



Esso fornisce inoltre l'indicazione concreta di un criterio generale di conservazione, fondato sulla possibilità di ottenere un rallentamento dei processi di deterioramento con procedimenti capaci di ridurre l'entità degli squilibri tra oggetto e ambiente.

I fenomeni di degrado sono determinati da quei fattori che agiscono nell'alterare l'aspetto, le dimensioni, o il comportamento chimico del materiale, sia nei suoi elementi individuali, sia come parti nell'insieme della struttura. Lo studio del fenomeno è reso complesso a causa della difficoltà di separare gli effetti dei vari agenti di degrado. Nessun fattore agisce da solo; l'importanza di ognuno è influenzata dall'effetto concomitante degli altri, ossia l'esposizione all'azione di uno può rendere il materiale maggiormente suscettibile alla successiva azione degli altri. È quindi chiaro che l'effetto osservato è dovuto alla somma di più fattori.

### CONDIZIONI AMBIENTALI

Il controllo delle condizioni microclimatiche, dell'illuminazione e qualità dell'aria all'interno degli ambienti destinati alla conservazione di beni di interesse culturale è un tema di grande importanza e notevolissimo interesse. In genere quello che si cerca di realizzare e mantenere sono condizioni climatiche "di benessere" per i beni culturali, ossia tali da ridurre al minimo la velocità dei processi di degrado. Le condizioni termoigrometriche possono influenzare e modificare alcune proprietà dei materiali: di conseguenza valori non corretti possono rendere assai più veloce il degrado di molti beni culturali. Ad esempio, materiali di natura organica (legno, avorio, ecc.) a contatto con aria molto secca si contraggono divenendo contemporaneamente più rigidi e fragili, mentre si dilatano e divengono più plastici e flessibili a contatto con aria umida; ancora, a contatto con aria umida e calda questi ed altri materiali possono subire attacchi di natura chimica e biologica (corrosione di metalli e vetri, sviluppo di muffe, funghi, insetti).

Alcuni di questi effetti, ad esempio nel caso di materiali porosi, potranno essere osservati nell'intera massa del corpo (legno, carta, ecc.); altri, nel caso di materiali compatti, solo sulle superfici esposte all'aria (manufatti metallici, ecc.). Le grandezze termoigrometriche sono quelle che meglio definiscono il microclima e le sue interazioni con le superfici del manufatto, per cui è utile darne una breve descrizione.

#### Temperatura (T)

Indica il livello di caldo o di freddo, misurato sulla base di una scala di temperatura a mezzo di uno dei vari tipi di termometri.

Fisicamente viene definito come la misura dell'Energia cinetica media  $E$  delle molecole del gas in esame (nel nostro caso l'aria) secondo l'equazione:

$$T = (2/5)kE$$

dove  $k$  è la costante di Boltzmann e  $T$  è espressa in °K.

#### Umidità Relativa (UR)

Informa sul grado di saturazione dell'aria e dipende dalla temperatura (con cui ha un rapporto inversamente proporzionale, ossia un aumento di questa provoca una diminuzione della UR) e dalla concentrazione di vapore presente nell'atmosfera. Fisicamente si esprime come il rapporto fra la quantità di vapore  $m_v$ , presente in un determinato volume di atmosfera, e la quantità di vapore  $m_s$  che si avrebbe se alla stessa temperatura si fornisse all'atmosfera vapor acqueo sino a raggiungere la saturazione:

$$UR = (m_v/m_s) \times 100 \quad (\%)$$

#### Umidità Specifica (US)

Si definisce come il rapporto tra la massa del vapore  $m_v$  e la massa complessiva del vapore e dell'aria ( $m_v + m_a$ ) in cui il vapore è disperso (tale rapporto va moltiplicato per 1000 per poterlo esprimere in g/Kg), cioè:

$$US = 10^3 \times (m_v/m_v + m_a) \quad (g/Kg)$$

poiché US è indipendente sia dalla temperatura che dal volume, ma varia solo se varia la quantità di vapore presente, è un parametro molto

utile per seguire il destino di una certa massa d'aria o mettere in evidenza evaporazioni, condensazioni o rimescolamenti di masse d'aria a diverso contenuto di vapore.

#### Umidità Assoluta (UA)

Si definisce come il rapporto tra la quantità di vapore  $m_v$ , contenuto in un certo volume di aria (V), ed il volume stesso.

$$UA = m_v/V \quad (\text{g/m}^3)$$

#### Temperatura di rugiada (TR)

Esprime la temperatura in cui l'aria diventa satura, e può avere inizio la condensazione.

### DISTANZA DAL PUNTO DI RUGIADA (DTR)

Si definisce come la differenza fra la temperatura dell'aria e la temperatura del punto di rugiada, e ci permette di valutare la possibilità che si verifichino fenomeni di condensazione.

Ogni manufatto risulta essere fortemente caratterizzato dalla storia dei suoi pregressi condizionamenti ambientali che hanno determinati degli assestamenti del materiale in risposta alle forzanti ambientali esterne, al gioco delle tensioni interne al materiale, e alla sua elasticità, dando vita a delle microfature interne, quando veniva superato il limite di sopportabilità delle tensioni. Man mano che il materiale invecchia la sua elasticità diminuisce e con essa i limiti di tolleranza agli stress meccanici. Risulta perciò opportuno cercare di mantenere stabile il microclima all'interno del quale l'oggetto si è adattato e da cui è stato condizionato, in tutti i casi in cui sia possibile e dove non esistano incompatibilità. È però possibile rendere migliore il microclima originario togliendogli o attenuandogli cicli diurni, fluttuazioni, brusche transizioni e gradienti. Rapidi cambiamenti temporali (o forti gradienti spaziali) di temperatura e/o umidità relativa o comunque scambi di calore e vapore causano a molti materiali stress interni con effetti irreversibili e cumulativi che intaccano l'integrità strutturale dell'oggetto accelerandone il processo di degrado.

Anche i cicli di condensazione-evaporazione possono risultare pericolosi per i manufatti, soprattutto per il fatto che l'acqua in fase liquida, formata e penetrata all'interno dei pori, trasporta con sé agenti inquinanti acidi e corrosivi, che attaccano gli stessi materiali, e anche nocivi sali solubili.

Nel caso per esempio dei materiali lapidei la successiva evaporazione dell'acqua all'interno dei pori porta alla riprecipitazione dei sali solubili nell'acqua condensata, con la formazione di nuovi cristalli, con probabilità di forti pressioni all'interno dei pori.

In un materiale contenente una soluzione salina, la precipitazione dei sali solubili causata, come già visto, dall'evaporazione dell'acqua può avvenire all'interno della superficie porosa, oppure alla superficie esterna.

Il fenomeno è regolato da due meccanismi concomitanti: la diffusione del vapor d'acqua attraverso lo strato esterno, già asciutto, del materiale, e la migrazione della soluzione entro la rete porosa dalle zone interne, ancora bagnate, verso quelle esterne che si stanno asciugando.

Se la velocità di diffusione del vapore è inferiore alla velocità di migrazione della soluzione, quest'ultima potrà arrivare fino alla superficie esterna, dove inizierà a cristallizzare. Nel caso contrario l'equilibrio tra i due fenomeni si raggiungerà ad una certa distanza dalla superficie esterna, e la cristallizzazione avrà luogo al di sotto di essa. Nel primo caso osservato si parla di efflorescenze, mentre nel secondo, di subflorescenze.

Molte reazioni chimiche vengono inoltre ad essere notevolmente accelerate all'aumentare dell'attività termodinamica dell'acqua assorbita sulla superficie stessa e quindi anche con l'aumentare dell'UR dell'aria a contatto. L'accelerazione del degrado è in genere notevole al di sopra di UR del 60-70%.

Ovviamente, qualora ai meccanismi di reazione partecipano inquinanti presenti nell'aria, la velocità dell'attacco, oltre che dall'UR, risulterà fortemente influenzata dalla natura e dalla quantità delle specie inquinanti, e cioè dalla qualità dell'aria.

Tabella 1  
Limiti massimi di concentrazioni segnalati per la qualità dell'aria in musei e archivi.

Inquinante	Musei	Archivi
Biossido di zolfo (SO <sub>2</sub> ) μ/m <sup>3</sup>	10	1,05
Biossido di azoto (NO <sub>2</sub> ) μ/m <sup>3</sup>	10	4,7
Ozono (O <sub>3</sub> ) μ/m <sup>3</sup>	2	25,5
Biossido di carbonio (CO <sub>2</sub> ) μ/m <sup>3</sup>	-	-
Polveri sospese		
(particelle totali sospese: PTS) μ/m <sup>3</sup>	-	75

Tabella 2  
Inquinanti atmosferici in interni museali.

Inquinante	Limite consigliato	Istituzione
O <sub>3</sub>	1 ppb <sup>(*)</sup>	NMAB <sup>(*)</sup>
SO <sub>2</sub>	< 0,4 ppb	NMAB, NBS <sup>(*)</sup>
NO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub>	< 2,5 ppb, BAT <sup>(*)</sup>	NMAB, NBS
Particelle (>2)	Rimozione 95%	BSI <sup>(*)</sup>

(\*) 1 ppb = 1 μg/m<sup>3</sup>

(\*) BAT: migliore tecnologia disponibile. NMAB: National Materials Advisory Board. NBS: National Bureau of Standards. BSI: British Standard Institution.





Anche il rischio di attacco biologico (sviluppo di muffe, imputridimenti da batteri, insetti), soprattutto su substrati di natura organica aumenta notevolmente con l'attività termodinamica dell'acqua sul substrato e quindi con l'UR dell'aria a contatto. In genere, tanto più l'UR cresce tanto più rapido è lo sviluppo delle colonie fungine interessate o di alcuni generi di batteri ed insetti.

### **AGENTI BIOLOGICI DI DEGRADO**

Il degrado biologico di un oggetto viene definito "biodeterioramento", intendendo con questo termine "qualsiasi cambiamento indesiderato delle proprietà di un materiale causato dall'attività di un organismo vivente".

Le alterazioni di origine biologica dei materiali si presentano con una fenomenologia assai diversa che è il risultato dello sviluppo degli organismi biodeteriogeni e del danno da essi apportato; questa varia inoltre in relazione alla natura del substrato e delle caratteristiche ambientali. Una tipologia di danno rilevante è quella indotta dall'assunzione e dall'emissione di sostanze a seguito del metabolismo cellulare dei biodeteriogeni. Sono di questo tipo i danni legati all'assorbimento a scopo nutrizionale di sostanze organiche ed inorganiche da parte del substrato, con conseguenti modificazioni chimiche e strutturali del materiale; a titolo esemplificativo si può ricordare l'assunzione di sali, presenti nel materiale lapideo, da parte degli organismi autotrofi (in grado di sintetizzare le molecole organiche necessarie al loro metabolismo a partire da sostanze inorganiche) o quella di polisaccaridi e proteine, presenti nei materiali organici, operata dagli organismi eterotrofi (utilizzando i composti organici quale fonte energetica e nutrizionale) mediante idrolisi enzimatica. Ancora, l'emissione di cataboliti, per lo più acidi, può causare un danno simile a quello di tipo chimico, determinando la formazione di sali solubili o insolubili. La genesi delle patine di ossalato di calcio ad esempio, ampiamente discussa in ambito scientifico, è stata messa in relazione con la produzione di acido ossalico da parte di alcuni organismi, come per esempio i funghi. Spesso risulta pericolosa anche l'azione meccanica prodotta dagli organismi che, penetrando ed accrescendosi all'interno del materiale, producono decoesioni e fessurazioni più o meno rilevanti del substrato con il conseguente distacco di cristalli o di intere parti del materiale. Nel caso specifico di ambienti interni, sono soprattutto i microorganismi a causare questo tipo di danno in modo particolare su dipinti murali e stucchi, anche se le strutture cellulari sono di dimensioni microscopiche e la loro penetrazione è alquanto superficiale. Il substrato così decoesionato può inoltre essere suscettibile di ulteriori fenomeni di degrado in quanto le soluzioni di continuità formate incrementano le vie d'accesso all'acqua e agli inquinanti atmosferici. Il danno di tipo estetico sta generalmente ad indicare modificazioni dell'aspetto esteriore originario di un'opera d'arte dovuto allo sviluppo di colonizzazioni biologiche. Tali modificazioni, pur non compromettendo l'integrità strutturale del manufatto, provocano l'impovertimento del valore estetico-culturale dell'oggetto. Si deve tuttavia tenere in considerazione che un danno estetico è quasi sempre accompagnato da meccanismi di biodeterioramento di tipo chimico e fisico. Un esempio di tale degrado in ambienti interni è rappresentato dal rilascio di pigmenti organici da parte di batteri, con conseguente formazione di macchie.

### **TRASPORTO E DEPOSIZIONE**

#### **DEGLI INQUINANTI**

La formazione di alterazioni superficiali sulle opere d'arte è il risultato di una serie di processi che hanno inizio con l'emissione di sostanze inquinanti da varie fonti, che continua con la loro dispersione in atmosfera dove subiscono importanti trasformazioni, fino alla deposizione di queste sulle superfici.

La deposizione secca delle sostanze inquinanti coinvolge tutte le particelle sospese in aria sia sotto forma di gas che aerosol. Naturalmente le dimensioni delle particelle inferiori a 1 µm fino ad alcune





decine di micron) sono di fondamentale importanza, in quanto l'aria può agire sia come un mezzo discontinuo per le particelle più piccole, che come mezzo continuo idrostatico o idrodinamico per le particelle più grandi. La deposizione risulta essere il risultato di diverse cause che i fenomeni microfisici e il microclima locale possono incrementare o ridurre, anche in funzione del diametro delle particelle inquinanti. Per lo stesso tipo di meccanismo, e per lo stesso diametro delle particelle, la quantità di particelle che si depositano su una superficie dipende dalla loro concentrazione nell'atmosfera, ossia nel caso in cui abbiano la stessa probabilità di urtare una superficie, la quantità di esse che si deposita è proporzionale alla loro concentrazione.

Tuttavia la probabilità di deposizione varia non solo con le dimensioni delle particelle, ma anche con le condizioni microfisiche in prossimità della superficie.

La deposizione Browniana è dovuta al fatto che le molecole in atmosfera sono sempre dotate di violenta agitazione, corrispondente al loro livello termico. Le particelle sono infatti soggette ad un continuo bombardamento da parte del mezzo in cui sono in sospensione, tanto che, osservando il moto di una di queste, si riscontra una traiettoria a zigzag, dove la fine dei tratti rettilinei è determinata da un urto.

## **AMBIENTE INTERNO**

Per quanto riguarda i materiali custoditi nei musei, il gran numero delle tipologie che costituiscono le opere d'arte è enormemente ampliato dalle raccolte specialistiche etnologiche, dai musei di scienze naturali, dalle biblioteche, dagli archivi storici, dalle fototeche, dalle raccolte di moda, dai musei del folklore, dalle raccolte di strumenti musicali, nonché dai numerosissimi musei regionali e locali, pubblici o privati.

Un panorama, già vasto per quanto riguarda il "contenuto", viene ulteriormente ampliato dalle pressoché infinite caratteristiche dei "contenitori" stessi.

I materiali museali, siano essi gli arredi interni che le strutture stesse dell'edificio che ospita la raccolta, sono caratterizzati da una forte variabilità: così come se ne trovano di moderni e razionali, ne esistono di antichi, essi stessi "beni culturali" da proteggere. Non si dimentichi, inoltre, la grande variabilità geografica e quindi climatica ed ambientale nella quale il nostro patrimonio culturale è parcellizzato. Gli ambienti confinati devono inoltre essere tutelati e controllati per quanto riguarda la qualità dell'aria (tabelle 1 e 2 secondo quanto consigliato da vari autori e Istituzioni), tenendo presente come peculiarità sostanziale che nei musei si ha, in genere, la presenza discontinua e talvolta massiccia di visitatori ai quali non è possibile imporre comportamenti, come accade invece in alcuni settori industriali. Inoltre devono essere garantite condizioni sufficientemente confortevoli dal punto di vista del ricambio d'aria e del microclima, e di "benessere" per i materiali da conservare. Numerosi inquinanti hanno la possibilità di interagire con i materiali da conservare a concentrazioni inferiori e per tempi superiori a quelli che in genere si considerano accettabili per la salute umana: ciò richiederebbe standard di qualità dell'aria particolarmente vincolanti. In un ambiente confinato, quale quello museale, alle sostanze indesiderate provenienti dall'aria esterna si aggiungono quelle dovute alla presenza dei visitatori: ad esempio il vapore d'acqua, dovuto sia alla respirazione che alle funzioni fisiologiche di termoregolazione mediante traspirazione.

Esaminando in definitiva le possibili veicolazioni di inquinanti all'interno di un ambiente, si possono distinguere vari meccanismi. L'accumulo di inquinanti sarà dovuto al bilancio di diversi fattori quali:

- apporto dall'esterno: ricambio d'aria, infiltrazioni, ingresso di visitatori;
- apporto dall'interno: cessione dai materiali, attività di visitatori, attività interne;
- rimozione: ricambio d'aria, filtrazioni, deposizione, trasformazioni o reazioni di sostanze, azione dei sistemi di pulizia e/o filtrazione.

