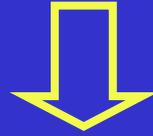


# **ASPETTI TERMODINAMICI DEI PROCESSI DI DEGRADO AMBIENTALE DEI BENI CULTURALI**

**Luigi Campanella  
Dipartimento di Chimica  
Università di Roma "La  
Sapienza"**

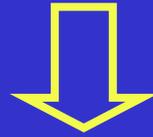
**INQUINAMENTO ATMOSFERICO E BENI CULTURALI. PROTEZIONE E  
CONSERVAZIONE DEL PATRIMONIO CULTURALE  
Udine 5-7 Dicembre 2006**

**UOMO**



**ambiente**

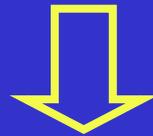
**RISORSE**



**INDUSTRIA**



**DEPAUPERAMENTO RISORSE UMANE**



**DEGRADO**

(immissione  
di rifiuti ed  
inquinanti)

**Consumo Mondiale energetico anno**

**=**

**12 Gtoneq (tonnellate equivalenti di petrolio)**

**60% da idrocarburi**

**25% da carbone**

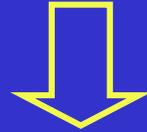
**incremento = 20% 2006 - 2015**

# Il destino dei metalli

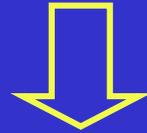


Dissoluzione  $\Longrightarrow$  BB.CC. (lapidei, metallici, pittorici)  
Ridurre la crescita di entropia cioè il consumo energetico

Limiti dello Sviluppo  
(ONU, 1972 Stoccolma)



Rio de Janeiro 1992



rapporto Bruntland  
(sviluppo sostenibile è quello che soddisfa  
i bisogni del presente senza compromettere  
la capacità delle generazioni future  
di soddisfare i propri)



Kyoto (?)

- Storicamente sono stati gli inquinanti inorganici i primi ad essere studiati ed ancora oggi molte delle centraline che controllano l'inquinamento urbano misurano inquinanti inorganici come CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>.
- L'acidità atmosferica è il primo nemico dei Beni Culturali: essa è in grado di solfatore il marmo trasformandolo nell'assai meno mobile e stabile gesso, di corrodere a secco ed ad umido i materiali metallici, di idrolizzare lignina e cellulosa rendendole assai meno concrete e soprattutto, nel caso della carta assai meno abili a conservare e trasmettere informazioni e documentazione.

# Inquinanti

Inquinanti primari

Inquinanti secondari

Inquinanti che interessano il degrado di materiali da costruzione sono:

- ciclo dello zolfo
- ciclo dell'azoto
- biossido di carbonio
- particolato sedimentabile e sospeso
- ozono
- acido cloridrico
- acido fluoridrico
- acidità del particolato
- solfati, cloruri, nitriti, nitrati, calcio, sodio, potasio, magnesio, ferro, ammonio ed altri ioni metallici presenti in traccia nel materiale particellare

# Ciclo dello Zolfo

Anidride Solforosa ( $\text{SO}_2$ )

Anidride Solforica ( $\text{SO}_3$ )

Acido solfidrico ( $\text{H}_2\text{S}$ )

Acido Solforico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )

Solfati

# Ciclo dell'Azoto

Ossidi di Azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ )

Ammoniaca ( $\text{NH}_3$ )

Acido Nitrico ( $\text{HNO}_3$ )

Sali di Ammonio

# Valori tipici di concentrazione degli ioni nelle precipitazioni acide

<i>Cationi</i>		<i>Anioni</i>	
<i>Ione</i>	<i>Concentrazione Equivalenti/L x 10<sup>6</sup></i>	<i>Ione</i>	<i>Concentrazione Equivalenti/L x10<sup>6</sup></i>
<b>H<sup>+</sup></b>	<b>56</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>51</b>
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<b>10</b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>20</b>
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>7</b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>12</b>
<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>5</b>	<b>Totale</b>	<b>83</b>
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>3</b>		
<b>K<sup>+</sup></b>	<b>2</b>		
<b>Totale</b>	<b>83</b>		

## Stime della velocità di alterazione (zone esposte al dilavamento della pioggia)

<i>Materiale</i>	Velocità di alterazione
Calcari cristallini totalmente esposti ( <i>U.S. Bureau of Standads, 1928</i> )	0,3 mm/100 anni
Marmi e calcari esposti in ambienti diversi ( <i>Winkler, 1973</i> )	1 - 1,6 mm/50 anni
Calcari con P = 18 - 20% (campioni esposti a Londra) ( <i>Honeyborne et Al., 1977</i> )	2,9 mm/100 anni
Marmo bianco esposto a Washington DC ( <i>Sleater, 1983</i> )	1 mm/50 anni
Marmo del Vermont (stima su campioni esposti all'aperto in U.S.A.) ( <i>Hayne, 1983</i> )	0,5 - 1 mm/100 anni
Marmi in ambiente rurale (pietre tombali U.S.A.) Marmi a Philadelphia Pa. (U.S.A.) Marmi a Edimburgo (UK) ( <i>Livingstone et Al., 1987</i> )	0,1 - 1 mm/100 anni 1,8 mm/100 anni 8 mm/100 anni
Marmi di lastre tombali a Philadelphia Pa. -in zona rurale Marmi di lastre tombali a Philadelphia Pa. -in zona urbana ( <i>Feddema et Al., 1987</i> )	<0,5 mm/100 anni 1,2 - 3,4 mm/100 anni
Materiali con P media <1% (sistema)	0,2 - 0,5 mm/100 anni
Materiali con P >10% (stima) ( <i>Anon., 1987</i> )	3 - 10 mm/100 anni
Marmo bianco (simulazione in laboratorio) ( <i>Guidobaldi, 1987</i> )	0,1 mm/100 anni
Calcari con P= 18-22% (campioni esposti a Londra) ( <i>Jaynes et Al., 1987</i> )	1 mm/100 anni
Calcari del Belgio (analisi del runoff water) ( <i>Rockens et Al., 1989</i> )	1,9 mm/100 anni

- Non solo l'acidità, anche i radicali prodotti nei processi imperfetti di combustione su cui si basano le produzioni energetiche, anche quelle nei veicoli a motore, sono specie reattive instabili e come tali responsabili dell'attacco ad innumerevoli matrici biologiche ed abiologiche.
- Il primo intervento protettivo di tali beni non può quindi che riguardare proprio l'ambiente nel quale sono collocati, venendo così a complementarsi l'un l'altra la scienza e la tecnologia dell'Ambiente e quella dei Beni Culturali ed integrarsi le esperienze maturate sui due fronti.

- Il degrado di un'opera d'arte 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.
- 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" (porzione di materia in studio) e il "mezzo" (ambiente circostante che può interagire con il sistema).

# Tipologie di danno di diversi materiali in relazione agli inquinanti ed alle condizioni ambientali

<b>Materiale</b>	<b>Principali fattori ambientali</b>	<b>Principali inquinanti</b>	<b>Tipo di danno</b>
<b>Edifici in pietra e laterizi</b>	umidità, precipitazioni, escursioni termiche, sali solubili, vibrazioni, agenti biologici	<b>SO<sub>x</sub>, materiale particellare</b>	formazione di croste nere: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ (il colore nero è dato da particelle carboniose inglobate nel gesso e molto attive nel catalizzare l'ossidazione di SO <sub>2</sub> as H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ); formazione e/o attivazione di sali solubili all'interno del materiale
		<b>CO, CO<sub>2</sub></b>	solubilizzazione della parte carbonica, sbriciolamento del materiale lapideo $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longleftrightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$
		<b>NO<sub>x</sub></b>	disgregazione del materiale lapideo; formazione e/o attivazione di sali solubili all'interno del materiale $\text{CaCO}_3 + 2\text{HNO}_3 \longrightarrow \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
		<b>materiali di restauro organici</b>	probabile causa della formazione superficiale di ossalato di calcio
<b>Dipinti murali all'interno</b>	umidità, sali solubili, escursioni termiche, vibrazioni, agenti biologici	<b>gas acidi (preval. SO<sub>x</sub>), CO materiale particellare</b>	corrosione superficiale; scolorimento; sporcamiento
		<b>idrocarburi pesanti</b>	effetto solvente sugli oli; se depositati danno effetto idrorepellente
<b>Metalli all'aperto</b>	umidità, sali solubili	<b>gas acidi (preval. SO<sub>x</sub>), materiale particellare</b>	corrosione; sporcamiento
		<b>HCl (su bronzo)</b>	"cancro" del bronzo (formazione sali veredi) $4 \text{HCl} + 4 \text{Cu} + \text{O}_2 \longrightarrow 4 \text{CuCl} + 2 \text{H}_2\text{O}$ $4 \text{CuCl} + 2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2 \text{Cu}_2\text{O} + 4 \text{HCl}$
<b>Materiali cellulosici, tessuti e tele</b>	umidità, luce solare, sollecitazioni meccaniche, agenti biologici	<b>SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, materiale particellare</b>	infragilimento, attenuazione e cambiamento del colore, sporcamiento
		<b>acidità atmosferica</b>	solubilizzazione dei trattamenti superficiali conseguente attacco di inquinanti

# Durevolezza (anni di vita) di materiali per differenti condizioni di esposizione atmosferica

<i>Materiali</i>	<i>Condizioni di esposizione</i>			
	<i>Molto severe <sup>(a)</sup></i>	<i>Severe <sup>(b)</sup></i>	<i>Miti <sup>(c)</sup></i>	<i>Molto miti <sup>(d)</sup></i>
Metalli preziosi	1000 - 10000	100000	1000000	10000000
Rocce naturali «forti»	100 - 1000	1000 - 10000	100000	1000000
Rocce naturali	10 - 100	100 - 1000	10000	100000
Ceramici «forti»	100 - 1000	1000 - 10000	1000000	10000000
Ceramici	1 - 100	100 - 1000	10000	100000
Calcestruzzo ad alta resistenza	10 - 100	100 - 1000	10000	100000
Malte	1 - 10	10 - 100	2000	10000
Gesso	= = =	1 - 10	500	200
Metalli	1 - 10	10 - 100	5000	10000
Legno	1 - 10	10 - 100	1000	10000
Plastica	1 - 10	10 - 50	100	1000
Vernici	= = =	2 - 20	500	2000
Cuoio	1 =	10 - 50	500	2000
Tessuti naturali	= = =	1 - 10	500	2000
Ossa	10 - 100	= = =	10000	100000

*(a)* Forti variazioni di temperatura/umidità, forti radiazioni solari, erosione eolica. Inquinamento.

*(b)* Moderate variazioni temperatura/umidità, moderati venti/radiazione solare.

*(c)* Moderate temperature, clima secco, minime variazioni ambientali.

*(d)* Clima molto secco/costante, venti leggeri, basse temperature, radiazione solare assente.

# Classificazione dei fattori di degrado dei beni culturali

<b>Fattori fisici</b>	<b>Temperatura</b>	Sue variazioni provocano espansione meccanica, variazione nel tenore d'acqua, shock termici. Influenza la crescita microbica.
	<b>Acqua e umidità</b>	È il principale solvente e "mezzo reattivo" per gli inquinanti atmosferici: l'interazione liquido-solido è in genere più efficace dell'azione diretta dei gas
	<b>Vento</b>	Causa erosione, determina violenza e impatto delle precipitazioni, influenza velocità d'evaporazione, trasporto e diffusione degli inquinanti
	<b>Radiazioni luminose</b>	Interagiscono con strutture cristalline, provocano foto-ossidazione, influenzano la crescita di vegetali
<b>Fattori biologi</b>	<b>Microrganismi, alghe, licheni, piante infestanti</b>	Le condizioni di crescita dipendono dalle superfici, dal tipo di approvvigionamento di energia e nutrienti
	<b>Deiezioni animali</b>	Oltre allo sporcamento determinano attacco chimico sui materiali
<b>Fattori chimici</b>	<b>Gas</b>	Comprendono sostanze acide, basiche o ossidanti: $SO_x$ , $NO_2$ , $HNO_3$ , $HCl$ , $HF$ , acidi organici, $NH_3$ , $O_3$ , $CO_2$ , idrocarburi pesanti e leggeri, composti di metalli pesanti
	<b>Aerosol</b>	Possono contenere sali aggressivi e sostanze acide
	<b>Particelle</b>	Le più pesanti provengono da combustione incompleta, contengono fuliggine, materiale catramoso, tracce di metalli pesanti
	<b>Deposizione</b>	Reazioni chimiche in funzione della composizione ( $CO_2$ , $NH_4^+$ , $SO_4^{--}$ , $Cl^-$ , $HCO_3^-$ .....)

# Microclima

## FINALITÀ

- azione diretta sul manufatto
- effetti sugli inquinanti presenti nell'atmosfera

## TEMPERATURA

## UMIDITÀ

tensione di vapore dell'acqua (mbar)

umidità assoluta (g/m<sup>3</sup>)

umidità specifica (g/Kg)

umidità relativa (%)

temperatura di rugiada (°C)

## INTENSITÀ E DIREZIONE DEL VENTO

## QUALITÀ, FREQUENZA ED INTENSITÀ DELLE PRECIPITAZIONI

## PRESSIONE

## RADIAZIONE SOLARE

# Seconda legge termodinamica



Differenza fra una visione del mondo soltanto meccanica, determinata cioè dalle forze ed una termodinamica determinata anche dall'entropia che deve aumentare nel corso degli eventi. Da questo deriva che la quantità di energia disponibile per produrre lavoro diminuisce costantemente anche se il contenuto energetico dell'universo è costante

- Una condizione di disequilibrio si produce ogni volta che una o più grandezze fisiche scelte per rappresentare lo stato del sistema o del mezzo assumono nelle due entità valori diversi.
- 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.

**FASE DELLA CONOSCENZA**

**FASE DEL RESTAURO**

**FASE DEL CONSOLIDAMENTO**

**Materiale base**

**Conoscenza**

**Prodotti di  
alterazione**

**tempo**

**?**



**ambiente**

# Prodotti di alterazione

Ossidazione



Corrosione

Reazioni superficiali

Complessazioni

Reazioni acido base

Adsorbimenti

**CONOSCENZA**

**Elementare**

**Composizionale**

**Strutturale**



$$K = \frac{CD}{AB}$$

Conc  
Attività  
mista

# Equilibrio di solubilità



$$K \uparrow \alpha \quad \frac{\text{sol}_{AB} \text{sol}_{XY}}{\text{sol}_{AY} \text{sol}_{BX}}$$

Per la dissoluzione BX ↓

(operazione sotto dilavamento)

(quindi no a trattamenti  
in strutture porose)

# Equilibrio Acido-Base



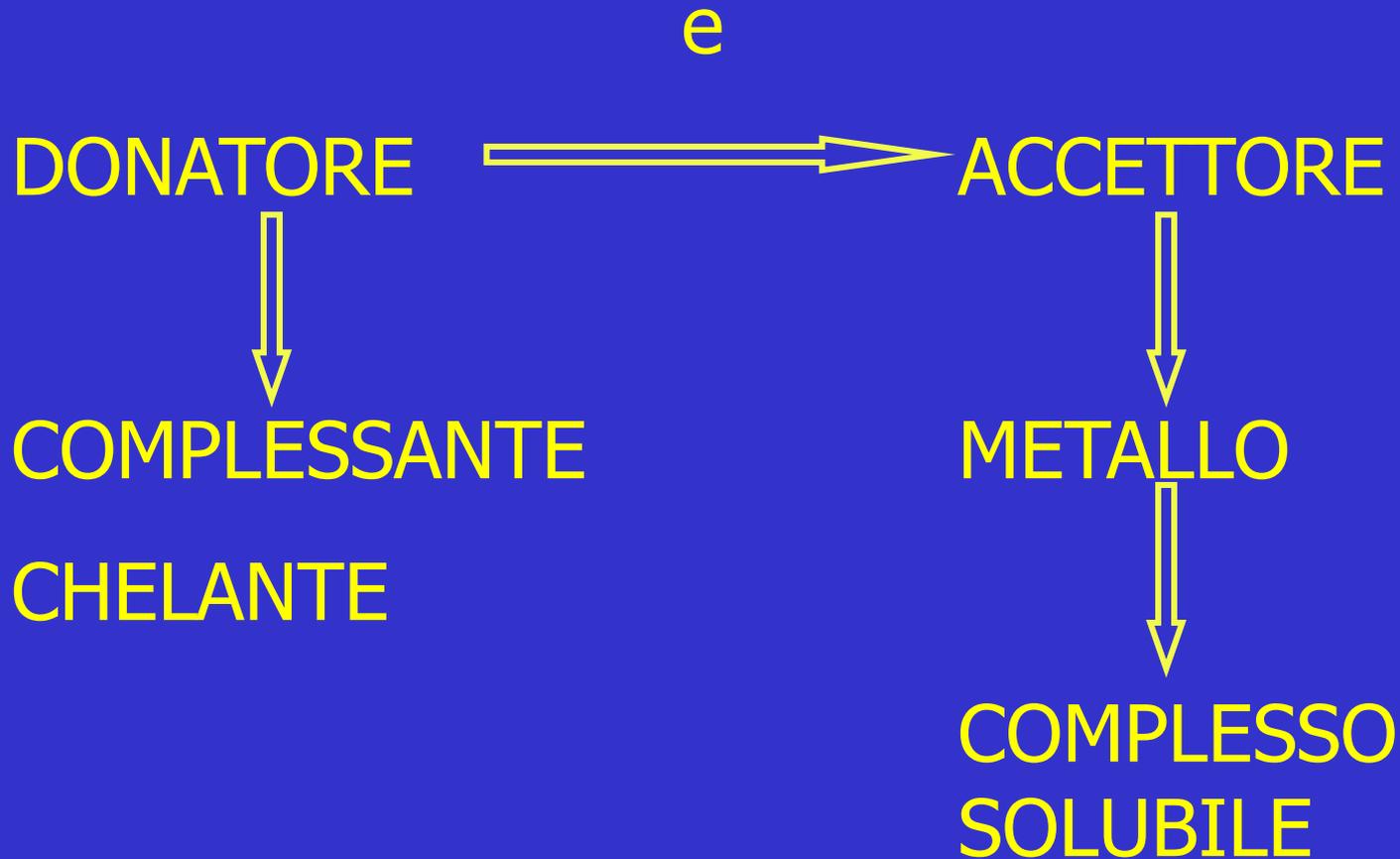
$$K \uparrow \alpha \quad \frac{K_{Hy}}{K_{HB}}$$

Hy acido forte  $\rightleftharpoons$  pericoli di danni

Scegliere opportunamente Hy

(attenzione Ay è solubile quindi  $K \downarrow$ )

# Reazioni acido-base di Lewis



# Equilibri di Complessazione



$$K \uparrow \alpha \quad K_{st\ AL} = \frac{K_{HL}}{K_{HB}}$$

$K_{st\ AL}$  a forza accettore  
(metalli transizione)

$K_{st\ AL}$  parametro chiave  $\rightleftharpoons$  chelati

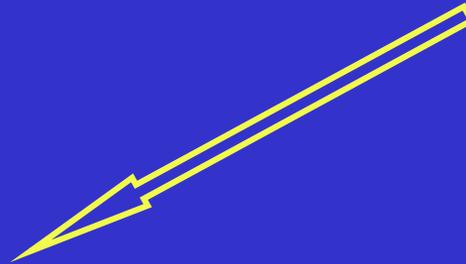
Possibilità di modulare la reazione  
variando il pH

# Materiali

lapidei

metallici

cellulosici



**Marmi**

**bronzi, ferro**

**tela, carta**

**Carbonato + SO<sub>2</sub> ⇨ solfito**

**carbonato + SO<sub>2</sub> + NO<sub>2</sub> ⇨ solfato (gesso)**

**Ca CO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**

**Ca CO<sub>3</sub> + CO<sub>2</sub>**

**paragonabili**

**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> > H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>**

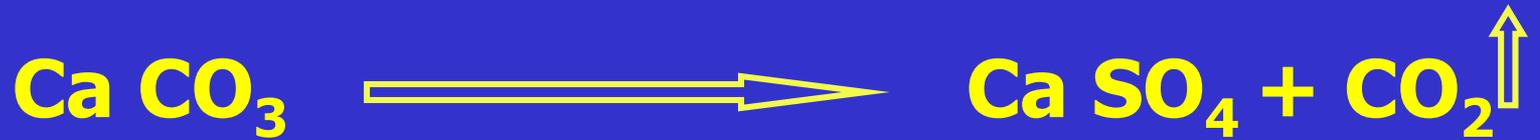
**CO<sub>2</sub> = 340 ppmV**

**SO<sub>2</sub> più solubile di CO<sub>2</sub>**

**SO<sub>2</sub> = 0,0004-1,6 ppmV**



# Marmi

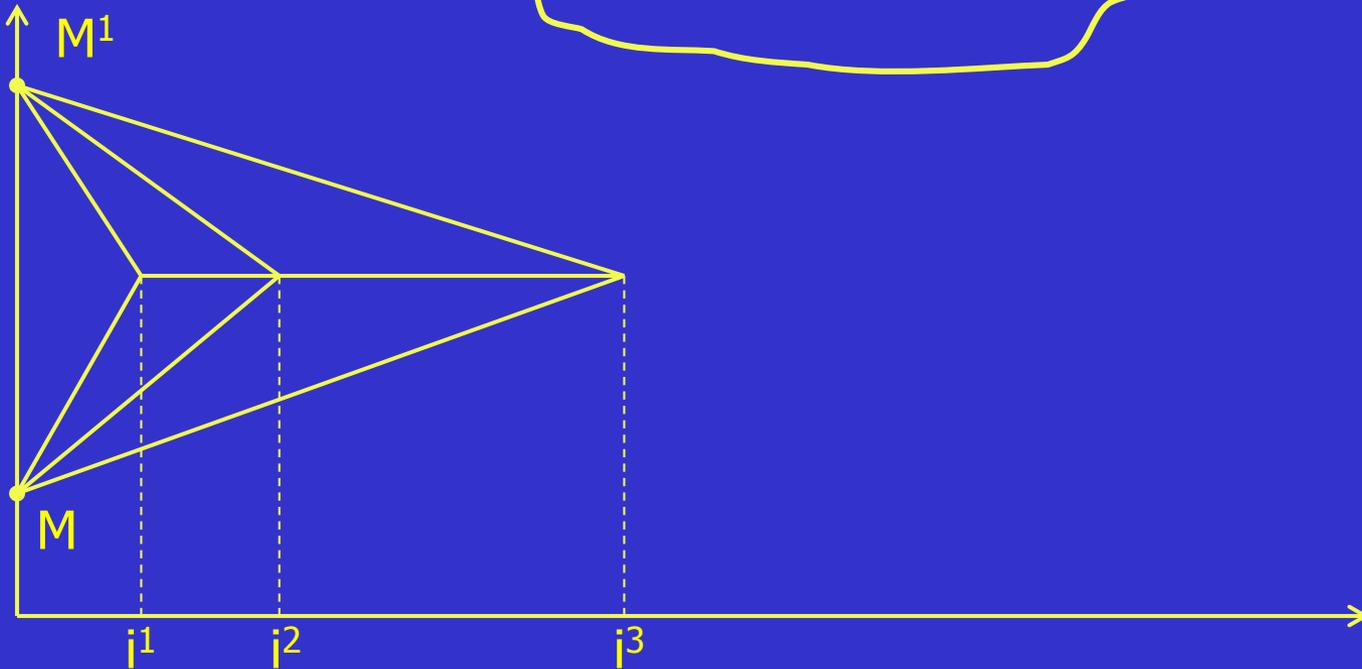
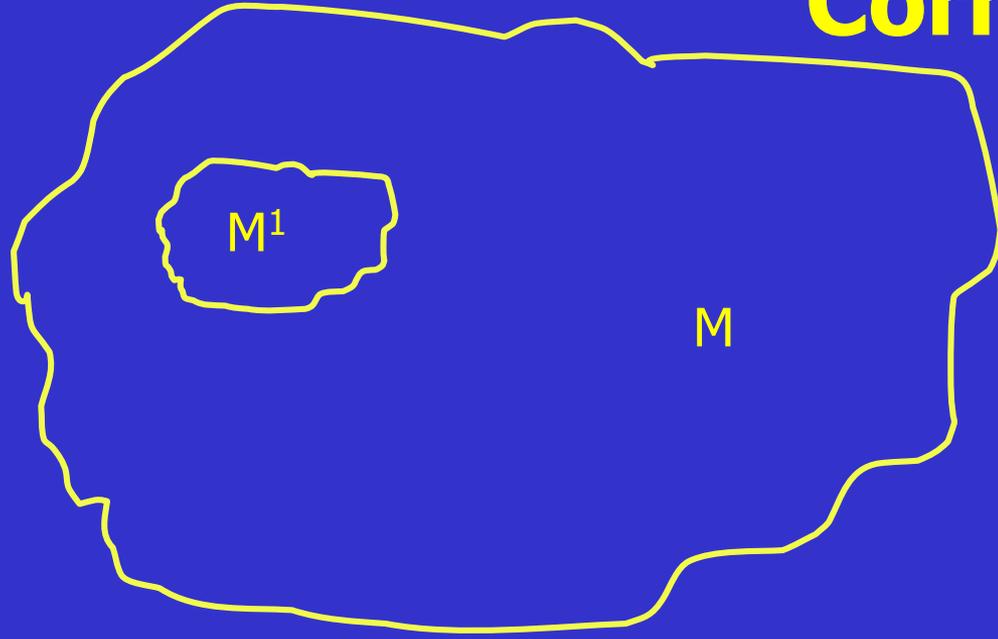


pori



# Metalli

# Corrosione



**Cellulosa**  $\xrightarrow{\text{(polimero } n)}$

$\xrightarrow[\text{OH}^-]{\text{H}^+}$  **Idrolisi ( $n_1 < n$ )**  
**(locale, generale)**

**Pigmenti**  $\xrightarrow{\text{solubilizzazione}}$   
**inorganici**  $\xrightarrow{\text{attacco meccanico}}$

- 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.

# Ossidazione elementi (molecole)



O<sub>2</sub> (anche ambiente purissimo)

$$\Delta G < 0$$

(in natura composti - rocce, minerali)

Disequilibrio fra sistema (BB.CC.) e ambiente

(differenze fra i valori delle funzioni che li rappresentano)

Disequilibri di valori infinitesimo  $\Longrightarrow$  equilibrio, reversibilità

Disequilibri di valore finito  $\Longrightarrow$  irreversibilità



Alterazione del sistema  $\propto$  entità disequilibrio

Protezione: minimizzare l'entità dei disequilibri

- 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.
- Il controllo delle condizioni microclimatiche, dell'illuminazione e qualità dell'aria all'interno degli ambienti destinati alla conservazione dei beni di interesse culturale è un tema di grande importanza e notevolissimo interesse. Condizioni climatiche "di benessere" per i beni culturali possono 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, possono 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.).
- La temperatura, l'umidità, la temperatura di rugiada sono le grandezze termoigrometriche che meglio definiscono il microclima.

- Ogni manufatto risulta essere fortemente caratterizzato dalla storia dei suoi progressi condizionamenti ambientali che hanno determinato 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 microfratture interne, quando viene 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 esistono 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, formatasi e penetrata all'interno dei pori, trasporta con sé agenti inquinanti acidi e corrosivi, che attaccano gli stessi materiali, e anche nocivi sali solubili.
- Molte reazioni chimiche vengono inoltre ad essere notevolmente accelerate all'aumentare dell'attività termodinamica dell'acqua assorbita sulla superficie stessa e quindi con l'aumentare dell'umidità relativa (U.R.) dell'aria a contatto. L'accelerazione del degrado è in genere notevole al di sopra di una U.R. del 60-70%.

**ATTIVITÀ DEL SOLVENTE**



**H<sub>2</sub>O**

**PIOGGE,  
RISALITE CAPILLARI,  
ESONDAZIONI,  
AFFIORAMENTI**

**Attività**  $\Longrightarrow$  **conc attiva ai fini  
di una reazione**

**Importante per le reazioni in Soluzione  
(BB.CC  $\Longrightarrow$  reazioni allo stato solido)**

- Qualora ai meccanismi di reazione partecipino inquinanti presenti nell'aria, la velocità dell'attacco, oltre che dall'U.R., risulterà fortemente influenzata dalla natura e dalla quantità delle specie inquinanti, e cioè dalla qualità dell'aria.
- 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'U.R. dell'aria a contatto. In genere, tanto più l'U.R. cresce tanto più rapido è lo sviluppo delle colonie fungine interessate o di alcuni generi di batteri ed insetti.

- 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 deteriorogeni 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.
- Esempi sono l'assunzione di sali, presenti nel materiale lapideo, da parte degli organismi autotrofi o quella di polisaccaridi e proteine, presenti nei materiali organici, operata dagli organismi eterotrofi mediante idrolisi enzimatica.

- 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 .
- Pericolosa è 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.

- Questo danno è particolarmente possibile nel caso specifico di ambienti interni, 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.
- Si deve tuttavia tenere in considerazione che un danno estetico è quasi sempre accompagnato da meccanismi di biodeterioramento di tipo chimico e fisico.

- Sempre con riferimenti all'ambiente museale 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 folclore, dalle raccolte di strumenti musicali, nonché dai numerosissimi musei regionali, pubblici o privati rendendo le soluzioni del problema ancor più variegate.
- Un panorama, già vasto per quanto riguarda il "contenuto", viene ulteriormente ampliato dalle pressoché infinite caratteristiche dei "contenitori" stessi.

- Il patrimonio storico-artistico negli ultimi decenni ha subito un degrado maggiore di quello cui è stato soggetto in tutti i secoli passati, tanto da far ritenere l'inquinamento ambientale non più solo un problema per la salute umana, ma anche un motivo di preoccupazione per conservatori e curatori museali.
- Lo studio sulle corrette condizioni di conservazione ed esposizione delle opere d'arte deve condurre alla messa in atto di strumenti normativi contenenti linee guida, anche in forma di valori "soglia" dei parametri ambientali raccomandati, e di modalità per la loro misura e controllo.

- C'è infine il problema dell'ambiente indoor: la globalizzazione ha allargato le frontiere ed ha reso sempre più attuale il turismo di massa, al quale corrisponde un uso ed una funzione sempre più massificati delle opere d'arte: gli ambienti indoor dei musei diventano però, in assenza di provvedimenti limitativi delle libertà individuali nell'interesse generale, altrettanti fonti di rischio e/o di danno per importanti opere d'arte per cui diviene sempre più necessario intervenire con monitoraggi e correzioni.
- Si è purtroppo ancora lontani dal fornire elementi certi di valutazione pratica sulla pericolosità degli ambienti interni.

- Non è stato, infatti, trovato ancora un accordo definitivo per quanto riguarda gli standard della qualità dell'aria in ambienti museali. Non è stata identificata una procedura normalizzata per il rilevamento dei meccanismi di trasporto e deposito degli inquinanti aerodispersi ed infine non è stata proposta a tutt'oggi una metodologia e una strumentazione "normalizzata", di basso costo e facile uso, atta a definire una scala di pericolosità dell'aria in ambienti interni.

- 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.
- Una proposta per la classificazione della pericolosità ambientale/aria all'esterno è stata avanzata in base alla legge 84/90 che ha promosso una ricerca relativa al progetto "Carta del Rischio del Patrimonio Culturale".

- Tale modello, basato su due indici, uno detto di erosione e l'altro di annerimento, non può essere applicato agli ambienti interni per ovvi motivi; tali ambienti, infatti, risentono fondamentalmente dell'effetto degli inquinanti gassosi aerodispersi e del particolato a scala locale e non risentono degli effetti dell'acqua di pioggia.
- È necessaria una ricerca finalizzata alla individuazione di un indice che tenga principalmente conto dell'effetto degli inquinanti acidi aerodispersi, e dello stato fisico delle superfici esposte e soprattutto della deposizione di particolato sospeso.

Le particelle contribuiscono alla deposizione di zolfo sulle superfici lapidee contenendo esse stesse concentrazioni variabili di zolfo; catalizzano la reazione di ossidazione ad acido solforico grazie al loro contenuto in carbonio; contengono sempre, accanto al carbonio, quantità variabili di ferro, vanadio, nichel e rame, metalli pesanti noti per il loro effetto catalitico nella reazione di ossidazione dello zolfo.

- Esaminando in definitiva le possibili veicolazioni di inquinanti all'interno di un ambiente, si possono distinguere vari meccanismi.

Ricambio d'aria, infiltrazioni, ingresso di visitatori dall'esterno; cessioni dai materiali, attività di visitatori e operatori dall'interno; ricambio d'aria, filtrazioni, deposizione, trasformazione o reazioni di sostanze, azione dei sistemi di pulizia e/o filtrazione per rimozione.

- I materiali museali, arredi interni e strutture 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, 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 facilmente imporre comportamenti.
- Inoltre devono essere garantite condizioni sufficientemente confortevoli dal punto di vista del ricambio dell'aria e del microclima, e di "benessere" per i materiali da conservare. Richiesta di standard di qualità dell'aria particolarmente vincolanti.

# Classificazione dell'ambiente museale

(adattata da Thompson, 1984)

## Classe I

- => Umidità relativa:  $55\% \pm 5\%$  RH in continuo. Il livello può essere fissato più alto o più basso di 55%. Per manufatti misti deve essere nell'intervallo 45 - 60%.
- => Temperatura: inverno  $19 \pm 1$  °C, estate  $24 \pm 1$  °C. Nei magazzini o aree chiuse al pubblico si può consentire una temperatura più bassa ovviamente evitando la condensazione. Si suggerisce un intervallo da 10 a 15 °C.
- => Inquinanti atmosferici: ossidi di zolfo e azoto al di sotto di  $10 \text{ mg/m}^3$ . Ozono sotto  $2 \text{ mg/m}^3$ . Particolato rimosso almeno all'80%.

## Classe II

- => Umidità relativa: mantenuta entro i limiti di pericolosità tra 40 e 70% RH usando umidificatori/deumidificatori sala per sala.
  - => Temperatura: ragionevolmente costante così da stabilizzare la RH.
- Inquinanti atmosferici: nessuna specificazione.

## Relazione tra inquinante interno ed esterno e sistemi di filtrazione (adattata da Baer & Banks, (1985) e da Ligocki et. Al., 1993)

Museo o Istituzione	Inquinante	Conc. Esterno (ppb)	Conc. Interno (ppb)	Sistema Filtrazione
NARS (Archivi), USA	SO <sub>2</sub>	7 - 34	2 - 25	Particelle
National Gallery, USA	SO <sub>2</sub>	7 - 34	< 1	Lavaggio Alcalino
Tate Garrely, UK	SO <sub>2</sub>	12 - 80	0 - 4	Carbone Attivo
V & A, UK	SO <sub>2</sub>	22 - 60	3 - 42	Nessuno
NARS (Archivi), USA	NO <sub>2</sub>	41	20 - 80	Particelle
NARS, USA	NO <sub>2</sub>	10 - 527	10 - 252	Particelle
National Gallery, USA	NO <sub>2</sub>	40 - 92	7 - 50	Lavaggio Alcalino
Library of Congress, USA	O <sub>3</sub>	1 - 21	0	Purafil
La Country Museum. USA	O <sub>3</sub>	200	< 10	Carbone Attivo
Sainsbry Centre, USA	O <sub>3</sub>	56	40	Particelle
Southwest Museum, USA	Particelle < 2 $\mu$	63 ( $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	60 ( $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	nessuno
Norton Simon, USA	Particelle < 2 $\mu$	65 ( $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	10 ( $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	Particelle

## Inquinanti atmosferici in interni museali (adattata da Brimblecombe, 1990).

Inquinante	Limite consigliato	Istituzione
O <sub>3</sub>	1 ppb	NMAB
SO <sub>2</sub>	< 0.4 ppb	NMAB, NBS
NO <sub>2</sub> HNO <sub>3</sub>	< 2.5 ppb, BAT	NMAB, NBS
Particelle (> 2*)	Rimozione 95%	BSI

Abbreviazioni: BAT: migliore tecnologia disponibile

NMAB: National Materials Advisory Board.

NBS: National Bureau of Standards.

BSI: British Standard Institution