

**Dispense di:**

**MICROCLIMATOLOGIA PER I BENI CULTURALI**

Enrico Ferrero

1. DEFINIZIONE DI MICROCLIMA .....	3
2. ARIA, VAPOR D'ACQUA E GAS PERFETTI .....	5
3. LA TEMPERATURA.....	8
MECCANISMI DI DEGRADO DOVUTI ALLA TEMPERATURA .....	9
LA TEMPERATURA IN UN EDIFICIO .....	12
ESEMPI .....	14
4. L'UMIDITÀ .....	19
5. QUAL E' IL MICROCLIMA MIGLIORE PER LA CONSERVAZIONE? .....	23
6. COME MANTENERE COSTANTE L'UMIDITA' RELATIVA IN STANZE E VETRINE .....	25
7. LA RADIAZIONE .....	28
DETERIORAMENTO DELLE OPERE D'ARTE DOVUTO ALLA LUCE.....	34
8 LA DEPOSIZIONE SECCA DI PARTICOLATO ATMOSFERICO .....	37
IL CASO DELLA SFINGE .....	44
9. L'INQUINAMENTO ATMOSFERICO .....	47
Lo Strato Convettivo .....	51
Lo Strato Residuale.....	53
Lo Strato Stabile .....	54
10. PIOGGE ACIDE, PRECIPITAZIONI E CROSTE.....	58
Esempi di croste nere dovute all'inquinamento e all'acqua piovana: .....	60
BIBLIOGRAFIA.....	62

# 1. DEFINIZIONE DI MICROCLIMA

Clima di una certa area: il prefisso indica la dimensione dell'area:

Macro, Meso, Micro.....

Definizione meteorologica (concetto di **scala**):

Globale, Locale, etc.

'Micro' si riferisce all'area dove è posto il manufatto:

*L'ambiente che è necessario studiare per conoscere i fattori che hanno diretta influenza sullo stato fisico del monumento e le interazioni con l'aria e con gli oggetti circostanti*

Definizione di clima (per i nostri scopi):

*Microclima è la sintesi delle condizioni fisiche ambientali (distribuzione temporale e spaziale, fluttuazione e andamento dei valori medi ed estremi, gradienti spaziali e frequenza di oscillazione) dovute, o alle variabili atmosferiche (temperatura T, umidità H, irraggiamento solare, vento), o a scambi con altri corpi (emissione infrarossa, riscaldamento, illuminazione, ventilazione), su un periodo di tempo rappresentativo di tutte le condizioni determinate da fattori forzanti naturali e causati dall'uomo.*

Quando l'intervallo di tempo di osservazione non è sufficientemente lungo da rappresentare statisticamente tutte le condizioni, deve poter rappresentare uno o più esempi delle principali condizioni differenti, in modo da poter capire la natura del problema.

**Una questione fondamentale è la seguente:**

E' possibile utilizzare le tradizionali misure meteorologiche per una stima e una interpretazione del microclima dei beni culturali?

I criteri di queste misure sono diversi da quelli necessari allo studio della conservazione:

- alcune misure possono essere utili
- in generale è opportuno prevedere delle misure ad hoc.

Le misure meteorologiche standard sono effettuate in modo da essere rappresentative di vaste aree.

Le misure utili ai nostri scopi devono tenere conto delle perturbazioni locali dovute alla presenza di edifici, alberi ed altri ostacoli.

E' opportuno distinguere tra clima *indoor* e *outdoor*. Entrambi sono influenzati dagli stessi fattori (anche se su scale molto differenti):

- Ciclo diurno di temperatura e umidità
- Esposizione alla radiazione a onda corta (SW), radiazione solare
- Movimenti delle masse d'aria
- Turbolenza
- Inquinamento
- Precipitazioni e umidità

***La differenza fondamentale consiste nel fatto che il clima indoor può essere controllato***

ma come?

Bisogna perseguire il benessere dei visitatori o quello delle opere d'arte?

Uno dei problemi fondamentali è l'utilizzo degli impianti di condizionamento dell'aria.

## 2. ARIA, VAPOR D'ACQUA E GAS PERFETTI

L'aria secca e' composta da una mistura di diversi gas:

Azoto (N <sub>2</sub> )	78,084%
Ossigeno (O <sub>2</sub> )	20,946%
Argon (Ar)	0,943%
Biossido di Carbonio (CO <sub>2</sub> )	360 ppm
Neon (Ne)	18,182 ppm
Elio (He)	5,24 ppm
Metano (CH <sub>4</sub> )	1,77 ppm
Cripto (Kr)	1,14 ppm
Idrogeno (H <sub>2</sub> )	0,5 ppm
Xeno (Xe)	0,09 ppm

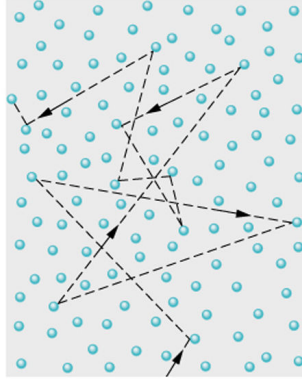
Molte altre sostanze "inquinanti" sono disperse nell'atmosfera, alcune delle quali non reattive e altre reattive, come p.e. biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>) e ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), particolarmente reattivi in associazione con l'acqua.

Il vapor d'acqua è un costituente variabile (tra 0.5 e 4%) la cui concentrazione dipende dalla temperatura e dalle vicissitudini dell'atmosfera:

- passaggi di stato (può diventare solido o liquido)
- precipitazione
- trasferimenti dall'atmosfera alla terra e viceversa.

Definizione di **gas perfetto**:

*Un gas perfetto è un gas ideale le cui molecole hanno volume trascurabile e non interagiscono tra di loro se non con urti elastici.*



Vale la semplice **'equazione di stato'**:

$$PV=nRT,$$

che lega le variabili di stato:

- pressione P
- temperatura T (assoluta si misura in Kelvin, K)
- volume V

R e' la costante dei gas perfetti che vale  $8.31 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

n è il numero di moli (1 mole contiene lo stesso numero di molecole per ogni gas:  $6,02 \cdot 10^{23}$  detto numero di Avogadro)

$n=m/M$  dove m è la massa del gas e M la massa di una mole, caratteristica di ogni gas.

- Per l'aria secca  $M_a=28,965 \text{ g/mole}$
- Per il vapore d'acqua  $M_v=18 \text{ g/mole}$

L'aria per semplicità viene trattata come un gas perfetto. Quando non vi sono cambiamenti di stato anche il vapor d'acqua può essere trattato come una gas perfetto. Maggiori problemi si hanno quando il vapor d'acqua è vicino alla saturazione o quando le molecole impattano su una superficie fredda o che è contaminata con un sale idrofilo, infatti, in questo caso le molecole di vapor d'acqua rimangono attaccate a tale superficie.

In atmosfera non è possibile definire il volume del gas e quindi si utilizza l'equazione nella seguente forma:

$$P = \rho R_a T$$

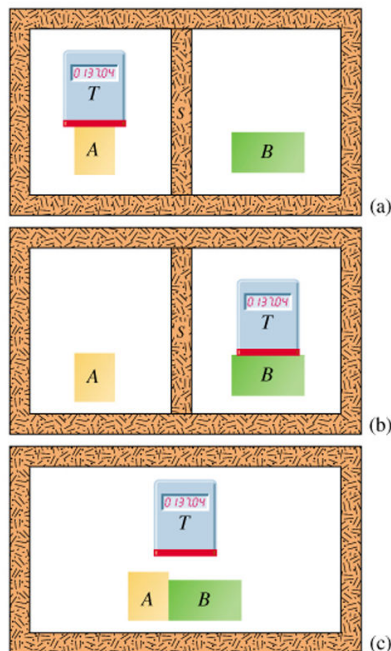
dove  $R_a = R/M_a = 287 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$  è una nuova costante data dal rapporto della costante dei gas perfetti divisa per la massa di una mole di aria secca e  $\rho$  la densità.

### 3. LA TEMPERATURA

*La temperatura è la condizione che determina la direzione del flusso di calore netto tra due corpi, cioè da quello più caldo a quello più freddo.*

La definizione di temperatura si basa sulla **legge zero della termodinamica**:

*Se due corpi A e B si trovano in equilibrio termico con un terzo corpo T allora essi sono in reciproco equilibrio termico.*



In altre parole:

*Qualsiasi corpo possiede una proprietà chiamata temperatura. Quando due corpi si trovano in equilibrio termico le loro temperature sono uguali.*

Dal punto di vista termodinamico la temperatura  $T$  rappresenta l'energia cinetica media di traslazione delle molecole del gas.

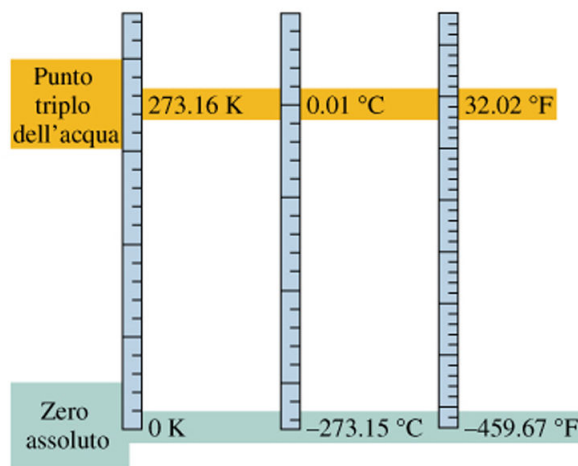
Scale di temperatura:

- $T$  temperatura assoluta in Kelvin (K)
- $t$  temperatura in gradi centigradi ( $^{\circ}\text{C}$ )



$$t = T - 273,15$$

La scala di temperature assolute è definita fissando la temperatura del punto triplo dell'acqua (punto al quale coesistono ad un particolare valore di temperatura e di pressione gli stati solido, liquido e gassoso) a 273,16 Kelvin. In questa scala non esistono temperature negative. L'intervallo di temperatura tra un Kelvin e il successivo è identico a quello tra un grado centigrado e il successivo.



## MECCANISMI DI DEGRADO DOVUTI ALLA TEMPERATURA

Le variazioni di temperatura inducono differenti espansioni nei materiali e sforzi di tensione tra le superfici e le strutture sottostanti.

Le variazioni cicliche di temperatura contribuiscono a danneggiare i materiali.

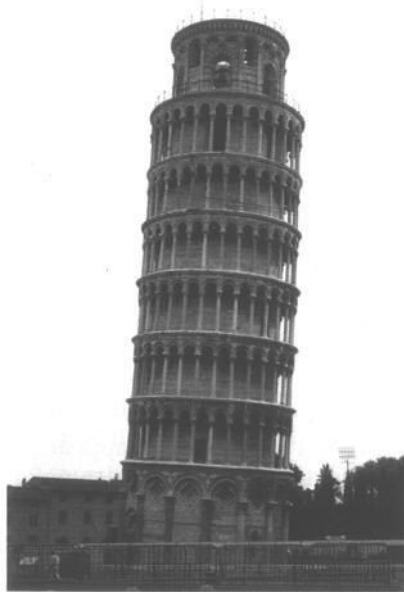
I danni sono tanto maggiori quanto più rapidi sono i cicli.

Quanto più brevi sono le fluttuazione tanto più sottile è lo strato influenzato da esse.

*Poiché le parti di maggior valore artistico dei monumenti si trovano sulla superficie, i cicli di temperatura giornalieri (o più brevi) sono molto più importanti che quelli stagionali.*

La presenza di acqua agisce come fattore sinergico con le variazioni di temperatura  
Le variazioni di temperatura fanno variare la quantità di acqua assorbita dai corpi (per esempio il legno), i quali espandendosi e contraendosi si crepano e si fessurano.

I meccanismi di espansione termica possono avere un ruolo importante nella stabilità delle strutture. Per esempio nella torre di Pisa il differente riscaldamento delle colonne durante le ore del giorno provoca dilatazione e compressione che causano temporanee inclinazioni e danni ai capitelli.



Disgregazione granulare: stress generato dalla diversa deformazione dei granuli o dei grandi cristalli (marmo e granito)



*Disgregazione granulare del marmo della Torre Aureliana*

La temperatura è un fattore fondamentale nel determinare l'habitat per la vita biologica e nel controllo del metabolismo:

- un temperatura di 20-35 °C favorisce l'attività microbiologica
- $t < 20$  °C riduce il metabolismo

La deposizione di biofilm sulle opere d'arte ha diverse conseguenze negative:

- aumentano la deposizione di inquinanti
- modificano l'albedo, la porosità, la conduttività termica e il bilancio d'acqua.

ma possono anche avere una funzione protettiva.



*VENEZIA: Patina verde tipica della colonizzazione da alghe sulle superfici umide*

Conseguenza delle variazioni di temperatura è l'aumento e diminuzione dell'acqua assorbita dai corpi che provoca espansioni e contrazioni che possono danneggiare i materiali

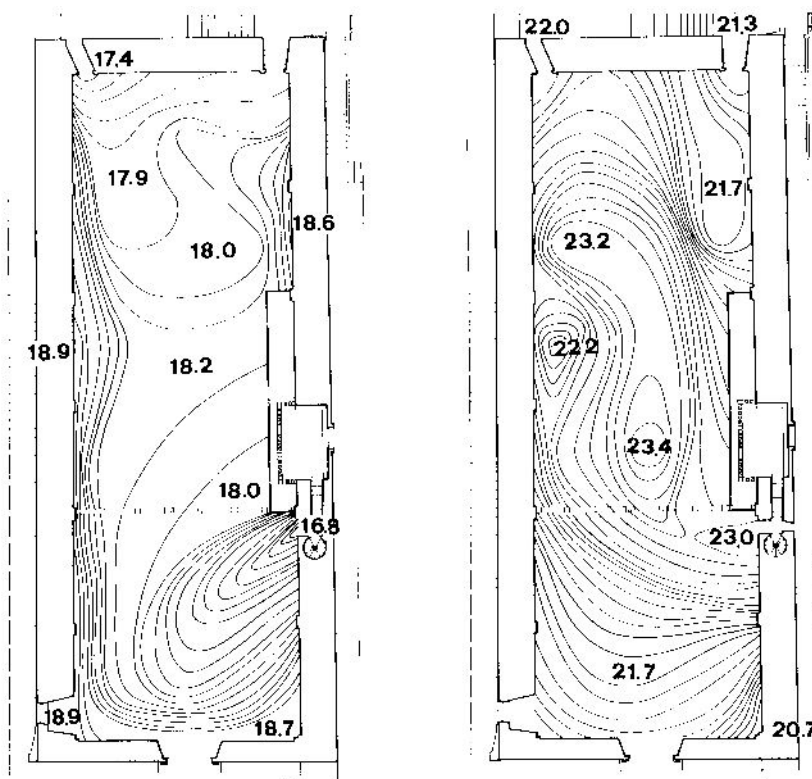
Nelle rocce porose l'evaporazione dell'acqua causa un aumento delle concentrazioni dei sali disciolti e la loro precipitazione quando la soluzione diventa supersatura.

## LA TEMPERATURA IN UN EDIFICIO

Le forzanti esterne dipendono dall'architettura dell'edificio e dalla scelta dei materiali:

- Spessore e conduttività delle pareti
- Finestre (effetto serra\*, scambi di aria)
- Differenti esposizioni (piano terra e ultimo piano)

Il normale equilibrio può essere mutato completamente dall'impianto di riscaldamento e/o di condizionamento e dalla presenza di persone.



*Cappella Sistina*

*Distribuzione di temperatura durante l'apertura per pulizie (sinistra) e durante l'orario di visita (destra)*

I normali impianti hanno un solo punto di controllo (termostato) ma, essendo l'aria mobile e con un basso calore specifico, questo può non essere sufficiente.

\* I gas serra atmosferici agiscono così come i vetri di una serra: fanno passare la luce solare e trattengono il calore. Il tutto comporta che la temperatura media della Terra sia di 15°C circa, un valore notevolmente più alto di quanto non sarebbe in assenza di questi gas (-18°C).

La temperatura all'interno di una stanza è determinata dagli scambi di calore con tutte le possibili sorgenti o pozzi di calore e dall'avvezione di nuova aria da porte o finestre.

In un ambiente chiuso l'ascesa dell'aria più calda è fermata dal soffitto, l'aria si distribuisce secondo la propria densità (aria più calda e più leggera in alto e aria fredda più pesante in basso) formando una *stratificazione stabile*

Tuttavia se c'è qualche *sorgente* o *pozzo* di calore (o le pareti non sono in *equilibrio termico* con l'aria alla medesima quota), la **conservazione della massa**, richiede necessariamente che l'ascesa dell'aria calda sia compensata dalla discesa di aria e viceversa.

Questo può avvenire in diversi modi:

1) Supponiamo tutto sia in equilibrio ma vi sia una sorgente di calore:

Si forma una colonna d'aria calda che sale fino al soffitto dove viene bloccata e diverge causando una subsidenza dell'intero volume d'aria.

Se la sorgente non è troppo calda ed ad una certa quota c'è la medesima temperatura, l'aria si ferma e diverge, lasciando l'aria al di sopra di questa quota imperturbata.

Analogamente se la sorgente si trova ad una certa quota dal pavimento l'aria ai livelli inferiori rimane imperturbata.

Poiché la massa deve rimanere invariata, i *flussi* (prodotto della velocità,  $v$  per la sezione della colonna d'aria,  $A$ ) ascendenti e discendenti devono rimanere uguali.

$$v_a A_a = v_d A_d$$

Il rapporto tra le velocità delle masse ascendenti e di quelle discendenti dovrà essere uguale a quello tra la sezione delle colonne d'aria discendente e ascendente (*moti convettivi*).

- 2) Tutto e' imperturbato tranne il pavimento che è più freddo o il soffitto che è più caldo:  
l'aria diventa via via più stabile
- 3) Tutto e' imperturbato tranne il pavimento che è più caldo o il soffitto che è più freddo:  
si formano moti convettivi.
- 4) Tutto e' imperturbato tranne le pareti che sono più calde: si forma uno strato di aria  
che sale fino al soffitto spostando verso il basso l'intera massa d'aria stratificata.
- 5) Tutto e' imperturbato tranne le pareti che sono più fredde: si forma uno strato di aria  
fredda che scende fino al pavimento sollevando la massa d'aria.

In conclusione, in un ambiente chiuso, l'aria generalmente è naturalmente stratificata e moti d'aria possono essere causati da corpi a diversa temperatura.

Le variazioni esterne, cicli diurni e stagionali, sono smorzati dallo spessore delle pareti che introducono un "tempo di ritardo".

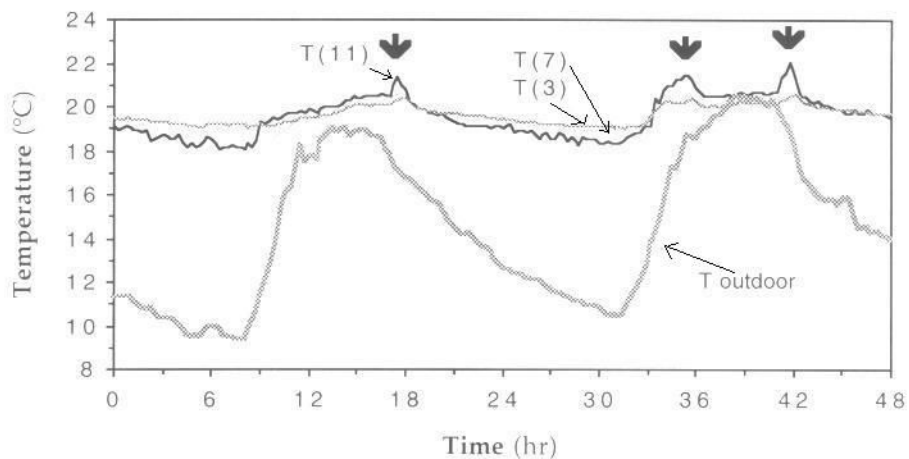
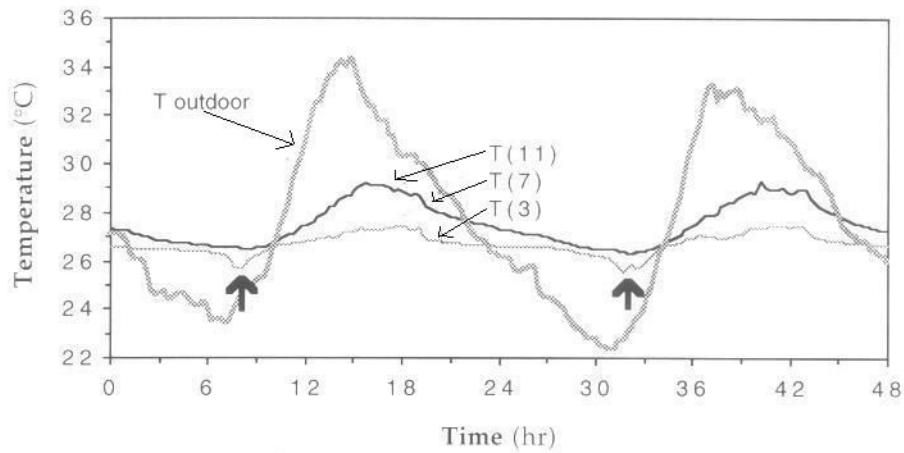
Maggiore è lo spessore delle pareti maggiore è il tempo di ritardo. Se quest'ultimo è uguale sia per le pareti, sia per il tetto e il pavimento la stabilità interna non cambia con le variazioni stagionali.

Per esempio nelle chiese antiche il soffitto ha un tempo di risposta alle variazioni stagionali molto più breve di quello dei pavimenti:

- in estate viene favorita la stratificazione stabile
- in inverno il profilo tende a diventare isoterma con la distruzione della stabilità

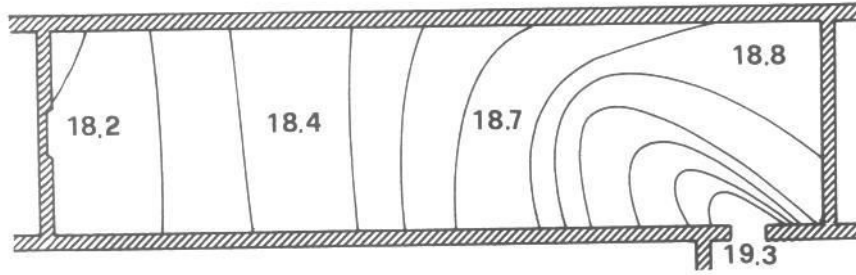
## **ESEMPI**

- 1) Confronto temperatura interna ed esterna in estate e in autunno in S. Maria Maggiore, Roma (da Camuffo)



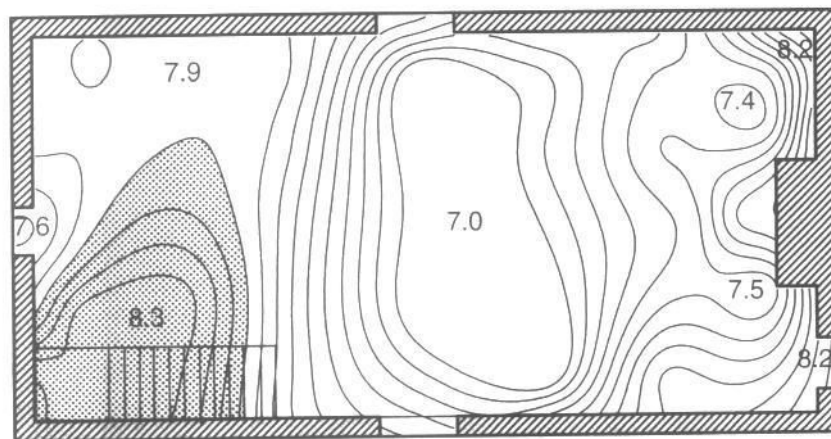
*Temperatura esterna ed interna misurata a 3, 7, 11 m nella Basilica di S. Maria Maggiore, Roma, in estate (sopra) e in autunno (sotto). Lo spessore delle pareti smorza il ciclo esterno e in autunno il calore accumulato nell'estate rende la temperatura interna piu' alta della temperatura media esterna. Aria fredda che entra dalle porte durante l'apertura mattutina è visibile a 3 m e un aumento di temperatura è visibile durante le funzioni religiose il sabato sera e la domenica.*

- 2) Interazioni fra stanze diverse (da Camuffo)



*Aria a differente temperatura fluisce attraverso la porta e si espande nel refettorio dell'Ultima cena di Leonardo*

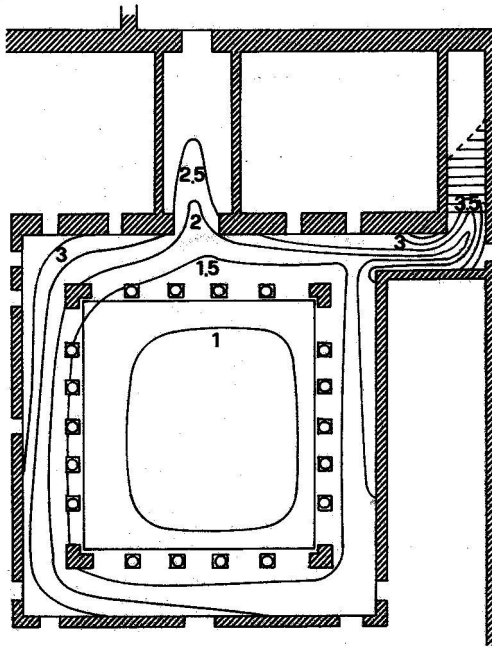
3) Interazioni tra diversi piani nell'Oratorio di S. Rocco a Padova (da Camuffo)



*In inverno l'aria temperata sale attraverso la scalinata e si diffonde nell'oratorio.*

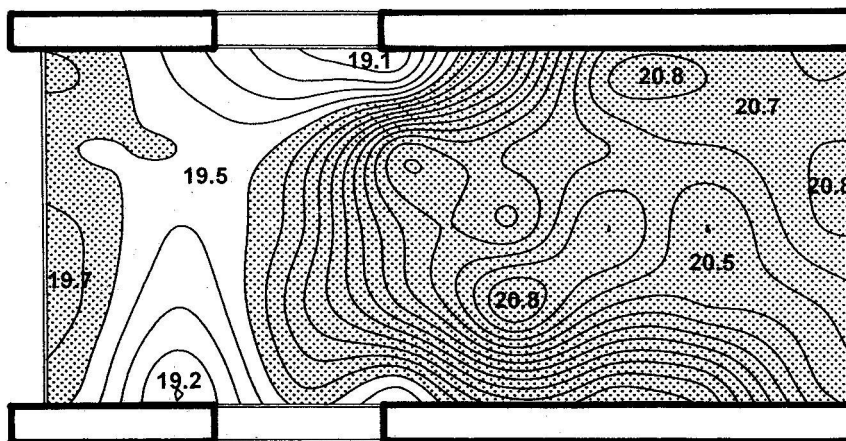


4) Cortile del Palazzo Ducale (Urbino) (da Camuffo)



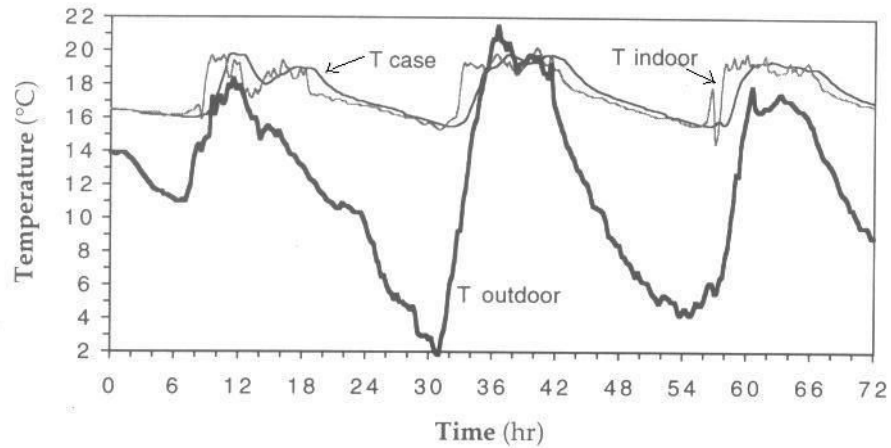
*Il microclima del cortile del Palazzo Ducale è determinato principalmente dal corso diurno del sole. Nell'angolo in alto a destra la scalinata trasporta, come una gigantesca ciminiera, l'aria calda determinando una corrente di aria fredda che invade la scala.*

5) Le costruzioni moderne in metallo e vetro hanno una maggiore conduttività che i tradizionali muri in mattoni e sono più sensibili alle condizioni esterne (da Camuffo)



*Sezione orizzontale del Sainsbury Centre for Visual Art, a Norwich (UK) mostra la distribuzione di temperatura.*

6) La temperatura in una vetrina: risposta alle variazioni esterne (da Camuffo)



*Confronto tra la temperatura interna e esterna in una vetrina. L'ampiezza delle variazioni di temperatura interna (circa 4 °C) è molto ridotta rispetto a quella esterna (circa 20 °C) e quella all'interno della vetrina è ritardata di circa 2 ore. Inoltre gli oggetti conservati nella vetrina non risentono delle rapide piccole variazioni.*

Problema del riscaldamento e della compatibilità con la conservazione dei beni culturali:

- ❑ Necessità di mantenere un clima costante
- ❑ Costi elevati per mantenere tali condizioni

## 4. L'UMIDITÀ

Il termine umidità è vago e può essere ambiguo

Si definiscono diverse quantità, utili per diversi casi.

Definiamo il "mixing ratio" (MR)  $w$  dell'aria umida, cioè dell'aria secca più il vapore d'acqua, come il rapporto tra la massa di vapore d'acqua  $m_v$  e la massa d'aria secca  $m_a$ , contenute nella particella d'aria:

$$w = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{g/g}) \quad (\text{MR} = 1000w, \text{g/kg})$$

$w$  è indipendente dai valori di Temperatura, Volume, Pressione atmosferica della particella d'aria e rimane costante eccetto quando si ha condensazione, evaporazione o rimescolamento con altre masse d'aria.

La misura di questa quantità può servire a riconoscere una massa d'aria e i suoi scambi igrometrici con l'ambiente.

Per esempio l'acqua precipitata in una massa d'aria può dare un'idea del suo moto verticale.

Variazioni del MR vicino ad una superficie mostrano che questa sta scambiando vapore con l'atmosfera:

- Se sulla superficie si ha evaporazione MR aumenta
- Se la superficie sta assorbendo molecole d'acqua o si ha condensazione MR diminuisce

Se si misura il MR vicino a pareti illuminate dalla radiazione solare o da lampade si può osservare il rilascio di umidità durante il riscaldamento fino a quando l'intonaco non è in equilibrio termico con la sorgente di calore.

Viceversa quando la sorgente d'illuminazione viene eliminata l'umidità diminuisce

Questi cicli giornalieri di illuminazione negli stessi punti, possono causare danni nei materiali che assorbono acqua variando le loro dimensioni.

Si definisce "umidità specifica" (US)  $s$  dell'aria umida il rapporto tra la massa del vapore d'acqua  $m_v$  e la massa di aria umida  $m_a + m_v$ , contenute nella particella d'aria:

$$s = \frac{m_v}{m_a + m_v} \quad (\text{g/g})$$

si ha quindi:

$$s = \frac{w}{1 + w}$$

Si definisce "umidità assoluta" la massa di vapore d'acqua contenuta nell'unità di volume dell'aria umida.

Si definisce "umidità relativa" (RH)  $u$  il rapporto tra la massa di vapore d'acqua realmente contenuto in un certo volume di atmosfera  $m_v$  e la più grande quantità possibile alla stessa temperatura  $m_{v,sat}$  :

$$u = \frac{m_v}{m_{v,sat}} \quad (\text{RH}=100u)$$

$m_{v,sat}$  è il valore alla saturazione, cioè in quella situazione nella quale liquido e vapore, per determinati valori di temperatura e pressione, non possono scambiarsi materia, sono in equilibrio.

$u$  varia tra 0 e 1, RH è espresso in percentuale.

All'aumentare della temperatura cresce il livello di saturazione (pressione di saturazione) e quindi cresce  $m_{v,sat}$ .

Di conseguenza l'RH decresce al crescere della temperatura.

## Esempio

Se una superficie fredda viene posta in contatto con l'atmosfera inizialmente diminuisce la temperatura dell'aria e MR rimane invariato mentre RH aumenta. Non appena comincia la condensazione MR inizia a decrescere e questo tende ad invertire l'andamento di RH.

Dopo un po' di tempo l'aria in prossimità della superficie è caratterizzata da una diminuzione di MR, ma nulla si può dire del valore finale di RH che è soggetta agli opposti effetti della temperatura e di MR.

In genere prevale l'effetto termico e quindi la variazione di RH è positiva.

Quando la parete viene riscaldata la temperatura aumenta, si ha evaporazione, quindi MR aumenta e si ha una situazione opposta alla precedente.

È noto che alti livelli di umidità aumentano il tasso di deterioramento in diversi modi:

La presenza di acqua allo stato liquido favorisce le reazioni chimiche: per esempio la trasformazione del marmo o delle rocce calcaree in gesso (in presenza di  $\text{SO}_2$ ).

Le pietre, i mattoni, le ceramiche, gli stucchi, gli affreschi e altri materiali aventi sali solubili nei pori sono sensibili ai cambiamenti microclimatici.

Le condizioni ambientali che portano a cicli di RH possono generare cristallizzazione e dissoluzione di sali attraverso due meccanismi principali:

- L'evaporazione dell'acqua, che è controllata dall'RH dell'ambiente, causa la concentrazione del soluto e la precipitazione dei cristalli.
- I sali igroscopici che sono in forma cristallina solo in un ambiente secco si liquefanno o precipitano (cristallizzano) seguendo i cicli di RH.

Questi meccanismi generano danni meccanici in maniera cumulativa.

- La corrosione è il risultato distruttivo di reazioni chimiche tra i **metalli** e l'ambiente: la corrosione dei metalli comporta il trasferimento di cariche elettroniche in soluzione acquosa, per questa ragione in presenza di acqua il metallo tende a combinarsi con altri componenti chimici.
- Per il **vetro** la situazione è complessa a causa del grande numero di tipi di vetro e di meccanismi di deterioramento. Le soluzioni chimiche possono provocare cambiamenti chimici sulla superficie che possono anche penetrare all'interno del vetro.
- Il **legno e le fibre di carta** sono composte principalmente da catene di cellulosa, l'effetto dell'umidità è quello di aumentare le dimensioni del materiale diminuendone la resistenza. Un'altra conseguenza dell'umidità è l'ossidazione o il degrado chimico della carta, particolarmente grave in presenza di inquinanti atmosferici e specialmente dell'ozono.
- Importante è anche il deterioramento di origine biologica. Per tutti i materiali il microclima deve essere scelto in modo da ridurre il rischio di attacco biologico da parte di funghi, batteri e altri parassiti.

## 5. QUAL E' IL MICROCLIMA MIGLIORE PER LA CONSERVAZIONE?

E' chiaro che il livello di umidità è spesso associato con un specifico meccanismo di deterioramento, o può accelerarlo.

Le molecole d'acqua assorbite possono provocare tensioni interne e deformazioni.

La quantità di acqua assorbita dipende da RH e, in minor misura, da T.

Le deformazioni tendono ad essere reversibili nei materiali moderni come la plastica ma **irreversibili** nei materiali antichi.

In letteratura si possono trovare dei suggerimenti sui valori o su intervalli di valori ottimali per la conservazione.

Bisogna però porsi una domanda:

“Possono, questi valori guida, essere sempre utili e da seguire per la miglior conservazione?”

Valori di RH e T che, in linea di principio, sono adatti ai materiali possono essere inadatti o addirittura pericolosi per particolari artefatti.

Infatti un particolare artefatto è stato sottoposto per secoli a condizioni di RH e T che hanno provocato tensioni interne, le quali hanno raggiunto un nuovo equilibrio con le deformazioni (permanenti) della sua struttura.

Quindi un manufatto antico che si è adattato alle condizioni ambientali potrebbe subire seri danni se portato in un ambiente diverso, per l'incapacità di adattarsi ad un nuovo microclima (es: conservazione del legno, esposizione alla luce di terrecotte o vetri).

Per queste ragioni è necessario avere una conoscenza accurata delle condizioni di conservazione passate.

Quindi tutti i cambiamenti improvvisi dei parametri microclimatici, così come i cicli giornalieri, sono pericolosi.

I cicli stagionali, essendo più lenti, sono meno dannosi: infatti permettono di creare le condizioni di equilibrio tra i materiali e l'ambiente e tra gli strati interni ed esterni.

Quando un oggetto non è condizionato irreversibilmente dal suo passato si possono scegliere le condizioni migliori per la conservazione. Queste sono in genere le condizioni fisiche in cui una variazione di RH porta la minor possibile variazione nell'assorbimento del vapor d'acqua.

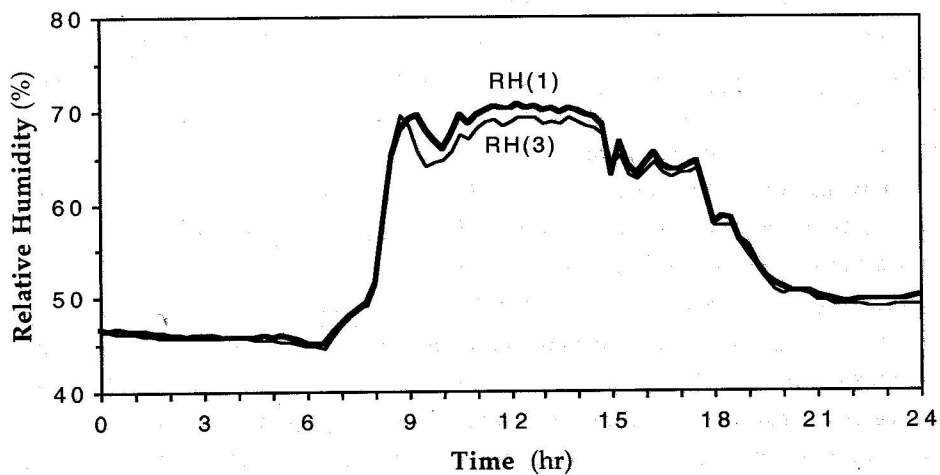
Conviene in ogni caso, per mantenere sempre costanti le condizioni, scegliere dei valori di RH vicini a quelli naturali. (Es: National Gallery di Londra, 60% RH che corrisponde al valore medio naturale di quel paese)



## 6. COME MANTENERE COSTANTE L'UMIDITA' RELATIVA IN STANZE E VETRINE

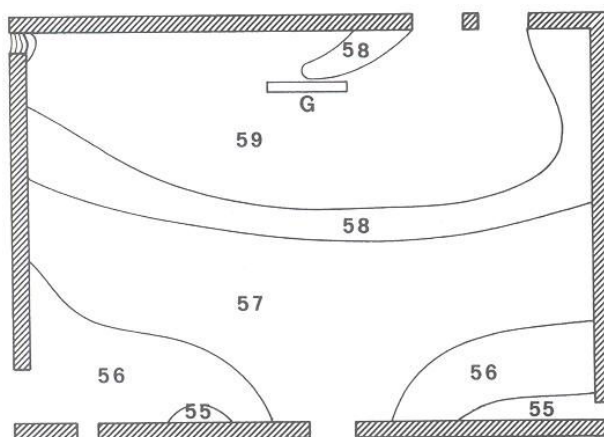
Gli umidificatori sono introdotti per mitigare o compensare le variazioni di umidità dovute a quelle della temperatura, ma se non sono ben bilanciati possono creare ulteriori variazioni di umidità.

Il funzionamento dell'umidificatore dovrebbe compensare l'aria secca causata dal riscaldamento, ma se non è ben tarato (figura da Camuffo) può causare un aumento dell'umidità.

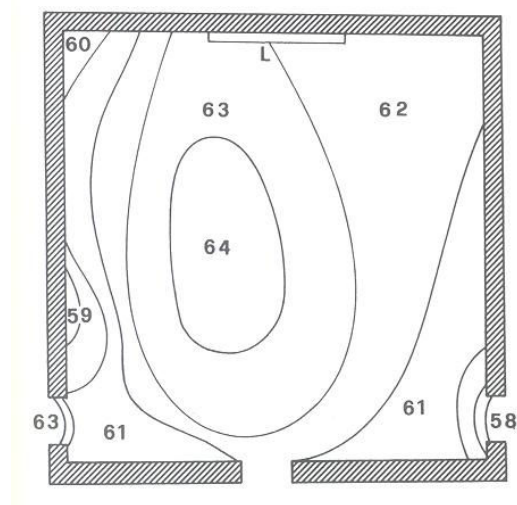


*Variazioni di umidità relativa a 1 e 3 m generate dal sistema di riscaldamento e dall'umidificatore compensatore*

Altri esempi di distribuzione dell'umidità relativa dovuti ad impianti di condizionamento (Uffizi, sale di Giotto e Leonardo, figure da Camuffo).

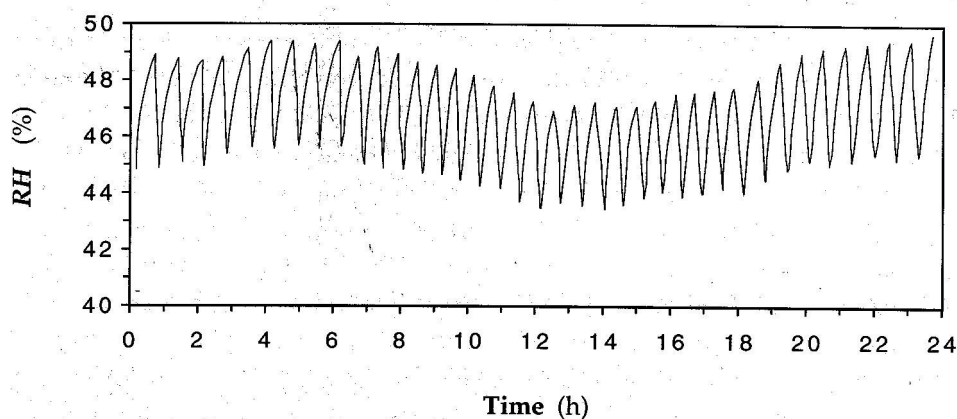


*Umidità relativa nella sala di Giotto, Galleria degli Uffizi. Nella stagione calda l'aria fredda rilasciata dal soffitto genera una zona perturbata*



*Umidità relativa nella sala di Leonardo, Galleria degli Uffizi. Nella stagione calda il sofisticato sistema di condizionamento rilascia aria da una sorgente estesa sotto il soffitto genera una zona perturbata*

I sofisticati sistemi che mantengono l'umidità relativa in un intervallo prefissato, causano dannose oscillazioni tra questi valori (figura da Camuffo). Sebbene queste variazioni siano solo di qualche percento e breve durata, e quindi non possono raggiungere gli strati più profondi, la ripetizione di questi cicli può avere un impatto negativo sui materiali sottili come i dipinti su tela.



*Fluttuazioni di umidità relativa generate dal sistema di controllo*

Gravi danni possono essere causati in chiese riscaldate una sola volta alla settimana: aumenti di 7°C possono causare diminuzione di RH del 10%, variazioni di 20°C provocano cadute di RH del 50%.

Le tele e i manufatti in legno si contraggono e si dilatano e quindi il ripetersi di questi cicli può avere gravi conseguenze.

Altre sistemi possono essere utilizzati per mantenere RH costante nelle vetrine, come per esempio il gel di silice o opportune soluzioni super sature.

L'umidità può essere controllata nelle vetrine con generatori di microclima che aggiungono o sottraggono umidità, in maniera continua fino a raggiungere l'equilibrio ad un valore di RH prefissato.

Nel caso vi siano differenze di temperatura tra l'ambiente e il sistema di controllo (per esempio a causa del sistema di illuminazione) la distribuzione di RH non risulta omogenea.

## 7. LA RADIAZIONE

Ogni corpo emette radiazione elettromagnetica che si propaga nello spazio sotto forma di onda.

Principali relazioni:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Relazione tra frequenza ( $\nu$ ), velocità ( $c$ ) e lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) della radiazione elettromagnetica ( $c$  velocità della luce nel vuoto)

L'intensità (flusso di energia per unità di tempo, unità di angolo solido e lunghezza d'onda) della radiazione luminosa emessa da un corpo è funzione della frequenza e dipende dalla sua temperatura.

La radiazione luminosa può essere descritta anche tramite la teoria del fotone di Einstein.

L'energia è trasportata dai fotoni la cui energia dipende dalla frequenza (e quindi dalla lunghezza d'onda) secondo la relazione:

$$E = h\nu$$

dove  $h$  è la costante di Planck.

L'intensità della radiazione è associata al numero di fotoni.

La radiazione elettromagnetica può essere suddivisa a seconda del valore della lunghezza d'onda (**spettro**) in:

<i>Radiazione</i>	<i>lunghezza d'onda</i>
Raggi $\gamma$ e X	minore di 0.001 micrometri ( $\mu\text{m}$ )
Ultravioletto (UV)	0.001 – 0.38 $\mu\text{m}$

Visibile	0.38 – 0.72 $\mu\text{m}$
Infrarosso (IR)	0.72 – 1000 $\mu\text{m}$
Microonde e onde radio	maggiore di 1000 $\mu\text{m}$

Sebbene la radiazione UV sia la più energetica essa è composta da un piccolo flusso di fotoni e quindi la potenza emessa (energia per unità di tempo) è molto bassa.

Circa metà della potenza emessa si trova nel visibile e la gran parte dell'altra metà nell'IR.

La lunghezza d'onda del picco di intensità della radiazione emessa da un corpo e la temperatura del corpo sono inversamente proporzionali:

$$\lambda_{picco} = \frac{const.}{T}$$

Di conseguenza:

Un corpo a T elevata emette radiazione a lunghezza d'onda minore (e quindi frequenza maggiore) rispetto ad un corpo a bassa T, che quindi emette radiazione a lunghezza d'onda maggiore (e frequenza minore)

La radiazione solare è prevalentemente onda corta (visibile), mentre la radiazione terrestre è onda lunga (IR).

Questo fenomeno è la causa dell'effetto serra: l'atmosfera è praticamente trasparente alla radiazione solare (onda corta) ma assorbe parte della radiazione infrarossa emessa dalla terra e dall'atmosfera stessa (onda lunga); un aumento della concentrazione dei gas che assorbono la radiazione infrarossa emessa dalla terra, come la CO<sub>2</sub>, causa un aumento della temperatura al suolo.

La scelta della migliore illuminazione delle opere d'arte dipende da due principali fattori:

- ❑ Una buona riproduzione dei colori
- ❑ Il minimo danno per i manufatti

L'esposizione diretta ai raggi UV e IR può provocare alterazioni e scolorimento, mentre l'effetto indiretto delle lampade è la creazione di moti convettivi che aumentano la deposizione della particelle.

Ogni sorgente luminosa possiede, nel proprio spettro, porzioni di UV e IR

I danni provocati dai raggi UV e IR dipendono dal tipo di materiale sensibile a queste lunghezze d'onda e dal tipo di sorgente luminosa.

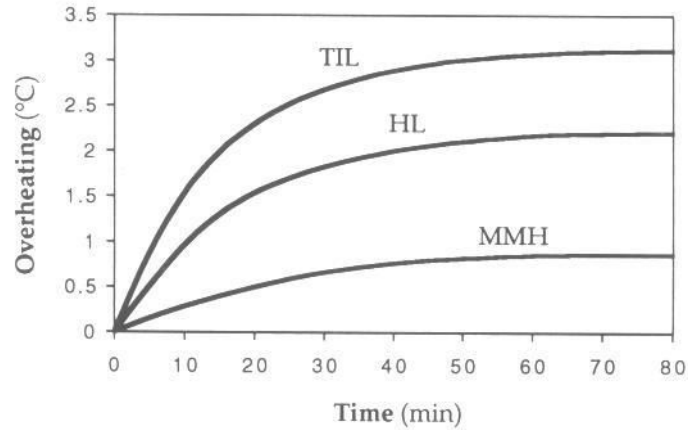
Per la conservazione la migliore lampada è quella con minor UV (le lunghezze d'onda più pericolose) e IR (minore flusso di calore).

Per quanto riguarda i colori, la luce artificiale deve possedere lo stesso spettro (lunghezze d'onda) della luce naturale al quale è sensibile l'occhio umano.

Le lampade ad incandescenza hanno un spettro continuo con una alta emissione nell'infrarosso che crea surriscaldamento e quindi diminuzione dell'umidità relativa.

Le lampade a fluorescenza hanno una bassa emissione di IR, ma uno spettro discontinuo molto diverso da quello solare, che può alterare i colori.

La radiazione emessa da queste lampade contiene un quantità maggiore di UV rispetto a quelle ad incandescenza, che possono essere ridotti con opportuni filtri.

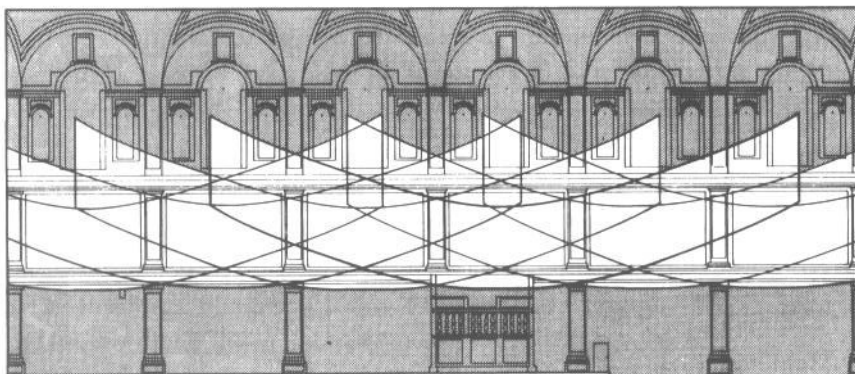


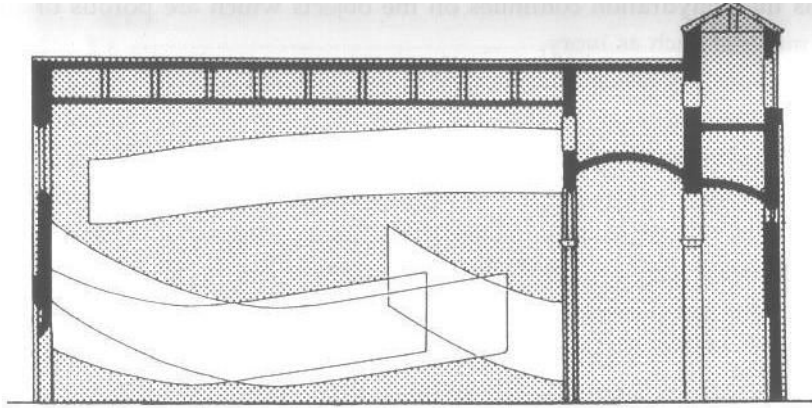
*Confronto del riscaldamento causato da differenti tipi di lampade a 500 lux: lampada di tungsteno a incandescenza (TIL), lampada alogena (HL), lampada ottenuta con una mistura di metalli alogenuri (MMH).*

L'uso combinato di sorgenti diverse non risolve il problema della mancanza di linee spettrali (lunghezze d'onda) ed è difficile da bilanciare.

Anche l'eccessiva illuminazione dovuta alla luce solare deve essere evitata.

I punti illuminati dalla radiazione solare si spostano con le ore del giorno e con la stagione (figure da Camuffo).



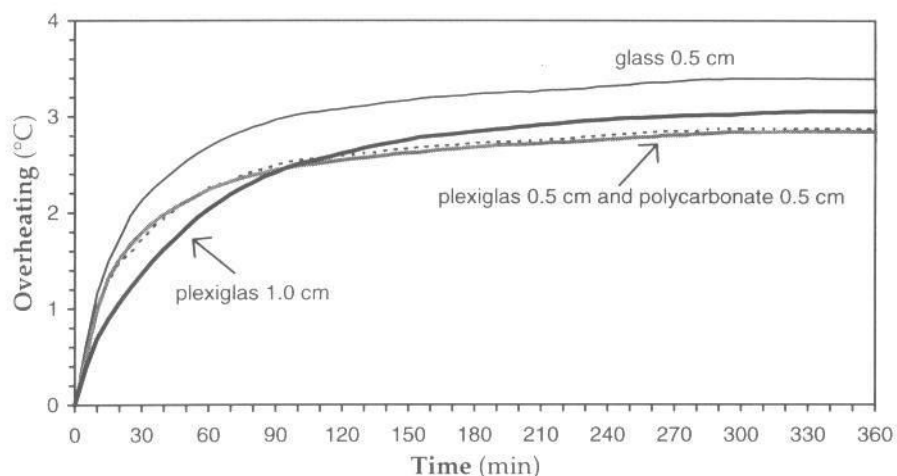


Per ridurre l'effetto della radiazione solare si usano comunemente le tende, ma queste introducono una serie di problemi:

- ❑ Scaldandosi generano moti convettivi
- ❑ Favoriscono lo sviluppo di batteri

Per schermare la radiazione si possono usare dei vetri otticamente selettivi.

L'illuminazione delle vetrine, come già visto, può causare una sorta di effetto serra con conseguente surriscaldamento e diminuzione dell'umidità relativa.



*Surriscaldamento come conseguenza dell'effetto serra di vetrine fatte di vetro, plexiglas e polycarbonato. L'illuminazione è costituita da una lampada a incandescenza al tungsteno.*



Questo problema può essere eliminato utilizzando le fibre ottiche, che possono trasportare luce filtrata degli UV e IR, e quindi composta dalla sola banda del visibile.

## DETERIORAMENTO DELLE OPERE D'ARTE DOVUTO ALLA LUCE

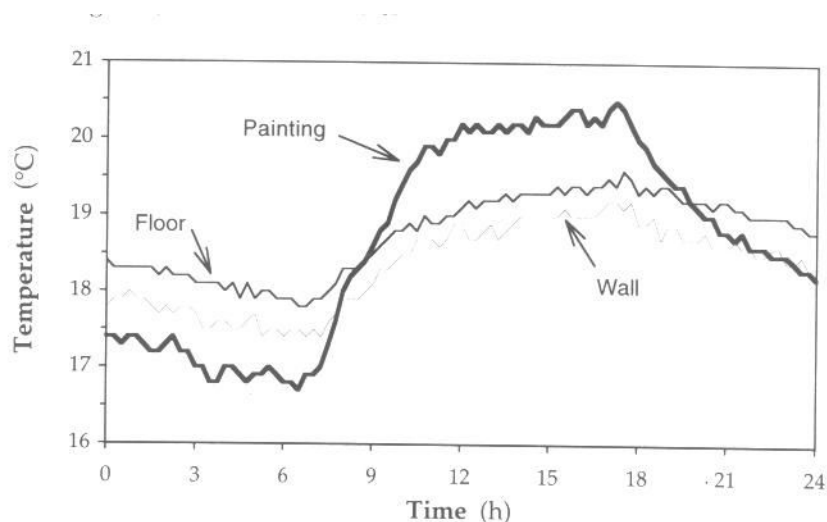
La luce può causare degrado tramite diversi meccanismi:

- ❑ Foto-ossidazione di inquinanti gassosi che formano un ambiente dannoso
- ❑ Fotosintesi clorofilliana che causa lo sviluppo di 'alghe' e altri tipi di vegetazione
- ❑ Danno diretto

La gravità dei danni diretti dipendono da diversi fattori:

- ❑ Energia dei fotoni
- ❑ Numero totale dei fotoni incidenti
- ❑ Risposta dei materiali (dipendente da: composizione chimica, struttura cristallina, proprietà ottiche dei diversi strati, profondità di penetrazione...)

Uno degli effetti principali è dovuto alla trasformazione dell'energia assorbita, che può essere trasformata in calore con conseguente variazione della temperatura e dell'umidità relativa.



*La figura mostra il riscaldamento del dipinto Madonna d'Ognissanti di Giotto (Galleria degli Uffizi, Firenze) confrontato con la temperatura del pavimento e della parete (da Camuffo)*

La luce incidente può causare alterazione della struttura cristallina o polimerica. I più efficienti in questo caso sono i raggi UV essendo i più energetici.

La luce può causare alterazione dei colori e ingiallimento.

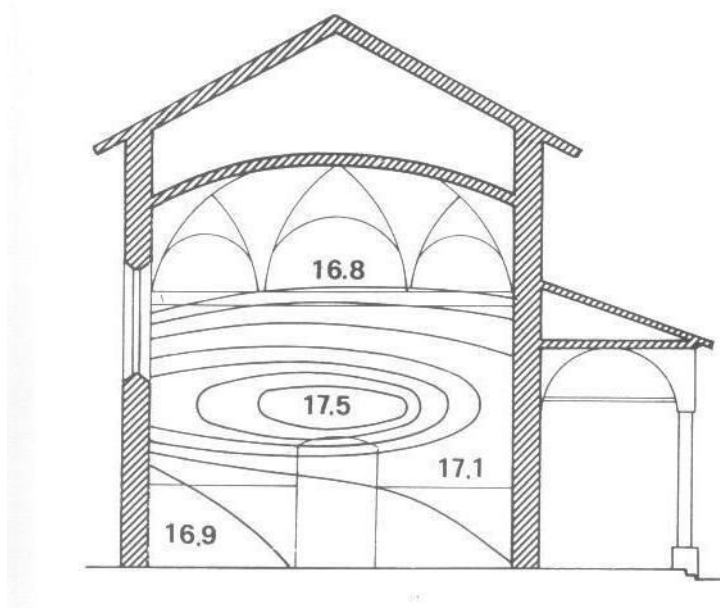
Il danno aumenta con il numero totale di fotoni che hanno raggiunto la superficie e dipende dall'intensità della luce, dalla durata dell'illuminazione, dal numero di cicli (variazione dell'illuminazione) ripetuti.

Bisogna quindi ridurre il tempo di illuminazione, possibilmente eliminandola quando non necessaria.

Alcuni materiali che sono cattivi conduttori di calore e costituiti da diversi strati vengono riscaldati dal sistema di illuminazione con un ritardo relativo a ciascun strato. Questo provoca delle tensioni tra strato e strato, ogni qualvolta si accende o si spegne la luce, che possono provocare fratture e distacco delle superfici.

I flash delle macchine fotografiche che sono vietati in tutti i musei, in realtà non sono così dannosi poiché la loro durata è estremamente breve.

La posizione delle lampade è molto importante perché il calore da esse generato può causare moti convettivi.



*Punti caldi generati da lampade ad incandescenza che, fino a qualche anno fa erano usate per illuminare l'Ultima Cena di Leonardo. Ora vengono usate luci più diffuse e fredde (da Camuffo).*

I moti turbolenti dell'aria generati dalla convezione favoriscono la deposizione delle particelle sulle superfici.

Il degrado dei colori è causato non solo dall'azione diretta della radiazione luminosa ma anche dallo smog foto-chimico dovuto alle reazioni tra ossidi di azoto e i fotoni che generano ozono.

Molti pigmenti e materiali coloranti sono attaccati dall'ozono e dagli ossidi di azoto associati con lo smog fotochimico.

I livelli di concentrazione dell'ozono sono legati alla radiazione solare, per cui seguono cicli giornalieri con picchi durante le ore diurne.

La luce induce la crescita di microrganismi che possono infestare le opere d'arte.

## 8 LA DEPOSIZIONE SECCA DI PARTICOLATO ATMOSFERICO

La deposizione secca di inquinante riguarda particolato con dimensioni che vanno da quelle molecolari a quelle più grandi di dimensione dei granelli di sabbia.

La dimensione del particolato è di grande importanza:

- nel caso del particolato più fine l'aria si comporta come un mezzo discontinuo in cui le molecole urtano casualmente le particelle di inquinante
- nel caso del particolato più grande l'aria si comporta come un mezzo continuo, come un fluido.

Se  $D$  è il diametro del particolato e  $\lambda$  il libero cammino medio delle molecole in aria (0.065  $\mu\text{m}$ ), la quantità:

$$Kn = \frac{2\lambda}{D}$$

costituisce un utile parametro per distinguere il diverso comportamento del particolato fine ( $kn > 1$ ) da quello grande ( $kn < 1$ ).

La mobilità del particolato diminuisce al crescere delle sue dimensioni.

La deposizione dipende da numerosi fattori che agiscono con una diversa efficienza a seconda delle dimensioni del particolato.

La probabilità di deposizione varia con le dimensioni e con lo stato microfisico dell'aria vicino alla superficie.

Infatti un considerevole numero di particelle fini e medie si trova sospeso nell'aria, perché hanno un lungo tempo di residenza, mentre è ridotto il numero di particelle di grandi dimensioni perché hanno un tempo di residenza molto breve.

Il numero di particelle di un dato diametro  $D$  che raggiunge l'unità di superficie nell'unità di tempo è proporzionale alla concentrazione  $C(D)$  di particelle in aria:

$$N(D) = V_{\text{dep}} \times C(D)$$

Dove  $V_{\text{dep}}$  è la velocità di deposizione che dipende dal diametro delle particelle, dalla temperatura dell'aria, dalle differenze di temperatura e umidità, dall'umidità relativa, dal campo elettrico in prossimità della superficie, dalla turbolenza, dalle caratteristiche della superficie etc.

Quindi  $N(D)$  può essere diminuito in due modi:

1. riducendo  $V_{\text{dep}}$ : cioè con appropriate condizioni microclimatiche
2. riducendo  $C(D)$  cioè utilizzando dei filtri.

I sistemi di filtraggio introducono ventilazione e turbolenza che possono aumentare la deposizione annullandone il beneficio.

La turbolenza causa il moto e la deviazione della direzione delle particelle sospese in aria che quindi impattano più facilmente sulle superfici.

Non tutte le particelle che arrivano alla superficie vi aderiscono.

Le forze che giocano un ruolo fondamentale nella 'cattura' della particelle da parte della superficie sono:

le forze molecolari di contatto e adesione, quelle di natura elettrica o dovute alla presenza di pellicole o acqua, la deformazione anelastica delle particelle che colpiscono la superficie e della superficie stessa.

La miglior condizione per ridurre la deposizione delle particelle sulle opere d'arte è quella in cui i movimenti delle masse d'aria sono ridotti e non si ha generazione di moti turbolenti, quindi aria stratificata stabilmente senza ventilazione e sorgenti di calore.

Un volta che le particelle colpiscono una superficie, rimbalzano o aderiscono ad essa. La frazione di particelle che rimangono sulla superficie dipende da diversi fattori: i principali sono la natura delle forze di adesione e le proprietà fisico-chimiche delle particelle e della

superficie. La rugosità della superficie e la dimensione e la forma delle particelle sono anche importanti. Rugosità macroscopiche possono trattenere particelle fini nelle cavità della superficie, e particelle grandi aderiscono meglio su superfici lisce.

Le forze di natura molecolare (forze di Van der Waal) sono forze di adesione molto efficaci. Una particella che si avvicina ad una superficie, sente un forza attrattiva che è proporzionale al diametro della particella ma inversamente proporzionale alla distanza dalla superficie. Particelle grandi vicino alla superficie sono catturate più facilmente. Una volta che le particelle sono a contatto con la superficie le forze di adesione sono tanto più forti quando è maggiore l'area di contatto. Deformazioni nella zona di contatto (dovute a particelle elastiche o presenza di cere o vernici), aumentano l'area di contatto e le forze di adesione. Particelle piccole o piatte hanno in generale un più grande rapporto tra area di contatto e volume totale. Per particelle con diametro inferiore a 2  $\mu\text{m}$  le rugosità superficiali sono dello stesso ordine delle dimensioni delle particelle, quindi le forze di adesione sono inversamente proporzionali alle dimensioni delle particelle. Infatti più fini sono le particelle più difficilmente possono essere rimosse dai moti turbolenti, inoltre le forze di adesione sono molto più grandi del peso delle particelle fini.

Per particelle intermedie con diametro compreso tra 2  $\mu\text{m}$  e 200  $\mu\text{m}$ , la situazione è molto variabile e dipende dalle dimensioni delle rugosità.

Particelle giganti, con diametro maggiore di 200  $\mu\text{m}$ , a causa del loro peso, aderiscono solo a superfici orizzontali o con elevata rugosità.

Le cariche elettriche presenti sulle particelle o sulle superficie possono contribuire ad attrarre le particelle sulla superficie dove poi possono rimanere attaccate a causa delle forze molecolari.

La presenza di uno strato di liquido sulla superficie provoca elevate forze di adesione, dovute alla tensione superficiale (si pensi per esempio ai castelli di sabbia), che trattengono tutte le particelle che impattano sulla superficie umida.

Superfici contaminate con sali solubili rimangono umide più a lungo e si sporcano maggiormente. In linea di principio, in ambienti umidi, le cere e alcune vernici possono rendere le superfici idrorepellenti, ma in ambiente secco questo vantaggio si perde perché

le superfici più lisce favoriscono l'adesione delle particelle più grandi, specialmente sotto l'azione delle forze elettrostatiche.

La presenza di *biofilm* favorisce l'adesione di particelle e la formazione di croste non-biologiche sopra precursori biologici.

Le particelle in un locale chiuso, **in assenza di movimenti d'aria** si dispongono vicino al suolo occupando uno strato il cui spessore è tanto maggiore quanto più fini sono le particelle. Ogni sorgente di turbolenza che causa un movimento dell'aria e un rimescolamento vicino al pavimento, per esempio camminando o pulendo, è responsabile della risospensione delle particelle con diametro superiore a 0.01  $\mu\text{m}$ , mentre quelle con diametro inferiore non si depositano ma rimangono sempre sospese e rimescolate.

Poiché nell'aria stagnante le particelle grandi e giganti si accumulano in uno strato molto sottile vicino al suolo, sarebbe possibile attivare nei musei e negli edifici storici un drenaggio notturno con un'aspirazione vicino al pavimento che rimuova la maggior parte dell'inquinante che occupa gli strati più vicini al pavimento.

Questo metodo può rimuovere in maniera semplice il particolato sospeso senza l'uso di filtri e le conseguenze che essi producono.

Gli aspiratori tendono a trascinare le particelle più grandi, che quindi vengono rotte e polverizzate e moltiplicate e riportate nell'ambiente sotto forma di nuvole di particelle fini che depositano di nuovo dopo qualche tempo. Solo una frazione del materiale aspirato rimane intrappolato nei filtri. Alcuni sistemi sono dotati di microfiltri adatti a trattenere una frazione consistente di materiale polverizzato. Solo i sistemi dotati di bocche esterne permettono di aspirare la polvere all'interno e di emetterlo all'esterno.

Lo sporco è causato dalla deposizione di particelle naturali o antropogeniche. Queste particelle inducono differenti effetti ottici a seconda delle diverse dimensioni, forme e natura. Il loro range varia da pochi centesimi di  $\mu\text{m}$  ad alcune decine di  $\mu\text{m}$ . Le forme possono essere sferiche o irregolari, o fibrose e prismatiche etc.. Ci sono particelle semitrasparenti o completamente opache.

Una volta depositate le varie particelle hanno differenti effetti, che possono essere fisici ed ottici, legati alla risposta fisiologica degli occhi. Gli effetti fisici anche se complessi possono essere oggettivamente definiti. Nel caso delle particelle completamente opache, i dipinti



gradualmente diventano via via più scuri mano a mano che le particelle si depositano. Nel caso delle particelle semitrasparenti l'attenuazione dei colori dipende dallo spessore dello strato di particelle depositate.

Nel caso di dipinti dove il ruolo dei colori è fondamentale la deposizione secca copre le superfici riducendo le differenze cromatiche diminuisce il valore artistico delle opere d'arte e falsando le interpretazioni. Questo significa che lo sporco deve essere rimosso usando i metodi necessari anche se questi espongono le opere d'arte a rischi e stress dovuti alla manipolazione. Nel caso delle sculture e delle opere architettoniche le forme possono essere danneggiate anche se riconoscibili, ma la bellezza estetica può essere sostanzialmente compromessa.

Tuttavia se le deposizioni sono solo secche i danni sono unicamente di tipo estetico, ma non compromettono l'integrità fisica del materiale di cui è costituita l'opera, se invece la deposizione è umida il problema diventa molto più grave a causa delle trasformazioni chimiche che possono provocare danni irreversibili alle opere d'arte.

Non vi è diretta correlazione tra le particelle sospese in aria e i danni alle opere d'arte. Questo dipende invece dalle particelle depositate e quindi dai meccanismi con i quali essa avviene, come descritto in precedenza.

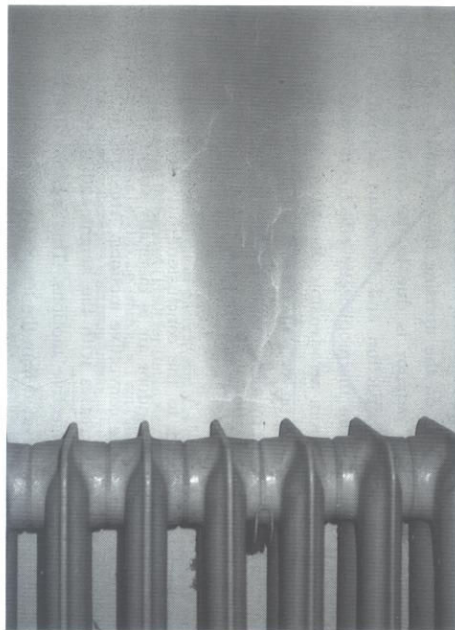
Il degrado dei monumenti dipende quindi dalla qualità e la quantità di inquinanti depositati e dal modo in cui le superfici sono inumidite (per esempio pioggia che dilava le superfici sporche o pioggia fine che attiva gli inquinanti senza rimuoverli), la frequenza e la durata dell'umidificazione in aggiunta ai fattori intrinseci: natura e robustezza del materiale, rugosità superficiale, porosità.

La conoscenza delle caratteristiche chimico-fisiche delle particelle e la loro relativa abbondanza in atmosfera e i meccanismi di deposizione che favoriscono il trasporto e l'adesione di alcuni tipi di particelle alle superfici piuttosto di altre, deve portare ad una profonda revisione della dinamica delle aggressioni chimiche e deve anche chiarificare le idee riguardo ciò che deve essere fatto o no per ridurre gli effetti negativi sul patrimonio culturale.

Essa aiuta anche a rivedere il tradizionale monitoraggio chimico. Infatti l'attenzione sulle concentrazioni dei componenti può indurre a trascurare piccole particelle potenzialmente aggressive.

Molti studi hanno dimostrato l'importanza del microclima nei processi di deposizione. Nella pratica è impossibile filtrare completamente il particolato sospeso, anzi, come già sottolineato, la presenza di impianti di filtraggio può peggiorare la situazione aumentando la deposizione.

Nella figura si possono osservare delle zone scure a 'V' sopra i supporti del termosifone dovute alla scia turbolenta indotta da questi supporti nella corrente di aria calda che sale, che aumenta la deposizione di particolato.



Si può quindi concludere che il microclima ideale è quello in cui l'aria è stratificata termicamente così da ridurre la turbolenza e i moti convettivi. La condizione di stabilità si raggiunge quando la temperatura cresce con la quota e non ci sono superfici calde che inducono moti convettivi.

Poiché tutti i sistemi di condizionamento e di regolazione inducono instabilità e variazioni delle condizioni microclimatiche, i migliori sistemi per la conservazione sono quelli

permanenti e passivi, come gli isolatori termici, schermi contro la radiazione diretta, l'uso di materiali con elevata capacità termica e igrometrica.

Non tutte le posizioni sono adatte ad appendere i quadri. Il problema non è solo evitare il riverbero di finestre o lampade opposte, ma si possono commettere i seguenti frequenti errori.

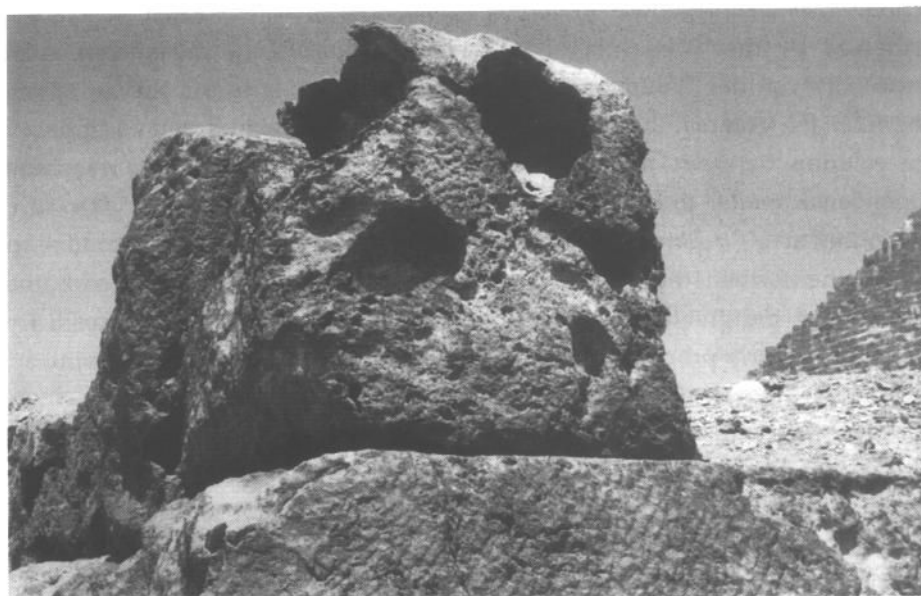
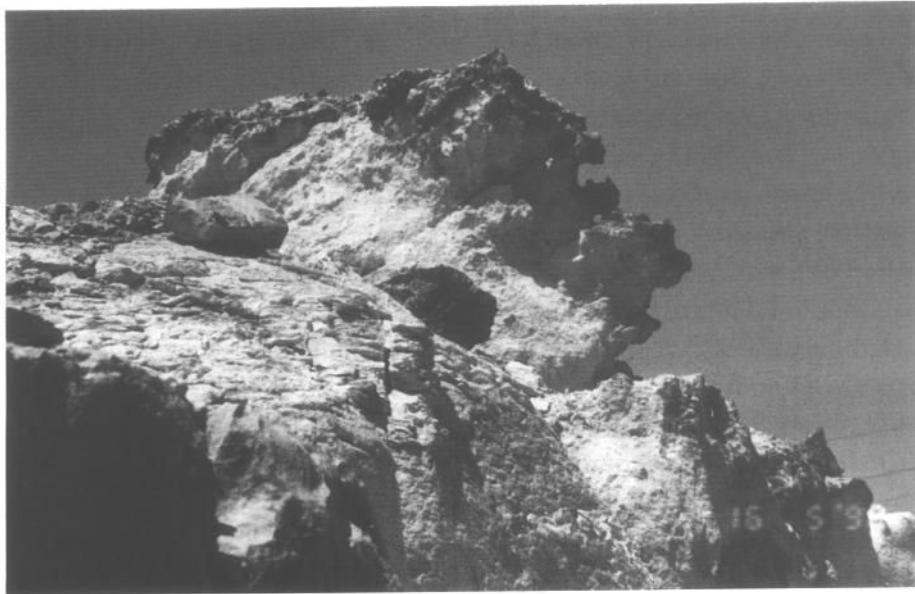
- Il quadro è sopra un radiatore (Figura da Camuffo): si creano correnti di aria calda ascendente ogni qualvolta il riscaldamento è acceso che alterano l'equilibrio termico e favoriscono la deposizione di particolato.



- Il quadro è posto vicino a un umidificatore e deumidificatore: si creano continue variazioni delle condizioni di umidità.
- Luce diretta da finestre o lampade: la luce può favorire le reazioni chimiche (principalmente l'ossidazione) scolorimento e riscaldamento, con tutti gli effetti negativi già discussi.
- Porte e finestre: quando esse sono aperte al mattino per le pulizie si generano correnti molto pericolose per le variazioni di calore e umidità che esse inducono.

In aggiunta alla deposizione leggera bisogna anche considerare le particelle giganti che impattano violentemente e l'erosione del vento.

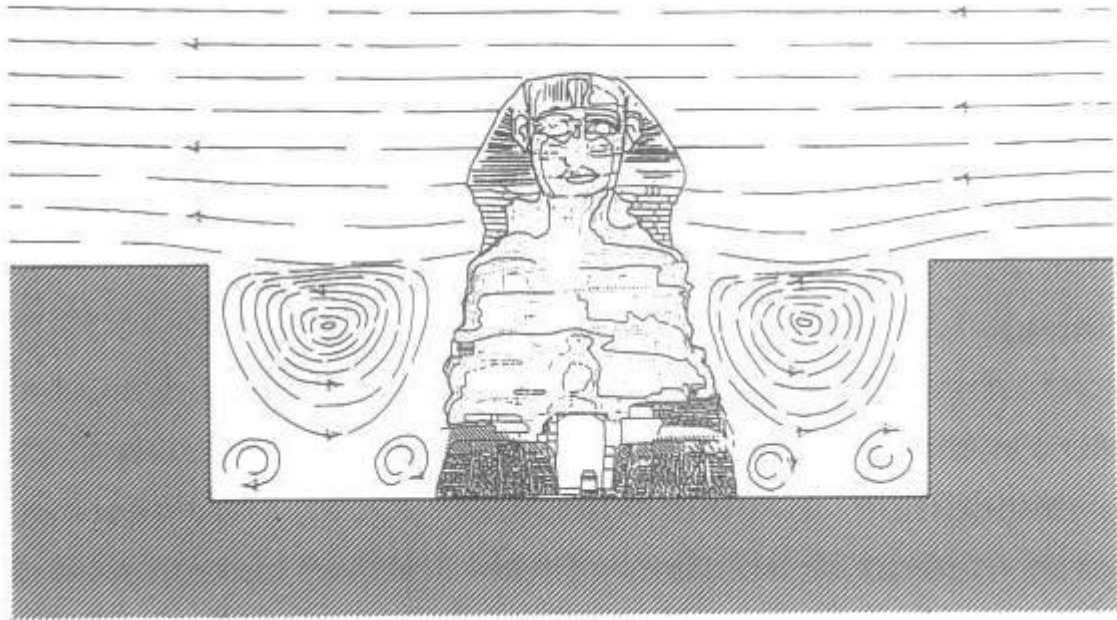
L'erosione del vento si verifica quando particelle abrasive impattano con elevata energia e per lungo tempo causando estesi danni micromeccanici che risultano in effetti di due tipi: sfrangiamento delle parti meno resistenti o formazione di buchi rotondi in pietre che inizialmente hanno qualche cavità (Figura, da Camuffo).



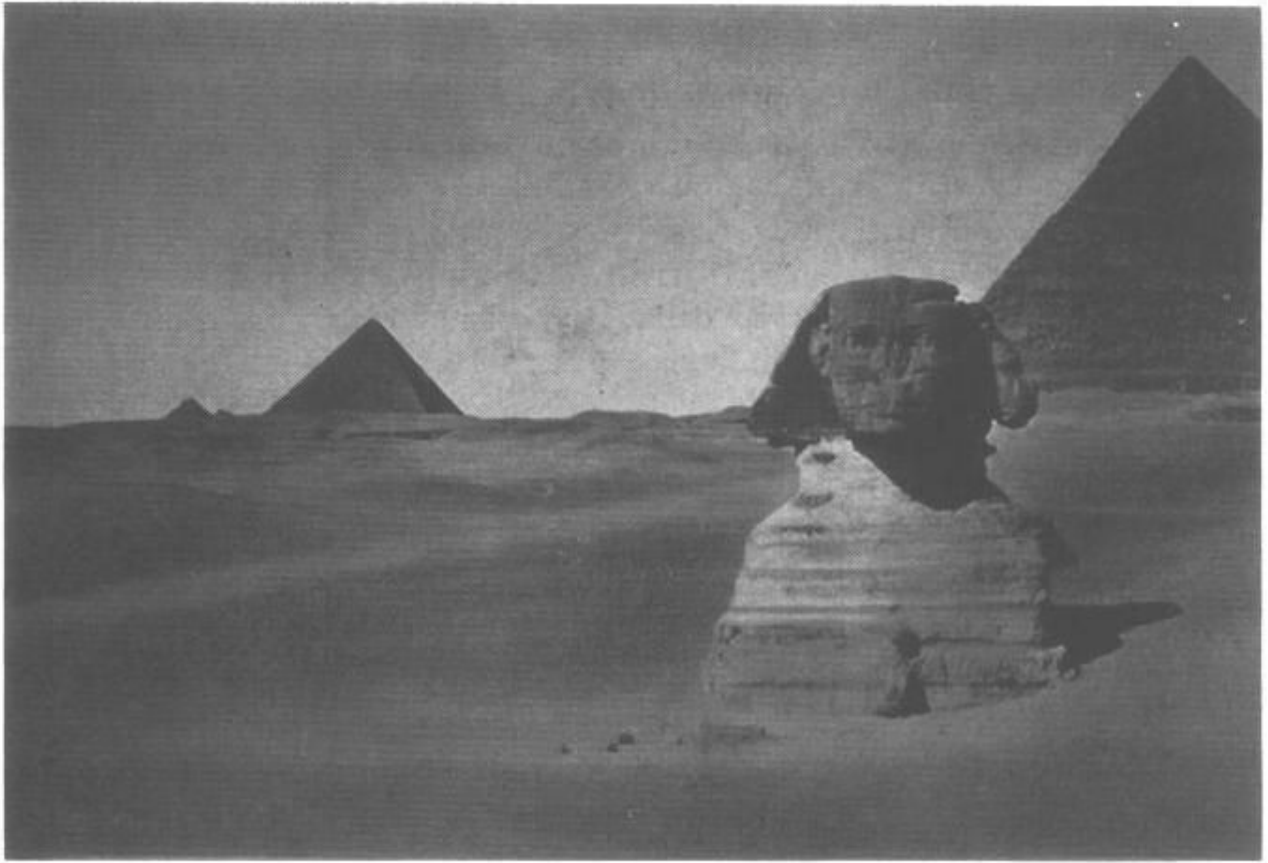
## **IL CASO DELLA SFINGE**

Il corpo della Sfinge fu ottenuto scavando intorno ad esso. Quando il vento soffia, si formano due vortici stazionari che cambiano la traiettoria dei granelli più grandi trasportati

dal vento, dalla forza di gravità e dalle forze inerziali. Il risultato è che tutti i granelli abrasivi cadono nello scavo senza raggiungere il monumento. Il volto non è stato raggiunto dai granuli più grossi ed è ben conservato.



Nei millenni passati , quando la Sfinge fu immersa nelle dune oscillanti, fu severamente erosa dai granelli di quarzo di dimensioni comprese tra 200 e 600  $\mu\text{m}$  che, sospinti da vento forte, avanzano rimbalzando sulla sabbia con salti che possono arrivare sino a circa un metro d'altezza, erodendo tutto ciò che incontrano. La rimozione della sabbia dello scavo circostante costituisce il metodo più efficace di conservazione contro l'erosione eolica.



## 9. L'INQUINAMENTO ATMOSFERICO

La condizione di stabilità dell'atmosfera dipende dall'andamento della temperatura con la quota (gradiente termico verticale). Se una particella d'aria si sposta verso l'alto o verso il basso varia la sua temperatura di 1 °C ogni 100 metri (gradiente termico adiabatico) e quindi si può trovare ad una temperatura diversa da quella dell'aria circostante che in generale ha un gradiente termico diverso. Si generano così delle forze di galleggiamento dovute alla differenza di temperatura e quindi di densità. Si hanno i seguenti possibili casi.

- a) La forza di galleggiamento e' concorde allo spostamento, **equilibrio instabile**
- b) La forza di galleggiamento e' nulla, **equilibrio neutro**
- c) La forza di galleggiamento si oppone allo spostamento, **equilibrio stabile**

Nel caso (a) la temperatura dell'atmosfera diminuisce con la quota più rapidamente di quella della particella, nel caso (b) diminuisce con lo stesso andamento e nel caso (c) diminuisce più lentamente o aumenta. Si vedano i corrispondenti casi a, b e c della figura.

Per esempio in atmosfera instabile una particella d'aria che si sposta verticalmente verso l'alto diminuisce la sua temperatura più lentamente che l'aria circostante e quindi, rimanendo più calda di essa, tende ancora a salire. Per questo motivo l'aria è detta instabile.

Pasquill introdusse una suddivisione in sei classi di stabilità (aumentate successivamente a sette), normalmente usata attualmente per determinare lo stato di stabilità dell'atmosfera. Se  $\Gamma_a$  rappresenta la diminuzione con la quota della temperatura atmosferica si ha:

cat. A	Condizioni estremamente instabili	$\Gamma_a \geq +1.9 \text{ °C}/100\text{m}$
cat. B	Condizioni moderatamente instabili	$+1.7 \leq \Gamma_a < +1.9 \text{ °C}/100\text{m}$
cat. C	Condizioni leggermente instabili	$+1.5 \leq \Gamma_a < +1.7 \text{ °C}/100\text{m}$
cat. D	Condizioni neutre	$+0.5 \leq \Gamma_a < +1.5 \text{ °C}/100\text{m}$
cat. E	Condizioni leggermente stabili	$-1.5 \leq \Gamma_a < +0.5 \text{ °C}/100\text{m}$
cat. F	Condizioni stabili	$-4.0 \leq \Gamma_a < -1.5 \text{ °C}/100\text{m}$
cat. G	Stabilità forte	$\Gamma_a < -4.0 \text{ °C}/100\text{m}$ .

Si noti che un valore negativo di  $\Gamma_a$  indica che la temperatura aumenta con la quota.

Ovviamente il metodo più esatto, per la valutazione del grado di stabilità, sarebbe quello della determinazione continua dell'andamento verticale della temperatura, fino ad una ragionevole altezza dal suolo, per poi procedere, dopo una congrua serie di osservazioni, alla classificazione dei dati ottenuti secondo opportuni intervalli di valori della variazione dell'andamento della temperatura. Questo metodo però, richiedendo molto tempo e particolari strumentazioni di misura, presenta notevoli difficoltà di attuazione nella pratica.

In mancanza di queste informazioni, si attribuisce un valore di stabilità, uniforme in tutto lo strato di atmosfera, utilizzando i dati disponibili al suolo. Il metodo di Pasquill, che prevede sette categorie di stabilità (come riportate sopra), propone la seguente tabella per la corrispondenza delle classi di stabilità a diverse condizioni d'insolazione, di cielo notturno e di vento.

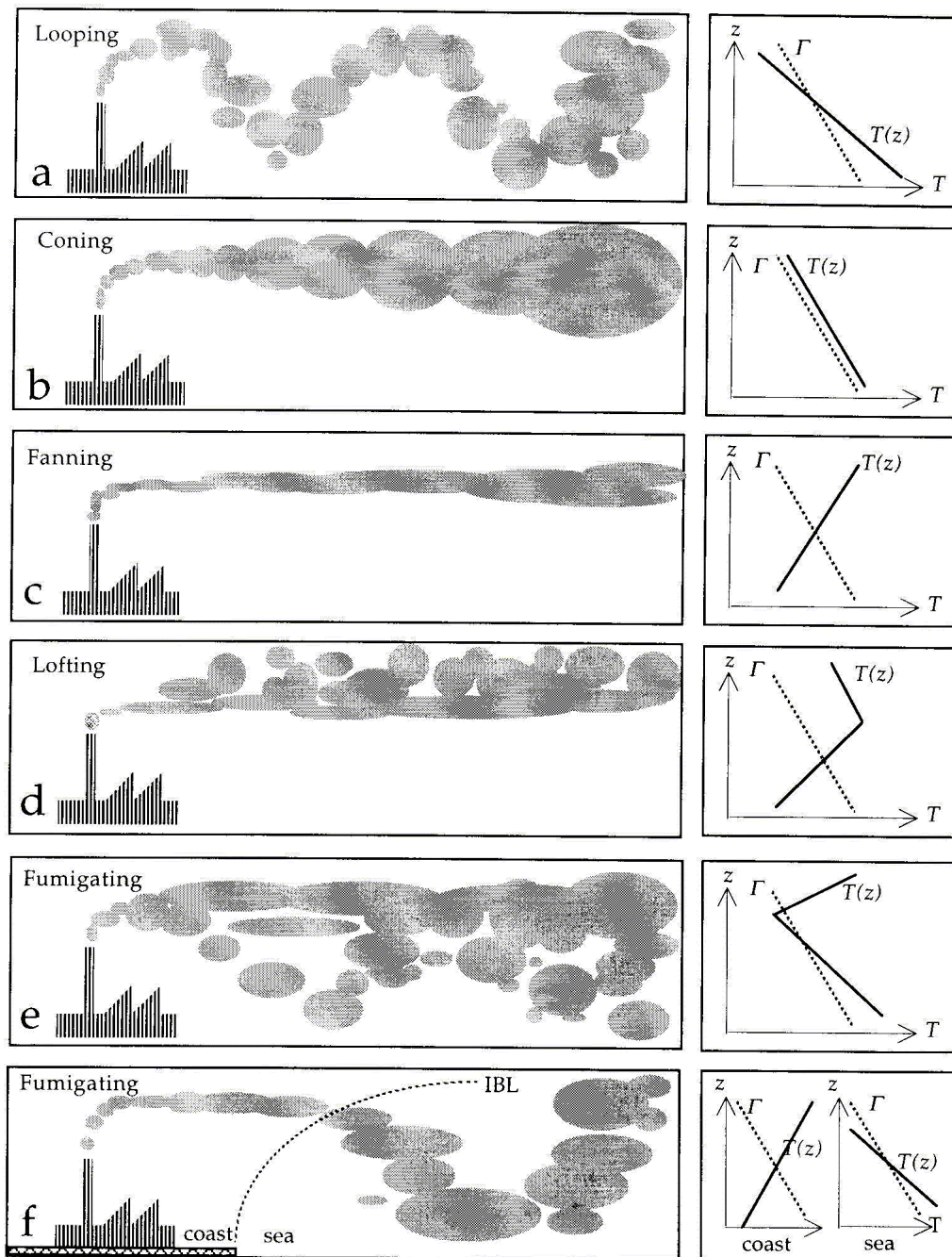
<b>Vento al suolo</b> (a 10 m)	<b>Insolazione</b>		
	<i>Forte</i>	<i>Moderata</i>	<i>Debole</i>
Calma	–	–	–
< 2 ms <sup>-1</sup>	A	A ÷ B	B
2 ÷ 3 ms <sup>-1</sup>	A ÷ B	B	C
3 ÷ 5 ms <sup>-1</sup>	B	B ÷ C	C
5 ÷ 6 ms <sup>-1</sup>	C	C ÷ D	D
> 6 ms <sup>-1</sup>	C	D	D

<b>Vento al suolo</b> (a 10 m)	<b>Stato del cielo notturno</b>		
	<i>Coperto</i>	<i>Parzialmente coperto</i>	<i>Sereno</i>
calma	–	–	G
< 2 ms <sup>-1</sup>	–	–	F ÷ G
2 ÷ 3 ms <sup>-1</sup>	E	F	–
3 ÷ 5 ms <sup>-1</sup>	D	E	–
5 ÷ 6 ms <sup>-1</sup>	D	D	–
> 6 ms <sup>-1</sup>	D	D	–



Il grado di stabilità atmosferica è di fondamentale importanza per il comportamento e la dispersione degli inquinanti in atmosfera. Infatti il gradiente termico dell'aria ha un'importanza rilevante nel determinare la diffusione verticale degli inquinanti: la seguente figura esemplificativa mostra come il gradiente termico verticale determini il comportamento dei pennacchi di inquinante, delineando la struttura della dispersione di un pennacchio in atmosfera nelle diverse condizioni meteorologiche, con alcuni casi possibili per il gradiente verticale di temperatura.

Nella figura la linea puntinata rappresenta il gradiente termico adiabatico (1 °C ogni 100 m) mentre la linea continua rappresenta la variazione della temperatura con la quota dell'atmosfera.



*La struttura della dispersione di un pennacchio in atmosfera nelle diverse condizioni meteorologiche (da Camuffo 1998)*

L'atmosfera terrestre è semitrasparente rispetto alla radiazione solare (radiazione a onda corta, SW). L'energia accumulata dal terreno, viene trasferita allo strato d'aria adiacente alla superficie sotto forma di calore sensibile o latente.

Il ciclo diurno di questo scambio di calore (energia) controlla, in massima parte, il flusso di energia nell'atmosfera. Al sorgere del sole il suolo, inizialmente freddo, viene riscaldato dalla radiazione solare causando così il formarsi dei flussi di calore sensibile, che riscaldano l'aria circostante, e latente, sotto forma di vapore proveniente dall'acqua presente nel suolo.

Dopo il tramonto il terreno incomincia a raffreddarsi a causa dell'assenza di irraggiamento, cedendo calore radiativamente verso l'alto, raffreddando così anche i primi metri di aria.

L'andamento tipico giorno-notte appena descritto genera lo strato limite rappresentato nella figura seguente.

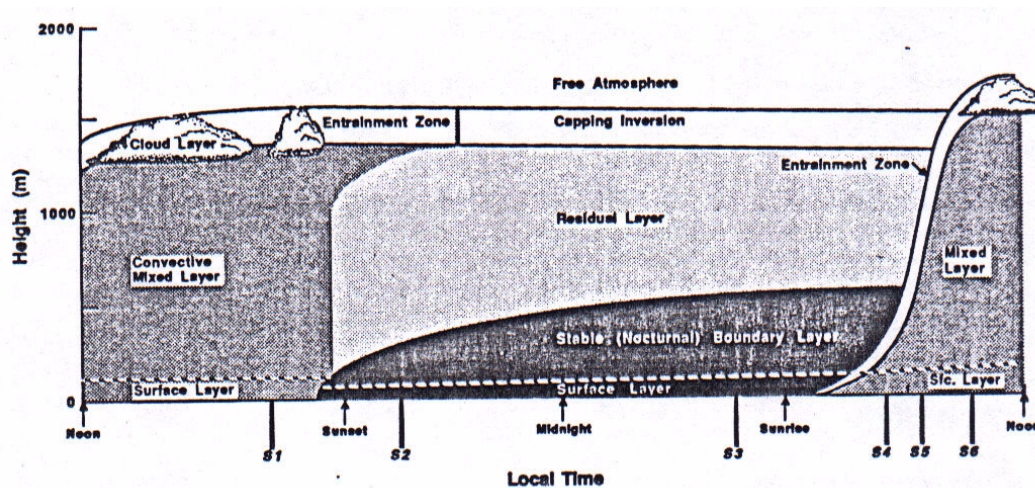


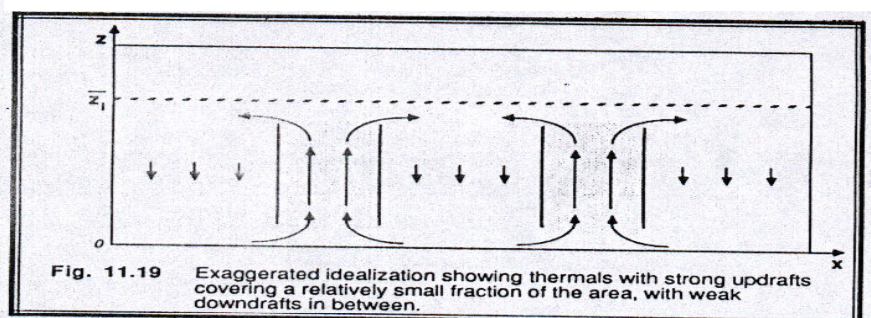
Figura: l'evoluzione temporale del ciclo diurno a partire da mezzogiorno per 24 ore; da Stull (1988).

Si possono distinguere 3 tipi di condizioni: strato convettivo (diurno) instabile (zona in grigio scuro), strato residuale neutro (zona in grigio chiaro) e strato stabile notturno (zona in nero), anche se l'atmosfera diurna può anche essere neutra o stabile.

## LO STRATO CONVETTIVO

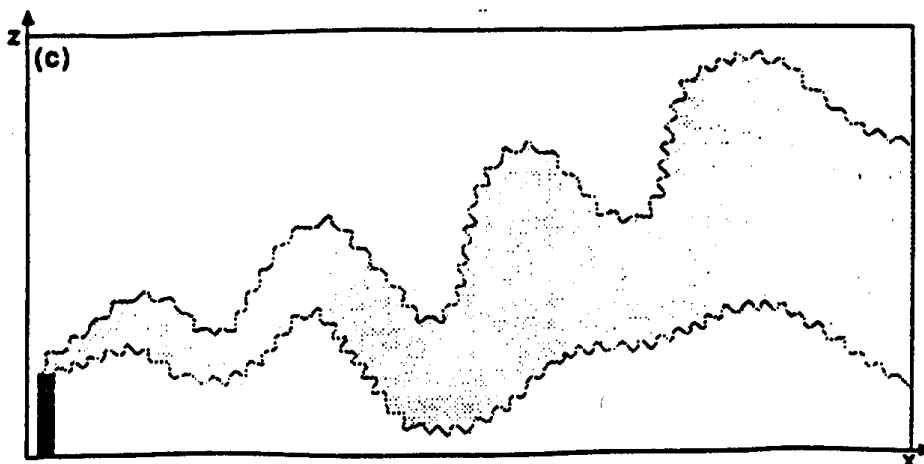
Le condizioni convettive cominciano ad interessare l'atmosfera circa mezz'ora dopo il sorgere del sole, e l'altezza del PBL continua poi ad aumentare sino a raggiungere il suo valore massimo nel tardo pomeriggio. Non appena i raggi solari cominciano a scaldare la superficie terrestre e, indirettamente, l'aria a contatto con essa (inizialmente fredda), si formano dei flussi di calore 'sensibile', che riscaldano l'aria circostante, e calore 'latente',

sotto forma di vapore proveniente dall'acqua presente nel suolo; si sviluppa così uno strato convettivo turbolento, dovuto al moto ascensionale di pennacchi d'aria calda soggetti a una forza di galleggiamento positiva, compensato dal moto discendente di colonne d'aria più fredda (Figura). L'evoluzione dello strato rimescolato è dunque decisamente legata al riscaldamento del terreno da parte del sole: lungo il corso della giornata, avviene l'accrescimento dello strato convettivo tramite la 'cattura' (*entrainment*) di aria dallo strato sovrastante meno turbolento (che può essere lo strato limite stabile o lo strato residuale), fino ad un massimo quando nel pomeriggio la temperatura superficiale del suolo perviene al suo valore più alto.



da Stull (1988)

In tali condizioni di rimescolamento dell'aria, gli inquinanti eventualmente presenti in atmosfera vengono dispersi in volumi d'aria molto grandi ed il pennacchio di inquinante mostra un caratteristico comportamento a "volute" chiamato *looping* (figura), restando gli inquinanti intrappolati nello strato convettivo a causa dell'incapacità delle correnti termiche di penetrare la sovrastante atmosfera libera. Questo si verifica perché al limite superiore dello strato convettivo si ha un'**inversione** di temperatura (si veda più avanti),

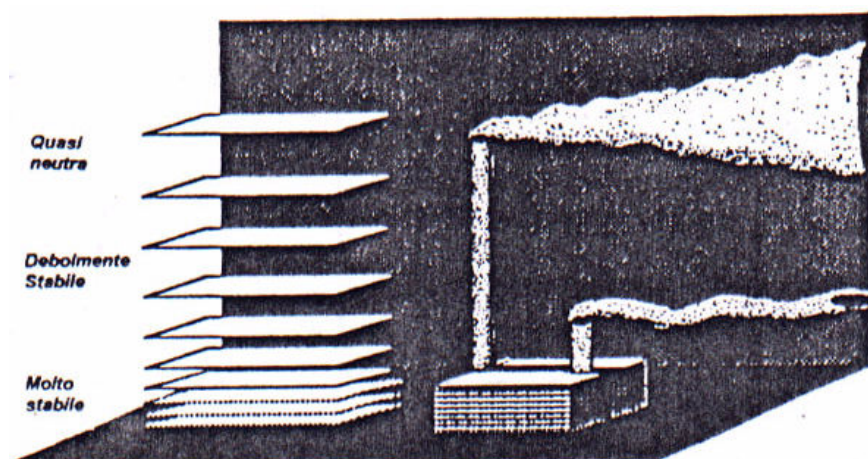


la quale sopprime quasi del tutto la turbolenza delimitando il passaggio all'atmosfera libera.

## LO STRATO RESIDUALE

Circa mezz'ora prima del tramonto le correnti convettive diminuiscono d'intensità e quindi la turbolenza comincia a decadere: lo strato convettivo si trasforma nello strato residuo. Si genera così uno strato dove, a parte la variazione della struttura della turbolenza e la modificazione del gradiente verticale della temperatura, che passa dalla precedente condizione di stratificazione instabile a quella neutra, l'andamento delle rimanenti variabili atmosferiche non subisce variazioni di rilievo rispetto a quello che presentavano nello strato convettivo precedente la formazione dello strato residuale.

Essendo lo strato residuale caratterizzato da stratificazione neutra, con un gradiente termico adiabatico l'unico meccanismo che genera la turbolenza è quello meccanico, con caratteristiche praticamente uguali in tutte le direzioni (isotropia). Come risultato, la dispersione di inquinanti immessi è la stessa sia verticalmente che lateralmente, tendendo a diffondersi simmetricamente attorno al proprio asse (determinato dal trasporto, cioè dal vento medio) originando così un pennacchio dalla tipica forma conica (*coning*). Il profilo verticale della velocità del vento parte dal suolo con intensità nulla, ed aumenta notevolmente con l'altezza. Tutto questo determina, in seno alla massa d'aria, moti organizzati e regolari (piccoli vortici) e, come conseguenza di questo tipo di moto, il pennacchio uscente dal camino si mantiene piuttosto compatto e raggiunge il suolo ad una distanza maggiore del caso convettivo; inoltre lo "sbandieramento" (cioè repentino cambiamento di direzione) dell'effluente è notevolmente ridotto.



*Figura: durante la notte, la stabilità statica decresce con la quota; rappresentazione schematica del comportamento dei pennacchi (Stull, 1988).*

## **LO STRATO STABILE**

Con il tramonto del sole e l'avanzare della notte, la porzione inferiore dell'atmosfera viene trasformata in uno strato stabile a causa del raffreddamento della superficie terrestre, che cede calore all'atmosfera per irraggiamento. Si forma così lo Strato Stabile caratterizzato da una inversione di temperatura con base al suolo. Infatti lo strato limite stabile è a diretto contatto con il terreno. La sua formazione inizia già poco prima del tramonto e, con il progredire della notte, la sua profondità aumenta dal suolo verso l'alto, a spese dello strato residuale sovrastante, man mano che il processo di raffreddamento dello strato d'aria a più diretto contatto con il terreno progredisce.

In queste condizioni si genera perciò uno strato d'inversione al suolo ed i moti verticali dell'aria tendono ad essere soppressi, poiché ogni eventuale moto iniziale di particelle d'aria viene attenuato, sia verso l'alto sia verso il basso. Nel moto verso l'alto a causa dell'espansione adiabatica la particella viene a trovarsi ad una temperatura minore dell'aria a quella quota, mentre in un moto diretto verso il basso viene a trovarsi ad una temperatura superiore e quindi, in entrambi i casi, la particella tende a ritornare alla sua posizione iniziale.

Nello studio della dinamica atmosferica degli inquinanti il fenomeno delle inversioni termiche nei bassi strati atmosferici acquista una particolare importanza. Questo perché gli strati di inversione possono diventare un ostacolo alla diluizione degli agenti inquinanti.

Con il termine di **inversione termica** si indica quel fenomeno che si riscontra nell'atmosfera caratterizzata da un aumento anziché una diminuzione della temperatura al crescere dell'altezza. Nella pratica, poi, il termine inversione è usato per indicare proprio uno strato, di piccolo spessore, molto stabile. Ovviamente è molto raro che uno strato molto spesso possa avere lo stesso tipo di gradiente per tutta la sua estensione verticale; ciò che determina le proprietà più importanti dello strato stabile è la posizione e l'intensità degli strati più stabili, ma sottili, che si trovano in esso.

Per quanto riguarda la dispersione degli inquinanti emessi nello strato stabile, bisogna notare che la loro diffusione orizzontale è molto più rapida e ampia di quella verticale,

perché le capacità dispersive dell'atmosfera, come già detto, sono scarse e predominano effetti cosiddetti di trasporto, cioè dovuti alle variazioni orizzontali della direzione del vento medio. Questo comportamento è chiamato *'fanning'* perché l'effluente risulta distribuito 'a ventaglio'. La dispersione orizzontale, comunque, può variare notevolmente dalla forma a 'nastro' che si conserva per lunghe distanze, se l'effluente si diluisce in un campo dinamico stazionario, a quella del tipo decisamente a 'bandiera', se la direzione del vento è molto variabile. Questo comportamento degli inquinanti dà luogo alla fine a una struttura chiamata *'layer-cake'*. Cioè gli inquinanti presenti in atmosfera (persino senza una diretta emissione da una sorgente notturna) si diffondono orizzontalmente in sottili sottostrati, e il forte *shear* del vento con le continue variazioni di direzione determinano un'ampia distribuzione di concentrazioni d'inquinanti diverse ad altezze diverse (figura). Questa struttura di stratificazione verticale a *'layer-cake'* caratterizza non solo le concentrazioni di inquinanti, ma anche le grandezze meteorologiche temperatura, umidità e turbolenza.

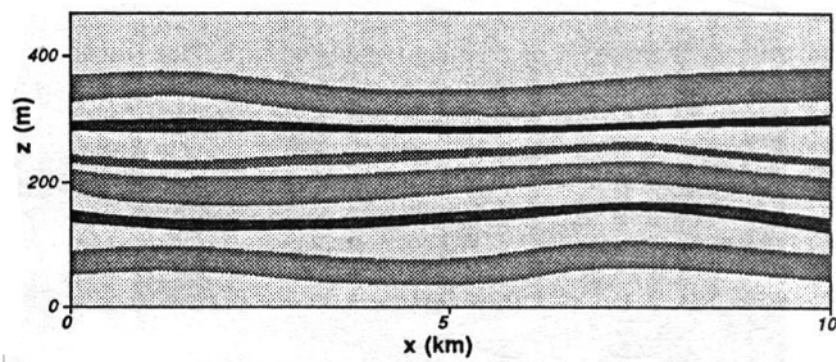


Figura: struttura a *'layer-cake'* di aerosol diffusi in atmosfera (da Stull, 1988).

Nella situazione di atmosfera stabile dunque (come già nel caso di stratificazione neutra) si è visto che gli effluenti, soprattutto se emessi alla sommità dello strato oppure direttamente nello strato residuale, a causa della scarsa intensità della turbolenza, si diffondono difficilmente verso il suolo: così essi possono essere trasportati, durante la notte, anche a centinaia di chilometri dalla sorgente.

Nello strato residuale i pennacchi di fumo si possono diffondere verso il basso finché non incontrano la sommità dello strato stabile a far loro da sbarramento: questa configurazione è detta *lofting*, perché l'effluente scorre lungo la parte superiore dello strato di inversione senza abbattersi al suolo, appunto perché incontra uno strato d'aria a forte stabilità che fa da scudo al suolo sottostante. Le condizioni di *lofting* si verificano più

frequentemente nelle ore prossime al tramonto del sole e la loro durata è ovviamente funzione dell'altezza della sorgente rispetto al suolo e dall'intensità dello strato di inversione.

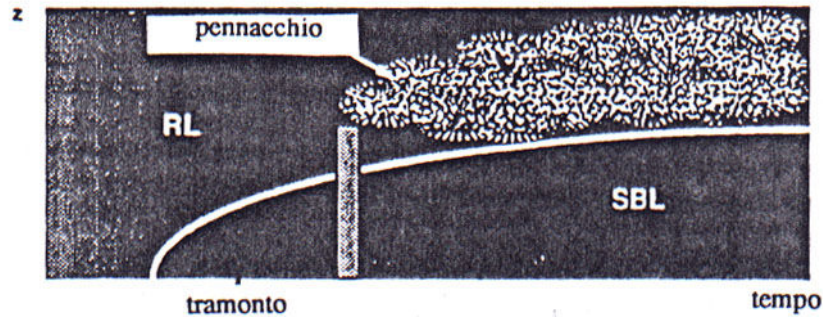


Figura: Rappresentazione schematica del lofting; da Stull, 1988.

Dopo l'alba, inizia a svilupparsi lo strato convettivo che erode via via lo strato stabile; quando la sua sommità raggiunge la quota alla quale la discesa degli effluenti, durante la notte, era stata bloccata dall'inversione, ha luogo l'*entrainment* degli inquinanti nello strato convettivo e la loro rapida diffusione verso il terreno. Questo processo è detto fumigazione (*fumigation*). La fumigazione può essere un processo critico dal punto di vista ambientale perché, in condizioni particolarmente sfavorevoli, può produrre concentrazioni al suolo molto rilevanti.

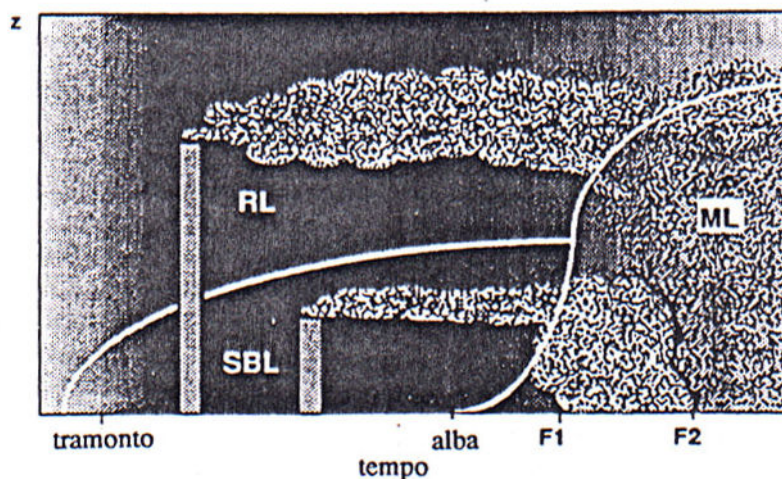
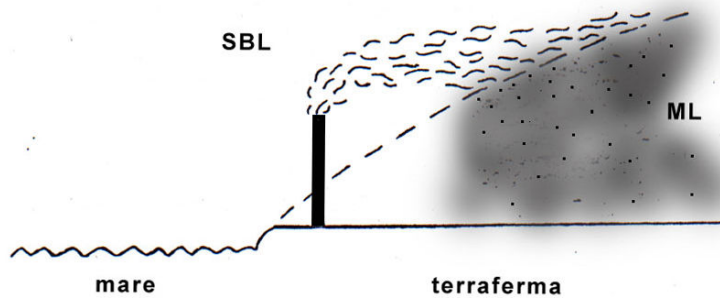


Figura: Rappresentazione schematica della fumigation; da Stull, 1988.

Queste condizioni di dispersione si possono sviluppare anche in presenza di brezze di mare nella tarda mattinata, o nel primo pomeriggio dei mesi caldi. Si veda la figura: in



prossimità delle coste, il vento soffia dal mare verso la terraferma (brezza di mare). Un camino, sufficientemente elevato e vicino alla costa, immette gli effluenti nello strato stabile (o neutro) che si trova al di sopra del mare; tali effluenti sono quindi trasportati dal vento verso l'entroterra dove incontrano la sommità dello strato convettivo più basso (che si sviluppa supportato dalla terraferma) e a questo punto inizia il processo di *entrainment* degli inquinanti e di diffusione verso il suolo.



*Figura: Rappresentazione schematica della discesa al suolo degli inquinanti in uno strato stabile in prossimità delle coste.*

## 10. PIOGGE ACIDE, PRECIPITAZIONI E CROSTE

Gli inquinanti presenti in atmosfera possono depositarsi per processi secchi o processi umidi. Le precipitazioni intense dilavano gli inquinanti presenti per deposizione secca.

Negli ultimi decenni l'acqua piovana ha raggiunto allarmanti livelli di acidità.

Le pietre dei monumenti siti in climi umidi, dopo il tramonto, si raffreddano più rapidamente dell'aria, per cui si verifica un flusso di calore e di aria inquinata, umida e calda verso la loro superficie esposta che, fungendo da parete fredda, inizia a condensare acqua. In queste condizioni, quando arrivano sullo strato liquido l' $\text{SO}_2$  e il particolato ricco di catalizzatori utili per la sua ossidazione, si ha la formazione di acido solforico il quale reagisce immediatamente con il carbonato di calcio presente nel marmo e nelle rocce calcaree per dare gesso. Con l'irraggiamento solare la soluzione salina così formata evapora, il gesso cristallizza e fa presa bloccando anche il particolato solido depositato sulla superficie e dando così luogo alla formazione di una crosta nera

La formazione di croste è legato alla presenza di acqua il cui maggior contributo è dovuto alla pioggia che è generalmente maggiore dell'assorbimento locale dalla nebbia e della condensazione. Questi processi coinvolgono una quantità di acqua minore di un millimetro al giorno che è un valore molto piccolo paragonato alle precipitazioni le quali possono portare diversi cm per giorno. Comunque è possibile un'azione indiretta delle goccioline accumulate durante alcune ore e raccolte alla base di superfici verticali.

Il problema ha molti aspetti e rimuovere le principali cause apparenti non necessariamente implica che siano eliminati gli effetti negativi. In passato c'era unanime consenso che l' $\text{SO}_2$  fosse il principale responsabile della solfatazione (con questo termine si indica la formazione di gesso a partire dal carbonato di calcio ad opera dell'acido solforico) e degrado delle pietre, cosicché, anche per questa ragione furono fatti numerosi sforzi per ridurre le emissioni di questo inquinante. Uno dei principali rimedi fu il passaggio dei combustibili da olio e carbone a metano. La concentrazione di  $\text{SO}_2$  diminuì e aumentò quella di  $\text{NO}_x$  e  $\text{O}_3$  ma ciò non portò ad evidenti benefici allo stato dei monumenti ed è troppo presto per fare un bilancio definitivo tra i vantaggi e gli svantaggi. Il potenziale di ossidazione è aumentato e così pure lo smog foto-chimico. Gli

ossidi di azoto depositati in maniera più abbondante sono solubili a livelli di umidità normale. Le reazioni chimiche che si sviluppano in presenza di acqua si verificano con maggior frequenza e per più lungo tempo in presenza di questi forti ossidanti.

Questo esempio mostra la complessità del problema del degrado dei monumenti associato all'inquinamento atmosferico e come ogni cambiamento nelle strategie emissive può portare a conseguenze inaspettate.

La formazione di croste su monumenti di marmo o di calcare compatto non è solo determinata dalla quantità di inquinanti depositata in accordo con le condizioni micrometeorologiche prevalenti vicino ai monumenti, ma è anche determinata dalla geometria delle superfici e dall'esposizione alla pioggia. Monumenti di forma simile inducono analoghe distribuzioni di croste.

Si trovano croste bianche o nere a seconda che la pioggia dilavi la superficie o la bagni semplicemente. Nel primo caso si verifica dissoluzione e erosione e le rocce calcaree formano aree bianche; esse sono caratterizzate da cristalli di calcite e dolomite riprecipitati che si formano quando l'acqua che contiene le pietre disciolte evapora. Quando la pietra è bagnata ma non dilavata si originano croste di gesso nere con incluse particelle di carbonato che sembrano giocare un importante ruolo in questo processo.

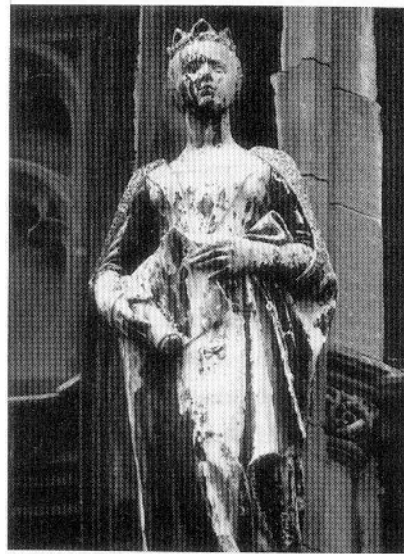
Osservazioni in campo hanno mostrato che in zone esposte alla pioggia i cristalli di gesso si trovano solo raramente mentre è più comune uno strato sottile di calcite di spato e cristalli di dolomite dovuto a riprecipitazione. D'altra parte la massima quantità di gesso si trova dove non si ha dilavamento della pioggia, cioè nelle croste nere.

L'ipotesi delle piogge acide non è sufficiente da sola a spiegare i principali problemi che affliggono i monumenti di marmo. Talora essi costituiscono solamente un problema estetico, altre volte essi sono pericolosi perché costituiscono un deposito di inquinamento che interagisce con i sottostanti strati di pietra in presenza di acqua. Le croste di gesso dovute semplicemente a solfatazione da piogge acide sono bianche e non nere.

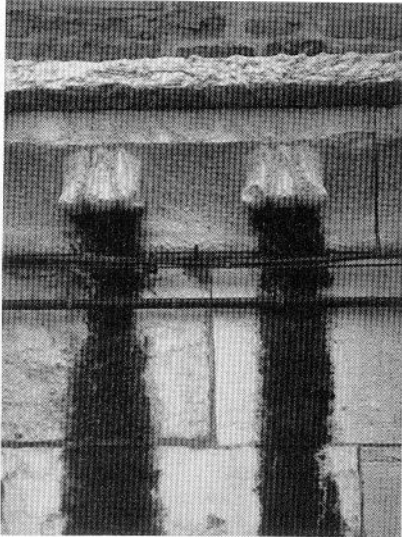
Esempi di croste nere dovute all'inquinamento e all'acqua piovana:



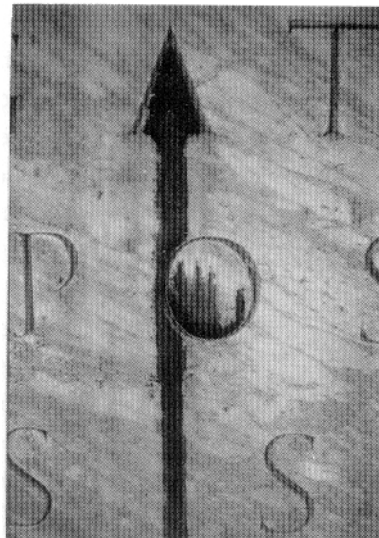
sul marmo



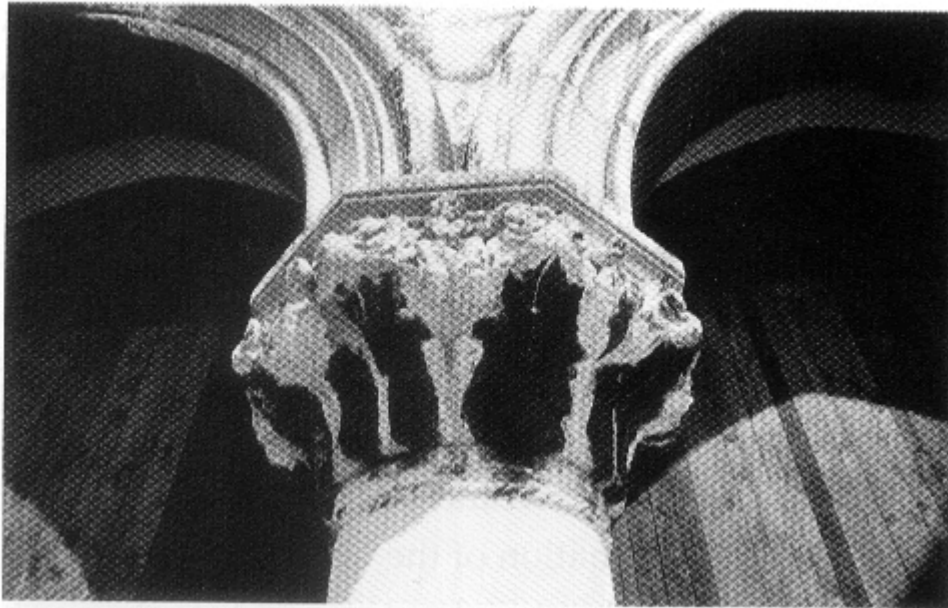
sul bronzo,



sulla pietra calcarea,



sul marmo



*Croste nere originate da depositi di fuliggine. Le parti dove scorre l'acqua sono bianche, le parti bagnate ma non dilavate sono nere (Palazzo Ducale, Venezia, da Camuffo).*



Macchie nere di origine biologica si trovano in posizioni frequentemente bagnate dove la formazione di croste di gesso e fuliggine è impossibile a causa del frequente dilavamento e aree bianche si trovano in zone asciutte non dilavate dove si aspetterebbero croste nere in caso di elevato inquinamento (Ravello, da Camuffo)

## BIBLIOGRAFIA

Halliday, Resnick, Walker: FONDAMENTI DI FISICA, Meccanica e Termologia, Casa Editrice

Ambrosiana

Camuffo D.: MICROCLIMATE FOR CULTURAL HERITAGE, Elsevier

Bernardi A.: CONSERVARE OPERE D'ARTE, Il microclima negli ambienti museali,

Ed. Il prato

Stull R.B. AN INTRODUCTION TO BOUNDARY LAYER METEOROLOGY, Kluwer

Academic Publishers