



# *Microclimatologia per i beni culturali*

---

Enrico Ferrero

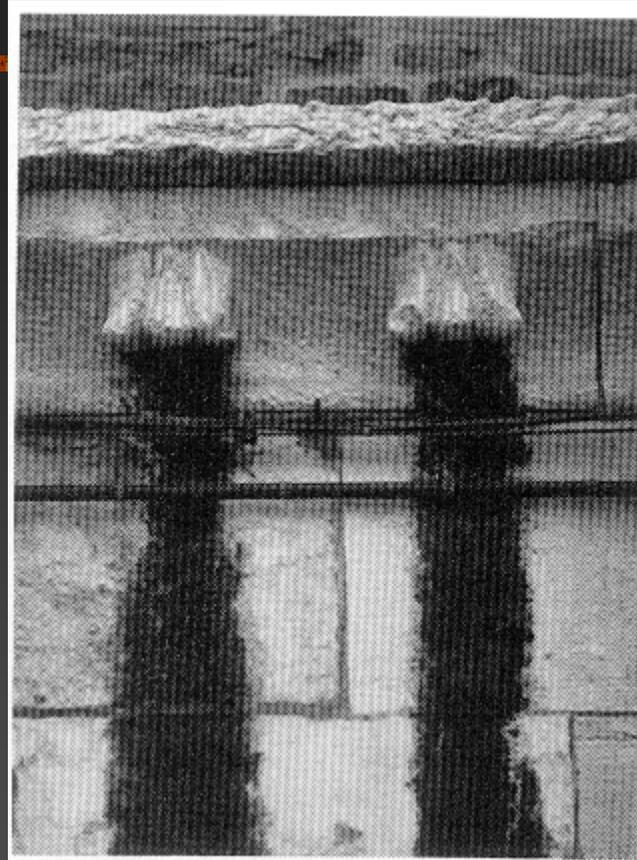
**CROSTE NERE DOVUTE ALL'INQUINAMENTO E ALL'ACQUA PIOVANA**



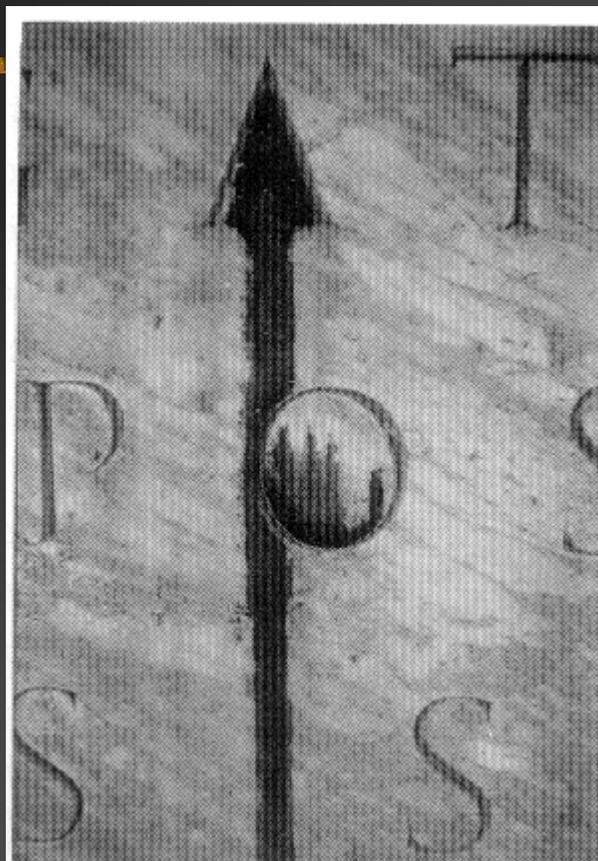
**SUL MARMO**



**SUL BRONZO**



**SULLA PIETRA CALCAREA**



**SUL MARMO**

## **DEFINIZIONE DI MICROCLIMA**

**CLIMA DI UNA CERTA AREA: IL PREFISSO INDICA LA DIMENSIONE  
DELL'AREA**

**ESEMPI: MACRO, MESO, MICRO.....**

**DEFINIZIONE METEOROLOGICA (CONCETTO DI SCALA):**

**Globale, Locale, etc.**

**'MICRO' SI RIFERISCE ALL'AREA DOVE E' 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:**

***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 ALLO STUDIO DEL MICROCLIMA 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**

# PRINCIPALI FATTORI DI DEGRADO

---

TEMPERATURA E SUE VARIAZIONI

UMIDITA' E SUE VARIAZIONI

DEPOSIZIONE DEL PARTICOLATO

RADIAZIONE

---

# TEMPERATURA E SUE VARIAZIONI

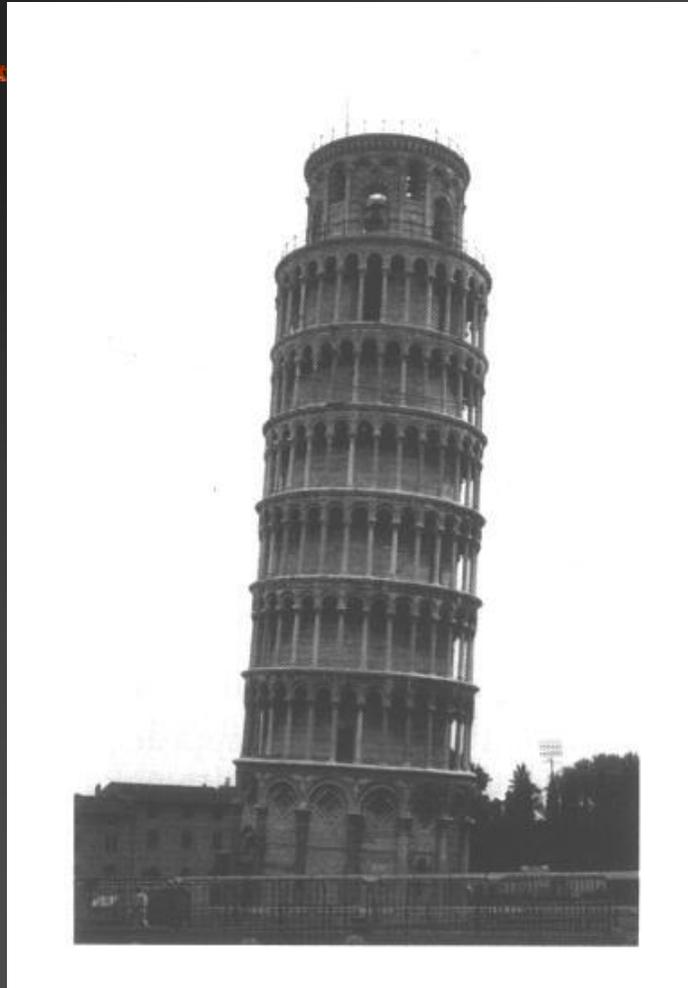
**LE VARIAZIONI DI TEMPERATURA INDUCONO DIFFERENTI ESPANSIONI NEI MATERIALI E SFORZI DI TENSIONE TRA LE SUPERFICI E LE STRUTTURE SOTTOSTANTI.**

**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.***

**I MECCANISMI DI ESPANSIONE POSSONO AVERE UN RUOLO IMPORTANTE NELLA STABILITÀ DELLE STRUTTURE**



**DISGREGAZIONE GRANULARE: STRESS GENERATO DALLA DIVERSA DEFORMAZIONE DEI GRANULI O DEI GRANDI CRISTALLI (MARMO E GRANITO)**



**DISGREGAZIONE GRANULARE DEL MARMO DELLA COLONNA AURELIANA**

# LA TEMPERATURA NEGLI EDIFICI

LE FORZANTI ESTERNE DIPENDONO DALL'ARCHITETTURA DELL'EDIFICIO E DALLA SCELTA DEI MATERIALI:

- Q SPESSORE E CONDUTTIVITÀ DELLE PARETI
- Q FINESTRE (EFFETTO SERRA, SCAMBI DI ARIA)
- Q DIFFERENTI ESPOSIZIONI (PIANO TERRA E ULTIMO PIANO)

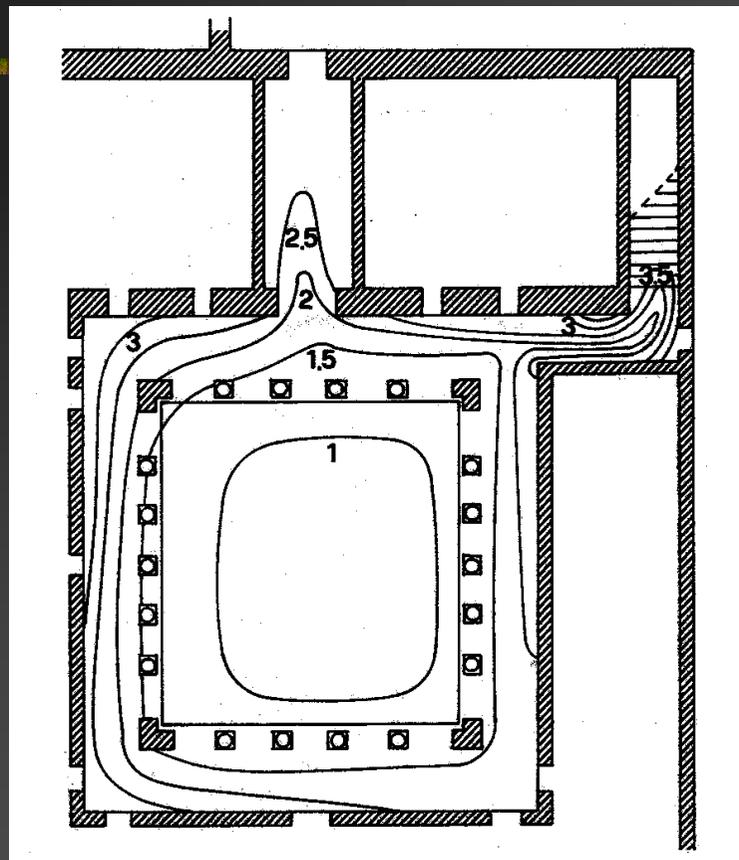
LA TEMPERATURA ALL'INTERNO DI UNA STANZA È DETERMINATA DAGLI SCAMBI DI CALORE CON TUTTE LE POSSIBILI SORGENTI O POZZI DI CALORE E DALL'AVVEZIONE DI NUOVA ARIA DA PORTE O FINESTRE.

**IN UN AMBIENTE CHIUSO L'ARIA SI DISTRIBUISCE SECONDO LA PROPRIA DENSITÀ  
(ARIA PIÙ CALDA E PIÙ LEGGERA IN ALTO E ARIA FREDDA PIÙ PESANTE IN BASSO)  
CREANDO DEI MOTI VERTICALI FORMANDO UN *STRATIFICAZIONE STABILE***

**IL NORMALE EQUILIBRIO PUÒ ESSERE MUTATO COMPLETAMENTE DALL'IMPIANTO DI  
RISCALDAMENTO E/O DI CONDIZIONAMENTO E DALLA PRESENZA DI PERSONE.**

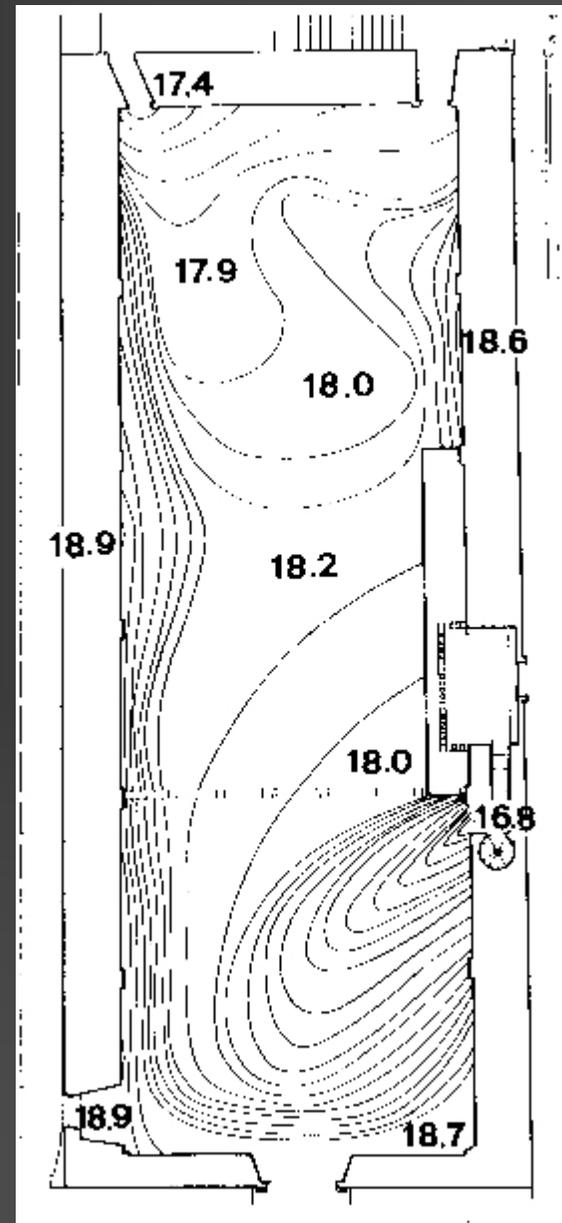
**I NORMALI IMPIANTI HANNO UN SOLO PUNTO DI CONTROLLO (TERMOSTATO) MA,  
ESSENDO L'ARIA MOBILE E CON UN BASSO CALORE SPECIFICO QUESTO PUÒ NON  
ESSERE SUFFICIENTE.**

# IL MICROCLIMA DEL PALAZZO DUCALE DI URBINO



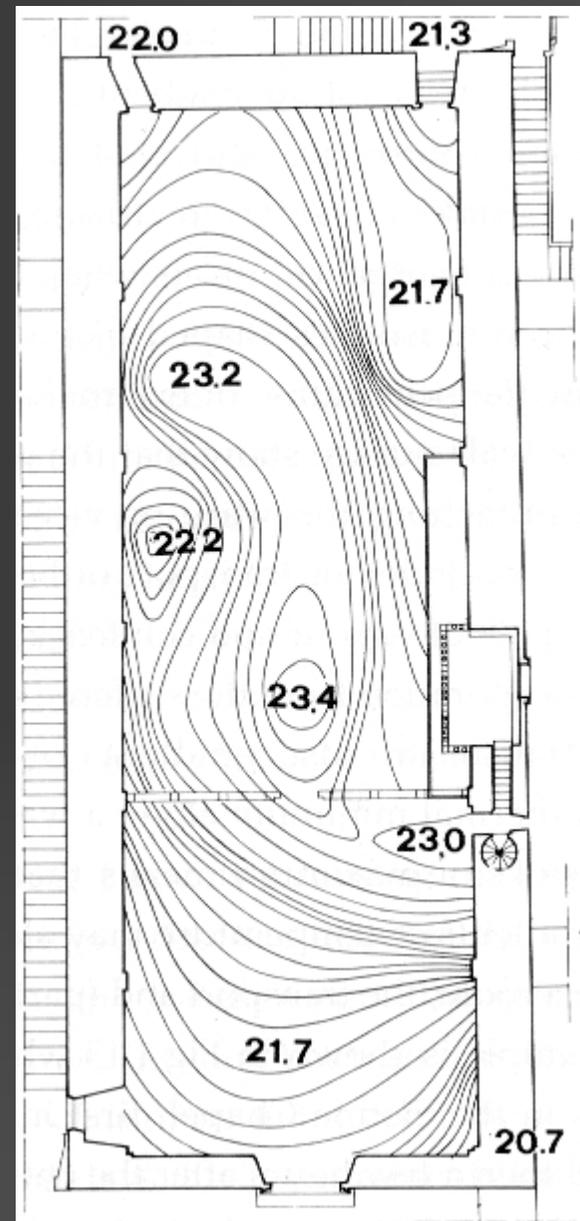
## Cappella Sistina

**DISTRIBUZIONE  
DI TEMPERATURA  
DURANTE  
L'APERTURA PER  
PULIZIE**



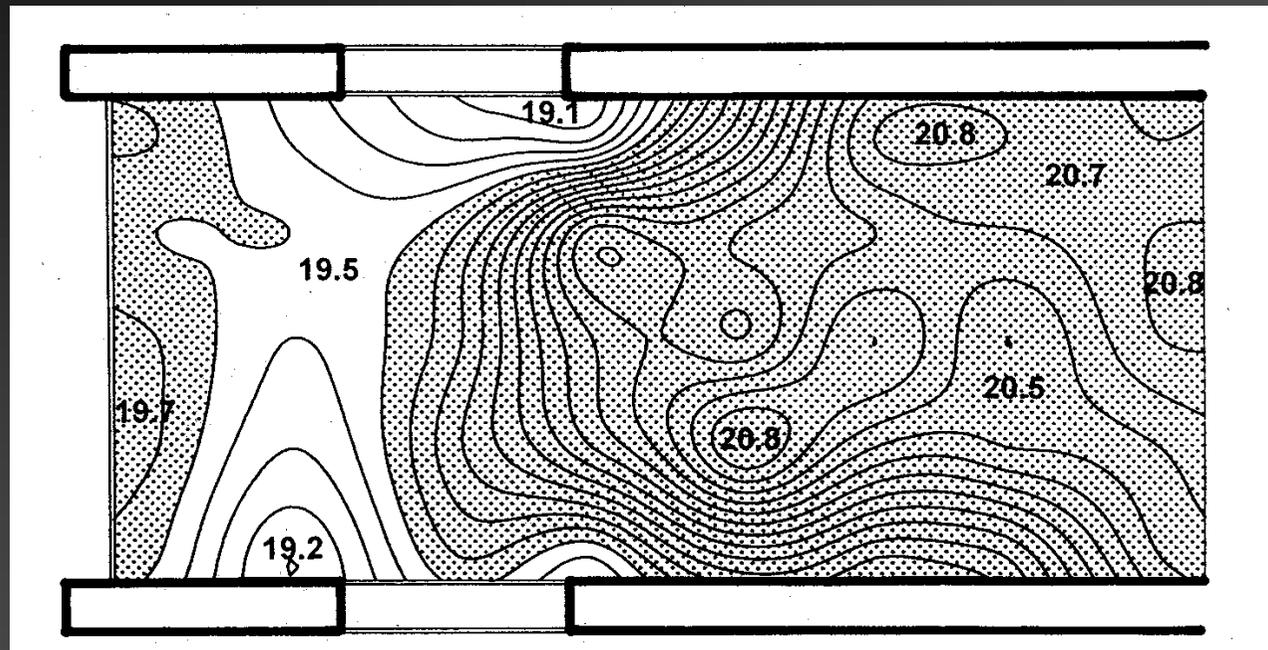
## Cappella Sistina

**DISTRIBUZIONE  
DI TEMPERATURA  
DURANTE  
L'ORARIO DI  
VISITA**



ESEMPIO DI UN EDIFICIO MODERNO:

SAINSBURY CENTRE FOR VISUAL ART, NORWICH (UK)



DISTRIBUZIONE DI TEMPERATURA

**LA TEMPERATURA È UN FATTORE FONDAMENTALE NEL  
DETERMINARE L'HABITAT PER LA VITA BIOLOGICA E NEL  
CONTROLLO DEL METABOLISMO**

**20°-35° C FAVORISCE L'ATTIVITÀ MICROBIOLOGICA  
T < 20° C RIDUCE IL METABOLISMO**

**LA DEPOSIZIONE DI BIOFILM SULLE OPERE D'ARTE HANNO DIVERSE  
CONSEGUENZE NEGATIVE:**

- **AUMENTANO LA DEPOSIZIONE DI INQUINANTI**
- **MODIFICANO L'ALBEDO, LA POROSITÀ, LA CONDUTTIVITÀ TERMICA E IL BILANCIO ENERGETICO**
- **MA POSSONO ANCHE AVERE UNA FUNZIONE PROTETTIVA.**

**VENEZIA:  
PATINA VERDE  
TIPICA DELLA  
COLONIZZAZIONE  
DA ALGHE  
SULLE SUPERFICI  
UMIDE**



# UMIDITA' E SUE VARIAZIONI

LA PRESENZA DI ACQUA ALLA STATO LIQUIDO FAVORISCE LE REAZIONI CHIMICHE: PER ESEMPIO LA TRASFORMAZIONE DEL MARMO 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.

**LA CORROSIONE È IL RISULTATO DISTRUTTIVO DI REAZIONI CHIMICHE TRA I METALLI E L'AMBIENTE.**

**PER IL VETRO LE SOLUZIONI CHIMICHE POSSONO PROVOCARE TRASFORMAZIONI CHIMICHE 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, 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.**

## VARIAZIONI DI UMIDITÀ RELATIVA A 1 E 3 M GENERATE DAL SISTEMA DI RISCALDAMENTO E DALL'UMIDIFICATORE COMPENSATORE

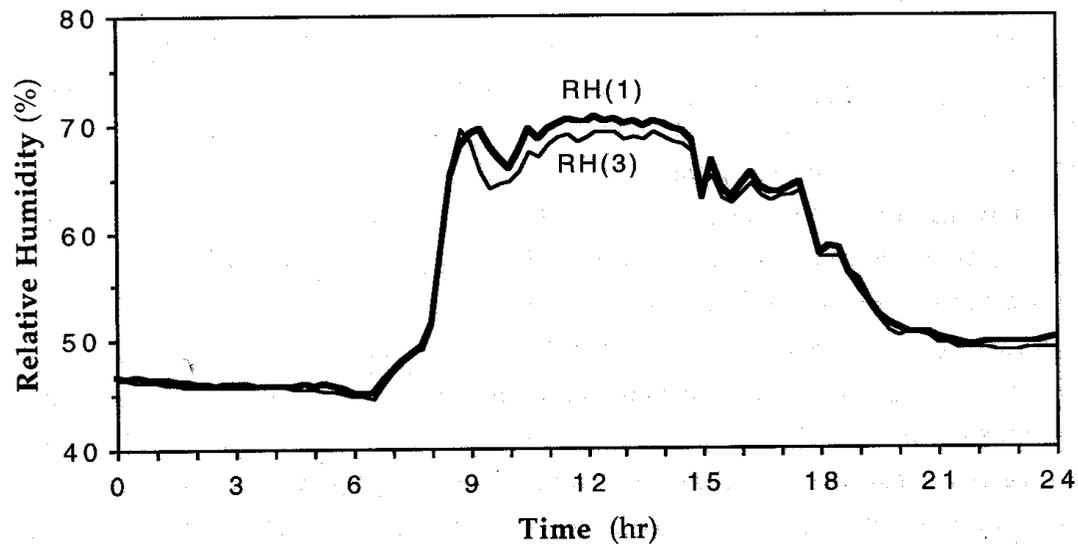
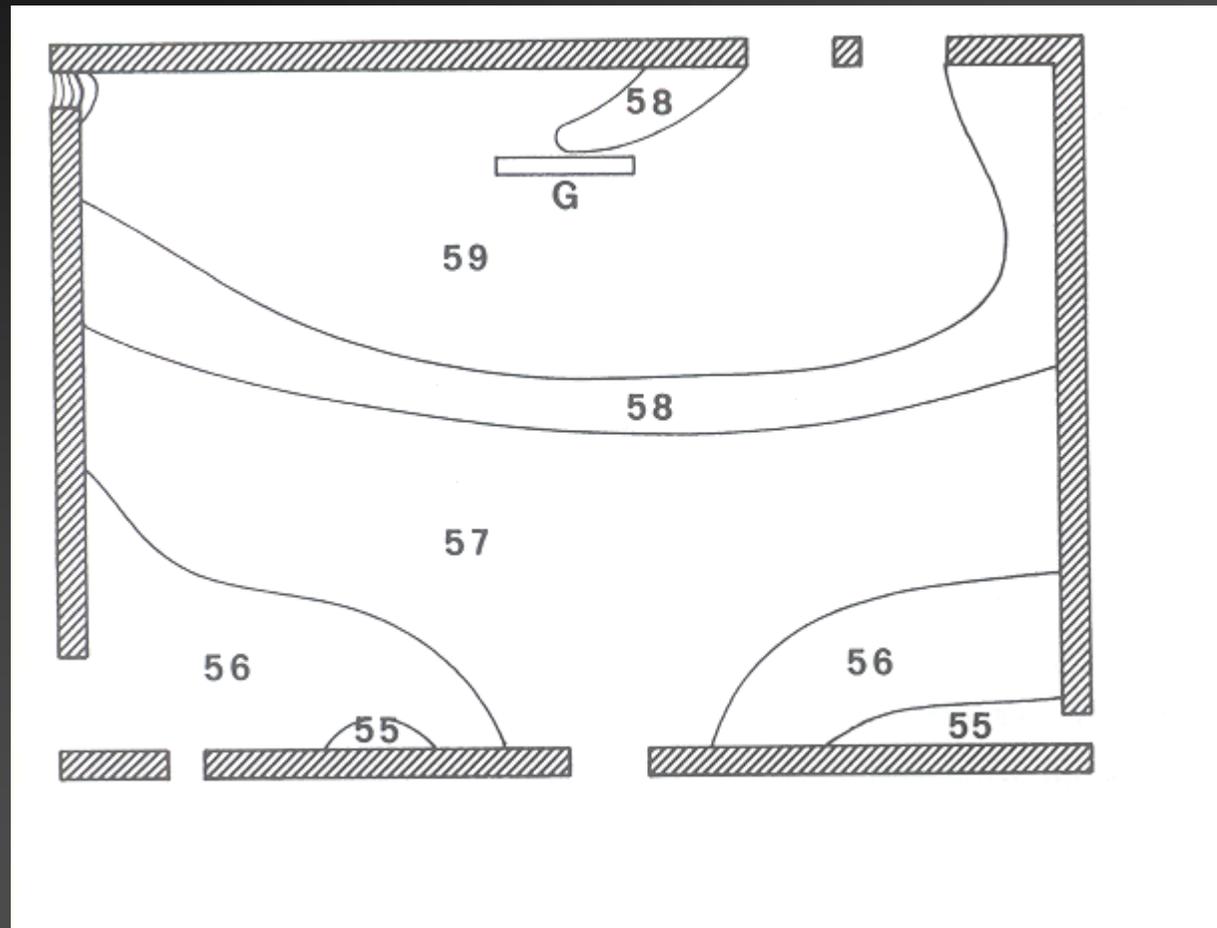


Fig.2.12 Change in relative humidity at 1 and 3 m above the floor, i.e. RH(1) and RH(3), when the heating system and the compensating humidifiers are operating during the visiting time (for the temperature change see Fig. 1.13a). The humidifiers are too much powerful and, instead of mitigating the dry air, the net result is a moistening. The Pollaiolo room, Uffizi Gallery, Florence, 18 February 1997.

## UMIDITÀ RELATIVA NELLA SALA DI GIOTTO, GALLERIA DEGLI UFFIZI

NELLA STAGIONE CALDA L'ARIA FREDDA RILASCIATA DAL SOFFITTO GENERA UNA ZONA PERTURBATA



## FLUTTUAZIONI DI UMIDITÀ RELATIVA GENERATE DAL SISTEMA DI CONTROLLO

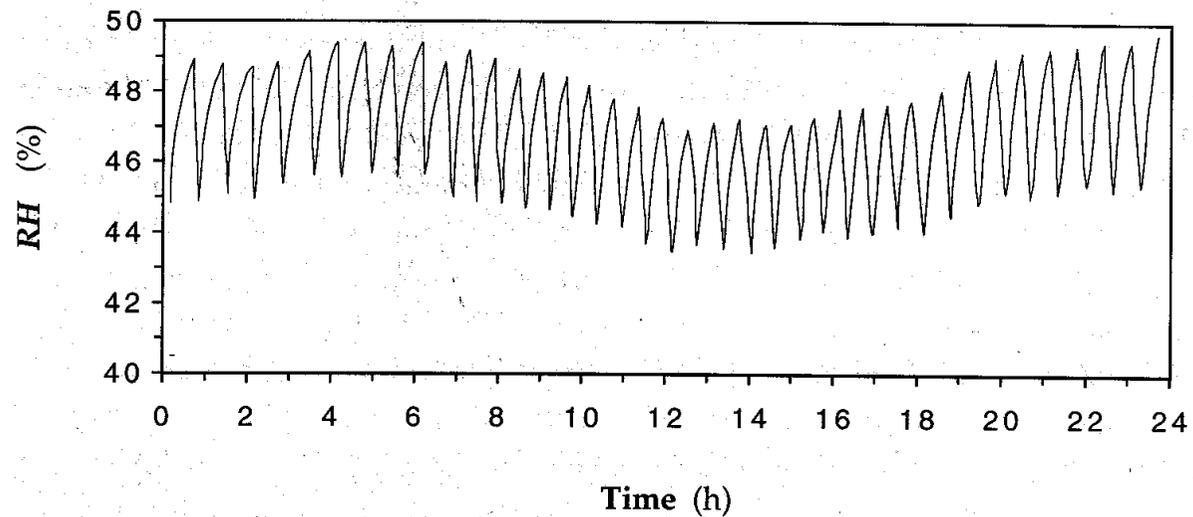


Fig.2.15. Fluctuations in relative humidity (*RH*) generated by a sophisticated controlling system, which controls this variable within two stated limits, i.e. the span  $45 \leq RH \leq 50\%$ . (Private Gallery of Modern Paintings, Parma, February 1996).

# DEPOSIZIONE DEL PARTICOLATO

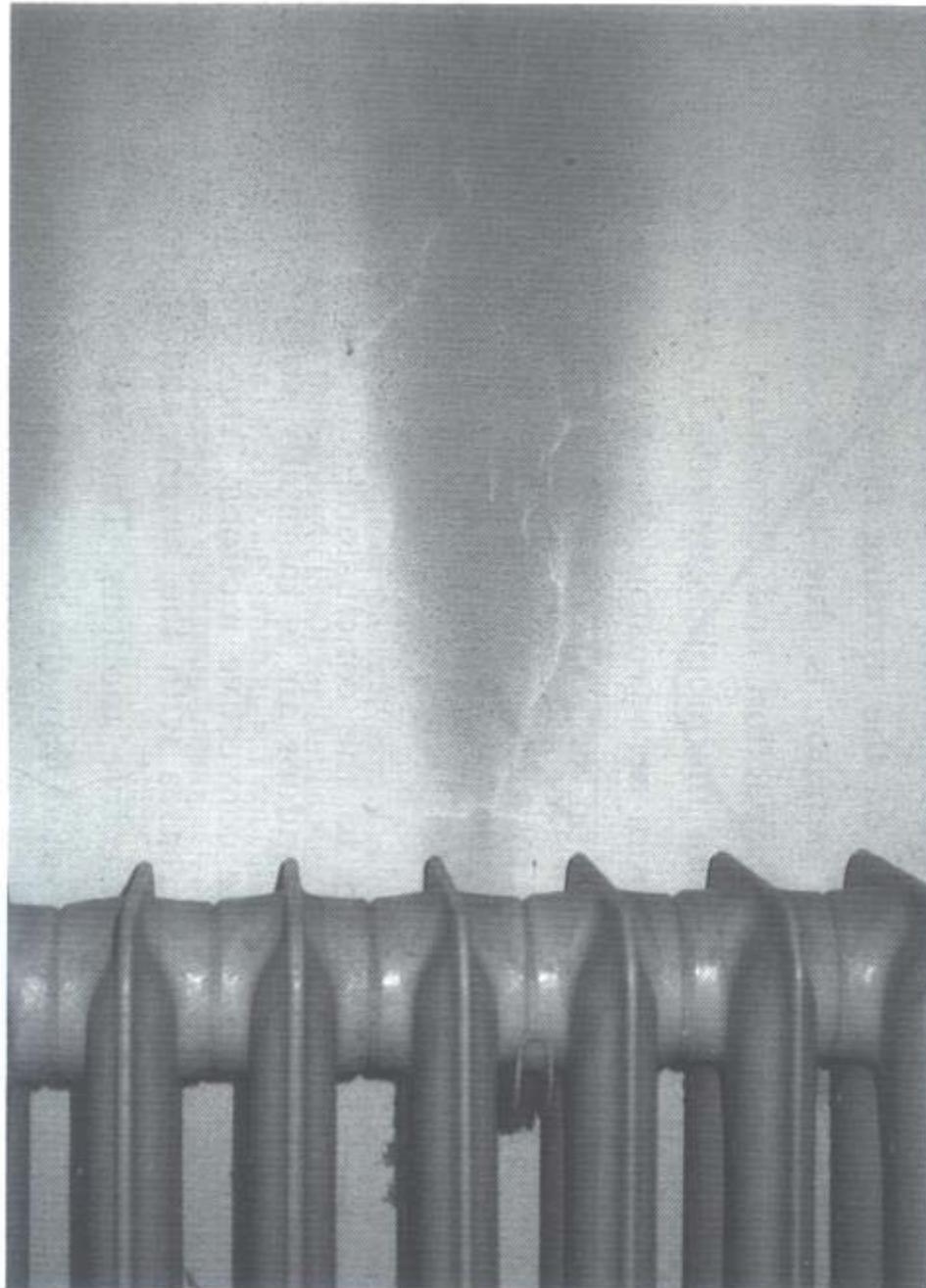
DIPENDE DA NUMEROSI FATTORI CHE AGISCONO CON UNA DIVERSA EFFICIENZA A SECONDA DELLE DIMENSIONI DEL PARTICOLATO

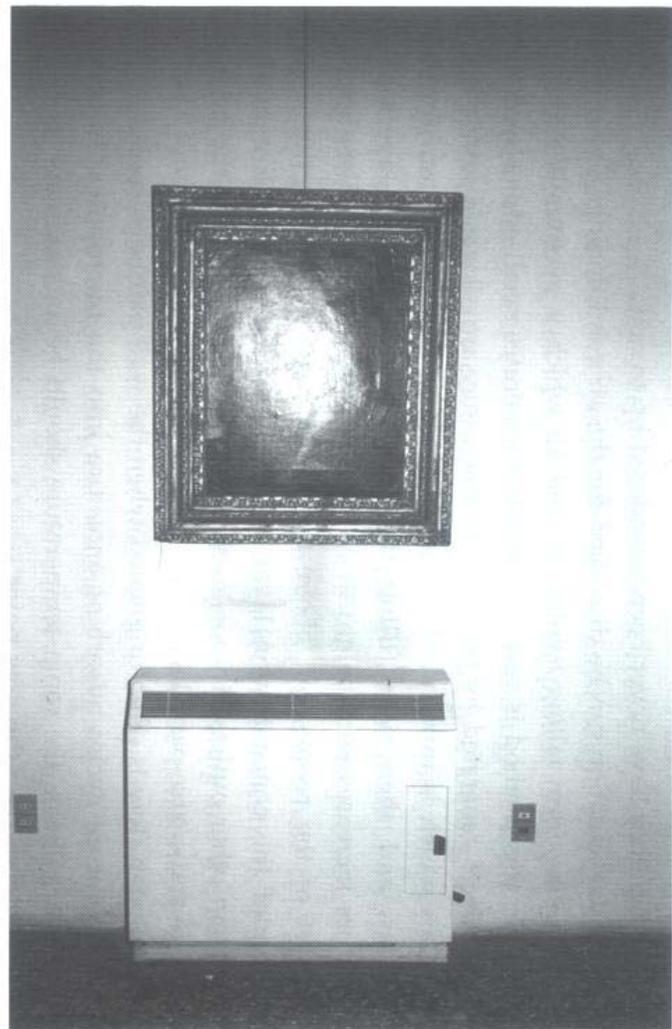
LA PROBABILITÀ DI DEPOSIZIONE VARIA CON LE DIMENSIONI E CON LO STATO MICROFISICO DELL'ARIA VICINO ALLA SUPERFICIE.

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, DALLA TURBOLENZA, DALLE CARATTERISTICHE DELLA SUPERFICIE





# RADIAZIONE

LA LUCE PUÒ CAUSARE DEGRADAZIONE TRAMITE DIVERSI MECCANISMI:

- Q FOTOOSSIDAZIONE DI INQUINANTI GASSOSI CHE FORMANO UN AMBIENTE DANNOSO
- Q FOTOSINTESI CLOROFILLIANA CHE CAUSA LO SVILUPPO DI 'ALGHE' E ALTRI TIPI DI VEGETAZIONE
- Q DANNO DIRETTO

LA GRAVITÀ DEI DANNI DIRETTI DIPENDONO DA DIVERSI FATTORI:

- Q ENERGIA DEI FOTONI
- Q NUMERO TOTALE DEI FOTONI INCIDENTI
- Q 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 CAPPELLA DEGLI SCROVEGNI



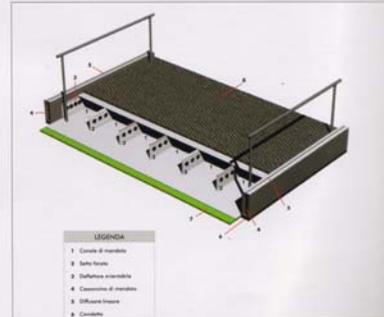
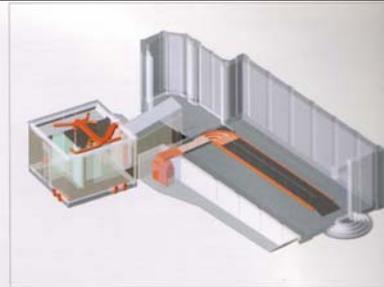
Dopo il restauro

Gli impianti tecnologici della Cappella e del Corpo Tecnologico Attrezzato



Pianta della Cappella e del CTA Il Corpo Tecnologico Attrezzato (CTA)

Il sistema di distribuzione ed estrazione dell'aria del CTA. Spaccato assonometrico della pedana di distribuzione dell'aria





FINE

