

tribution of a Thermal  
place and Fourier  
of. on Inverse Probl.

Thermal NDT of  
cessing.-*NDT & E*,

of Thermal NDT.-  
A, pp.178-182.  
rinetti: "Informative  
signal processing for  
ATO ASI, Series E:  
193-207, 1994.  
ng of Orientation in  
Eurotherm Seminar

with phase sensitive  
pp. 3962-3965.  
hy. J. Appl. Phys.,

Thermal NDT" Infrared  
ances in *NDT*, ed.  
., , cap.4 1994.23  
etti S., Bressan C.  
g "Termo.Heat" and  
IRT-94", Eurotherm  
s.  
88 Michigan USA.  
en, E. Rosina, G.  
ella Ragione, Milan,

**PnD**  
**Padova**  
**'97**

Conferenza Nazionale sulle  
**Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica**

9° CONGRESSO NAZIONALE dell'AIPnD

25 • 26 • 27 settembre 1997

### **LA QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA NEGLI AMBIENTI MUSEALI: CONSIDERAZIONI SU UN CASO CONCRETO**

Fantozzi F.\* - Scirpi F.\*\* - Toti L.\*\*

\* UNIVERSITÀ DI PISA, FACOLTÀ DI INGEGNERIA, DIP. ENERGETICA.

\*\* UNIVERSITÀ DI FIRENZE, FACOLTÀ DI ARCHITETTURA, DIP. P.M.P.E.

#### **Sommario**

Una corretta politica di conservazione del patrimonio esposto nei musei è uno dei compiti più importanti della nostra società, e non ci si può limitare a soli interventi di restauro, ma occorre attuare una decisa prevenzione, caratterizzata dall'esposizione degli oggetti d'arte in ambienti idonei.

Le radiazioni luminose, le condizioni termoisometriche e la qualità dell'aria a contatto con gli oggetti costituiscono le condizioni ambientali dei musei, spesso interagenti in complesse sinergie, il cui controllo è determinante ai fini della conservazione nel tempo dei beni culturali in essi contenuti.

Dopo aver preso in considerazione le diverse fonti di inquinamento interno nei musei, le tipologie di inquinanti più facilmente riscontrabili ed i loro conseguenti effetti sugli oggetti d'arte, si riportano i risultati di un'analisi sulla qualità dell'aria in alcuni musei fiorentini. La metodologia adottata per la misura dell'aggressività dell'aria interna si è basata sulla collocazione in alcuni ambienti del museo, per un tempo prestabilito di 90 giorni consecutivi, di alcuni test campione in rame e argento, dai quali può essere stimato il grado di inquinamento dell'aria, comprensivo degli effetti sinergici dei vari componenti presenti, attraverso l'analisi in laboratorio dello strato di corrosione prodottosi sugli elementi metallici durante la loro esposizione.

Oltre all'aria esterna, sono stati analizzati alcuni ambienti interni climatizzati nonché alcune vetrine espositive. Tale indagine si propone, quindi, lo studio di una metodologia non distruttiva che permetta di classificare un ambiente in funzione dell'aggressività dell'aria interna.

### 1. Gli agenti del degrado delle opere d'arte nei musei

Il sistema museale è costituito da una complessità di elementi in interazione, attribuibili all'ambiente e ai materiali costituenti gli oggetti esposti; e sono proprio queste interazioni che se non opportunamente controllate e limitate, sia nella durata che nell'intensità e frequenza, possono dare luogo a processi di natura irreversibile alla base dei fenomeni di degrado. Gli ambienti museali vanno quindi analizzati e monitorati al fine di valutare la loro idoneità alla conservazione degli oggetti in essi contenuti, soprattutto nei casi in cui il museo è il risultato del riutilizzo di spazi non sempre ottimali da questo punto di vista (chiese, conventi, ecc.).

In mancanza di informazioni sui parametri fisico-tecnici relativi agli ambienti museali (condizioni termoigrometriche, illuminotecniche e di qualità dell'aria interna) non è infatti possibile valutare l'esistenza di situazioni di rischio per la conservazione delle opere esposte, premessa indispensabile alla programmazione di eventuali interventi atti a riportare la situazione entro i limiti di soglia.

Ogni opera d'arte esposta ha esigenze conservative ottimali in funzione del materiale di cui è costituita, del luogo di provenienza, degli sforzi cui è soggetta, dell'iter di invecchiamento e delle condizioni ambientali cui è stata sottoposta nel tempo. Dunque l'attenzione si deve rivolgere al controllo dei parametri ambientali che influenzano il deterioramento degli oggetti collocati all'interno di contenitori espositivi e principalmente a:

- radiazioni elettromagnetiche provenienti dalla luce naturale ed artificiale;
- condizioni termoigrometriche sia dell'aria dell'ambiente che delle superfici ove sono collocate le opere, e loro variazioni nel tempo;
- qualità dell'aria interna (quantità di polveri e di gas inquinanti presenti).

Questi parametri presi singolarmente hanno effetti diversificati sugli oggetti esposti, principalmente in dipendenza della natura dei materiali costituenti l'opera d'arte. Non vanno però dimenticati i complessi sinergismi tra questi tre fattori che possono comportare fenomeni di degrado amplificati ed a volte imprevedibili.

Il deterioramento dovuto alle radiazioni luminose è proporzionale al *fattore di degrado*, al *livello d'illuminamento* e al *tempo di esposizione*, dove il "fattore di degrado" esprime il danno provocato su di un oggetto da una specifica sorgente luminosa per effetto delle radiazioni da essa emesse, in rapporto ad altri tipi di sorgenti, per un illuminamento ed un tempo di esposizione unitari. Maggiormente dannose sono le radiazioni UV che possono provocare lo scolorimento di molti materiali a seguito di effetti fotochimici, mentre le radiazioni IR possono portare un aumento della temperatura sulle superfici delle opere illuminate. La luce inoltre costituisce la fonte energetica di attivazione per una qualsiasi reazione chimica.

Per quanto riguarda le condizioni termoigrometriche, è noto che gli oggetti tendono sempre ad entrare in equilibrio con l'ambiente circostante, quindi, entro intervalli di temperatura ed umidità relativa accettabili, il rischio maggiore per la loro conservazione deriva dall'entità dei gradienti temporali di queste grandezze.

Inoltre la maggior parte degli oggetti contenuti nei musei, essendo formata da materiali igroscopici, è molto più sensibile alle variazioni di umidità che non a quelle di temperatura. Ad esempio nel legno si ha lo stesso valore di dilatazione per un aumento di umidità relativa del 4% (a temperatura costante) che per un aumento di temperatura di 10°C (ad umidità relativa costante).

Oltre a causare variazioni dimensionali (in maniera diretta al variare della quantità

d'acqua contenuta nei favoriti da temperature condizioni termoigrometriche di qualsiasi fenomeno alla trasformazione che

Pur essendo nota l'importanza termoigrometriche ed assoluti e delle loro variazioni effetti non sono attualmente

Ai fini di una corretta gestione delle grandezze, cui il museo con la sequenza di eventi, cioè presa in considerazione riguarda i parametri termici

### 2. Qualità dell'aria interna

Il controllo della qualità dell'aria espositiva è quindi indispensabile per la conservazione ed alla

Tabella 1

Origine esterna	- apparati - emissioni - traffico
Origine interna	- processi - fumo - prodotti - solventi - particelle - trafilati - NOx, CO - emissioni - impianti

#### Fonti di inquinamento

I gas inquinanti nell'aria degli edifici, secondo quanto in aree urbane, i tassi di inquinamento esterno, prodotto per il riscaldamento e dall'inquinamento

E' quindi evidente che l'inquinamento è dovuta all'introduzione di inquinanti per infiltrazioni naturali oppure

A ciò si affiancano tutte le

• l'afflusso di visitatori e le variazioni dei parametri ambientali

• la non adeguata ventilazione dell'aria, che può portare all'introduzione di inquinanti introdotti in ambiente di umidificazione;

• emissioni dei materiali

enti in interazione, costi; e sono proprio itate, sia nella durata li natura irreversibile o quindi analizzati e : degli oggetti in essi iutilizzo di spazi non ).

elativi agli ambienti di qualità dell'aria oni di rischio per la a programmazione di soglia.

nali in funzione del forzi cui è soggetta, stata sottoposta nel parametri ambientali terno di contenitori

ed artificiale; ie delle superfici ove

ti presenti). ificati sugli oggetti li costituenti l'opera questi tre fattori che e imprevedibili.

zionale al *fattore di e*, dove il "fattore di a specifica sorgente porto ad altri tipi di nitari. Maggiormente colorimento di molti

IR possono portare inate. La luce inoltre eazione chimica.

oto che gli oggetti stante, quindi, entro hio maggiore per la queste grandezze.

essendo formata da i umidità che non a ore di dilatazione per ostante) che per un

variare della quantità

d'acqua contenuta negli oggetti) ed effetti biologici (formazione di muffe e insetti favorita da temperature superiori a 20°C e umidità relativa maggiore del 65%), le condizioni termoigrometriche costituiscono il substrato necessario per l'attivazione di qualsiasi fenomeno chimico di ossidazione e corrosione, e possono dare luogo alla trasformazione chimica di sostanze aggressive amplificandone gli effetti.

Pur essendo nota l'esistenza di queste interrelazioni tra inquinanti, condizioni termoigrometriche ed illuminotecniche dell'ambiente, in dipendenza dei loro valori assoluti e delle loro rapide variazioni nel tempo, tuttavia correlazioni fra cause ed effetti non sono attualmente del tutto note e sono oggetto di studio.

Ai fini di una corretta conservazione è quindi opportuno raccogliere i valori di tali grandezze, cui il manufatto è stato sottoposto nel tempo, e metterli a confronto con la sequenza di eventi caratterizzanti il degrado dell'oggetto stesso; andrebbe cioè presa in considerazione, se nota, la "storia climatica dell'oggetto", per ciò che riguarda i parametri termoigrometrici, illuminotecnici e di qualità dell'aria interna.

## 2. Qualità dell'aria interna

Il controllo della concentrazione degli inquinanti presenti all'interno di ambienti espositivi è quindi indispensabile per valutare il livello di idoneità dell'ambiente alla conservazione ed alla esposizione di opere d'arte.

Tabella 1 - Principali fonti di inquinamento all'interno di un museo

<b>Origine esterna</b>	- apparecchi a combustione industriali e domestici (CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> etc.); - emissioni industriali (CO, C.O.V.); - traffico veicolare (SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> , Pb, particolato, etc).
<b>Origine interna</b>	- processi metabolici (CO <sub>2</sub> , CO, vapor d'acqua, residui epidermici, etc.); - fumo di tabacco (CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub> , particolato solido, etc.); - prodotti per l'igiene personale (particolato, etc.); - solventi e detergenti usati per la pulizia degli ambienti (formaldeide, NH <sub>3</sub> , particolato); - trafilemanti da sale bar, foyer, sale congressi, stanza fotocopie, etc. (SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO <sub>2</sub> , etc.); - emissioni dei materiali da costruzione e arredi (formaldeide, solventi, etc.); - impianti di condizionamento dell'aria (agenti batterici, polveri, etc).

### Fonti di inquinamento interno

I gas inquinanti l'aria interna possono provenire da fonti esterne od interne agli edifici, secondo quanto indicato in *tabella 1*. Nei musei, essendo per lo più situati in aree urbane, i tassi di inquinamento interno dipendono in larga misura da quello esterno, prodotto per la maggior parte da emissioni originate da veicoli, impianti di riscaldamento e dall'industria in genere.

E' quindi evidente che una prima importante causa di inquinamento indoor è dovuta all'introduzione di aria esterna non filtrata e depurata (attraverso infiltrazioni naturali oppure meccaniche dei sistemi di ventilazione).

A ciò si affiancano tutte le sorgenti interne, quali principalmente:

- l'afflusso di visitatori, che possono provocare sollevamento di polveri nonché variazioni dei parametri fisico tecnici;
- la non adeguata o assente manutenzione degli impianti di condizionamento dell'aria, che può portare all'accumulo di polveri nei condotti e nei terminali, poi introdotte in ambiente, ed alla proliferazione di microrganismi nelle sezioni di umidificazione;
- emissioni dei materiali utilizzati per le strutture edilizie, per i rivestimenti e per

gli arredi (i tessuti e le moquettes possono essere fonti di contaminanti microbiologici; i trattamenti del legno e i collanti utilizzati nei truciolati di alcune vetrine d'esposizione possono emettere formaldeide). A seguito della presenza di tutti i fattori riassunti nella *tabella 1*, nei musei spesso si rileva la prevalenza dell'inquinamento di natura chimica, rispetto a quello di natura fisica e biologica.

#### Tipi di inquinanti indoor e loro effetti sui manufatti

L'effetto che l'inquinamento indoor provoca sugli oggetti esposti varia in funzione del tipo di inquinante, della sua concentrazione e della natura del materiale esposto.

La gamma dei possibili inquinanti indoor è molto vasta, come evidenziato nella *tabella 2*, dalla quale sono stati esclusi alcuni agenti ossidanti che verranno descritti a parte, in quanto per concentrazione e dannosità si trovano più frequentemente nei musei (biossido di azoto, anidride solforosa, ozono e inquinanti solidi).

Tabella 2. Alcuni agenti inquinanti e principali effetti sugli oggetti /1-2-4-6-8-9/.

Inquinante	Fonti principali	Materiali	Effetti di degrado
CO <sub>2</sub> (Anidride Carbonica)	· presente in natura · respirazione	· manufatti lapidei contenenti CaCO <sub>3</sub> · metalli	· solubilizzazione del carbonato · corrosione
CO (Ossido di carbonio)	· combustione incompleta dei combustibili		· ancora da indagare
HF, HCl (Alogenuri di idrogeno)	· fonti industriali · processi di degrado di alcune materie plastiche (PVC);	· manufatti lapidei contenenti CaCO <sub>3</sub> , · metalli · materiali silicei	· corrosione
H <sub>2</sub> S (solfuro di zolfo)	· fonti naturali · degrado di sostanze quali collanti, lane, gomma	· metalli (specie l'argento)	· corrosione (patine nere)
Cl <sub>2</sub> , ClO <sub>2</sub> (Composti inorganici del cloro)	· fonti specifiche quali industrie, ecc	· manufatti metallici (rame, acciaio, argento) · elastomeri ed alcune	· corrosione elettrolitica · azione ossidante
NH <sub>3</sub> (Ammoniaca e derivati)	· fonti industriali specifiche (impianti per la produzione di fertilizzanti, industria	· rame e leghe · manufatti lapidei contenenti CaCO <sub>3</sub>	· corrosione · perdita di materiale, efflorescenze
C.O.V. (composti organici volatili, quali toluene, tricloroetilene, acetone, piretro)	· solventi, materiali per pulizia, inchiostri, legni trattati, ecc	· manufatti lapidei contenenti CaCO <sub>3</sub> , · metalli	· corrosione
Formaldeide	· come legante nella schiuma isolante a base di urea - formaldeide, come ritardante al fuoco e nei materiali utilizzati per la disinfezione di ambienti · combustione metano · fumo di tabacco	· materiali ricchi di sostanze proteiche · carta	· irrigidimento · riduzione resistenza

#### 1 - Ossidi d'azoto (N<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub>)

Gli ossidi di azoto, come prodotti della combustione del riscaldamento nonché derivati del traffico veicolare, rivestono un ruolo importante nel processo di formazione dell'ozono nell'atmosfera e presentano un effetto catalitico sulla corrosione dei metalli attaccati dai cloruri e dai solfuri.

Gli ossidi di azoto attaccano le pietre calcaree contenenti gruppi di azoto che degrada la maggior parte della superficie dei manufatti. La volatilità dell'acido nitrico è alta.

2 - Ossidi di zolfo (SO<sub>2</sub>)  
Gli ossidi di zolfo, generati da sorgenti naturali e industriali, formano acido solforico e solfati di calcio (gessi, pietre calcaree) con conseguente corrosione.

I manufatti più attaccati sono i tessuti, pigmenti, pitture.

Tutti i materiali a base di calcio sono attaccati dagli acidi solforici; l'entità del danno dipende dall'umidità relativa che favorisce il solforico può attaccare la carta (pergamena) riducendola.

Fra i metalli il più attaccato è l'argento (dal 60-70%); l'argento è contenuto nell'atmosfera.

3 - Ozono (O<sub>3</sub>)  
La presenza di ozono, ossigeno, e tra la luce ultravioletta scarichi delle auto e dei elettrodomestici. All'interno delle fotocopiiatrici, stampanti.

L'ozono reagisce con il carbonio; tale meccanismo sui manufatti in gomma causa un'azione distruttiva. L'ozono reagisce con i materiali d'archivio, tessuti.

Oltre a ciò, l'ozono, essendo un ossidante, attacca l'argento e il ferro, pericoloso per l'integrità dei manufatti.

4 - Particolato  
Il particolato è composto da particelle di diverse dimensioni variabili tra 0,1 e 10 micrometri, microrganismi, spore, ecc.

Il particolato presente negli ambienti museali, all'eccessiva presenza di inquinanti, causa un aumento del particolato e dei danni ai manufatti. Le fonti di cibo per attacchi microbiologici sono nocive in quei musei che...

nti di contaminanti  
si truciolati di alcune  
rito della presenza di  
rileva la prevalenza  
fisica e biologica.

tti esposti varia in  
e della natura del

ome evidenziato nella  
idanti che verranno  
sità si trovano più  
a, ozono e inquinanti

etti /1-2-4-6-8-9/.

	Effetti di degrado
	<ul style="list-style-type: none"> <li>solubilizzazione del carbonato</li> <li>corrosione</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ancora da indagare</li> <li>corrosione</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>corrosione (patine nere)</li> </ul>
ci	<ul style="list-style-type: none"> <li>corrosione elettrolitica</li> <li>azione ossidante</li> </ul>
ine	<ul style="list-style-type: none"> <li>corrosione</li> <li>perdita di materiale, efflorescenze</li> <li>corrosione</li> </ul>
li	<ul style="list-style-type: none"> <li>irrigidimento</li> <li>riduzione resistenza</li> </ul>

iscaldamento nonché  
nte nel processo di  
fetto catalitico sulla

Gli ossidi di azoto corrodono i metalli, provocano idrolisi della cellulosa ed attaccano le pietre calcaree. In particolare il biossido di azoto attacca i colori contenenti gruppi di ammine, e in presenza di umidità forma acido nitrico che degrada la maggior parte dei materiali. In genere l'attacco acido si realizza sulla superficie dei manufatti e non penetra in profondità, in conseguenza della elevata volatilità dell'acido nitrico che si forma sulla superficie stessa.

#### 2 - Ossidi di zolfo ( $SO_2$ , $SO_3$ )

Gli ossidi di zolfo, generati dalla combustione di prodotti fossili contenenti zolfo e da sorgenti naturali (biologiche, vulcaniche), in presenza di umidità elevata formano acido solforico e solforoso che attacca manufatti contenenti carbonato di calcio (gessi, pietre calcaree, marmi) trasformandolo in una polvere (solfato di calcio) con conseguente distruzione del manufatto che lo conteneva.

I manufatti più attaccati sono materiali proteici quali materiale zoobotanico, tessuti, pigmenti, pitture, elastomeri e materiale fotografico.

Tutti i materiali a base vegetale (carta, cotone, lino) possono essere corrosi dagli acidi solforici; l'entità dei danni è incrementata dalla presenza di radiazioni UV e dall'umidità relativa che se supera il 70% aumenta la velocità di reazione. L'acido solforico può attaccare tutti i materiali a base di fibre animali (seta, lana, cuoio, pergamena) riducendoli in polvere o instaurando un processo di putrefazione.

Fra i metalli il più attaccato è il ferro che si corrode in ruggine; il bronzo non è attaccato dall'anidride solforosa quando l'umidità relativa si mantiene nell'ordine del 60-70%; l'argento è attaccato soprattutto dal solfato di idrogeno normalmente contenuto nell'atmosfera, mentre l'oro è immune da ogni attacco di gas inquinanti.

#### 3 - Ozono ( $O_3$ )

La presenza di ozono nell'atmosfera è dovuta a reazioni fotochimiche tra UV e ossigeno, e tra la luce solare e gli ossidi di azoto e idrocarburi presenti negli scarichi delle auto e derivanti anche da processi industriali e dal riscaldamento domestico. All'interno degli ambienti confinati può essere prodotto da fotocopiiatrici, stampanti laser, apparecchiature elettriche.

L'ozono reagisce con i composti organici insaturi rompendo i doppi legami di carbonio; tale meccanismo si evidenzia con rotture trasversali che si determinano sui manufatti in gomma esposti per periodi prolungati all'aria. L'ozono presenta quindi un'azione distruttiva sulla quasi totalità dei composti organici quali dipinti, materiali d'archivio, tessuti, arredamenti, materiali zoobotanici, cuoio, pelli, ecc.

Oltre a ciò, l'ozono, esercitando un'azione accelerante sui processi di ossidazione dell'argento e del ferro e sui processi di solfatazione di argento e rame, risulta pericoloso per l'integrità di sculture, oggetti preziosi e argenteria di vario genere.

#### 4 - Particolato

Il particolato è composto da particelle di varia natura (aerosol, tracce di metalli, microrganismi, spore, ecc.) sospese nell'aria in fase liquida e/o solida, con dimensioni variabili tra 0.001 e 50  $\mu m$ .

Il particolato presente all'interno di un museo è dovuto a fonti esterne, ad impianti di condizionamento i cui filtri non vengono adeguatamente puliti, all'eccessiva presenza di arredi tessili ed all'affollamento umano che provocano un aumento del particolato sotto forma di fibre tessili e frammenti di pelle che sono fonti di cibo per attacchi biologici; a ciò si associa il fumo di sigaretta che è molto nocivo in quei musei che aprono le sale di esposizione ai ricevimenti.

Le polveri che si depositano sulle superfici degli oggetti possono creare patine in grado di inglobare composti acidi aggressivi, che in presenza di elevati valori di umidità, possono diventare chimicamente attivi. Oltre a ciò le polveri, contenendo spore di miceti e batteri, in presenza di umidità relativa superiore al 65% e temperatura compresa tra 20 e 30°C, possono favorire lo sviluppo degli agenti del biodegrado, in particolare nei materiali a base di cellulosa.

La rimozione delle polveri dalle superfici, inoltre, richiede spesso strofinamenti e lavaggi che accelerano il degrado degli oggetti incrementando significativamente il rischio di danneggiamento fisico-chimico. Ai fini della corretta conservazione delle opere esposte in un museo, la qualità dell'aria a contatto con l'oggetto deve essere quindi caratterizzata dalla minima quantità possibile di inquinanti solidi e gassosi.

A differenza dei parametri microclimatici ed illuminotecnici, per i quali la letteratura scientifica /3-8/ ha ormai fornito dati accettati dalla maggior parte dei ricercatori del settore, nei limiti della "storia termoigrometrica dell'oggetto", per quanto riguarda la qualità dell'aria indoor la letteratura specializzata /6-7/ non fornisce per ogni materiale i livelli di controllo consentiti, ma propone i valori di concentrazione massima consigliati per la protezione degli oggetti d'arte conservati nei musei solo per alcuni inquinanti, biossido di zolfo, biossido di azoto, ozono e particolato.

Valori superiori ai limiti stabiliti indicano che l'ambiente non è sufficientemente controllato e che si potrebbero instaurare fenomeni di degrado sugli oggetti.

Tabella 3 - Livelli di controllo di alcuni inquinanti raccomandati per i musei /6-7/

INQUINANTI	LIVELLI DI CONTROLLO (ppb)
Biossido di zolfo SO <sub>2</sub>	0,35
Biossido di azoto NO <sub>2</sub>	2,65
Ozono O <sub>3</sub>	0,94
Particolato	75 *

ppb = parti per miliardo

\* µg/m<sup>3</sup>

### 3. Metodologie per il rilevamento e la misura dei micro-inquinanti

L'aggressività ambientale è sperimentalmente rilevabile e quantificabile mediante due metodologie. La prima prevede l'utilizzo di *strumenti analizzatori* che misurano le concentrazioni di ogni singolo gas presente nell'aria. Tale metodo indaga le cause dell'inquinamento gassoso cercando di individuare la consistenza di ogni elemento concorrente. Questi rilevatori automatici sfruttano sostanzialmente cinque principi di misura: raggi per il particolato, fluorescenza U.V. per SO<sub>2</sub>, chemiluminescenza per NO<sub>2</sub>, assorbimento U.V. per O<sub>3</sub>, spettroscopia di assorbimento otticodifferenziale (DOAS) che consente di rilevare contemporaneamente SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>, HNO<sub>2</sub>, e HCHO /4/.

Altro metodo finalizzato all'analisi degli effetti che i gas contaminanti hanno sulle opere d'arte da conservare riguarda la *misura della reattività di test-campione* installati nell'ambiente da monitorare /7/.

L'aggressività ambientale è sperimentalmente rilevabile mediante l'esposizione in ambiente di lamine metalliche riportate su cristalli di quarzo (coupon) la cui frequenza di vibrazione dipende dallo spessore della lamina: la corrosione del metallo ad opera dei micro-inquinanti gassosi riduce lo spessore della lamina e l'entità della corrosione è proporzionale alla carica di aggressività chimica di tali

inquinanti. Essa non componenti contami comportano la presenza originato dalla cond L'entità dell'attacco d del coupon nell'ambi ed aumenta rapidame

Fra gli agenti più corrosione si poss dell'ambiente e la pr metallica.

### 4. Il monitoraggio d

Una campagna di coupon sopra descritt Comitato Termotecn

I rilievi hanno inte stagione invernale 15 sono conservati mate

armature, metalli, mat Il monitoraggio c appositamente scelti ambienti confinati e evitare l'accumulo di tali da non poter ess

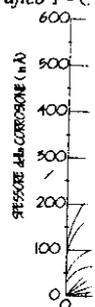
altro personale che fr Lo schema di classif coupon, viene ripropo

Tabella 4 - Classif

QUALITA' DELL'ARIA
molto pura
pura
pulita
leggermente contaminata
contaminata

(N.B. Valori di c

Grafico 1 - C



ono creare patine in di elevati valori di polveri, contenendo superiore al 65% e ppo degli agenti del

esso strofinamenti e significativamente il conservazione delle oggetto deve essere ti solidi e gassosi.

rici, per i quali la a maggior parte dei a dell'oggetto", per cializzata /6-7/ non i propone i valori di etti d'arte conservati o di azoto, ozono e

n è sufficientemente sugli oggetti.

per i musei /6-7/

CONTROLLO (ppb)
35
15
14
*

quinanti  
 quantificabile mediante  
 nti analizzatori che  
 ell'aria. Tale metodo  
 uare la consistenza di  
 itano sostanzialmente  
 enza U.V. per SO<sub>2</sub>,  
 O<sub>3</sub>, spettroscopia di  
 sente di rilevare  
 HCHO /4/.

ntaminanti hanno sulle  
 vità di test-campione

dianete l'esposizione in  
 urzo (coupon) la cui  
 na: la corrosione del  
 essore della lamina e  
 ssività chimica di tali

inquinanti. Essa non avviene per azione diretta del metallo con l'ossigeno ed i componenti contaminanti dell'aria ma mediante meccanismi elettrochimici che comportano la presenza di un film di elettrolita sulla superficie metallica, in genere originato dalla condensazione dell'umidità ambientale sulla superficie metallica. L'entità dell'attacco dipende quindi dalla natura del film e dal tempo di permanenza del coupon nell'ambiente. In particolare, la velocità di corrosione cresce con l'U.R. ed aumenta rapidamente al di sopra di una soglia definita U.R. critica.

Fra gli agenti più significativi che concorrono ad incrementare i fenomeni di corrosione si possono individuare le *particelle solide sospese nell'aria dell'ambiente* e la *presenza di cloruri* che si possono depositare sulla superficie metallica.

#### 4. Il monitoraggio della reattività ambientale nei musei italiani

Una campagna di rilevamento della qualità dell'aria mediante la tecnica dei coupon sopra descritti, è stata impostata nell'ambito di un gruppo di lavoro del Comitato Termotecnico Italiano presieduto dal Prof. Giorgio Raffellini.

I rilievi hanno interessato 25 musei italiani dislocati in 12 città durante la stagione invernale 1995-96 e quella estiva del 1996, coinvolgendo ambienti in cui sono conservati materiali di natura diversa (affreschi, tavole su tela o legno, arazzi, armature, metalli, materiali lapidei) e quindi con diverse esigenze conservative.

Il monitoraggio consiste nell'espore questi coupons in alcuni ambienti appositamente scelti per un tempo prefissato, normalmente 90 giorni per gli ambienti confinati e 30/45 per l'esterno. Essi vengono posizionati in verticale per evitare l'accumulo di particolato solido sopra le lamine metalliche ed in posizioni tali da non poter essere disturbati, rimossi o venire a contatto con i visitatori o altro personale che frequenta gli ambienti interessati dall'indagine.

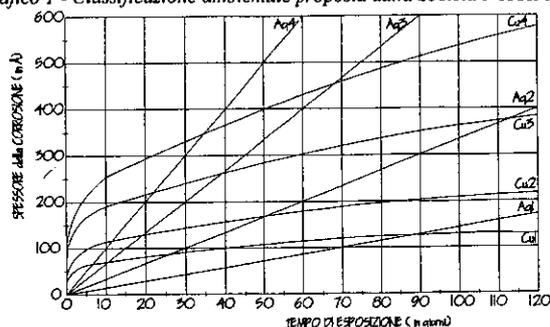
Lo schema di classificazione ambientale della Soc. Purafil basato sulla tecnica dei coupon, viene riproposto in *tabella 4* e nel *grafico 1*.

Tabella 4 - Classificazione ambientale per la conservazione dei beni storico-artistici

QUALITÀ DELL'ARIA	CLASSE cu	CORROSIONE cu	CLASSE ag	CORROSIONE ag
molto pura	C1	< 90 Å	S1	< 40 Å
pura	C2	< 150 Å	S2	< 100 Å
pulita	C3	< 250 Å	S3	< 200 Å
leggermente contaminata	C4	< 350 Å	S4	< 300 Å
contaminata	C5	> 350 Å	S5	> 300 Å

(N.B. Valori di corrosione del rame e dell'argento per 30 giorni di esposizione)

Grafico 1 - Classificazione ambientale proposta dalla Società PURAFIL



Le curve C3 ed S3 mettono in evidenza le *soglie di attenzione*, le C4 e S4 il limite oltre il quale l'ambiente monitorato supera la *soglia di pericolosità*.

Grafico 2 e 3 - Classi

### 5. Raccolta informazioni: schede e rilievi termoigrometrici

A supporto dei rilievi effettuati con i test-campione è stata predisposta e compilata una analisi degli ambienti e delle metodologie di rilievo su supporto cartaceo. Le informazioni sono state raccolte in una *scheda-coupon* per ciascun test-campione e in una *scheda-diario* per ogni differente sede museale.

Nella *scheda-coupon* vengono riportati dati relativamente a:

- l'edificio della sede museale, la destinazione museale;
- la posizione del test-campione e la descrizione dell'habitat nel quale è collocato: planimetrie, quantità delle superfici vetrate, frequenza del pubblico, impianti termoigrometrici di cui la sede è dotata, rilievi fotografici, ecc;
- dati termoigrometrici ambientali;
- operazioni di pulizia praticate: frequenza, modalità, prodotti impiegati, ecc.

La *scheda-diario* riporta, in funzione dei giorni effettivi di esposizione del test-campione in ambiente, gli eventi significativi della vita museale di interesse agli effetti del rilevamento come le chiusure al pubblico, gli interventi di manutenzione, i convegni, le cerimonie e i concerti.

### 6. La campagna invernale nei musei di Firenze

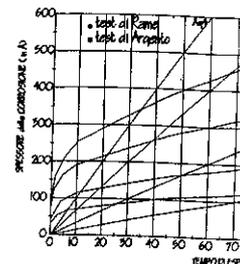
I coupon all'interno dei musei sono stati posizionati in ambienti significativi per i materiali che vi sono conservati, per la notevole affluenza di pubblico, per la tipologia degli impianti di condizionamento presenti nell'ambiente e nelle vetrine come nel caso del *Museo degli Strumenti Musicali* in Palazzo Vecchio.

I rilievi specifici dei singoli coupon sono riportati in riassunto nella *tabella 5*, mettendo in evidenza gli scostamenti dalle soglie di attenzione e di pericolosità.

Tabella 5. Dati relativi i rilievi con coupon nei musei di Firenze

COUPON N.°	POSIZIONE			PERIODO			IMPIANTO DI DATI		CORROSIONE mg								
	interno	est.	est.	dal	al	giorni	clim. / clim. / clim. /	±%	h.a. %	A	> C4	C3-C4	< C3	A	> S4	S3-S4	< S3
2007	2 FI	e		9-11	12-02	95	gel di alicce	12-18	32-56	198				#	405		#
2008	2 FI	e		9-11	12-02	95	gel di alicce	12-18	32-56	192				#	228		#
2009	2 FI	e		9-11	12-02	95	gel di alicce	12-18	32-56	233				#	279		#
2010	2 FI	e		9-11	12-02	95	gel di alicce	12-18	32-56	192				#	187		#
2011	2 FI	e		9-11	12-02	95	gel di alicce	12-18	32-56	216				#	244		#
2012	2 FI	e		9-11	12-02	95	gel di alicce	12-18	32-56	203				#	291		#
2037	8 FI	e		9-11	7-02	90	-			167				#	226		#
2038	8 FI	e		9-11	7-02	90	pompa di calore			217				#	536		#
2039	8 FI	e		9-11	7-02	90	pompa di calore			211				#	438		#
2040	8 FI	e	e	9-11	11-12	32	-	-2+21	10+99	969	#			#	307		#
2041	8 FI	e	e	11-12	9-01	29	-	2+18	44+93	832	#			#	355		#
2042	8 FI	e	e	9-01	7-02	29	-	-1+16		453	#			#	397		#
2097	18 FI	e		8-11	7-02	91	pompa di calore	12+21	35+63	162				#	743		#
2098	18 FI	e		8-11	7-02	91	pompa di calore	14+21	35+65	205				#	282		#
2099	18 FI	e		8-11	7-02	91	ventilconvettori	8+17	40+53	149				#	200		#
2100	18 FI	e	e	8-11	11-12	33	-	-2+21	10+99	1632	#			#	833		#
2101	18 FI	e	e	11-12	9-01	29	-	2+18	44+93	3111	#			#	340		#
2102	18 FI	e	e	9-01	7-02	29	-	-1+16		797	#			#	666		#
2103	19 FI	e		8-11	7-02	91	ventilconvettori	12-19	33-75	156				#	273		#
2104	19 FI	e		8-11	7-02	91	ventilconvettori			193				#	413		#
2105	19 FI	e		8-11	7-02	91	-			233				#	710		#
2106	19 FI	e	e	8-11	11-12	33	-	-2+21	10+99	375	#			#	325		#
2107	19 FI	e	e	11-12	9-01	29	-	2+18	44+93	352	#			#	318		#
2108	19 FI	e	e	9-01	7-02	29	-	-1+16		318	#			#	524		#
2115	21 FI	e		6-11	7-12	31	-	-2+22	10+96	656	#			#	364		#
2116	21 FI	e		6-11	12-02	98	-			198				#	376		#
2117	21 FI	e		9-01	12-02	34	-	2+20	43+92	669	#			#	296		#
2118	21 FI	e		7-12	9-01	33	-	-1+17		782	#			#	323		#
2119	21 FI	e		6-11	12-02	98	-			167				#	559		#
2120	21 FI	e		6-11	12-02	98	-			167				#	356		#

Grafico 2 - interno



Gli spessori di corrosione in ambiente di esposizione in ambiente interno e di grafico 3 (per soglie di attenzione (C3, S3).

I coupon posti all'esterno alle soglie di pericolo; i coupon con la conservazione delle

E' stato ovviamente rilevato quantità di gas inquinanti termoigrometrici ed i rilievi

evidenziare come queste ultime di dati sia, per ambedue i punti e 0,5. Si è rilevato inoltre

un perfetto controllo dell'umidità dell'ambiente in cui sono collocati anche notare come le vetrine

7. Conclusioni  
Dall'esperienza condotta sulla qualità dell'aria utilizzati indipendentemente.

Se da un lato le tecniche di concentrazione di ogni d'acquisto e di gestione, ne

quindi un sistema scarsamente qualità dell'aria indoor e, di

ambienti che invece richiama ambientale sia a causa dell'conservazione richieste dalle

I rilievi effettuati con i coupon possibilità di individuare, con

dovuti alla presenza dei valori negli ambienti confinati attraverso una indagine successiva nel

nzione, le C4 e S4 il pericolosità.

ci  
 è stata predisposta e di rilievo su supporto 'a-coupon per ciascuno museale.

ell'habitat nel quale è frequenza del pubblico, fotografici, ecc;

prodotti impiegati, ecc. vi di esposizione del museale di interesse agli venti di manutenzione,

bienti significativi per i za di pubblico, per la mbiente e nelle vetrine o Vecchio.

isunto nella tabella 5, ie e di pericolosità.

i di Firenze

3-C4	CORROSIONE			
	< C3	A	> S4	S3-S4
#	405			#
#	228			#
#	279			#
#	187			#
#	244			#
#	291			#
#	228			#
#	556			#
#	438			#
#	307		#	#
#	355	#		#
#	397	#		#
#	743		#	#
#	282			#
#	200			#
#	833	#		#
#	340	#		#
#	666	#		#
#	273			#
#	413			#
#	710		#	#
#	325	#		#
#	318	#		#
#	524	#		#
#	384	#		#
#	376			#
#	298		#	#
#	323		#	#
#	559			#
#	356			#

Grafico 2 e 3 - Classificazione dell'ambiente interno ed esterno nei musei Fiorentini

grafico 2 - interno

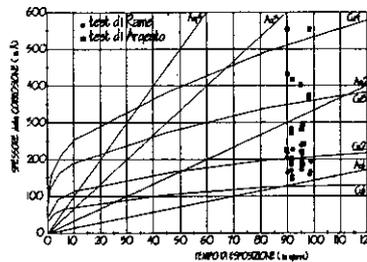
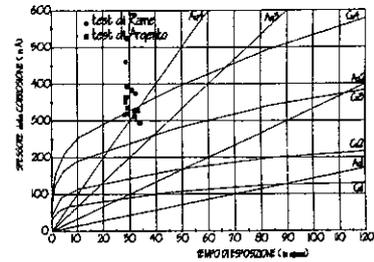


grafico 3 - esterno



Gli spessori di corrosione misurati sui coupon in rapporto al loro tempo di esposizione in ambiente sono riportati nei diagrammi di *grafico 2* (per gli ambienti interni) e di *grafico 3* (per i risultati dei rilievi effettuati all'esterno) in relazione alle soglie di attenzione (C3,S3) e di pericolosità (C4,S4).

I coupon posti all'esterno rilevano un'aria a presenza di gas inquinanti superiore alle soglie di pericolo; i coupon posti all'interno rilevano invece un'aria compatibile con la conservazione delle opere d'arte.

E' stato ovviamente rilevato che le vetrine sono i mezzi più idonei a ridurre le quantità di gas inquinanti a contatto con gli oggetti da conservare e dai rilievi termoisometrici ed i relativi grafici delle escursioni orarie /S/ è possibile evidenziare come queste ultime siano molto più contenute e la maggior percentuale di dati sia, per ambedue i parametri (T e U.R.), nell'ambito di una variazione fra 0 e 0,5. Si è rilevato inoltre che le *teche condizionate con gel di silice* garantiscono un perfetto controllo dell'umidità relativa che le rende indipendenti dalle variazioni dell'ambiente in cui sono dislocate; alla luce dei dati riportati in tabella 5 si può anche notare come le vetrine fungano da ulteriore filtro alle sostanze inquinanti.

### 7. Conclusioni

Dall'esperienza condotta è nata la convinzione che dei metodi di analisi della qualità dell'aria utilizzati negli ambienti museali nessuno è ottimale se utilizzati indipendentemente.

Se da un lato le tecniche di monitoraggio tradizionali forniscono i dati riferiti alla concentrazione di ogni singolo inquinante, dall'altro richiedono alti costi d'acquisto e di gestione, necessitando inoltre di personale specializzato. Risultano quindi un sistema scarsamente pratico per un primo approccio di conoscenza della qualità dell'aria indoor e, di conseguenza, non vengono utilizzati su larga scala in ambienti che invece richiedono un costante monitoraggio della situazione ambientale sia a causa dell'incremento delle fonti inquinanti sia per le necessità di conservazione richieste dalle opere d'arte.

I rilievi effettuati con i coupon, pur se limitati ad un'analisi generale, danno la possibilità di individuare, con semplice ed economica soluzione, gli effetti sinergici dovuti alla presenza dei vari tipi di inquinanti. Quindi la lettura degli inquinanti negli ambienti confinati attraverso i coupon si pone come punto di partenza per una indagine successiva nel caso di situazioni a rischio per la conservazione delle

opere d'arte. L'impiego di questo sistema passivo presenta numerosi altri vantaggi quali la non aggressività nei confronti degli oggetti esposti e delle persone presenti (dal punto di vista della qualità dell'aria), l'indipendenza da impianti elettrici, l'assenza di rumori o vibrazioni, la possibilità di non interferire con i percorsi espositivi ed infine i costi contenuti. L'indagine sulla qualità dell'aria con i coupon è inoltre auspicabile nei casi in cui si prevede l'allestimento di nuove sale museali o per esposizioni temporanee in ambienti di cui non si conosce l'aggressione chimica dell'aria.

Rilevata con il metodo dei coupon la presenza in un museo di ambienti a rischio a causa di eventuali sostanze inquinanti sarebbe comunque auspicabile provvedere ad ulteriori indagini, fino all'analisi chimica effettuata direttamente sull'oggetto esposto.

#### BIBLIOGRAFIA

- /1/ C. Buratti, F. Cotana, F. Sciarpi, *Rilievo della qualità dell'aria in alcuni spazi espositivi della Galleria Nazionale dell'Umbria*, Atti della giornata seminariale dedicata a "Microclima, qualità dell'aria e impianti negli ambienti museali", Firenze, 7 febbraio 1997.
- /2/ C. Carletti, F. Sciarpi, *Qualità dell'aria in ambienti di culto*, Volume Cuore Mostra SAIE '96, Chiese, città, comunità, Faenza Editrice, 1996.
- /3/ C. T. I., *Progetto di norma CTI E02.01.304.0 "Analisi e valutazione delle condizioni ambientali, termiche, igrometriche e luminose per la conservazione di beni di interesse storico ed artistico"*, CDA, 4 aprile 1994.
- /4/ F. Fantozzi, V. Gai, D. Grechi, *Importanza della qualità dell'aria nella conservazione museale*, Atti del Convegno "Aria 92", Pisa, 28/29 ottobre 1992.
- /5/ F. Fantozzi, V. Gai, L. Toti, *Indagini sulla qualità ambientale nelle sale di alcuni musei fiorentini*, Atti della giornata seminariale dedicata a "Microclima, qualità dell'aria e impianti negli ambienti museali", Firenze, 7 febbraio 1997.
- /6/ C. Muller, *Gaseous contaminant control strategies at the Hague*, 87<sup>TH</sup> Annual Meeting & Exhibition of air & Waste Management Association, Cincinnati, 19/24 giugno 1994.
- /7/ E. Sacchi *La qualità dell'aria in edifici storico-museali. Una indagine su campo*, Atti della giornata seminariale dedicata a "Microclima, qualità dell'aria e impianti negli ambienti museali", Firenze, 7 febbraio 1997.
- /8/ F. Sciarpi, L. Toti, *La qualità degli ambienti museali: indagini conoscitive sulle realtà attuali dei musei delle provincie di Firenze e Perugia*, tesi di laurea, 4 aprile 1995.
- /9/ M. A. Thomson, *Manual of Curatorship*, Butterworths, London, 1992.

**PnD**  
**Padova**  
**'97**

MISURA  
MURA

Nicc

IS7

#### Sommario

Una delle maggiori fonti di acqua all'interno del deposito superficiale di questo fenomeno dipende come la temperatura, le variazioni del contenuto di un oggetto, in particolare stante l'alto valore di termovisivo si è cercata l'entità di tale flusso. Inoltre risalire alla natura. Esperimenti per individuare la traspirazione forzata, Fisica Generale Applicata camera climatica in grado di misurare la velocità relativa e flusso dell'aria non stazionarie. I valori di un'equazione di bilancio mostrano un buon accordo attendibile del contenuto

\* Istituto di Fisica Generale  
E-mail: Nicola.Lu