



CONSERVAZIONE PREVENTIVA DELLE OPERE

Riassumiamo brevemente le azioni fondamentali da osservare per la conservazione preventiva nei confronti degli oggetti costituiti da un solo o più materiali. Ricordiamo che la normativa oggi disponibile offre criteri e riferimenti generali, che vanno verificati prima della loro applicazione al caso specifico. I seguenti criteri generali e fondamentali vanno sempre e prioritariamente fatti rispettare:

- evitare bruschi cambiamenti di umidità relativa e temperatura negli ambienti di esposizione e di deposito
- prima di effettuare spostamenti di oggetti verso ambienti con caratteristiche differenti, verificare la disponibilità di documentazione inerente le condizioni ambientali in cui si trova l'oggetto
- programmare per tempo lo spostamento di oggetti. Il tempo minimo di osservazione del luogo di destinazione, in mancanza di dati storici, è un anno, per avere la possibilità di fare osservazioni e misure nelle diverse condizioni stagionali
- in caso negativo, predisporre il rilievo sul posto di misure ambientali da protrarre per almeno un mese e comunque cercare di reperire informazioni termoigrometriche relative a siti simili presenti nello stesso contesto ambientale
- alla stessa maniera verificare la disponibilità di dati relativi all'ambiente di destinazione e in caso contrario predisporre una opportuna campagna di rilevamento microclimatico
- verificare le esigenze di conservazione dell'oggetto e la compatibilità di queste nei confronti di altri tipi di oggetti presenti nello stesso ambiente
- umidità e luce sono parametri da controllare più importanti della temperatura: umidità e luce accelerano infatti l'invecchiamento dell'oggetto
- limitare l'esposizione dell'oggetto alla luce naturale e artificiale (vedi limiti specifici)
- attenzione a non sottostimare l'illuminamento da luce naturale;

effettuare misure con il fotometro per accertare l'effettiva quantità di luce che cade sull'oggetto

- adottare opportune schermature alle finestre (tendaggi, schermi, applicazione di filtri UV ai vetri delle finestre)
- verificare la quantità e la qualità della luce artificiale che raggiunge l'oggetto (vedi capitolo 1 e capitolo 4)
- verificare la possibilità di regolazione dell'umidità relativa (UR) dell'ambiente attraverso la disponibilità di impianti e deumidificatori
- controllare la polverosità dell'ambiente con misure idonee (vedi capitolo 3), ricordando che l'aerosol atmosferico è vettore sia di sostanze chimiche aggressive, sia di microrganismi biodeteriogeni.

MATERIALI INORGANICI

(metalli, vetri, pietre, marmi, intonaci, materiali sintetici)

Questi materiali sono teoricamente più tolleranti ai valori limite di umidità relativa, di luce e di temperatura, ma la loro relativa impermeabilità all'acqua, fatta eccezione per pietre, marmi e intonaci, fa sì che facilmente si formi acqua di condensa (rugiada) sulla loro superficie mettendo in soluzione parte delle polveri depositate.

- attenzione alle polveri depositate sulle superfici degli oggetti: sono in parte solubili e possono dare luogo, in presenza di acqua, a reazioni chimiche aggressive con conseguente solubilizzazione del substrato (vedi anche capitolo 3). Rimedio: spolverature frequenti.
- l'aerosol da inquinamento urbano (particelle e gas) è particolarmente aggressivo nei confronti di questi materiali per le reazioni chimiche con il substrato che frequentemente generano prodotti cristallini in grado di crescere all'interno delle microscopiche discontinuità del materiale stesso, producendo fessurazioni, fratture e distacchi. Rimedio: controlli e spolverature frequenti.
- la colonizzazione delle superfici da parte dei microrganismi è generalmente prerogativa dei materiali organici, ma è frequente osservare colonie batteriche, algali e licheniche anche su metalli, vetri e pietre soprattutto quando sono esposti all'aperto. Rimedio: individuazione dell'agente biologico e pulitura chimica e meccanica per l'eliminazione delle croste e delle patine che si sono formate.

(segue)



MATERIALI ORGANICI

(legno, carta, tele e tavole dipinte, tessuti, cuoio e pergamene)

- Attenzione all'eccessivo essiccamento dei materiali organici che, al contrario di molti materiali inorganici come vetro, metallo e resine, utilizzano l'acqua di imbibizione come supporto strutturale al pari delle sculture di sabbia bagnata.
- nella maggior parte dei casi, la pratica suggerisce di non scendere mai sotto il 40% di UR e di non superare il 65%. Questi valori sono da considerare come valori estremi, non come valori limite di conservazione.
- le escursioni molto rapide (entro i 30 minuti) di UR vengono avvertite poco dal legno e dai libri; le stampe se non protette adeguatamente sono più sensibili.
- più pericolose sono le oscillazioni cicliche di UR nelle 24 ore che permettono al legno di mettersi in equilibrio con l'ambiente con conseguenti ritiri e rigonfiamenti che possono causare la caduta della lamella pittorica superficiale. Rimedio: intervenire sulla causa di queste oscillazioni dovute o al riscaldamento o alla climatizzazione o alla apertura di finestre.
- i restauratori lo sanno: il bloccaggio di scorrimenti, originariamente consentiti, con graffe metalliche provoca maggiori problemi e successivi danni causati dalla forza del legno sottoposto a ritiri e rigonfiamenti, come pure gli interventi sulle traversature.
- la presenza di abbondante umidità nel substrato organico, anche senza la presenza di acqua liquida sulle superfici, può innescare processi di colonizzazione biologica dapprima superficiali poi in profondità, con danni simili alla formazione dei cristalli nei materiali come malte e pietra. Rimedio: individuazione dell'agente biologico e trattamento con sostanze biocide per l'eliminazione delle croste e delle patine formate. Controlli e spolverature frequenti poiché i microrganismi colonizzatori sono sempre presenti nel pulviscolo atmosferico.

OGGETTI APPESI ALLE PARETI

- Tele dipinte, tavole dipinte, stampe, arazzi debbono essere collocati alle pareti con supporti che consentano di posizionare l'oggetto ad una distanza dalla parete di non meno di 3 cm per piccole superfici e di non meno di 5 cm per oggetti di dimensioni superiori ad alcuni metri di larghezza e altezza.
- L'uso di materiali isolanti da interporre fra oggetto e parete è inopportuno in quanto, in caso di parete umida, la presenza dell'isolante può favorire l'insorgenza di muffe sulla parete.

CONSERVAZIONE DEI MATERIALI DI SCAVO

Presso il museo può esservi necessità di ospitare materiale di scavo da pulire, stabilizzare e classificare. Generalmente si tratta di *materiale ad alto contenuto di umidità che va tenuto in quelle condizioni*. Come conservarlo in attesa di un definitivo lavoro di consolidamento?

- in mancanza di una vera e propria camera climatica si possono ricoverare i pezzi entro apposite buste di polietene provviste di chiusura e insufflare nella busta azoto, gas inerte che non permette o limita i processi chimici (ossidazioni e carbonatazioni) e biologici (muffe e batteri).
- il materiale così preparato va conservato in frigorifero a temperatura sopra lo zero, in attesa di lavorazioni successive.

La qualità dell'aria indoor



Il problema dell'inquinamento atmosferico non è circoscritto solo agli spazi aperti dell'ambiente esterno, ma interessa anche l'interno degli edifici delle città. Possiamo infatti pensare ai centri urbani come a strutture tridimensionali, alveolari, in grado di intrappolare nelle numerosissime cavità costituite dall'interno degli edifici le polveri, i vapori e i gas prodotti dal traffico veicolare e dalle altre attività umane. I musei si trovano così immersi nell'aerosol urbano alla pari di tutte le altre strutture e della stessa popolazione che le utilizza.

Per rendersi conto della quantità di materiale sottile sospeso in atmosfera è sufficiente indossare una mascherina filtrante e muoversi in bicicletta nella città o attorno alla città e osservare dopo un paio d'ore quanto sia cambiato il colore della maschera in corrispondenza del nostro naso attraverso il quale abbiamo respirato 10 litri d'aria. Se la prova la eseguiamo nei mesi invernali, da dicembre a febbraio, quando l'atmosfera è fredda e le situazioni di inversione termica, cioè di ristagno dell'aria al suolo, sono frequenti, otterremo lo stesso risultato in un tempo ancora minore. Allo stesso modo campionamento può essere eseguito con pompa aspirante e filtro all'interno di un edificio, che non sia provvisto di impianto di climatizzazione con filtrazione dell'aria circolante, e ci stupiremo della quantità di sostanze che verranno catturate dal filtro.

3.1 POLVERI, VAPORI E GAS

Un rapporto dell'amministrazione della Provincia di Bologna (Rapporto sullo stato dell'Ambiente 2004) [25], ha fornito una stima su base annua delle emissioni atmosferiche della provincia, originate dalle tre principali fonti antropiche: il settore industriale, il settore civile e il traffico veicolare. I contaminanti presi in considerazione sono i seguenti: biossido di zolfo (SO_2), composti organici volatili (COV), monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO_x), polveri respirabili (PM10) e polveri totali sospese (PTS). I dati sono relativi al 2002 e sono espressi in tonnellate/anno, come viene rappresentato nella figura 3.1, nella quale possiamo osservare che il contributo principale agli inquinanti urbani è dovuto al traffico veicolare, fatta eccezione per il biossido di zolfo, non riportato in figura, che viene emesso principalmente dalle attività industriali.

Come possiamo vedere, le quantità emesse sono notevoli e probabilmente superano i valori che ognuno di noi, non addetto ai lavori, avrebbe immaginato. Un ulteriore dato interessante e preoccupante è che il rapido incremento della presenza dei composti organici volatili (COV) è stato determinato dall'adozione della benzina verde, che ha sostituito la benzina super contenente additivi al piombo, il cui uso ha introdotto in atmosfera considerevoli quantità, non previste, di benzene. Il problema degli inquinanti atmosferici sta assumendo notevole importanza non solo per la salute dei cittadini, ma anche per gli effetti su molti materiali esposti all'aria ed in particolare per i possibili danni ai beni culturali conservati all'interno dei musei e degli archivi, dal momento in cui è stato riscontrato che il tasso di inquinamento presente negli ambienti interni supera spesso quello atmosferico come rivela un'indagine eseguita a Bruxelles nel 2003. I test hanno mostrato che le concentrazioni, in questo caso di benzene, nelle abitazioni erano il dop-

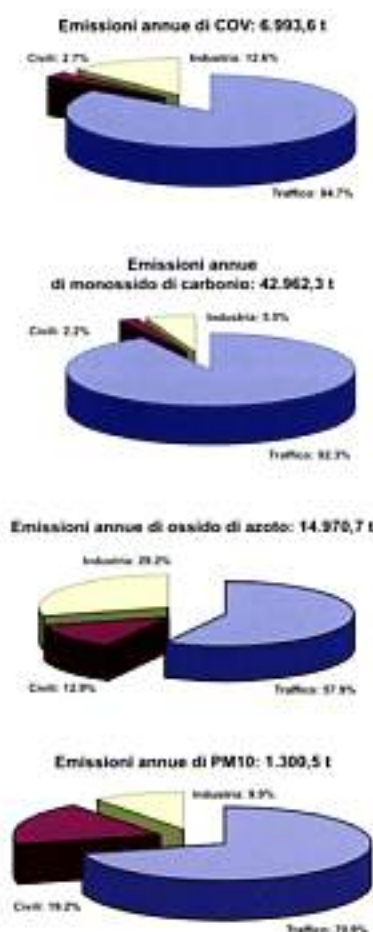


Fig 3.1
Emissioni atmosferiche della provincia di Bologna (2002), espresse in tonnellate/anno, relative a COV, CO, NO_x e PM10, prodotte da traffico, industria e attività civili.

pio di quelle dell'aria della città, con valori medi di 6,4 microgrammi per metro cubo (Progetto Europeo PEOPLE). La conferma dei risultati dell'indagine di Bruxelles viene da numerosi recenti lavori e convegni [2,10,15] che riportano valori indoor di concentrazione di inquinanti, superiori dal 50 al 100% ai valori di concentrazione esterna. Queste misure confermano semplicemente l'efficienza dei meccanismi di intrappolamento all'interno degli edifici dell'aerosol esterno entrato attraverso aperture ed infissi. La regola infatti è che l'aerosol atmosferico entra con facilità negli ambienti chiusi e ne esce con grande difficoltà generalmente perché rimane "fissato", attraverso reazioni chimiche, alle superfici sulle quali è avvenuto il contatto trasformandosi in altre specie chimiche.

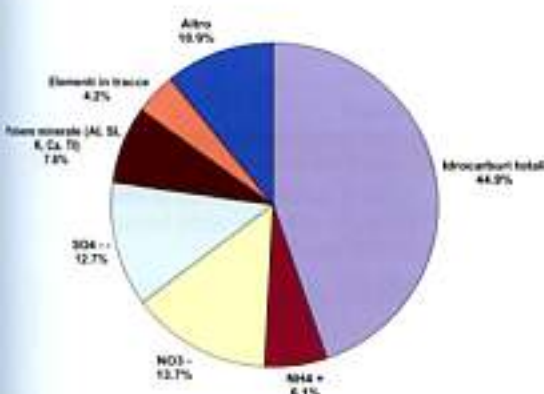


Fig 3.2
Composizione chimica percentuale del PM₁₀, aerosol di dimensioni inferiori a 10 µm (millesimi di millimetro) di un grosso centro urbano (dati ARPA Emilia-Romagna 2002) [3].

Da cosa viene generata questa quantità di aerosol in continuo aumento? Il pulviscolo atmosferico è costituito da piccolissimi frammenti di natura minerale, vegetale e animale, prodotti da processi biologici, dall'attività erosiva degli agenti atmosferici sul terreno e sui manufatti, dalle combustioni, dalle attività industriali più diverse e soprattutto dall'attività veicolare. La composizione chimica della frazione minerale che possiamo analizzare nelle polveri sottili di una grande città, chiamate PM₁₀, è costituita da idrocarburi, nitrati, solfati, sali di ammonio, polveri minerali come silicati,

altre sostanze ed elementi in tracce. Una parte di queste polveri è solubile in acqua e questa caratteristica è la causa dell'innescarsi di reazioni chimiche sulle superfici sulle quali si sono depositate, con conseguente sviluppo di processi di trasformazione e corrosione. Un'altra parte di questo aerosol è oleosa e ha la caratteristica di aderire alle superfici formando pellicole molto resistenti all'acqua e in grado di fungere da base per la deposizione di altre particelle solide per formare patine antiestetiche e molto resistenti nel tempo. Purtroppo questi processi non avvengono solo negli spazi aperti, ma anche negli ambienti chiusi nei quali le particelle giungono trasportate dai movimenti dell'aria e favorite dalle loro piccole dimensioni. Attraverso questi meccanismi ritroviamo queste polveri anche nelle nostre abitazioni e nelle sale dei musei.

Al pari delle particelle, e con maggior facilità di queste, sono presenti nell'aria inquinata numerosi gas e vapori che hanno maggior capacità di diffusione e rimangono più a lungo sospesi in atmosfera. Essi vengono distinti in inquinanti primari e secondari. I principali inquinanti primari sono: monossido di carbonio (CO), monossido di azoto (NO), idrocarburi (HC), biossido di zolfo (SO₂), particolati. Gli inquinanti secondari (biossido di azoto NO₂ e ozono O₃) sono invece frutto di reazioni tra i primari, o tra i primari e i componenti naturali dell'atmosfera.

La maggior parte di queste sostanze gassose le ritroviamo all'interno dei musei, come viene riportato nella tabella 3.1 nella quale si fa riferimento ad alcuni tipi di danno che gas e polveri possono causare alle superfici interessate dalla deposizione [6,7,9,22,23,38].

Tab 3.1 - (tabella rieditata da Baer et al. [38])

TIPI DI DANNO CHE SUBISCONO ALCUNI TIPI DI MATERIALE A CONTATTO CON ALCUNE FRA LE PIÙ DIFFUSE SOSTANZE INQUINANTI



MATERIALE	DANNO	PRINCIPALI INQUINANTI ATMOSFERICI
Metalli	Corrosione, ossidazione	Anidride solforosa, solfuro di idrogeno, solfuro di carbonile, acido formico, acido acetico, formaldeide
Pitture e rivestimenti organici	Scolorimento, insudiciamento	Anidride solforosa, solfuro di idrogeno
Carta	Infragilimento, scolorimento	Anidride solforosa
Materiali fotografici	Micromacchie, solforazione	Anidride solforosa, solfuro di idrogeno
Tessuti	Ridotta robustezza, insudiciamento	Anidride solforosa, ossidi di azoto
Tessuti colorati	Scolorimento, cambiamento di colore	Ozono, ossidi di azoto
Cuoio	Indebolimento, polverizzazione superficiale	Anidride solforosa
Gomma	Perdita di elasticità, rottura	Ozono

Molte indagini debbono essere ancora sviluppate, ma da un primo approccio al problema ci rendiamo conto che le sostanze gassose più aggressive sono quelle citate e cioè: ossidi di zolfo (SO_x), ossidi di azoto (NO_x) e ozono (O₃) seguite dai composti ammoniacali (NH₃).

L'intensità dell'attacco chimico sulle superfici interessate dalla presenza di sostanze inquinanti è proporzionale ai valori di temperatura e umidità relativa. In altre parole, la stessa quantità di

inquinante reagirà sull'oggetto o sul manufatto tanto più velocemente quanto più alta sarà la temperatura e la reazione potrà avvenire "su tetto umido" come si dice quando vi è presenza di acqua liquida.

Detto ciò occorre fare attenzione alle condizioni di presenza di forte umidità, o di acqua di condensazione, quando ci troviamo in un'atmosfera "sporca e calda" come può verificarsi ad esempio in pianura padana. Queste sono le condizioni migliori per un rapido degrado dei materiali, non solo per l'azione delle sostanze inquinanti, ma in generale per tutte le reazioni chimiche e biochimiche che possono avvenire sui diversi tipi di substrato.

A questo punto dobbiamo proporre, su basi sperimentali, i valori di concentrazione atmosferica oltre i quali certamente prenderanno avvio attacchi chimici ai materiali presenti nell'ambiente. Nella tabella 3.2 sono riportate le concentrazioni limite di alcuni gas inquinanti presenti nell'ambiente museale e negli archivi. Come possiamo notare, i valori limite per l'archivio sono 10 volte maggiori di quelli fissati per il museo e ciò è dovuto al fatto che il proponente la norma ha ritenuto, da prove effettuate, che il materiale cartaceo, a parità di condizioni, debba resistere in modo migliore e quindi più a lungo di altri materiali verosimilmente presenti in un museo. Sottolineiamo "resista" poiché non siamo in condizione di produrre risultati certi solo attraverso simulazioni di effetti sul lungo tempo.

Questi valori sono derivati da tre fonti: NISO (National Information Standards Organization, ente americano) [23], Peter Brimblecombe, autore inglese noto per fondamentali lavori scientifici nel settore [6] e UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione [35]. Nella tabella non sono riportati valori limite di concentrazione per il biossido di carbonio perché non indicati nella letteratura specializzata. Di fatto, esistono raccomandazioni sui valori limite

Tab 3.2 - I valori sono espressi in ppb (parti per bilione/miliardo in volume) e in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (microgrammi per metro cubo di aria). La concentrazione di altri gas viene espressa in ppm (parti per milione in volume) e in mg/m^3 (milligrammi per metrocubo)

VALORI LIMITE RACCOMANDATI DI CONCENTRAZIONE DEGLI INQUINANTI AERODISPERSI

INQUINANTE	ARCHIVI (NISO-TR01/95)	MUSEO (BRIMBLECOMBE[6])	UNI 10586/97
Biossido di zolfo	5-10 ppb (vol)	<0.4 ppb (vol)	<10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Biossido di azoto	5-10 ppb (vol)	<2.5 ppb (vol)	<2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (NOx)
Ozono	5-10 ppb (vol)	1 ppb (vol)	<2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM10 (polveri)		20 - 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	

di anidride carbonica (biossido di carbonio o CO_2) relativi a concentrazioni da non superare, ad esempio l'esposizione continua è consentita per valori inferiori a 500 ppm e negli uffici non possono essere superati i 800 ppm [36] (limiti fissati dall'OSHA, l'agenzia statunitense per la sicurezza sui luoghi di lavoro), ma non sono disponibili al momento test di comparazione fra concentrazione di CO_2 e gravità del danno provocato a materiali.

I valori riportati in tabella vanno intesi come valori limiti da non superare. Anche nel caso di monitoraggi in continuo i valori istantanei devono essere tutti al di sotto di tali limiti.

Come si è già detto anche per le polveri, è opportuno mettere in essere tutti quei presidi e interventi di tipo passivo e di gestione, atti ad abbattere la concentrazione degli inquinanti aerodispersi. In caso di progettazione di un impianto per il condizionamento del museo, questo deve sempre prevedere un sistema di filtrazione degli inquinanti aerodispersi gassosi e particellati, sia dell'aria esterna immessa all'interno, sia dell'aria interna riciclata, per diminuire la concentrazione degli inquinanti indoor [21].

Sintesi

INQUINAMENTO ATMOSFERICO OUTDOOR E INDOOR

L'inquinamento atmosferico è una delle principali cause di danno alla salute umana e ai materiali esposti sia all'aperto che all'interno di edifici.

Per quanto riguarda la conservazione dei beni culturali presenti in musei, biblioteche e archivi, distinguiamo inquinanti provenienti da sorgenti esterne e inquinanti generati da sorgenti interne.

Dall'esterno giungono: ossidi di azoto, ossidi di zolfo, idrogeno solforato e solfuro di carbonile (COS), ozono. Dall'interno possono essere generati: ossidi di azoto da stufe a gas, idrogeno solforato e anidride carbonica dalle persone, ozono da fotocopiatrici e stampanti. Altre sostanze possono essere prodotte dagli allestimenti, mobilio, preparazione di oggetti. Esse sono: acido acetico, acido formico, formaldeide. Altri inquinanti sono molto importanti per la salute umana ma non altrettanto importanti per la conservazione dei materiali come ad esempio i composti organici volatili (COV).

I sistemi di filtrazione dell'aria ambiente sono efficaci e producono aria pulita nelle sale e nei depositi, ma non possono eliminare i vapori di acido acetico che si trovano all'interno di vetrine e cassette.

Nel corso degli ultimi anni lo sviluppo delle conoscenze scientifiche sulla qualità dell'aria negli ambienti confinati (abitazioni, uffici, scuole ecc.), ha evidenziato che la cosiddetta Indoor Air Quality (IAQ) rappresenta una delle principali problematiche ambientali in particolare nei paesi industrializzati. Alcune considerazioni ci aiutano a comprendere questa crescente presa di coscienza. La maggior parte del nostro tempo viene trascorso in luoghi chiusi, quali la propria casa, il luogo di lavoro, le scuole, negozi, palestre, cinema, ecc. In media circa l'80-90% del tempo è trascorso al chiuso e la percentuale sale per alcune categorie di persone tra le quali i bambini, gli anziani, i malati. Se si ragiona in termini di esposizione ad un agente inquinante, ossia del prodotto della concentrazione per il tempo cui si è sottoposti a quel inquinante

$$\text{Esposizione} = \text{Concentrazione inquinante} \times \text{Tempo}$$

ci si rende conto che questa avviene per la maggior parte proprio negli ambienti confinati. Perfino l'esposizione ad inquinanti tipicamente prodotti all'esterno (ad esempio, emissioni gassose) può avvenire nei luoghi chiusi, sempre per effetto del maggior tempo ivi trascorso.

Il progresso tecnologico-industriale ha fatto sì che il numero e la quantità delle sostanze immesse negli ambienti confinati crescesse, modificando, in particolare negli ultimi decenni, la qualità dell'aria interna e aprendo una problematica "esposizione-effetto"

Approfondimento



ASSORBIMENTO DEGLI INQUINANTI INDOOR

Lo studio della presenza di sostanze inquinanti negli ambienti chiusi presenta aspetti di notevole complessità e pertanto questo argomento è ancora aperto a indagini di ricerca, infatti, alcuni lavori mettono in evidenza l'importanza del fenomeno dell'assorbimento dei gas da parte delle strutture e dei materiali situati all'interno del museo [34]. Questa diminuzione di concentrazione indoor di inquinanti, se viene rilevata senza il corredo di altre misure che documentano gli scambi di aria,

di calore e di umidità che avvengono nei locali, potrebbe essere interpretata come il risultato di buone procedure per interrompere o ridurre gli scambi d'aria esterno-interno. Queste misure, eseguite in maniera continuativa, parallelamente alle misure di inquinanti, permettono di verificare con sicurezza l'intrusione di masse d'aria inquinata ed il successivo depauperamento di inquinanti dovuto all'assorbimento da parte dei materiali e alle reazioni secondarie [22].

Questa situazione, che avviene frequentemente, produce il paradossale effetto di essere valutata positivamente dal punto di vista della salute umana (minore inquinamento indoor rispetto all'ambiente esterno) e negativamente dal punto di vista del conservatore che sa che le sostanze inquinanti "mancanti" sono state sottratte dall'atmosfera perché hanno reagito sui materiali provocando danni.

ancora da chiarire completamente. Basti pensare alla vicenda dell'amianto, la cui tossicità è emersa solo a posteriori, all'impiego di formaldeide nell'industria del mobile per le abitazioni o al crescente uso di attrezzature per l'ufficio (fotocopiatrici, computer, fax, stampanti). Lo stesso tipo di problematica ci viene posta ora per quanto riguarda la presenza di aerosol inquinante all'interno dei musei [18,27]. Questo problema è stato posto in evidenza attraverso la ricerca scientifica solo da una decina di anni e la sua soluzione è legata al raggiungimento della capacità di stima degli effetti della esposizione degli oggetti e dei materiali agli agenti inquinanti, come viene dimostrato dalle raccomandazioni di tenore propositivo del D.L. 112/98. Esposizione, dose ed effetti non sono parametri indipendenti, ma rappresentano fasi successive e complesse di un *continuum*.

Su questo argomento è importante confrontarsi con le raccomandazioni che vengono applicate da istituzioni di altri paesi, come il CCI (Canadian Conservation Institute) nelle *Guidelines for Pollutant Concentrations in Museums* [30].

Determinare un accettabile andamento del deterioramento dovuto agli inquinanti è responsabilità del curatore di museo. Il problema infatti non è aderire strettamente a norme ma utilizzare un set di linee guida per scegliere un accettabile livello di conservazione basato su obiettivi e risorse dell'istituzione, che può considerare costi e benefici di una strategia di controllo parallelamente ad altre priorità. Una lista di limiti accettabili di concentrazione di inquinanti per alcuni materiali è disponibile nel volume *Airborne Pollutants in Museums, Galleries, and Archives: Risk Assessment, Control Strategies, and Preservation Management* di Jean Treault [29]. Sebbene sia possibile determinare la concentrazione accettabile di ciascun inquinante per ciascun tipo di oggetto, questo tipo di approccio richiede molto tempo e molto denaro. Per questa ragione molti musei preferiranno adottare le concentrazioni massime di molti inquinanti dannosi per collezioni di media sensibilità. Una tabella simile a quella riportata (tab. 3.3) è pubblicata nel 2003 *ASHRAE Handbook* dell'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [1]. Va notato che queste raccomandazioni non sono appropriate per materiali ipersensibili come cellulosa, acetato, alcuni coloranti, piombo, gomme naturali, argento e nastri magnetici poliuretanici.

Tab 3.3

OBIETTIVI DI RIFERIMENTO DI QUALITÀ DELL'ARIA PER MUSEI, GALLERIE E ARCHIVI



INQUINANTI	CONCENTRAZIONE MEDIA PER I VALORI SOTTO INDICATI, $\mu\text{g m}^{-3}$ (ppb)			INTERVALLO DI CONCENTRAZIONE MEDIA, $\mu\text{g m}^{-3}$	
	1 ANNO	10 ANNI	100 ANNI	ATMOSFERA PULITA	AREA URBANA
Acido acetico	1000 (400)	100	100 ^b	0.3-5	0.5-20 ^c
Iidrogeno solforato	1 (0.71)	0.1	0.01	0.01-1	0.02-1
Biossido di azoto	10 (5.2)	1	0.1	0.2-20	3-200
Ozono	10 (5.0)	1	0.1	2-200	20-300
Biossido di zolfo	10 (3.8)	1	0.1	0.1-30	6-100
Particelle fini (PM _{2,5})	10	1	0.1	1-30	1-100
Vapor d'acqua	rimanere sotto 60% UR ^d				

Per poter raggiungere ragionevoli obiettivi di conservazione la tabella 3.4 indica obiettivi che sono raggiungibili in diversi luoghi e in diverse condizioni [30].

Tab 3.4

OBIETTIVI DI CONSERVAZIONE POTENZIALE PER NUMEROSE COLLEZIONI



	CONSERVAZIONE POTENZIALE (in anni) ^a				
	IN UNA SALA	SENZA EE ^c	CON EE	IN VETRINE CON ME ^b	IN VETRINE CON ME CON EE
CONTROLLO QUALITÀ ARIA NELL'EDIFICIO					
Ventilazione naturale o climatizzazione con filtri di particelle a efficienza moderata, senza filtri per gas.	1-10	≤ 1	10-100	10-100	≥ 100
Climatizzazione con filtri per particelle e gas, edificio isolato e buon controllo del flusso di visitatori.	10-100	≤ 10	10-100	≥ 100	≥ 100
Climatizzazione con filtri ad alta efficienza per particelle e gas, edificio molto isolato e accesso limitato ai visitatori.	≥ 100	≤ 10	10-100	≥ 100	≥ 100

NOTA a: Sono esclusi effetti negativi dovuti ad umidità e materiali ipersensibili. **b:** Materiali Emissivi (lastre di collodio, negative a base di nitrate o acetato di cellulosa). **c:** Essicante Efficiente (si considera che la vetrina abbia uno scambio di aria giornaliero). **d:** Con periodico cambio dei filtri.

3.2 LA MISURA DEGLI INQUINANTI

La misura della concentrazione di inquinanti atmosferici non è una misura semplice da eseguire, poiché richiede una strumentazione specifica normalmente gestita da personale tecnico specializzato. Recentemente sono stati introdotti sul mercato misuratori portatili di gas atmosferici di costo elevato ma relativamente facili da utilizzare.

La misura di inquinanti atmosferici viene generalmente eseguita in due modi:

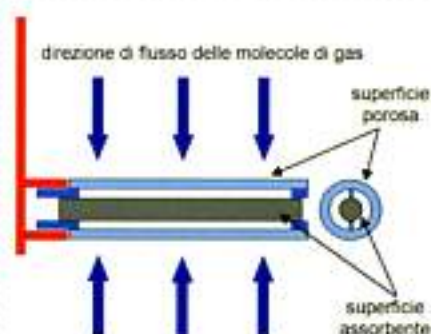
- misura diretta per mezzo di analizzatori specifici di gas
- misura indiretta attraverso l'analisi in laboratorio di un campione prelevato sul posto.

Anche l'effettuazione del prelievo di campioni richiede personale addestrato, ma vi sono metodi semplificati che possono essere eseguiti facilmente dopo un breve corso di istruzione. Le misure possono essere continue, come nel caso del monitoraggio dell'inquinamento atmosferico nelle città, o estemporanee secondo un programma prestabilito da eseguire nel luogo e nel momento più opportuni.

La necessità del museo di effettuare le misure indoor di inquinanti con una disponibilità economica spesso limitata può essere

risolta con l'adozione di campionatori passivi che offrono il vantaggio di essere poco costosi e facilmente gestibili anche da personale non esperto. Alla base del funzionamento dei campionatori passivi (fig. 3.3) vi è il principio della diffusione passiva di un gas in un mezzo adsorbente che può essere cellulosa o carbone [4,14].

Fig 3.3
Sezione verticale del
radiello, campionatore
passivo di gas.



Uno di questi campionatori è il *radiello*, ideato e brevettato dal Centro di Ricerche Ambientali della Fondazione Salvatore Maugeri IRCCS, Padova. È un campionatore passivo che al con-

trario degli analizzatori automatici, non utilizza una pompa. Una sostanza gassosa dispersa in aria in una data concentrazione diffonde nello spazio e un adsorbente contenuto nel campionatore passivo ne capta una certa massa (fig. 3.4). La concentrazione in aria si ottiene misurando il tempo d'esposizione e la massa di sostanza captata.

Nel caso venga utilizzato nel museo, la sola operazione da fare è la sistemazione dei radielli nelle sale secondo un protocollo prestabilito e, al termine del periodo di campionamento, il recupero delle cartucce adsorbenti che verranno spedite al servizio di analisi.

Il radiello ha lo svantaggio di non fornire dati in tempo reale ma solo le concentrazioni medie relative al periodo di campionamento. Esso è adatto per costituire un archivio di dati sulla presenza di inquinanti gassosi, dati indispensabili per determinare strategie per la riduzione o l'eliminazione di queste sostanze deterioranti, nei confronti degli oggetti custoditi, e dannose alla salute del personale del museo e dei visitatori.

Il radiello deve essere esposto per un determinato periodo nell'ambiente da analizzare, questo permette l'adsorbimento dei COV sulla superficie di carbone attivo della cartuccia; nel caso di campionamento personale l'esposizione sarà minore di quella esterna o interna ad edifici.

Questo metodo permette di analizzare la presenza in atmosfera delle seguenti sostanze gassose: Acido cloridrico, Acido fluoridrico, Acido solfidrico, Aldeidi, Ammoniaca, Biossido di azoto, Biossido di zolfo, Ozono, Composti Organici Volatili [19], alcuni dei quali sono fra gli aeriformi dei quali viene raccomandato il monitoraggio nel D.M. 10 maggio 2001 "Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei. (Art. 150 comma 6, D.lgs. n.112/1998)"

La misura con questa metodica di inquinanti indoor nei musei è già stata effettuata con successo anche per campagne di sensibilizzazione delle amministrazioni e del pubblico verso la protezione del patrimonio culturale ("Salvailmuseo", monitoraggio sull'inquinamento atmosferico nelle aree museali italiane, Legambiente in collaborazione con 5 musei nazionali, 2006).

Un'altra metodologia disponibile per l'effettuazione delle misure di inquinamento indoor, relativamente alla corrosione di oggetti metallici, è l'uso dei "corrosion classification coupons" costituiti da piccole piastre metalliche di rame e argento da esporre nei locali da monitorare (fig. 3.5)



Fig. 3.4
Campionatore passivo di gas denominato "radiello", le cui dimensioni sono 10x12 cm circa.



Fig. 3.5
Indicatore di processi di rischio ambientale di corrosione nei metalli chiamato CCC (corrosion classification coupons) distribuito dalla Purafil Inc. Sotto, una serie di provini dopo l'esposizione in atmosfera inquinata.

L'esame del livello di corrosione deve essere effettuato da un laboratorio specializzato ed è eseguito secondo standard di classificazione della qualità dell'aria. Negli Stati Uniti ci si riferisce allo standard ISA [18] che fissa 4 livelli di corrosione: debole, moderato, forte, molto forte (fig. 3.5). Questi coupons per il monitoraggio del rischio di corrosione per gli oggetti metallici sono reperibili anche in Italia e sono già stati impiegati per questo scopo in alcuni musei. Esiste anche una versione elettronica avanzata di questo test basato sulla misura diretta della perdita di materiale metallico per corrosione. La soluzione è sensibilmente più costosa ed è costituita da un apparecchio, ONGUARD, brevettato dalla Purafil e già installato in alcuni musei che permette il monitoraggio in tempo reale.

3.3 IL TRATTAMENTO DELL'ARIA

Il miglioramento dell'aria degli ambienti museali, come abbiamo visto, si effettua mettendo in atto procedure che sono:

- la rimozione delle fonti di inquinamento o il controllo delle loro emissioni (quando le sorgenti sono interne)
- la ventilazione
- la depurazione.

Alla depurazione si ricorre quando non riusciamo a controllare le emissioni o non possiamo adottare la ventilazione per rimuovere gli inquinanti. La ventilazione può essere quella naturale, che utilizza la regolazione delle aperture (porte e finestre), per effettuare eccezionali e controllati ricambi d'aria. Viceversa, la ventilazione forzata è in generale associata alla distribuzione di aria a temperatura e umidità controllata attraverso la presenza di un impianto di climatizzazione.

Le operazioni di trattamento dell'aria sono relativamente complesse e consistono in:

- miscelazione tra aria di ricircolo e aria esterna
- filtrazione della miscela d'aria ottenuta
- pre riscaldamento dell'aria
- umidificazione dell'aria
- raffreddamento e deumidificazione dell'aria
- post riscaldamento dell'aria
- movimento dell'aria

che sono caratteristiche di un impianto di climatizzazione.

Normalmente l'impianto di climatizzazione possiede una o più "batterie" di filtri che assicurano l'abbattimento delle polveri pre-

senti negli ambienti del museo. In queste batterie possono essere montati filtri con particolari caratteristiche tali da poter assorbire sostanze chimiche indesiderate quali le sostanze inquinanti.

In caso di assenza di impianto di climatizzazione, sono possibili soluzioni, generalmente adottate per risolvere problemi di qualità dell'aria, limitate ad ambienti adibiti a funzioni specifiche come un deposito, un laboratorio di restauro, un archivio di ridotte dimensioni. Questi sistemi di depurazione dell'aria sono chiamati "unità di abbattimento" e sono spesso impianti pre-montati. In queste unità vengono utilizzati filtri speciali monouso a seconda delle sostanze chimiche da intercettare. Nelle figure 3.6 sono presentati alcuni componenti di queste unità.



Fig 3.6 Unità di abbattimento di polveri e sostanze inquinanti: **a)** Unità a package per aria di ricircolo, da installare direttamente negli ambienti confinati da proteggere; **b)** Unità integrabile con impianti di condizionamento per purificazione aria primaria e di ricircolo.

Sintesi

MONITORARE L'INQUINAMENTO

- Per poter valutare il rischio di danno ai beni culturali arrecato dagli inquinanti aerodispersi, occorre avere dati di misure effettuate. I dati di inquinamento esterno generalmente sono disponibili, spesso gratuitamente, presso le amministrazioni comunali e provinciali. I dati di inquinamento interno debbono essere invece generati attraverso misure eseguite ad hoc.
- Il monitoraggio di inquinanti interni sta diventando sempre più importante non solo per i musei ubicati nei centri urbani. Il monitoraggio richiede un programma orientato e la collaborazione di esperti.
- Il monitoraggio interno degli inquinanti può essere eseguito attraverso campionamento attivo e campionamento passivo. Il primo richiede una strumentazione costosa che utilizza pompe per prelevare i campioni che dovranno essere analizzati; il secondo non ha pompa ma piccoli tubi con sostanze che assorbono gli inquinanti e che verranno analizzati in un secondo tempo. Questo metodo è più economico e può essere chiesto come servizio a società specializzate.
- Le sostanze inquinanti possono essere rimosse dagli ambienti attraverso azioni che vanno dal controllo delle immissioni dell'aria esterna all'utilizzo di sistemi di filtrazione dell'aria interna.

3.4 COMFORT UMANO E CONSERVAZIONE

Il museo non contiene solo oggetti ma anche persone che sono presenti con ruoli diversi: lo staff del museo e i visitatori. Ognuna di queste persone ha esigenze ambientali differenti sulla base delle attività che compie e del proprio stato fisiologico.

Se il calore prodotto dal nostro organismo è maggiore di quello che riusciamo a smaltire verso l'ambiente circostante avvertiamo una sensazione di caldo; al contrario se il nostro corpo perde più calore di quanto ne produce internamente, si avverte una sensazione di freddo. Nel caso in cui il calore prodotto è uguale a quello scambiato, la sensazione è neutra e la situazione viene definita di comfort o benessere termoisgrometrico.

Le variabili ambientali che influiscono sulla definizione del comfort sono:

- la temperatura, dell'aria e delle pareti, che determina la quantità di calore scambiato fra l'individuo e l'ambiente nelle tre forme principali di scambio termico, ovvero l'irraggiamento, la conduzione e la convezione;
- l'umidità, che incide sull' "indice di calore" nel caso in cui sia troppo alta e sulla sensazione di "secchezza alla gola" quando è troppo bassa;
- la presenza di eventuali stratificazioni termiche, che inducono fastidi legati al problema di avere parti del corpo a differenti temperature;
- la velocità dell'aria, che può produrre spiacevoli situazioni qualora essa sia troppo alta (maggiore di 0.25 m/s).

Inoltre è bene definire che:

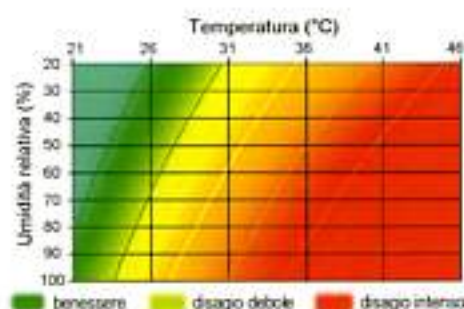
- il benessere è individuale e non collettivo: corrisponde per definizione al soddisfacimento psicofisico di un singolo individuo;
- il benessere è globale e non singolare: nella realtà i vari fattori interferiscono fra loro e le percezioni sensoriali si sovrappongono.

Capovolgendo la frase di apertura, potremmo ora affermare che il museo non contiene solo persone che cercano negli ambienti, che sono di lavoro o di svago, la migliore condizione di vivibilità o di benessere o comfort climatico, ma anche oggetti e materiali che debbono essere conservati rispettando parametri ambientali alcuni dei quali sono gli stessi che condizionano anche il nostro benessere, come la temperatura, l'umidità relativa, la ventilazione. L'argomento delle condizioni climatiche più confortevoli per l'or-

ganismo umano è stato trattato da molti studiosi ed è tuttora motivo di grande interesse soprattutto in discipline come la medicina del lavoro e la medicina sportiva.

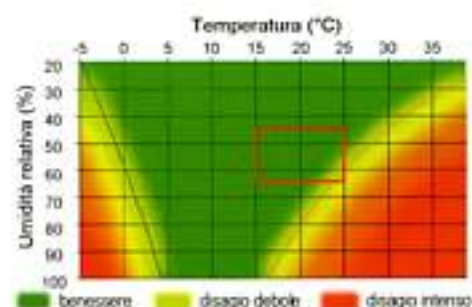
Il nomogramma, e cioè la funzione di due variabili rappresentata sotto forma di grafico, più utilizzato per determinare le condizioni di comfort corporeo è quello chiamato indice di Thom [31] che viene presentato soprattutto durante i mesi caldi per avvertire la popolazione di possibili disagi o pericolo di condizioni termoigrometriche avverse (alta temperatura e alta umidità) e che viene qui sotto riportato (fig. 3.7).

fig 3.7 Indice di Thom detto anche indice di benessere; utilizza la temperatura dell'aria e l'umidità relativa. In questa versione l'intervallo di temperatura considerata è ridotta a 21 - 46 °C.



Una seconda rappresentazione meno utilizzata ma più efficace per i nostri scopi è quella di Scharlau [28], nella quale il campo più esteso di temperature ci permette di dimostrare che le condizioni termoigrometriche raccomandate per la corretta conservazione della maggior parte dei materiali e degli oggetti presenti nelle collezioni museali, eccetto materiali fotografici e reperti di scavo, rientrano con facilità nell'area verde di benessere termoigrometrico dell'individuo più prossima all'intervallo 15 - 25 °C di temperatura e 45 - 65 % di umidità relativa (fig. 3.8).

Fig 3.8 Indice di Scharlau che rappresenta l'indice di benessere corporeo estivo e invernale; il rettangolo rosso rappresenta le condizioni di T e UR valide per la maggioranza degli oggetti da conservare.



Nella pratica



POLVERI, VAPORI E GAS

Le sostanze inquinanti caratteristiche dell'atmosfera dei centri urbani sono presenti in misura rilevante anche all'interno degli edifici, in quantità che vanno dal 10 al 40% dell'inquinamento esterno. Musei e archivi non fanno eccezione.

- Tre sono le azioni da intraprendere:
 - il monitoraggio di gas e particelle all'interno del museo
 - il controllo degli scambi d'aria fra ambiente interno e ambiente esterno
 - la frequente rimozione della polvere all'interno del museo.

MONITORAGGIO DEGLI INQUINANTI

- Per i musei situati in centri urbani o in aree a elevato inquinamento atmosferico è consigliato un periodico rilevamento (4 volte l'anno) dei seguenti inquinanti: ossidi di zolfo (SO_x), ossidi di azoto (NO_x), ozono (O_3), anidride carbonica (CO_2).
- Il monitoraggio va richiesto a ditte specializzate e viene eseguito posizionando negli ambienti prestabiliti e per un tempo definito (da 1 settimana a 1 mese) semplici campionatori passivi che verranno poi ritirati e analizzati dalla stessa ditta.
- I risultati del monitoraggio non sono quindi disponibili in tempo reale, ad eccezione dell'anidride carbonica (CO_2) la cui misura può essere eseguita con un sensore speciale collegato alle centraline microclimatiche predisposte (sensore relativamente costoso).
- In caso di superamento dei limiti di inquinamento riportati alla tabella 3.2 di questo capitolo, occorrerà mettere in atto procedure mirate alla riduzione del carico di inquinanti atmosferici attraverso:
 - la rimozione dei depositi di polvere sugli oggetti e negli ambienti
 - la riduzione degli scambi di aria fra esterno e interno, incluso il controllo della tenuta dei serramenti
 - la filtrazione dell'aria circolante negli ambienti.
- Il monitoraggio dell'anidride carbonica (CO_2) può risultare importante e, in casi di sovraffollamento, obbligatorio soprattutto in occasione di Mostre temporanee. Il monitoraggio va predisposto per tempo per poter garantire la disponibilità dei dati in tempo reale.

- Il monitoraggio della corrosione di oggetti di metallo può essere eseguito con speciali campionatori passivi detti "corrosion classification coupons".
- Per finalizzare il monitoraggio degli inquinanti occorre mettere in atto protocolli che regolino tempi e modi di apertura di porte e finestre (ventilazione naturale) e/o sistemi mobili o fissi di filtrazione dell'aria.

MONITORAGGIO DELLE POLVERI

- Il monitoraggio delle polveri può essere eseguito autonomamente dal museo o dall'archivio purché soddisfi queste condizioni:
 - possesso dello strumento portatile di misura (valore attuale circa 4.000 euro)
 - addestramento di un operatore.
- Senza questi requisiti occorre rivolgersi ad un servizio qualificato.

IL TRATTAMENTO DELL'ARIA

- La frequentazione sempre maggiore degli ambienti museali e degli archivi e il consistente aumento del livello di inquinamento atmosferico richiedono un maggior controllo della qualità dell'aria degli ambienti interni e azioni e procedure che si prefiggano la regolazione della umidità relativa, la rimozione delle polveri e la rimozione di gas inquinanti.

REGOLAZIONE DELLA UMIDITÀ

- Occorre un impianto di climatizzazione predisposto per l'umidificazione e la deumidificazione dell'aria. Possono essere utilizzate anche macchine singole che generalmente sono costruite per la sola funzione di deumidificazione.
- L'umidificazione degli ambienti con apparecchiature singole è possibile però solamente per sale di ridotte dimensioni.

RIMOZIONE DELLE POLVERI

La *circolazione della polvere* è condizionata dalla circolazione dell'aria negli ambienti e dal tipo di sistema di riscaldamento.



- Con il *riscaldamento a termosifone* non vi è alcuna possibilità di separare la polvere che circola assieme all'aria calda.
- Con il *riscaldamento a termoconvettore* la circolazione dell'aria è forzata da ventilatori che generalmente sono provvisti di filtri da cambiare periodicamente. Non cercate di risparmiare sulla sostituzione dei filtri e controllate che non siano sostituiti con filtri rigenerati meno efficienti. La frequenza del cambio dei filtri va determinata dopo alcuni controlli.
- Con il *riscaldamento a circolazione d'aria* normalmente sono inserite nell'impianto batterie di filtri la cui efficienza deve essere frequentemente controllata. Anche in questo caso, suggeriamo di contattare periodicamente il gestore del servizio per informazioni sulla sostituzione dei filtri.
- La *spolveratura periodica* degli oggetti è senza dubbio una pratica efficace non solo per la manutenzione degli oggetti ma anche per la rimozione della polvere dagli ambienti. Suggeriamo di non sottovalutarne l'importanza.
- La *pulizia dei pavimenti* è l'operazione più importante per la rimozione delle polveri. I risultati, però, dipendono fortemente da come viene eseguita.
- Pulizia con *macchine per l'aspirazione della polvere*: questa procedura elimina la polvere grossolana ma rimette in sospensione la polvere fine che continuerà a circolare nell'ambiente per tempi lunghi.
- *Lavaggio dei pavimenti*: impedisce la risospensione della polvere fino a quando il pavimento è bagnato, ma genera una consistente quantità di umidità registrata dagli igrometri presenti.
- Pulizia con *macchine lavapavimenti*: è certamente la miglior soluzione se non sono presenti moquette o sbarramenti sul pavimento. La pulizia viene eseguita con l'asportazione della polvere e il contemporaneo lavaggio del pavimento, senza modificare sensibilmente l'umidità degli ambienti.

RIMOZIONE DEGLI INQUINANTI

È una procedura complessa e costosa che richiede impianti generalmente utilizzati negli ambienti industriali e quindi non alla portata della gestione di edifici pubblici e privati.

- Esistono soluzioni basate sul lavaggio dell'aria ambiente che sono però applicabili per ambienti di piccole dimensioni. Questa soluzione può essere presa in considerazione per piccoli depositi.
- La soluzione più economica ed efficace consiste nella *limitazione degli scambi di aria* fra esterno e interno e nella filtrazione dell'aria circolante.
- Adottare bussole e doppie porte per evitare l'ingresso diretto di aria esterna.

COMFORT UMANO E CONSERVAZIONE

Nel capitolo abbiamo messo in evidenza questa problematica che riassumiamo in alcune azioni da intraprendere.

- Vigilare per il rispetto del mantenimento delle condizioni termoigrometriche degli ambienti che dovrebbero rispettare le norme di sicurezza relative a questa tipologia.
- Controllare frequentemente la velocità dell'aria che circola nei diversi ambienti e che può provocare sensazione di disagio quando supera certi valori.
- Vigilare sulle manovre arbitrarie di modificazione della regolazione prestabilita di riscaldamento.
- Vigilare sull'arbitraria apertura di finestre e porte.
- Considerare l'opportunità di suggerire o fornire un tipo di abbigliamento al personale di sorveglianza, idoneo alle condizioni ambientali del museo.
- Ricordare che il personale del museo e i visitatori percepiscono diversamente le stesse condizioni microclimatiche.
- Discutere e predisporre con il gestore dell'impianto di climatizzazione le specifiche di esercizio dell'impianto finalizzato alla buona conservazione delle opere presenti nel museo.