

Inquinamento e degrado dei beni culturali

L'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e Servizi Tecnici (APAT) ha avviato dal 2000 una collaborazione scientifica con l'Istituto Centrale per il Restauro (ICR) per la valutazione di soglie di tolleranza per i monumenti, ed in particolare dei manufatti lapidei, nei confronti delle principali sostanze inquinanti. Il degrado naturale cui sono soggette le opere d'arte è fortemente accelerato e reso più intenso dall'inquinamento ambientale in quanto non posseggono sistemi di autorigenerazione presenti invece negli esseri viventi. Non esistono al momento valori di soglia specifici per gli effetti deleteri dell'inquinamento atmosferico sui beni culturali, e non è detto che il rispetto dei limiti attualmente vigenti assicuri adeguata protezione anche alle opere d'arte, per la evidente diversità dei meccanismi chimici e fisici coinvolti. Dal punto di vista normativo, infatti, i limiti di legge sull'inquinamento dell'aria, in vigore nel nostro paese e in tutta l'UE, sono stati emanati avendo come fine ultimo la salvaguardia soprattutto della sola salute umana o, per taluni inquinanti, degli ecosistemi e della vegetazione. Lo studio sperimentale elaborato dall'APAT e dall'ICR, condotto nelle città di Roma e Milano, è stato finalizzato a catalizzare l'attenzione sul problema ed a riunire le competenze nazionali sull'argomento, individuando contemporaneamente, sulla base delle conoscenze fino a questo momento disponibili, una metodologia mirata alla quantificazione del danno causato dall'inquinamento atmosferico sui beni culturali italiani esposti all'aperto. A tale proposito è stato costituito un tavolo tecnico coordinato da APAT e ICR, che ha riunito alcuni tra i maggiori esperti del settore appartenenti a diverse istituzioni (CNR ISAC, CNR IIA, ENEA, MBAC). Dagli studi effettuati sull'argomento è stato possibile valutare che l'erosione, l'annerimento, la contaminazione biologica e lo stress fisico risultano essere i principali responsabili del degrado delle superfici dei manufatti.

I risultati dello studio sperimentale APAT-ICR per la valutazione del danno dei beni storico-artistici esposti all'aperto

di **Patrizia Bonanni^(*), Roberto Daffinà^(*), Raffaella Gaddi^(*), Valerio Silli^(*),
Mario Cirillo^(*), Carlo Cacace^(**), Annamaria Giovagnoli^(**)**

^(*) APAT, Dipartimento Ambiente e Metrologia Ambientale

^(**) ICR

Introduzione

La presenza sul territorio italiano di una parte senz'altro consistente del patrimonio storico-artistico mondiale deve rendere il nostro paese particolarmente sensibile allo svi-

luppo di strategie nel settore della conservazione preventiva e al sostegno di studi e ricerche scientifiche finalizzati ad assicurare il più possibile ottimali condizioni di conservazione.

Nella banca dati della Carta del Rischio del Patrimonio Culturale [1] dell'Istituto

Centrale per il Restauro (ICR) ad oggi sono schedati 62756 beni suddivisi per Regione (Fig. 1). Tutto questo deve quindi rendere il nostro paese particolarmente sensibile alla tematica della loro conservazione ottimale.

Innumerevoli studi ed indagini scientifiche hanno evidenziato che negli ultimi decenni il degrado dei materiali esposti all'aperto ha subito un'accelerazione e in generale è stato registrato un incremento della velocità con cui alcuni processi, coinvolti nel degrado, evolvono nel tempo. Nel valutare le cause di tale degrado l'inquinamento atmosferico è risultato un fattore di pressione determinante per le superfici dei monumenti esposti all'aperto. L'impatto delle sostanze inquinanti emesse in atmosfera sui materiali costitutivi dei monumenti è ingente ed irreversibile a causa della mancanza di sistemi di autorigenerazione, che sono invece presenti negli esseri viventi [2], [3], [4].

I limiti di legge sull'inquinamento dell'aria in vigore nel nostro paese e nell'Unione europea sono stati emanati avendo come fine ultimo la salvaguardia della sola salute umana o, per taluni inquinanti, degli ecosistemi e della vegetazione.

Non esistono al momento valori limite specifici per gli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni di interesse storico-artistico.

Sola eccezione, in Italia, sono le opere d'arte esposte all'interno dei musei per le quali con il Decreto Legislativo n. 112 del 1998 si affronta, con l'art. 150, il problema della qualità dell'aria all'interno e le implicazioni dell'ambiente esterno sulle opere conservate.

L'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e Servizi Tecnici (APAT) ha avviato dal 2000 una collaborazione scientifica con l'Istituto Centrale per il Restauro (ICR) finalizzata alla valutazione di soglie di tolleranza per i monumenti, ed in particolare dei manufatti lapidei, nei confronti delle principali sostanze inquinanti. Tale studio ben si colloca all'interno delle attività dell'Agenzia che consistono, tra le altre, nella determinazione di tali soglie (carichi critici) per vari elementi recettori con il fine ultimo di pianificare le quote di riduzione di emissione di sostanze inquinanti, tali da garantire il non superamento di queste soglie. Il progetto di ricerca elaborato dall'APAT e dall'ICR è stato finalizzato a catalizzare l'attenzione sul problema ed a riunire le competenze nazionali sull'argomento, individuando contemporaneamente, sulla base delle conoscenze fino a questo momento disponibili, una metodologia mirata alla quantificazione del danno causato dall'inquinamento atmosferico sui beni culturali italiani esposti all'aperto.

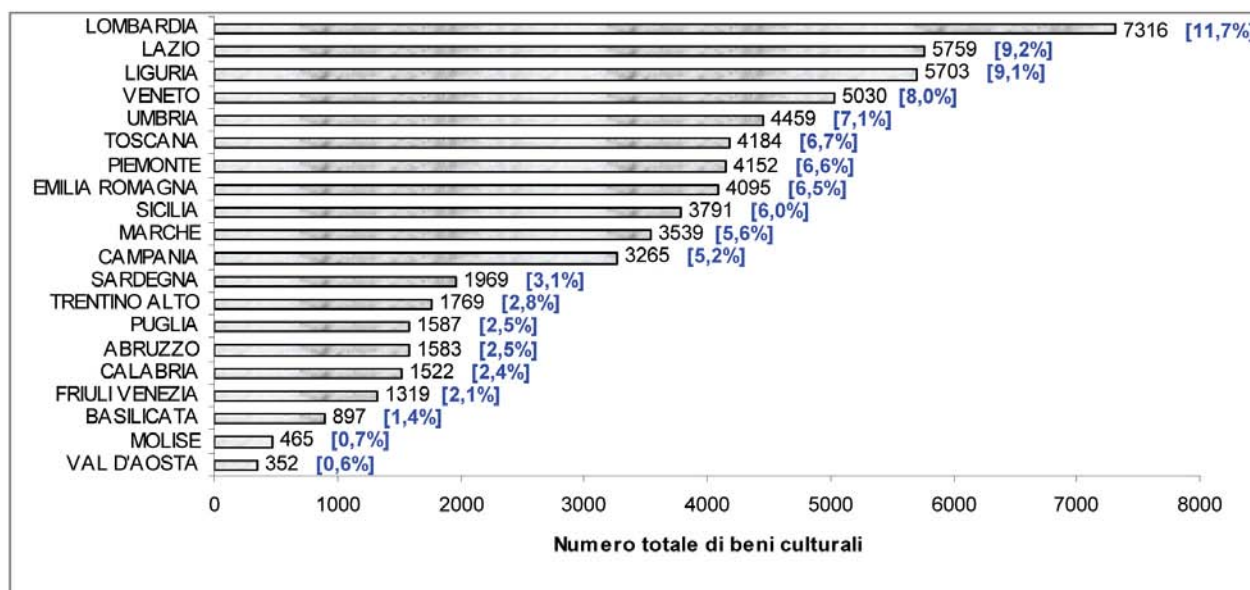


Fig. 1: Distribuzione Regionale, in parentesi quadre le percentuali sul totale, dei beni culturali presenti in banca dati del Sistema Informativo Territoriale della Carta del Rischio dell'ICR.

A tale proposito è stato costituito un tavolo tecnico coordinato da APAT e ICR, che ha riunito alcuni tra i maggiori esperti del settore appartenenti a diverse istituzioni¹.

Dagli studi effettuati sull'argomento è stato possibile valutare che l'erosione, l'annerimento, la contaminazione biologica [5] e lo stress fisico [6] risultano essere i principali responsabili del degrado delle superfici dei manufatti.

Per quanto riguarda l'erosione esistono specifiche funzioni di danno, cioè algoritmi matematici, che correlano il danno stesso alla concentrazione di inquinanti aerodispersi; per l'annerimento, lo stress fisico e la contaminazione biologica, invece, tali funzioni non sono ancora state esplicitate: la loro definizione è stato l'obiettivo della sperimentazione condotta nell'ambito della convenzione ICR-APAT in due città italiane (Roma e Milano). Lo studio effettuato può essere considerato un primo passo per la realizzazione di mappe di sensibilità aventi come recettori sensibili i beni di interesse storico-artistico esposti all'aperto, in analogia con quanto realizzato già da APAT in ambito ONU - ECE per gli ecosistemi forestali.

Fonti di emissione delle sostanze inquinanti

Tra le sostanze in grado di deteriorare un'opera d'arte, quelle considerate maggiormente aggressive per i materiali lapidei sono: i composti dello zolfo (in particolare l'anidride solforosa SO_2) [7], gli ossidi di azoto (NO_x) [8], l'anidride carbonica (CO_2) per il suo potere acidificante ed il particolato atmosferico che ricopre un ruolo fondamentale poiché rappresenta la principale causa di annerimento delle superfici lapidee esposte all'aperto.

Tali inquinanti possono provenire ed essere emessi da fonti diverse, in particolare [9]:

- *processi di combustione* in ambito industriale e domestico che generano inquinanti aeriformi quali ossido di carbonio (CO), biossido di zolfo (SO_2), idrocarburi, aldeidi, ceneri composte da cloruro di sodio e di magnesio (NaCl e MgCl_2), particelle carboniose, ecc.;

- *traffico veicolare* (produzione di ossidi di carbonio, azoto e zolfo, particolato, polveri provenienti dall'usura di manti stradali, di pneumatici ed idrocarburi incombusti);
- *lavorazione dei manufatti* in processi industriali e combustioni dei rifiuti che immettono nell'atmosfera vapori di solventi organici, biossido di zolfo, acido cloridrico, ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e particolato.

Analizzando le emissioni in Italia degli ossidi di azoto (NO_x), dell'anidride solforosa (SO_2), del particolato² (PM_{10}), notiamo come si è avuta una sensibile riduzione delle emissioni nel periodo che va dal 1990 al 2003, rispettivamente del 36, 72 e 29%; per quanto riguarda l'emissione di CO_2 si è registrato un incremento del 10%.

Nella figura 2 in particolare è rappresentata la situazione delle emissioni nazionali di NO_x nel 1990 e nel 2003 suddivisa per settori. Oltre la metà delle emissioni è dovuta al settore dei trasporti e la sua riduzione nel tempo ha consentito di abbattere sensibilmente le emissioni complessive. Il taglio di 284 Gg in questo settore ha rappresentato circa il 41% del calo delle emissioni complessive che in tredici anni è stato di 696 Gg.

L'altro settore che ha inciso per circa il 45% su questo calo è quello della combustione nel settore energetico.

Dalla figura 3 si rileva che la riduzione di 1288 Gg di SO_2 complessive è da imputare quasi interamente, circa l'86%, ai settori energetico, dell'industria manifatturiera ed edile, e al settore dei trasporti. Ogni singolo settore ha almeno dimezzato le sue emissioni nel periodo considerato.

I tre settori menzionati in precedenza pesano per circa un 83% sulle emissioni complessive e quindi una loro diminuzione incide in maniera consistente sulle emissioni complessive.

Nella figura 4 viene esplicitato l'andamento del PM_{10} , nei due anni di riferimento.

L'abbattimento delle emissioni complessive, circa 69 Gg, ha trovato il contributo di tutti i settori ad eccezione di quello residenziale e terziario, relativo al riscaldamento

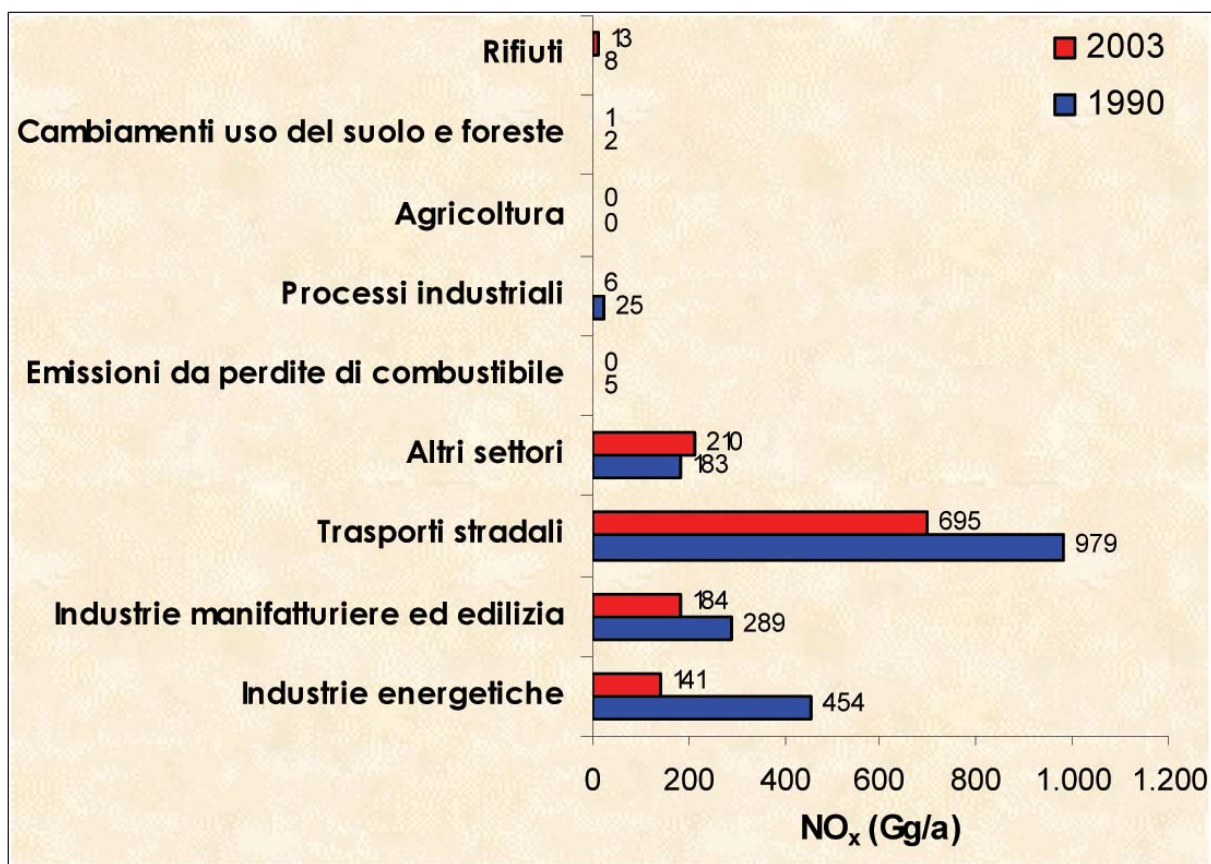


Fig. 2: Distribuzione delle emissioni di NO_x in Italia nel 1990 e nel 2003 suddiviso per settore classificazione IPCC. Fonte: APAT.

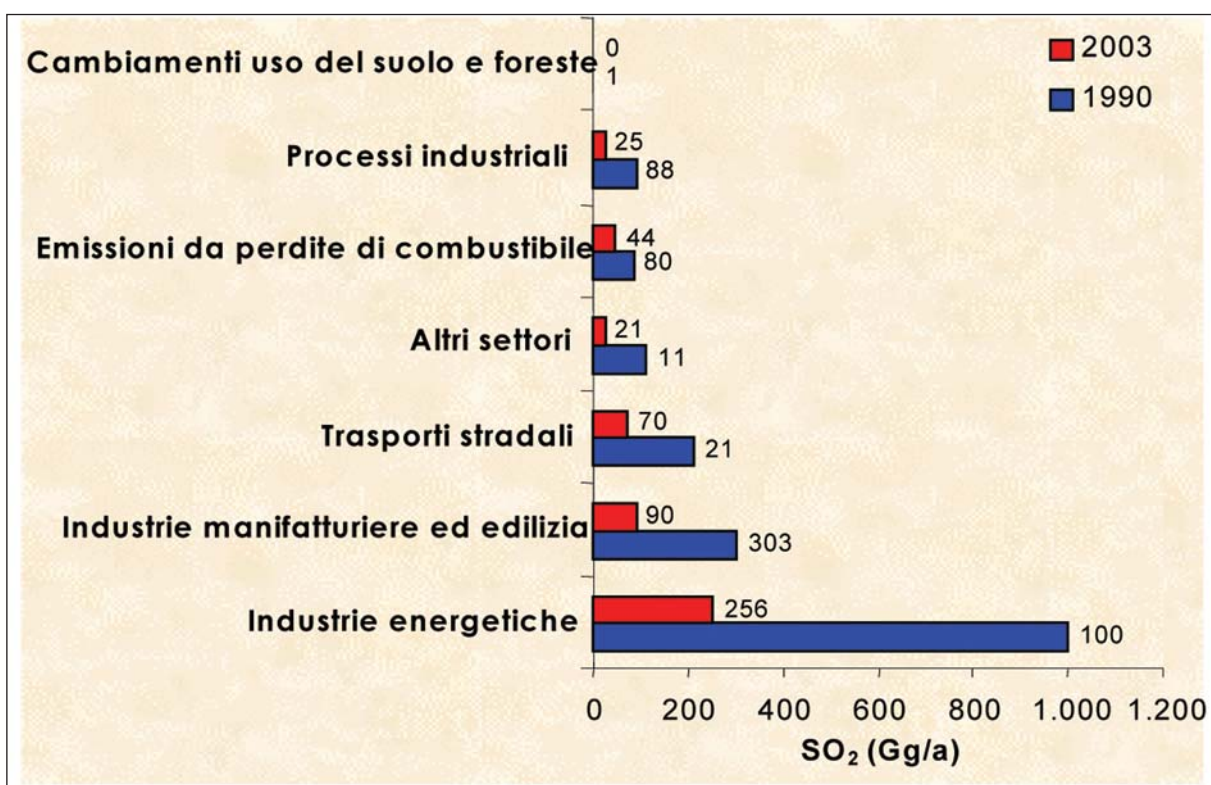


Fig. 3: Distribuzione delle emissioni di SO_2 in Italia nel 1990 e nel 2003 suddiviso per settore classificazione IPCC. Fonte: APAT.

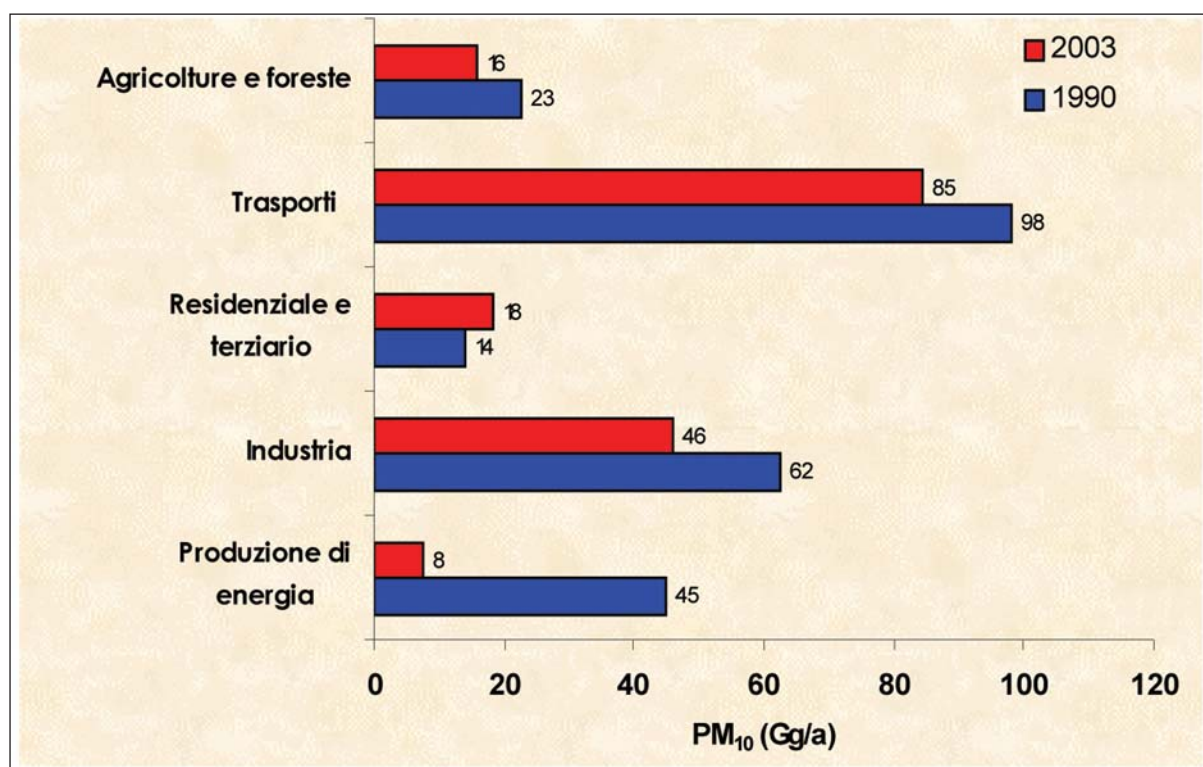


Fig. 4: Distribuzione delle emissioni di PM₁₀ in Italia nel 1990 e nel 2003 suddiviso per settore classificazione SNAP 97. Fonte: APAT.

degli ambienti, che ha visto aumentare le emissioni di un 33%. La metà dell'abbattimento complessivo è da attribuirsi al settore energetico, che in tredici anni ha ridotto di 37 Gg le sue emissioni, passando dai 44 Gg del 1990 ai 7,6 del 2003.

Una buona *performance* è stata ottenuta anche dal settore dei trasporti che passa dalle 98 Gg del 1990 alle 84 del 2003. Questa sua riduzione è importante per il peso che copre questo inquinante sulle emissioni complessive. Occorre notare come circa 2/3 delle emissioni da trasporti sia da imputare al trasporto su strada e in maniera particolare ai veicoli che utilizzano un carburante diesel (circa 40 Gg).

Nella figura 5 si vede come l'aumento delle emissioni complessive di anidride carbonica sia dovuto al forte aumento del settore dei trasporti e del settore energetico che hanno incrementato di circa 50 Tg le loro emissioni nel periodo. Questi due settori sono responsabili di circa il 71% delle emissioni complessive di CO₂ e quindi una loro variazione si ripercuote in maniera consistente sul totale.

Gli aumenti delle emissioni di questi due settori sono stati mitigati dall'aumento del-

l'abbattimento del settore dei cambiamenti del suolo e delle foreste con riduzioni che passano dai circa 60 Tg agli 81 Tg del 2003.

Forme di degrado ed effetti degli inquinanti sulle opere d'arte

Il degrado di un'opera d'arte inizia subito dopo la sua realizzazione e la velocità con cui procede dipende da fattori sia naturali che antropogenici. Il processo di deterioramento è progressivo e irreversibile; i tempi e le modalità di impatto differiscono sia in funzione del tipo di materiale che degli agenti fisico-chimici e biologici coinvolti che possono essere di differente natura.

Un manufatto a differenza di un sistema biologico (che tra l'altro spesso è in grado di modificare l'habitat in suo favore o magari di spostarsi), non è dotato di meccanismi di smaltimento o di eliminazione delle sostanze inquinanti con le quali viene a contatto e per tale ragione si assiste in breve tempo all'accumulo di tali sostanze.

Tra le forme di degrado cui sono soggetti i materiali lapidei, assumono particolare importanza in risposta all'azione degli

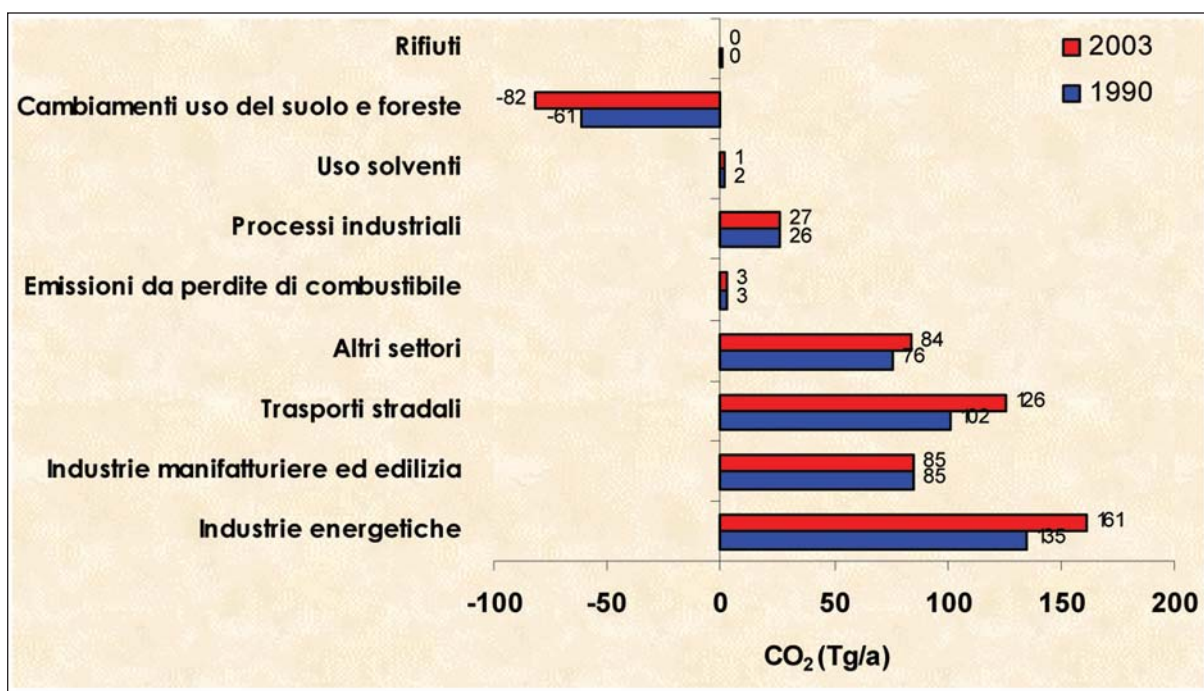


Fig. 5: Distribuzione delle emissioni di CO₂ in Italia nel 1990 e nel 2003 suddiviso per settore classificazione IPCC. Fonte: APAT.

inquinanti atmosferici, la perdita netta di materiale detta "erosione", che si verifica soprattutto nelle zone esposte all'azione dilavante della pioggia, l'"annerimento" (Fig. 6) o sporcamento determinato dal deposito delle particelle carboniose sulla superficie del monumento e che si verifica invece nelle zone protette dalla pioggia e "lo stress fisico" (determinato da fattori climatici e microclimatici).

Il parametro che tiene conto del fenomeno erosione, definito indice di erosione (I_{erosione}), viene derivato dalla somma di tre differenti effetti: effetto del dilavamento (potere solubilizzante della pioggia), effetto dell'inquinamento (per inquinanti acidi), effetto costa (per aerosol marino).

In particolare, la perdita di materiale di un'opera d'arte ($\mu\text{m}/\text{anno}$), nell'unità di tempo, si può quantificare attraverso l'utilizzo della formula di Lipfert³, che ha permesso una valutazione dell'influenza dei singoli fattori sull'effetto della perdita di materiale calcareo [10], [11]; tra questi quelli maggiormente incidenti sono la pioggia, le componenti acide in essa disciolte e la deposizione di zolfo.

Per l'annerimento, invece, non sono state ad oggi esplicitate funzioni di danno specifiche che permettano di valutare gli

effetti delle sostanze inquinanti aerodisperse e il degrado dei materiali esposti all'aperto.

L'indice di annerimento risulta genericamente funzione della concentrazione del particolato totale sospeso e della sua velocità di deposizione.

$$I_{\text{annerimento}} = f(\text{PST}, V_{\text{dep}})$$

Tale indice così formulato non tiene conto dei fattori in grado di influire sulle interazioni tra il materiale e l'ambiente circostante associati al materiale (porosità, struttura ecc.).

Per tale motivo è necessario introdurre il concetto di stress fisico che considera alcuni parametri quali: il tempo di inumidimento (valutabile come il periodo annuo in cui l'umidità relativa è superiore all'80%), la frequenza di oscillazione della temperatura ambiente attorno a 0°C e la gelività del materiale⁴.

Dagli studi effettuati sull'argomento è emerso che molte forme di deterioramento dei materiali lapidei sono causate dall'azione di agenti biodeteriogeni aerodispersi che possono giocare un ruolo sinergico sui danni tipicamente chimico-fisici. Ai tre fattori considerati va pertanto affiancato un nuovo parametro la contaminazione biologica, correlato al grado di colonizzazione, ad esempio ad opera di organismi,

EROSIONE

Erosione su pareti murarie



ANNERIMENTO

Statua Chiesa S. Antonio – Roma



*Duomo di Napoli



*Statua a Palermo



Fig. 6: Esempi di fenomeni di erosione e annerimento (*Foto di proprietà della dott.ssa M. Laurenzi Tabasso).

quali muschi, licheni e funghi, del materiale che costituisce il monumento o opera d'arte.

La raccolta dei dati sperimentali funzionali alla determinazione delle funzioni di danno relative all'annerimento, allo stress fisico e alla contaminazione biologica è stato l'obiettivo delle campagne di monitoraggio condotte da APAT e ICR presso due città italiane, Roma e Milano [12].

La sperimentazione è stata realizzata a Milano presso la Pinacoteca di Brera, in una zona centrale della città ma a traffico limitato, e a Roma presso l'Istituto Superiore di Sanità situato in una zona ad alto traffico autoveicolare. Le campagne di monitoraggio si sono basate sull'esposizione di provini di materiale lapideo di neoformazione, sui quali sono state eseguite, nell'arco di un anno, analisi di tipo chimico, fisico e biologico.

Sui provini sono state eseguite anche misure per la valutazione ottica – colorimetrica dell’andamento dello ‘sporciamento’ superficiale utilizzando una strumentazione [13] in grado di misurare automaticamente il progressivo decremento di brillantezza (misura della variazione del grado di bianco e quindi la variazione cromatica) in funzione del tempo, delle superfici di campioni esposti alle deposizioni atmosferiche.

Dai dati rilevati i campioni esposti a Milano risultano più “anneriti” di quelli esposti a Roma, in quanto hanno mostrato in un anno una diminuzione della brillantezza pari a circa il 34%, mentre quelli esposti a Roma una diminuzione della brillantezza di solo circa il 2%, tutto questo con concentrazioni medie di particolato comparabili per le due città (Figg. 7 e 8).

I dati di variazione di brillantezza registrati sono stati correlati con le concentrazioni di PM_{10} provenienti dalle centraline poste nelle adiacenze dei siti di studio.

Nonostante i dati disponibili ad oggi siano limitati ad un anno, è ragionevole, data l’elevata rappresentatività di questi ultimi, pensare di poter estendere la retta di regressione ed i risultati anche ad una situazione più avanti nel tempo. Nelle figure 9 e 10 si possono quindi osservare gli andamenti della brillantezza e della funzione cumulata

dell’inquinante PM_{10} (si considera il PM_{10} e non il PST perché contiene una maggiore percentuale di prodotti carboniosi).

La funzione cumulata viene calcolata al fine di considerare l’accumulo del particolato in maniera progressiva tenendo memoria delle sue evoluzioni precedenti. Questo è possibile poiché l’aumento del contenuto di PM_{10} sulla superficie marmorea non subisce diminuzione nel tempo essendo l’ambiente preso in considerazione tale da isolare eventi climatici alteranti come pioggia o vento.

I dati ottenuti e in particolare le differenti diminuzioni di brillantezza registrate sono spiegabili con le diverse condizioni climatiche delle due città e con la diversa composizione chimica del particolato depositato, che a Roma è caratterizzato da componenti di colorazione più chiara a causa della presenza di composti derivanti dall’aerosol marino e di polvere terrosa di natura silicea, mentre a Milano è evidentemente più ricco di componente carboniosa, dovuta alla presenza di idrocarburi incombusti.

Dette risultanze dimostrano quindi che il termine annerimento è piuttosto riduttivo e che invece per un inquadramento corretto della problematica sia più giusto parlare di sporciamento, cioè di quell’insieme di fenomeni di variazioni cromatiche delle superfi-

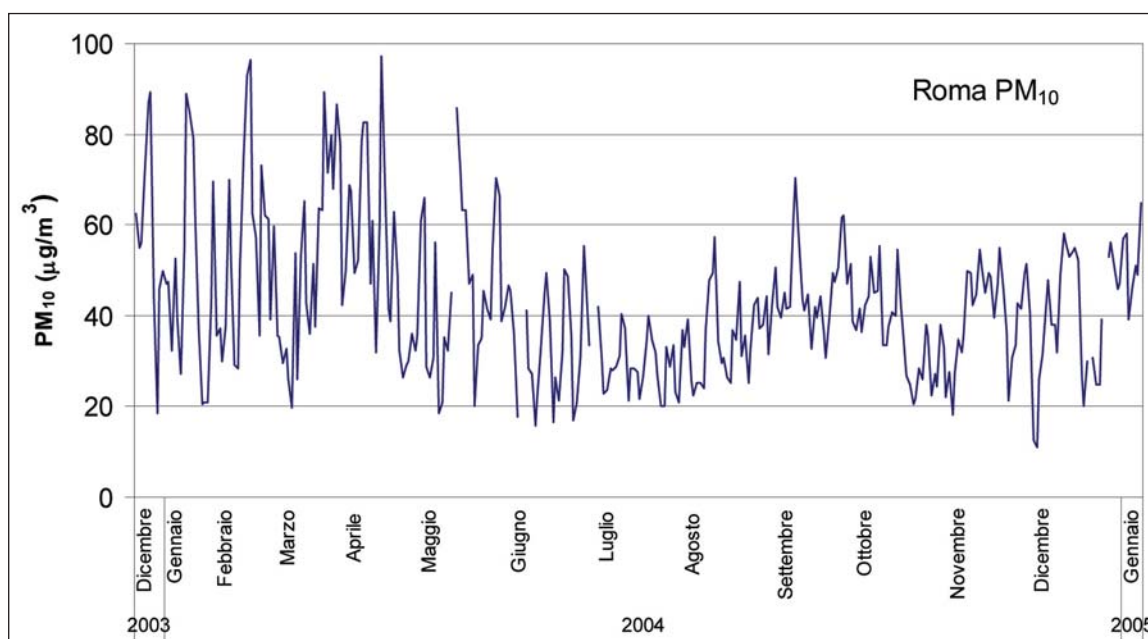


Fig. 7: Andamento giornaliero del PM_{10} a Roma da dicembre 2003 a gennaio 2005. Fonte: APAT.

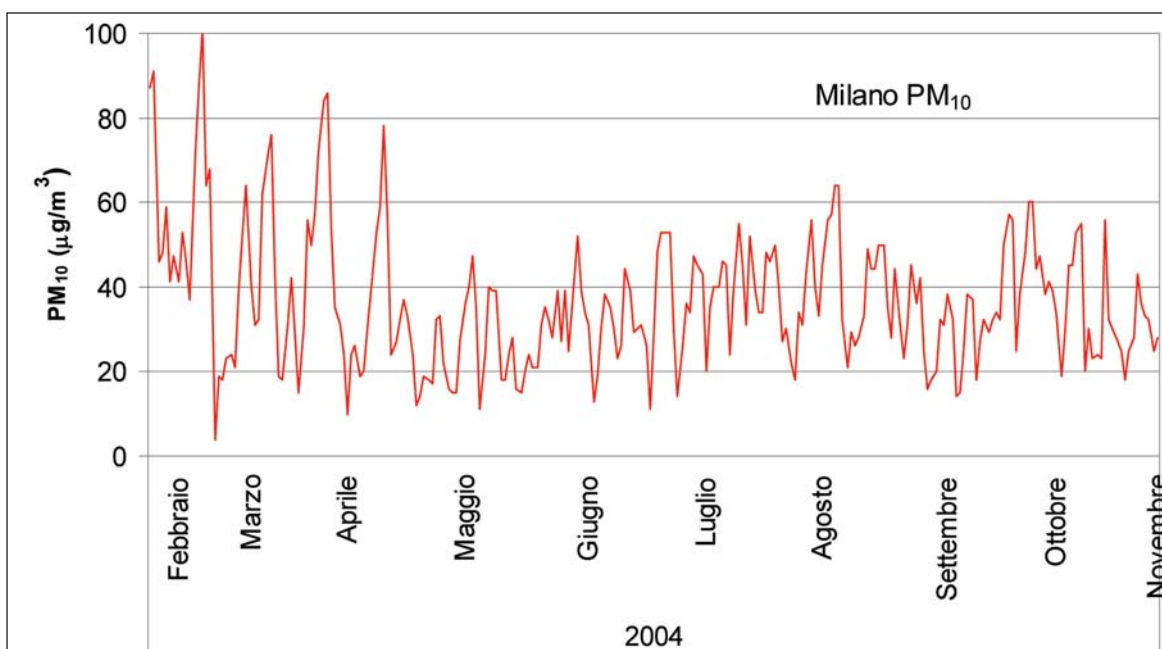


Fig. 8: Andamento giornaliero del PM₁₀ a Milano da febbraio a novembre 2004. Fonte: APAT.

ci dei manufatti delle quali l'annerimento è un caso particolare, ma non il solo.

Lo sporco è quindi causato dalla deposizione di particelle di origine naturale o antropogenica. Tali particelle provocano effetti ottici differenti in funzione delle loro dimensioni, natura e forma. Come risultato di tali deposizioni i manufatti gradualmente si possono scurire, i loro colori si possono

affievolire o alterare. Nei beni architettonici e monumentali e nelle sculture, sia la leggibilità complessiva che le forme ne vengono alterate, compromettendo l'estetica dell'opera.

Lo sporco dipende non solo dalla concentrazione delle particelle nell'atmosfera e dalla loro composizione, ma anche dalla velocità di deposizione delle stesse sulle superfici; quest'ultima dipende, a sua volta,

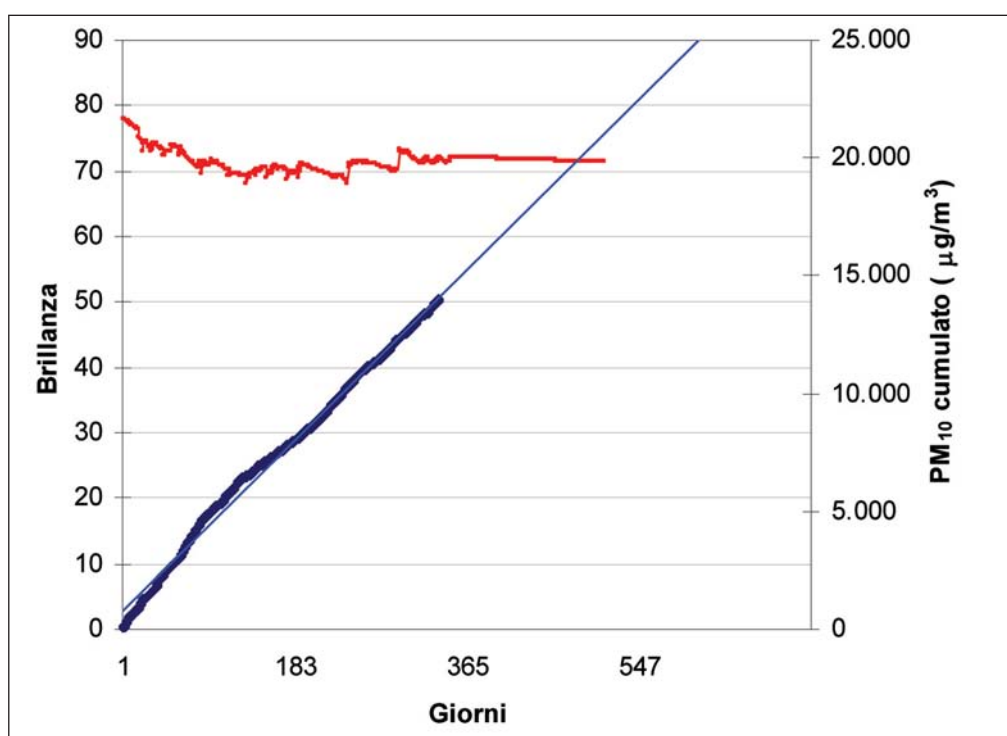


Fig. 9 - Confronto brillanza e funzione cumulata del PM₁₀ - Roma periodo dicembre 2003-febbraio 2005. Fonte: APAT, ICR.

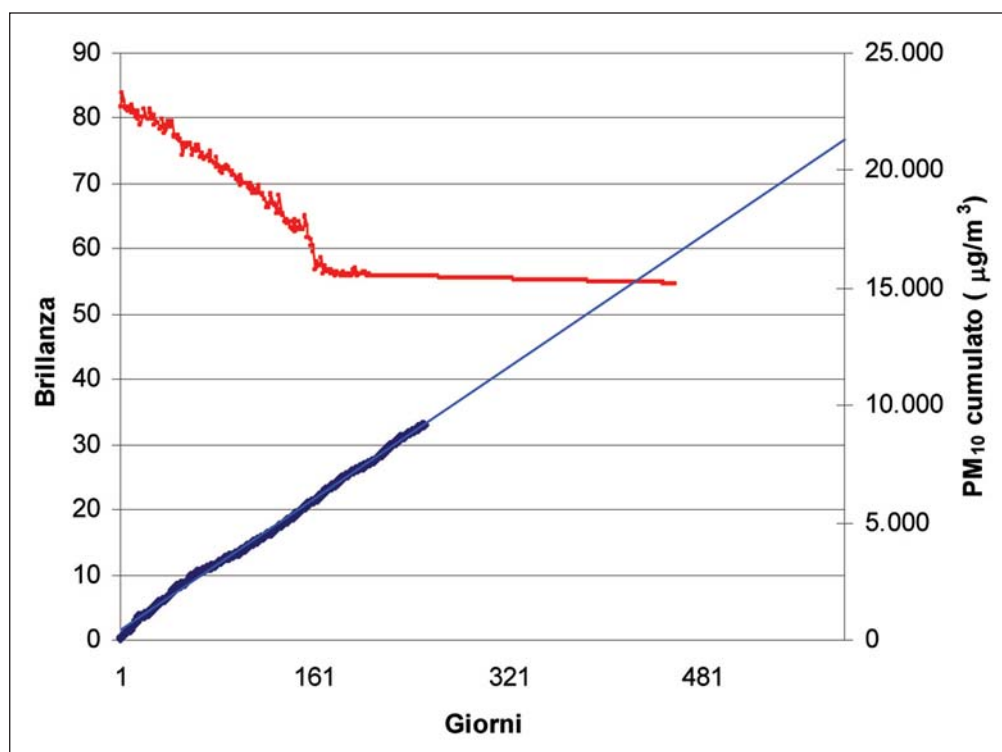


Fig. 10: Confronto brillanza e funzione cumulata del PM₁₀ – Milano periodo febbraio 2004 – febbraio 2005. Fonte: APAT, ICR.

dalle caratteristiche chimico-fisiche e geometriche delle particelle, dai parametri microclimatici dell'ambiente in cui si trova il manufatto e dalle proprietà intrinseche del materiale di cui quest'ultimo è costituito.

In particolare, lo sporco dipende anche dal contenuto di acqua negli strati superficiali del materiale; infatti, esso favorisce l'aumento dell'efficienza di cattura da parte di una superficie bagnata, causando un maggiore deposito degli inquinanti presenti in atmosfera.

Le condizioni di umidità relativa e la conseguente disponibilità di acqua sul materiale lapideo condiziona fortemente non solo i meccanismi di deposizione ma anche la possibilità che i contaminanti biologici possano dare origine a colonizzazioni microbiche attraverso la formazione di *biofilm*. Tale fenomeno incrementa ulteriormente la capacità di cattura delle superfici e contribuisce ai fenomeni di degrado chimici e fisici oltre ad alterare la morfologia dei manufatti artistici.

A questo proposito, lo studio effettuato ha messo in evidenza che dal punto di vista climatico e microclimatico, il sito di Roma si è rivelato più caldo e più umido di quello di Milano ed è caratterizzato da eventi di con-

densa superficiale nelle porosità, più numerosi per cui risulterebbe maggiormente a rischio sporco.

A valle di quanto esposto appare evidente che per determinare correttamente l'influenza del particolato sullo stato di conservazione di un monumento, al fine di avere elementi utili per programmare idonei interventi conservativi e stabilire i tempi della manutenzione, è necessario conoscere oltre ai dati di concentrazione dell'inquinante, rilevati il più possibile nelle vicinanze del bene, anche la sua composizione chimica. La comprensione dei meccanismi di deposizione del particolato si basa inoltre sulla conoscenza dei parametri termoigrometrici, che permette di valutare quello che viene definito l'indice di stress fisico, un indicatore che tiene conto dell'interazione termica ed igrometrica tra ambiente e materiale (interazione che comprende fenomeni come la dilatazione termica, la gelività, il tempo di bagnamento, ecc.).

Le indagini biologiche e chimiche eseguite sui provini hanno comunque evidenziato la necessità di confrontare l'andamento del degrado subito dal materiale neoesposto con il danno che caratterizza il materiale in opera.

In base a queste osservazioni è emersa l'esigenza di proseguire lo studio, utilizzando lo stesso percorso analitico seguito nella presente sperimentazione, per studiare il degrado direttamente su monumenti che sono stati precedentemente sottoposti ad interventi di restauro e di cui si conoscono lo stato di conservazione e le forme di degrado. A questo proposito, APAT ha intenzione di coinvolgere tutto il sistema agenziale per potere estendere lo studio a quante più città possibili, questo perché il territorio italiano gode di una spiccata eterogeneità di zone climatiche e microclimatiche nonché di distribuzione delle fonti di emissione degli inquinanti con conseguenti variazioni dei parametri critici che rendono differente la vulnerabilità di un stesso materiale anche in zone relativamente vicine.

La considerazione del patrimonio artistico come elemento recettore sensibile è quindi un problema estremamente complesso a causa della molteplicità dei fenomeni coinvolti e per la grande varietà di materiali costitutivi dei beni, essendo ogni materiale dotato di caratteristiche morfologiche, chimiche e fisiche totalmente dissimili, tanto da rendere ogni bene storico artistico un individuo singolo caratterizzato da una specifica vulnerabilità a lui soltanto attribuibile.

Bibliografia

- [1] MINISTERO DEI BENI CULTURALI ED AMBIENTALI - ISTITUTO CENTRALE PER IL RESTAURO *Carta del Rischio del Patrimonio Culturale* vol. 1 a cura di ATI - MARIS Bonifica, Roma 1996.
- [2] CAMUFFO D., *Inquinamento, piogge acide e degrado dei monumenti*, Rassegna dei Beni Culturali, 1989.
- [3] BERNARDI A., *Meccanismi di formazione delle croste sui monumenti*, Rassegna dei Beni Culturali, 1989.
- [4] LO RUSSO S., TRAILI M., BIONDI F., BUONOCORE F., PRESTILEO F., *Controllo di manufatti lapidei esposti all'inquinamento atmosferico con tecniche ottiche e non distruttive*, Il giornale delle prove non distruttive, monitoraggio e diagnostica, 1997.
- [5] NUGARI M.P., 2003, *The aerobiology applied to the conservation of works of art*. Coalition. Newsletter n. 6, Special Issue: Coalition Advanced Course "Biological Problems in Cultural heritage", 8-9 November 2002, Florence, Italy: 8-10.
- [6] CAMUFFO D., *Microclimate for cultural heritage* *Developments in Atmospheric Science* 23, 1998 Elsevier.
- [7] SABBIONI C., GHEDINI N., MACCHIAROLA M., *Deposizione atmosferica di zolfo e carbonio sui monumenti in pietra di Roma*; in Atti della 5ª Giornata di Scienza della Terra e dell'Archeometria, Patron Editore, Bologna, pp.: 141-144, Bari, 19-20 febbraio 1998.
- [8] DE SANTIS F., ALLEGRI I., *Heterogeneous reaction of SO₂ and NO₂ on carbonaceous surfaces*, Atmospheric Environment 26A, No 16, pp.: 3061-3064, 1992.
- [9] SOZZI R., *Gli inquinanti e le emissioni*, in La micrometeorologia e la dispersione degli inquinanti in aria APAT, CTN-ACE 2003.
- [10] LIPPERT F. W., *Atmospheric damage to calcareous stones: comparison and reconciliation of recent experimental findings* - Atmospheric Environment, vol. 23, no. 2, 414-429, 1989.
- [11] *Manual on methodologies for Mapping Critical Loads/levels, Final Draft* - Budapest, 1996.
- [12] BONANNI P., DAFFINÀ R., GADDI R., GIOVAGNOLI A., SILLI V., *L'Impatto dell'inquinamento atmosferico sui beni di interesse storico-artistico*, Rapporto APAT 2006.
- [13] MARABELLI M., GIOVAGNOLI A., IVONE A., *The risk map and the blackening index: a new recording apparatus*, 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice 19-24 June 2000.

Note

¹ Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Scienze dell’Atmosfera e del Clima (CNR ISAC) di Bologna e Padova; Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto sull’Inquinamento Atmosferico (CNR IIA) di Montelibretti – Roma; Ente per le Nuove Tecnologie, l’energia e l’ambiente (ENEA); Ministero per i beni artistici e culturali (MBAC). Esperti esterni: M. Laurenzi Tabasso, M. Marabelli.

² Il particolato è costituito da un insieme eterogeneo di particelle solide e liquide che restano in sospensione nell’aria a causa delle ridotte dimensioni, che variano da pochi nanometri a qualche micrometro. Del particolato atmosferico si distinguono diverse frazioni, in particolare il PM₁₀ caratterizzato da particelle di diametro aerodinamico inferiore a 10 μm ; il PM_{2,5} con particelle di diametro aerodinamico inferiore a 2,5 μm ; il PM₁ costituito da particelle di diametro aerodinamico inferiore a 1 μm .

$$^3 P_m = 18,8 + 0,016H^+R + 0,18[V_{dS}(SO_2) + V_{dN}(HNO_3)]$$

dove i parametri hanno i seguenti significati:

P_m = perdita di materiale nell’unità di tempo ($\mu\text{m}/\text{anno}$)

R = quantità di pioggia ($\mu\text{m}/\text{anno}$)

H^+ = disponibilità di ioni idrogeno (nmol/cm^3)

V_{dS} = velocità di deposizione di biossido di zolfo (cm/s)

(SO_2) = concentrazione del biossido di zolfo in aria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

V_{dN} = velocità di deposizione di acido nitrico (cm/s)

(HNO_3) = concentrazione di acido nitrico in aria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

⁴ Tendenza delle rocce a disgregarsi a causa del gelo. L’acqua, penetrata in fori o fessure, gelando aumenta di volume provocando nel tempo la disgregazione del materiale.